



№1-2021

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Перспективы применения робототехнических комплексов
- Системы управления и моделирования
- Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура
- Связь, навигация и наведение
- Техническое зрение

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс 41970

№ 1 (218). 2021 г.

Тематический выпуск

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Каляев И.А. (гл. редактор); Курейчик В.В. (зам. гл. редактора); Курейчик В.М. (зам. гл. редактора); Бородинский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.; Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.; Хашемипур М.; Чашлыгин Ю.А.; Чередниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Косенко Е.Ю.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 29.06.2021. Формат $70 \times 108 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 24,7. Уч.-изд. л. – 19,7.

Заказ № 8070. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. 8(863)2478051.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 247-80-51.

Адрес редакции: 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, ЮФУ, тел. +7 (928) 909-57-82, e-mail: iborodyanskiy@sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А.В. Вазаев, К.Ю. Машков, В.П. Носков, И.В. Рубцов КЛАССИФИКАЦИЯ ЗОНЫ МАНЕВРИРОВАНИЯ РТК НА ОСНОВЕ ТАКТИЛЬНОЙ И ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	6
Г.П. Виноградов, А.С. Емцев, И.С. Федотов БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ В ЗАЩИЩАЕМЫХ ЗОНАХ	19
А.М. Маевский, Р.О. Морозов, В.А. Рыжов, А.Е. Горель РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ АНПА В НЕИЗВЕСТНОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ.....	30
А.И. Наговицин, Б.Б. Молоткова ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НАЗЕМНЫХ РТК ВН СРЕДСТВАМ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОРАЖЕНИЯ (ПОДАВЛЕНИЯ) ПРОТИВНИКА.....	47
Н.А. Соколов, А.В. Рычков ПОВЫШЕНИЕ ПОИСКОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	59
В.Д. Сытенький, И.И. Маркович, Е.Е. Завтур ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАССИВНЫХ РЛС АМПЛИТУДНЫМ МЕТОДОМ	72
В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, А.В. Зуев, А.С. Губанков, Д.Д. Минаев ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	81
В.С. Быкова, А.И. Машошин, И.В. Пашкевич АЛГОРИТМ МАНЕВРИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОВОДКЕ СУДНА ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН	93
В.В. Косьянчук, В.В. Гласов, Е.Ю. Зыбин, Л. Тань ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	101
М.И. Мокрова ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ ПОЖАРНОЙ ОБСТАНОВКИ НА КАЧЕСТВО НАБЛЮДЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЁТА БЛА	112
И.О. Шальнев ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ МАШИНЫ.....	125

РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.В. Кофнов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов, П.М. Трефилов СПЕЦИАЛЬНОЕ МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ПОВЕДЕНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ	138
А.А. Петунин, Е.Г. Полищук, С.С. Уколов НОВЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ ОБХОДА КОНЕЧНОГО МНОЖЕСТВА НЕПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ КОНТУРОВ НА ПЛОСКОСТИ	149
А.В. Логунов, А.Л. Береснев ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПОДВЕСКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	165

РАЗДЕЛ III. СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, ПРИВОДНАЯ И ДАТЧИКОВАЯ АППАРАТУРА

В.А. Костюков, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, Е.Ю. Косенко ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПОДЗАРЯДКИ ГРУППЫ БЛА.....	175
Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА	189

РАЗДЕЛ IV. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ

В.А. Костюков, Е.Ю. Косенко, М.В. Мамченко, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов МЕТОД ОЦЕНКИ КООРДИНАТ БЛА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЛОКАЛЬНЫМ РАССТОЯНИЯМ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ГРУППЫ	204
Ю.Н. Кочеров, Д.В. Самойленко РАЗРАБОТКА НАДЕЖНОГО МЕТОДА СВЯЗИ РТК НА БАЗЕ ГРУППОВОГО МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ, ОСНОВАННОГО НА СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ.....	218
С.М. Соколов, Н.Д. Беклемишев, А.А. Богуславский ОРГАНИЗАЦИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОРИЕНТИРОВ	235
В.А. Бондаренко, П.А. Гессен, В.А. Павлова, М.В. Созинова, В.А. Тупиков АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ОБУЧЕНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ.....	247

РАЗДЕЛ V. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

Н.А. Бочаров, А.Г. Зуев, О.А. Славин ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МИКРОПРОЦЕССОРА ЭЛЬБРУС-8СВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ	259
А.М. Федунин, Д.М. Дрягин ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ БЛА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ	271

CONTENT

SECTION I. PROSPECTS FOR THE USE OF ROBOTIC SYSTEMS

A.V. Vazaev, K.Yu. Mashkov, V.P. Noskov, I.V. Rubtsov CONTACT AND VISUAL BASED ENVIRONMENT CLASSIFICATION FOR MOBILE ROBOTS	9
G.P. Vinogradov, A.S. Emtsev, I.S. Fedotov WIRELESS SENSOR NETWORKS IN PROTECTED AREAS	19
A.M. Maevskiy, R.O. Morozov, V.A. Ryzhov, A.E. Gorelyi DEVELOPMENT OF A HYBRID METHOD FOR PLANNING THE MOVEMENT OF A GROUP OF MARINE ROBOTIC COMPLEXES IN AN A PRIORI UNKNOWN ENVIRONMENT WITH OBSTACLES	31
A.I. Nagovitsin, B.B. Molotkova OPERATIONAL AND TACTICAL REQUIREMENTS FOR THE SYSTEM OF COUNTERING GROUND-BASED RTK VN MEANS OF ELECTRONIC DESTRUCTION (SUPPRESSION) OF THE ENEMY	48
N.A. Sokolov, A.V. Rychkov INCREASING THE SEARCH CAPABILITIES OF AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES THROUGH THE USE OF MULTI-CHANNEL MAGNETOMETRIC SYSTEMS	60
V.D. Sytenky, I.I. Markovich, E.E. Zavtur DETERMINATION OF THE COORDINATES OF RADIATION SOURCES IN PASSIVE RADARS BY THE AMPLITUDE METHOD	73
V.F. Filaretov, D.A. Yukhimets, A.V. Zuev, A.S. Gubankov, D.D. Minaev DIGITAL PLATFORM FOR THE CREATION OF DISTRIBUTED CONTROL AND NAVIGATION SYSTEMS FOR UNDERWATER VEHICLES	82
V.S. Bykova, A.I. Mashoshin, I.V. Pashkevich ALGORITHM FOR MANEUVERING AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WHEN NAVIGATING A SHIP THROUGH A MINED AREA	94
V.V. Kosyanchuk, V.V. Glasov, E.Yu. Zybin, L. Tan AIRCRAFT FLIGHT PATH PREDICTION UNDER COMPLETE PARAMETRIC UNCERTAINTY	102
M.I. Mokrova INVESTIGATION OF THE IMPACT OF COMPLEX FIRE CONDITIONS ON THE QUALITY OF SURVEILLANCE AND FLIGHT SAFETY OF UAVS	113
I.O. Shalnev COMMUNICATION AND DATA TRANSFER IN DISTRIBUTED ROBOTICS SYSTEMS	125

SECTION II. CONTROL AND SIMULATION SYSTEMS

O.V. Kofnov, S.A. Potriasaev, B.V. Sokolov, P.M. Trefilov SPECIAL MODELS, ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR PROACTIVE GROUP BEHAVIOR CONTROL OF ROBOTS	138
A.A. Petunin, E.G. Polishchuk, S.S. Ukolov A NEW ALGORITHM FOR CONSTRUCTING THE SHORTEST TOUR OF A FINITE SET OF DISJOINT CONTOURS ON A PLANE	150
A.V. Logunov, A.L. Beresnev CAPABILITIES OF VIBROACOUSTIC EXAMINATION AND DIAGNOSTICS OF VEHICLE SUSPENSION	166

**SECTION III. POWER ENGINEERING SYSTEMS,
DRIVE AND SENSOR EQUIPMENT**

V.A. Kostjukov, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov, E.Yu. Kosenko THE METHOD OF ESTIMATION POSITIONS OF THE UAVS BY MEASURING THE DISTANCES BETWEEN ELEMENTS OF THE GROUP	176
N.K. Kiselev, L.A. Martynova, I.V. Pashkevich ORGANIZATION OF THE ELECTRIC NETWORK OF THE HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE	190

SECTION IV. COMMUNICATION, NAVIGATION, AND HOVER

V.A. Kostjukov, E.Yu. Kosenko, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov, THE METHOD OF ESTIMATION POSITIONS OF THE UAVS BY MEASURING THE DISTANCES BETWEEN ELEMENTS OF THE GROUP	205
Y.N. Kocherov, D.V. Samoylenko DEVELOPMENT OF A RELIABLE RTC COMMUNICATION METHOD BASED ON A GROUP DATA SEPARATION METHOD BASED ON A RESIDUAL CLASS SYSTEM	218
S.M. Sokolov, N.D. Beklemishev, A.A. Boguslavsky ORGANIZATION OF GOAL-DIRECTED MOVEMENTS OF VEHICLES USING VISUAL LANDMARKS	236
V.A. Bondarenko, P.A. Gessen, V.A. Pavlova, M.V. Sozinova, V.A. Tupikov OBJECT DETECTION ALGORITHM FOR OPTOELECTRONIC SYSTEMS WITH ONLINE LEARNING	248

SECTION V. TECHNICAL VISION

N.A. Bocharov, A.G. Zuev, O.A. Slavin PERFORMANCE OF THE ELBRUS-8SV MICROPROCESSOR FOR TECHNICAL VISION TASKS UNDER POWER CONSTRAINTS	259
A.M. Fedulin, D.M. Driagin PROSPECTS OF MALE-CLASS UAVS USING FOR THE HUGE TERRITORIES AERIAL SURVEY	272

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-6-19

А.В. Вазаев, К.Ю. Машков, В.П. Носков, И.В. Рубцов

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗОНЫ МАНЕВРИРОВАНИЯ РТК НА ОСНОВЕ ТАКТИЛЬНОЙ И ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для повышения возможностей и расширения области применения робототехнических комплексов специального и военного назначения предлагается переходить сначала от принимаемых в настоящее время на вооружение систем дистанционного управления к полуавтономным системам, осуществляющим контроль за действиями оператора и выполняющим часть его функций. А затем – к автономным системам управления, способным функционировать в режиме “молчания”, в экранированных зонах и за пределами дальности средств радиосвязи. Такая интеллектуализация бортовых систем управления позволит исключить принципиальные ограничения и недостатки, обусловленные каналом связи, и обеспечивает реализацию группового управления. Показано, что основой повышения автономности робототехнических комплексов через интеллектуализацию бортовых систем управления, как при управлении движением, так и при управлении навесным оборудованием, является решение бортовыми средствами задач формирования модели внешней среды и определения координат объекта управления. Наличие модели внешней среды и текущих координат объекта управления позволяет автоматизировать планирование и обработку траектории движения, что и обеспечивает автономное функционирование робототехнических комплексов. Рассмотрена сложная проблема классификации зоны маневрирования по критериям геометрической и опорной проходимости с учетом характеристик движителя, геометрии рельефа и опорных свойств грунта. Описаны существующие методы и алгоритмы, а также приведены результаты экспериментальных исследований по решению следующих основных задач данной проблемы: – классификации зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости по данным бортовой системы технического зрения на основе 3D-лазерного сенсора; – распознавания типов грунтов по данным комплексированной системы технического зрения, состоящей из взаимно-юстированных 3D-лазерного сенсора, цветной видеокамеры и тепловизора, имеющих общую зону обзора; – использования аппарата нейронных сетей для повышения достоверности распознавания типов грунтов; – определения опорных характеристик грунта по измерениям реакций движителя в процессе движения. Сформулированы перспективные направления дальнейших исследований в части комплексирования тактильной и зрительной информации для повышения достоверности классификации участков зоны маневрирования по комплексному критерию геометрической и опорной проходимости.

Движитель; рельеф; грунт; геометрическая и опорная проходимость; модель внешней среды; система технического зрения.

A.V. Vazaev, K.Yu. Mashkov, V.P. Noskov, I.V. Rubtsov

CONTACT AND VISUAL BASED ENVIRONMENT CLASSIFICATION FOR MOBILE ROBOTS

To increase the capabilities and expand possible applications of robotic systems for special purposes, switching from the currently being adopted remote control systems to semi-autonomous systems that monitor operator actions and perform part of his functions is proposed. Moving to autonomous control systems capable of functioning in the "silent" mode, in shielded areas and

beyond the range of radio communications is proposed as a next step. Such intellectualization of on-board control systems will allow to eliminate fundamental limitations and disadvantages caused by the communication channel and ensures the implementation of robot group control. It is shown that the basis for robot autonomy increasing of on-board control systems, both for movement and tool control, is onboard environment model generation and determining the coordinates of the control object. External environment model and current coordinates makes it possible to automate the trajectory planning and movement, which ensures the autonomous functioning of robotic systems. The complex problem of environment segmentation according to geometric and ground passability is considered, taking into account the characteristics of the chassis, the geometry of the relief and the supporting properties of the ground. The existing methods are described and the results of experimental studies are given to solve the following main tasks: – classification of the operation zone according to geometric passability based data from the onboard technical vision system; – ground types recognition according to the integrated technical vision system; – using the apparatus of neural networks to improve the reliability of ground types recognition; – determination of ground reference characteristics by measuring the reactions of the chassis during movement. The promising directions for further research in integrating tactile and visual information to improve the reliability of the classification of operation zone according to the complex criterion of geometric and support passability are formulated.

Chassis; relief; ground; geometric and support passability; external environment model; technical vision system.

Введение. Как показывает анализ путей развития робототехнических комплексов (РТК) специального и военного назначения, основным перспективным направлением дальнейшего их совершенствования является повышение автономности за счет интеллектуализации бортовых систем управления, что позволит исключить недостатки и ограничения, присущие принимаемым на вооружение в настоящее время дистанционно-управляемым РТК. Принципиальными недостатками дистанционно-управляемых РТК, существенно ограничивающих их область применения, являются:

- ◆ ограниченный зоной уверенного радиобмена радиус действия;
- ◆ невозможность использования в экранированных зонах, которыми изобилует индустриально-городская среда, в том числе и здания;
- ◆ повышенная уязвимость для средств радиоэлектронного и огневого противодействия противника вследствие постоянно работающего канала связи;
- ◆ человеческий фактор (утомляемость и высокая вероятность ошибочных действий оператора, а также низкое соотношение числа операторов к числу роботизированных средств, вследствие сложности объекта управления).

Как показано в [1], повышение автономности целесообразно проводить в последовательном переходе сначала от существующих в настоящее время простейших систем дистанционного управления к интеллектуальным системам дистанционного управления, обеспечивающим повышенную информативную осведомленность оператора, контролирующим его действия и выполняющим часть его функций. А затем – к интеллектуальным системам автономного управления, обеспечивающим автономное функционирование в режиме “молчания”, в экранированных зонах и за пределами дальности средств радиосвязи. Создание интеллектуальных систем дистанционного и автономного управления, в свою очередь, позволит перейти к решению задач группового управления уже на практическом уровне.

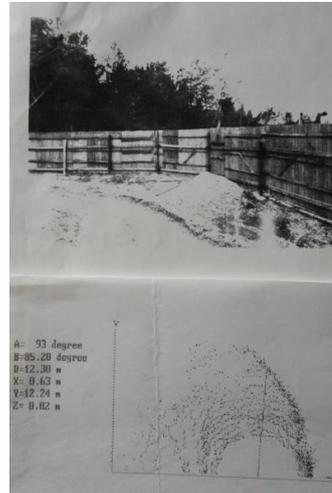
Основой повышения автономности РТК через интеллектуализацию бортовых систем управления, как при управлении движением [2–7], так и при управлении навесным оборудованием [8], является решение бортовыми средствами задач формирования модели внешней среды и определения координат объекта управления. Наличие модели внешней среды и текущих координат объекта управления позволяет автоматизировать планирование и обработку траектории движения, что и обеспечивает автономное функционирование РТК.

Для обеспечения целенаправленного безопасного движения необходимо учитывать геометрию рельефа и опорные характеристики грунта [9, 10]. При этом, чем полнее и точнее сформированная модель описывает данные параметры и характеристики, тем меньше требуется участия человека-оператора в процессе управления и тем большей автономностью обладает РТК. Рассмотрим с этой точки зрения методы формирования модели внешней среды по данным бортовых средств и перспективы их дальнейшего развития.

Классификация зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости. Для классификации зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости необходимо сначала построить ее геометрическую модель. Впервые геометрическая модель внешней среды по данным бортовой системы технического зрения (СТЗ) была получена в СССР в 80-х годах прошлого столетия, когда был создан первый 3D-лазерный сенсор [11] (см. рис. 1,а), который позволял в реальном времени с достаточной точностью формировать трехмерное облако точек окружающего пространства (см. рис. 2,б).



а – роботизированная БМП с лазерной СТЗ



б – фото и геометрическая модель внешней среды

Рис. 1. Формирование геометрической модели бортовой СТЗ

При наличии геометрической модели в виде трехмерного облака точек $\{(x_i, y_i, z_i)\}$ ($i=1,2,\dots,n$), сформированного в подвижной системе координат, связанной с корпусом шасси и приведенной к местной вертикали, классификация зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости может быть эффективно выполнена с использованием функции геометрической проходимости [3]. Функция геометрической проходимости $f(\mathbf{l})$ (рис. 2) содержит информацию о предельно-допустимых наклонах корпуса (γ_m) по углам крена и дифферента и предельную высоту преодолеваемой ступеньки (h_m) для данного объекта управления.

Аргументом функции геометрической проходимости является расстояние $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ между проверяемой парой точек (x_i, y_i, z_i) и (x_j, y_j, z_j) в горизонтальной плоскости, а значением – предельно допустимый перепад высот опорной поверхности на этом расстоянии. Функция геометрической проходимости определена на интервале $0 < l < L$ (L – максимальный размер шасси в горизонтальной плоскости). Классификация в рассматриваемом случае сводится к вычис-

лению модуля разности высот $\Delta z_{ij} = |z_i - z_j|$ проверяемой пары точек и сравнения его со значением функции проходимости $f(l_{ij})$ (если $\Delta z_{ij} > f(l_{ij})$, то соответствующий участок зоны маневрирования является препятствием). При $l_{ij} = 0$ проверяются вертикальные ступеньки, при $0 < l_{ij} < L$ – наклоны рельефа. Результат такой классификации приведен на рис. 3 (зеленые участки – разрешены для движения, красные – препятствия, серые – зона неизвестности).

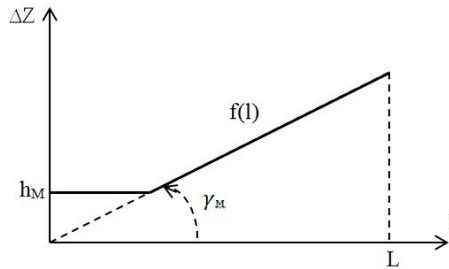
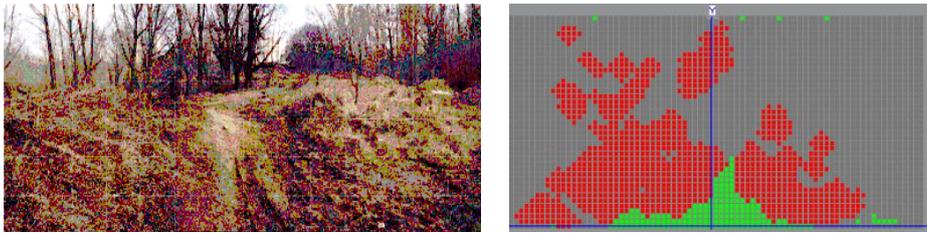


Рис. 2. Функция геометрической проходимости



а – фотопанорама внешней среды б – формальная модель внешней среды

Рис. 3. Результат классификации по критерию геометрической проходимости

Если объект управления имеет несколько скоростей движения, то для классификации рельефа необходимо использовать систему функций геометрической проходимости (рис. 4).

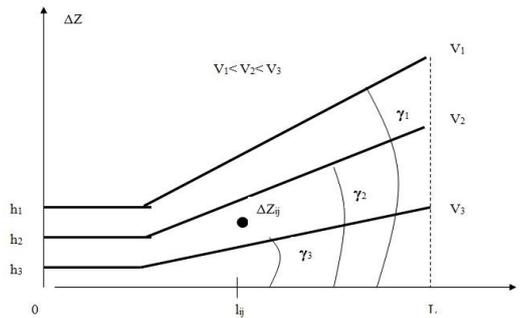


Рис. 4. Система функций геометрической проходимости

В этом случае участки формальной модели будут “раскрашены” разрешенными скоростями движения. Например (см. рис. 4), если для проверяемой пары точек (x_i, y_i, z_i) и (x_j, y_j, z_j) , находящихся друг от друга в горизонтальной проекции на расстоянии l_{ij} , перепад высот Δz_{ij} больше $f_3(l_{ij})$, но меньше $f_2(l_{ij})$, то соответствующий участок рельефа запрещен для движения со скоростью V_3 ($V_3 > V_2 > V_1$).

Метод классификации внешней среды с использованием функции геометрической проходимости успешно проверен в реальных условиях и реализован в программно-аппаратных средствах ряда действующих экспериментальных и макетных образцов РТК, созданных при выполнении НИОКР.

Классификация зоны маневрирования только по критерию геометрической проходимости корректна для относительно твердых грунтов, в общем же случае необходимо учитывать и несущие характеристики грунта.

Распознавание типов грунтов. Существенным приближением к решению задачи классификации зоны маневрирования по критерию опорной проходимости является решение задачи распознавания типов грунтов (песок, гравий, глина, асфальт, растительность и др.). В [5–7] предложен метод дистанционного распознавания типов грунтов по данным бортовой комплексированной СТЗ, состоящей из взаимно-юстированных 3D-лазерного сенсора, цветной видеокамеры и тепловизора, имеющих общую зону обзора (рис. 5).



Рис. 5. Комплексированная система технического зрения

Данные юстировки позволяют совмещать в единой системе координат дальнометрические, видео- и тепловизионные изображения, в результате чего получается геометрия рельефа опорной поверхности в виде облака точек, с распределением на нем цветового и температурного полей:

$$\mathbf{T} = [T_i] = [< \alpha_i, \beta_i, d_i, I_i, R_i, G_i, B_i, Y_i >],$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где n – число точек;

α_i, β_i – углы, соответственно, горизонтальной и вертикальной развёртки 3D-лазерного сенсора;

d_i – измеренная дальность;

I_i – измеренная интенсивность отражённого зондирующего сигнала;

R_i, G_i, B_i – три компоненты цвета пиксела, полученные с телевизионной камеры;

Y_i – температура пиксела, полученная с тепловизионной камеры.

Для каждой произвольной i -й точки сцены вычисляются степени достоверности (вероятности) принадлежности к каждому k -му типу поверхности ($k = 1, 2, \dots, m$):

$$P_{ik} = \frac{1}{b_{\text{цв}} + b_{\text{темп}} + b_{\text{дисп}}} (b_{\text{цв}} P_{ik}^{\text{цв}} + b_{\text{темп}} P_{ik}^{\text{темп}} + b_{\text{дисп}} P_{ik}^{\text{дисп}}),$$

где $P_{ik}^{\text{цв}}$, $P_{ik}^{\text{темп}}$, $P_{ik}^{\text{дисп}}$ – вероятность принадлежности i -й точки к k -му типу поверхности по результатам анализа, соответственно, цвета (компонент R_i, G_i, B_i), температуры (компоненты Y_i) и дисперсии высоты точек в области фиксированного радиуса вокруг i -й точки (определяется с использованием компонент α_i, β_i, d_i);

$b_{\text{цв}}$, $b_{\text{темп}}$, $b_{\text{дисп}}$ – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния данных сенсоров на итоговую вероятность.

Вероятности $P_{ik}^{дв}$, $P_{ik}^{темп}$, $P_{ik}^{дисп}$ принадлежности i -й точки к k -у типу грунта определяется по степени близости (в смысле евклидова расстояния) вектора признаков к эталонному вектору признаков для k -о типа грунта в многомерном пространстве признаков. Эталонные вектора признаков для различных типов грунтов определяются экспертом в результате проведения опытных экспериментальных исследований в реальных условиях. На рис. 6 приведен результат распознавания типов грунтов описанным выше методом в реальных условиях.

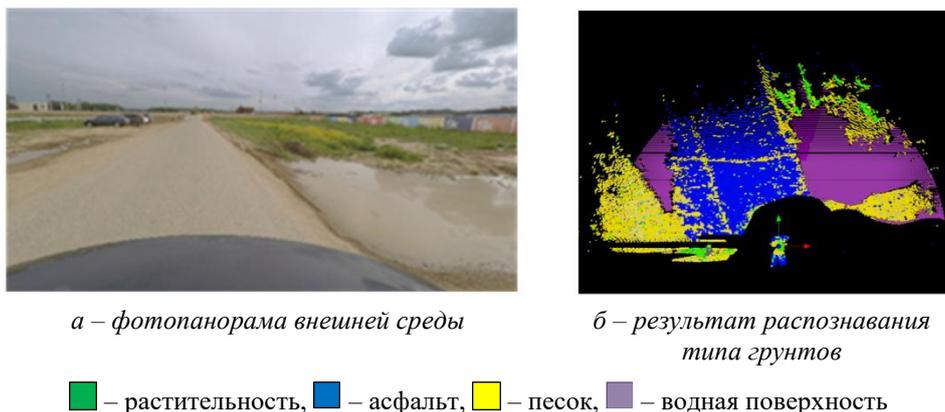


Рис. 6. Результат распознавания типов грунтов

Данный подход обеспечивает достаточно надежное распознавание типов грунтов при относительно стабильных внешних условиях (метеорологические условия, освещенность, время суток, времена года). Однако при изменении этих условий вероятность правильной классификации падает, и эталонные вектора признаков необходимо корректировать. Для автоматизации данного процесса можно использовать аппарат нейронных сетей [7]. В частности хорошие результаты были достигнуты при использовании сверточной нейронной сети CaffeNet (аналог известной AlexNet [12]), содержащей пять свёрточных и три полносвязных слоя. Обучение нейронной сети выполнялось на достаточно большой обучающей выборке изображений, полученной на большом промежутке времени в различные времена года при различных метеорологических условиях. Результаты обучения сети приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обучения в зависимости от размера слоёв сети

Число параметров сети, млн.	60,0	8,0	3,1	2,1	1,1	0,7	0,4
Время классификации, мс	42,7	10,7	7,2	6,0	4,8	4,4	3,0
Точность классификации, %	92,2	92,4	91,8	90,2	84,7	89,3	29,4
Ошибка	0,222	0,217	0,211	0,241	0,386	0,267	1,372

На рис. 7. приведены результаты работы обученной нейронной сети (значения на выходах сети) для одной из сцен при различных условиях внешней среды.



Рис. 7. Результаты классификации

Знание типа грунта позволяет определить из справочных данных ориентировочные значения опорных характеристик данного типа грунта [13, 14]. При классификации грунтов и описания их механических свойств, согласно ГОСТ 25100-2011, различают свыше 150 наименований различных характеристик, что для практического применения при анализе поведения транспортного средства в прямолинейном движении и в повороте является избыточным. Поэтому для описания процессов взаимодействия движителя с грунтом (рис. 8), используются только следующие три безразмерных обобщающих коэффициента [15]: коэффициент сопротивления движению $f = R_{X \text{ текущее}} / R_Z$, коэффициент сцепления $\phi = R_{X \text{ макс}} / R_Z$ и коэффициент сопротивления повороту $\mu = R_Y / R_Z$. Здесь R_X , R_Y , и R_Z – силы, возникающие в пятне контакта движителя с грунтом, δ – угол увода.

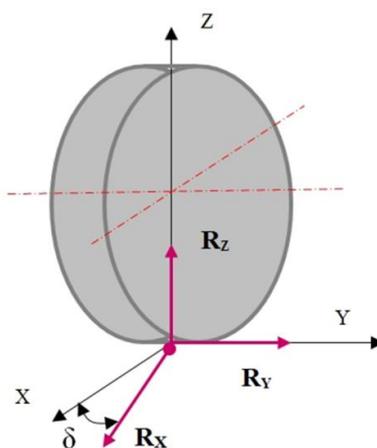


Рис. 8. Силы в пятне контакта колесного движителя с грунтом

Значения обобщённых коэффициентов для различных типов грунтов для колёсных и гусеничных движителей приводятся в справочниках [16]. Пример справочных данных для коэффициента сцепления приведен в табл. 2. Для коэффициентов сопротивления движению и повороту также имеются аналогичные таблицы.

Таблица 2

Максимальные значения коэффициента сцепления

Наименование	Трак с необрезиненной поверхностью	Трак с обрезиненной поверхностью	Шины высокой проходимости
Дорога с асфальтовым покрытием	0,35–0,45	0,7–0,8	0,65–0,85
Сухая бетонная дорога	0,25–0,35	0,71–0,8	0,7–0,8
Мокрая бетонная дорога	0,2–0,3	0,5–0,6	0,5–0,6
Сухая грунтовая дорога	0,6–0,7	0,6–0,7	0,5–0,6
Обледенелая дорога	0,15–0,2	0,12–0,14	0,12–0,14
Грунтовая дорога в период распутицы	0,2–0,5	0,2–0,4	0,2–0,3
Сухой песок	0,4–0,5	0,4–0,45	0,20 ... 0,30
Луг, поросший травой (сухой)	0,9–1,0	0,8–0,9	0,8–0,9
Снег	0,2–0,8	0,15–0,6	0,2–0,5

Табличные значения опорных характеристик грунтов являются ориентировочными и, как показала практика, не всегда совпадают с реальными в данный момент движения РКТ в данной рабочей зоне при данных условиях. Поэтому востребованы бортовые средства, позволяющие непосредственно в процессе движения уточнять текущие значения опорных характеристик грунта.

Контактные методы определения опорных характеристик грунта. Вопросам взаимодействия движителя и деформируемого опорного основания посвящено достаточно много трудов как отечественных, так и зарубежных авторов. В основном эти работы проводились для уже существующих экипажных машин [17, 18]. На настоящий момент сложилось полное понимание, что для эффективного управления даже экипажной машиной необходима автоматизация, обеспечивающая управляемое движение не только с учетом конструктивно-кинематических и силовых особенностей машины, но и с учетом взаимодействия движителя с грунтом [19]. Поэтому для обеспечения адаптивного к изменяющимся условиям внешней среды управления необходимо решать обратную задачу террамеханики – на основе измерений воздействий со стороны грунта на ходовую систему шасси определять текущие значения коэффициентов, характеризующие опорную проходимость грунта. Для этого можно использовать описывающую совместную ДИНАМИКУ корпуса и ходовой части (рис. 9) математическую модель движения шасси по деформируемому грунту [20, 21], позволяющую выявлять зависимость между реакциями, возникающими в пятне контакта, и опорными характеристиками грунта. Для снятия динамических воздействий на движитель со стороны грунта (продольная R_x , поперечная R_y и вертикальная R_z силы, крутящий момент M_k , буксование S_k) необходимо использовать силомоментные датчики (например, тензодатчики).

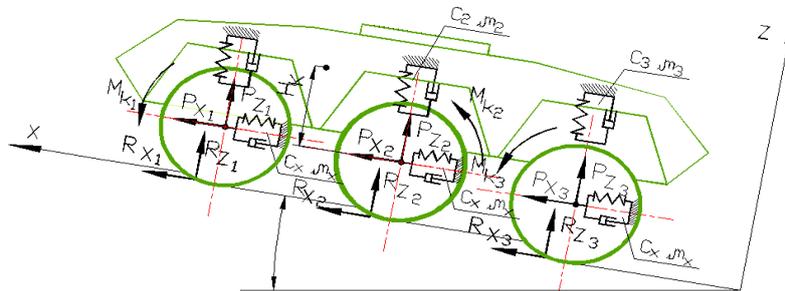


Рис. 9. Динамика прямолинейного движения РТК

Реальные опорные характеристики грунта в этом случае могут быть определены заранее экспериментальным путем по методике «типовых маршрутов» [22], которая предусматривает отработку данным шасси прямолинейного движения и поворотов на типовых для данной местности грунтах при различных климатических условиях с фиксацией экспериментальных данных и последующей обработкой. Вычисленные на основе экспериментальных данных опорные характеристики грунтов могут быть внесены в базу данных (рис. 10) и использованы при эксплуатации РТР в данном районе при различных климатических условиях.

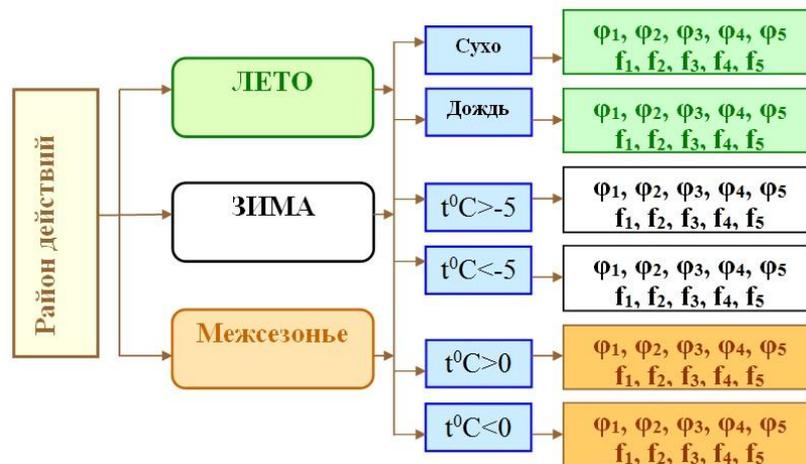


Рис. 10. Опорные характеристики 5-и типов грунтов для данного района при различных климатических условиях

Необходимо отметить, что данная методика экспериментального определения опорных характеристик грунта может быть использована и для оперативного уточнения текущих значений опорных характеристик грунта при непосредственной эксплуатации РТР.

Комплексирование тактильной и зрительной информации при классификации зоны маневрирования. Достоверность распознавания типов грунтов тем выше, чем больше датчиков и сенсоров для этого используется [5–7]. Тактильное определение опорных характеристик грунта позволяет дополнить пространство признаков, сформированное по данным комплексированной СТЗ, текущими значениями опорных характеристик грунта. Увеличение размерности пространства

признаков обеспечивает более достоверную работу классификатора в неблагоприятных условиях, когда один или несколько сенсоров формируют не качественные данные (например, – телевизионная камера при низком уровне освещения). А возможность постоянной коррекции значений характеристик опорной проходимости в процессе движения обеспечивает адаптацию системы управления к изменениям условий во внешней среде, например, к таким, как резкое изменение погоды, или – появление типов грунтов, не имеющих в базе данных. Комплексирование тактильной и зрительной информации позволяет не только существенно повысить достоверность классификации, но и – быстродействие за счет экстраполяции опорных характеристик грунта, полученных в пятне контакта движителя с грунтом, на всю модель, сформированную дистанционно по данным СТЗ [5]. Кроме того появляется возможность автоматизировать трудоемкие процессы выбора соответствующих текущим условиям внешней среды эталонных векторов признаков грунтов, обеспечивающих достоверное их распознавание в многомерном пространстве признаков [5], а также – процессы формирования обучающей выборки и обучения нейронной сети для распознавания типов грунтов по зрительной информации [7].

Дистанционное определение геометрических и опорных характеристик грунта в зоне маневрирования РТК по данным бортовой СТЗ позволяет выполнить ее классификацию по комплексному критерию геометрической и опорной проходимости. Классификацию участков зоны маневрирования по комплексному критерию можно выполнять также с использованием функции геометрической проходимости (см. рис. 2), но скорректированной в соответствии с характеристиками грунта классифицируемого участка. Коррекция функции проходимости в этом случае выполняется аналогично коррекции при изменении скорости (см. рис. 4), т.е., чем более неблагоприятны для движения опорные характеристики грунта, тем меньше допустимые наклоны корпуса (γ_m) и предельная высота преодолеваемой ступеньки (h_m).

Заключение. Результаты приведенных исследований показывают, что в настоящее время имеются все предпосылки для постановки и решения актуальной комплексной проблемы формирования модели зоны маневрирования по данным бортовых средств РТК с учетом опорно-геометрических характеристик грунта и характеристик движителя. Уровень проработки отдельных задач данной проблемы различен, в частности:

- ◆ средства классификации зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости по данным бортовой СТЗ реализованы в ряде действующих экспериментальных и макетных образцов РТК, созданных при выполнении НИОКР, и прошли успешные испытания в реальных средах;
- ◆ средства распознавания типов грунтов по данным комплексированной СТЗ реализованы в виде полнофункционального макета и прошли успешные испытания в реальных средах при стационарных климатических условиях;
- ◆ получены положительные результаты по использованию аппарата нейронных сетей для повышения достоверности распознавания типов грунтов по данным комплексированной СТЗ в реальной среде при не стационарных климатических условиях;
- ◆ в лабораторных условиях проведены стендовые испытания средств решения обратной задачи террамеханики для колесного движителя и получены приемлемые точности определения опорных характеристик для связного и несвязного грунтов.

Для окончательного решения вышеперечисленных задач и решения поставленной проблемы до уровня создания программно-аппаратных средств, пригодных для интеграции в серийные образцы МРК, требуется проведение соответствующих НИОКР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лапиов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А., Рябов А.В. Хрущев В.С.* Формирование моделей виртуальной реальности и информационно-навигационных полей для обеспечения автономного функционирования РТК специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1-2. – С. 142-146.
2. *Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В., Каляев И.А.* Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. – М.: Наука, 1990. – 147 с.
3. *Буйволово Г.А., Носков В.П., Руренко А.А., Распопин А.Н.* Аппаратно-алгоритмические средства формирования модели проблемной среды в условиях пересеченной местности // Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов: Сб. научн. тр. – М.: ИФТП, 1989. – С. 61-69.
4. *Носков В.П., Рубцов И.В.* Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 21-24.
5. *Носков В.П., Рубцов И.В., Вазаев А.В.* Об эффективности моделирования внешней среды по данным комплексированной СТЗ // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2 (7). – С. 51-55.
6. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г.* Распознавание объектов и типов опорной поверхности по данным комплексированной системы технического зрения // Известия ЮФУ. Технические Науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 127-139.
7. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В.* Нейросетевой модуль выбора эталонов для распознавания типов опорной поверхности // Сб. материалов 14 Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные задачи и системы управления». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 29-32.
8. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г.* Комплексированная СТЗ в системе управления пожарного робота // Известия ЮФУ. Технические Науки. – 2017. – № 1 (186). – С. 121-132.
9. *Беляков В.В. и др.* Вездеходные транспортно-технологические машины. – Н. Новгород: Изд-во «Талам», 2004. – 960 с.
10. *Чобиток В.А.* Теория движения танков и БМП. – Воениздат, 1984. – 264 с.
11. *Сологуб П.С., Веселов В.А., Ипатов О.С. и др.* Космические роботизированные комплексы. Ленинградская – Санкт-Петербургская научно-конструкторская школа / под общ. ред. В.А. Веселова. – (Б-ка журн. «Военмех. Вестник БГТУ»). – СПб., 2016. – 200 с.
12. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E.* ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems 25 / ed. by Pereira F., Burges C.J.C., Bottou L., Weinberger K.Q. Curran Associates, Inc., 2012. – P. 1097-1105.
13. *Говорухин А.М., Куприн А.М., Коваленко А.Н., Гамезо М.В.* Справочник по военной топографии. – 2-е изд. перераб. – М.: Воениздат, 1980. – 344 с.
14. *Беккер М.Г.* Введение в теорию систем местность–машина: пер. с англ. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 519 с.
15. Теория и конструкция танка. Т. 8. Параметры внешней среды, используемых в расчётах танков. – М.: Машиностроение, 1987. – 196 с.
16. Полотно пути транспортно-технологических машин: учебник / под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина. – Н. Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2014.
17. *Красеньков В.И., Харитонов С.А., Шумилин А.В.* Математическая модель криволинейного движения транспортной гусеничной машины по деформируемому основанию // Известия вузов. Машиностроение. – 1989. – № 11. – С. 94-99.
18. *Жилейкин М.М., Захаров А.Ю., Паньшин М.В.* Проверка адекватности и точности математической модели взаимодействия эластичного колеса с деформируемым опорным основанием // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2018. – № 4. – С. 206-214.
19. *Бекетов А.С.* Теория управляемого движения гусеничных машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 125 с.
20. *Наумов В.Н., Машков К.Ю., Котиев Г.О., Чижов Д.А., Горелов В.А.* Метод математического моделирования прямолинейного движения роботизированных транспортных средств по деформируемому грунту // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 11 (11). – С. 34.

21. *Машков К.Ю., Рубцов В.И., Штифанов Н.В.* Автоматическая система обеспечения опорной проходимости мобильного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». Спец. выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». – 2012. – С. 95-106.
22. *Mashkov K.Y. Pozdnyakov T.D.* Using strain gages to assess the bearing properties of underlying surface with a robot crawler IOP // Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 820.

REFERENCES

1. *Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Rudianov N.A., Ryabov A.V. Khrushchev V.S.* Formirovanie modeley virtual'noy real'nosti i informatsionno-navigatsionnykh poley dlya obespecheniya avtonomnogo funktsionirovaniya RTK spetsial'nogo naznacheniya [Formation of virtual reality models and information and navigation fields to ensure the autonomous functioning of special-purpose RTCs], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1-2, pp. 142-146.
2. *Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V., Kalyaev I.A.* Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. Moscow: Nauka, 1990, 147 p.
3. *Buyvolov G.A., Noskov V.P., Rurenko A.A., Raspopin A.N.* Apparato-algoritmicheskie sredstva formirovaniya modeli problemnoy sredy v usloviyakh peresechennoy mestnosti [Hardware-algorithmic means of forming a model of the problem environment in the conditions of rough terrain], *Upravlenie dvizheniem i tekhnicheskoe zrenie avtonomnykh transportnykh robotov: Sb. nauchn. tr.* [Traffic management and technical vision of autonomous transport robots: Collection of scientific papers]. Moscow: IFTP, 1989, pp. 61-69.
4. *Noskov V.P., Rubtsov I.V.* Opyt resheniya zadachi avtonomnogo upravleniya dvizheniem mobil'nykh robotov [Experience in solving the problem of autonomous motion control of mobile robots], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Management], 2005, No. 12, pp. 21-24.
5. *Noskov V.P., Rubtsov I.V., Vazaev A.V.* Ob effektivnosti modelirovaniya vneshney sredy po dannym kompleksirovannoy STZ [On the effectiveness of modeling the external environment according to the integrated STZ data], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2015, No. 2 (7), pp. 51-55.
6. *Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G.* Raspoznavanie ob"ektov i tipov opornoj poverkhnosti po dannym kompleksirovannoy sistemy tekhnicheskogo zreniya [Recognition of objects and types of the reference surface according to the data of the integrated system of technical vision], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 127-139.
7. *Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V.* Neyrosetevoy modul' vybora etalonov dlya raspoznavaniya tipov opornoj poverkhnosti [Neural network module for selecting standards for recognizing types of reference surfaces], *Sb. materialov 14 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye zadachi i sistemy upravleniya»* [Collection of materials of the 14th All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective tasks and Management systems"]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 29-32.
8. *Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G.* Kompleksirovannaya STZ v sisteme upravleniya pozhnar'nogo robota [Integrated STZ in the fire robot control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1 (186), pp. 121-132.
9. *Belyakov V.V. i dr.* Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskije mashiny [All-terrain transport and technological machines]. Nizhniy Novgorod: Izd-vo «Talam», 2004, 960 p.
10. *Chobitok V.A.* Teoriya dvizheniya tankov i BMP [Theory of movement of tanks and infantry fighting vehicles]. Voenizdat, 1984, 264 p.
11. *Sologub P.S., Veselov V.A., Ipatov O.S. i dr.* Kosmicheskie robotizirovannye komplekxy. Leningradskaya – Sankt-Peterburgskaya nauchno-konstruktorskaya shkola [Space robotic systems. Leningrad – St. Petersburg Scientific and Design school], under the general ed. of V.A. Veselova. Saint Petersburg, 2016, 200 p.

12. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, *Advances in Neural Information Processing Systems 25*, ed. by Pereira F., Burges C.J.C., Bottou L., Weinberger K.Q. Curran Associates, Inc., 2012, pp. 1097-1105.
13. Govorukhin A.M., Kuprin A.M., Kovalenko A.N., Gamezo M.V. Spravochnik po voennoy topografii [Handbook of Military Topography]. 2nd ed. Moscow: Voenizdat, 1980, 344 p.
14. Bekker M.G. Vvedenie v teoriyu sistem mestnost'-mashina [Introduction to the theory of terrain-machine systems]: trans. from the engl. by V.V. Gus'kova. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 519 p.
15. Teoriya i konstruktsiya tanka. T. 8. Parametry vneshney sredy, ispol'zuemykh v raschetakh tankov [Theory and design of the tank. Vol. 8. Parameters of the external environment used in the calculations of tanks]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 196 p.
16. Polotno puti transportno-tekhnologicheskikh mashin: uchebnik [The roadbed of transport and technological machines: textbook], ed. by V.V. Belyakova, A.A. Kurkina. Nizhny Novgorod: NGTU im R.E. Alekseeva, 2014.
17. Krasnen'kov V.I., Kharitonov S.A., Shumilin A.V. Matematicheskaya model' krivolinyenogo dvizheniya transportnoy gusenichnoy mashiny po deformiruemu osnovaniyu [Mathematical model of the curved movement of a transport crawler on a deformable base], *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Izvestiya vuzov. Mechanical engineering], 1989, No. 11, pp. 94-99.
18. Zhileykin M.M., Zakharov A.Yu., Pan'shin M.V. Proverka adekvatnosti i tochnosti matematicheskoy modeli vzaimodeystviya elastichnogo koleasa s deformiruемым опорным osnovaniem [Checking the adequacy and accuracy of the mathematical model of the interaction of an elastic wheel with a deformable support base], *Tr. NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the NSTU named after R. E. Alekseev]. – Nizhny Novgorod, 2018, No. 4, pp. 206-214.
19. Beketov A.S. Teoriya upravlyаемого dvizheniya gusenichnykh mashin [Theory of controlled movement of tracked vehicles]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2017, 125 p.
20. Naumov V.N., Mashkov K.Yu., Kotiev G.O., Chizhov D.A., Gorelov V.A. Metod matematicheskogo modelirovaniya pryamolineynogo dvizheniya robotizirovannykh transportnykh sredstv po deformiruemu gruntu [Method of mathematical modeling of rectilinear motion of robotic vehicles on deformable ground], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, No. 11 (11), pp. 34.
21. Mashkov K.Yu., Rubtsov V.I., Shtifanov N.V. Avtomaticheskaya sistema obespecheniya opornoй prokhodimosti mobil'nogo robota [Automatic support system for mobile robot patency], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». Spets. vypusk «Spetsial'naya robototekhnika i mekhatronika»* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Mechanical Engineering". Special issue "Special robotics and Mechatronics"], 2012, pp. 95-106.
22. Mashkov K.Y. Pozdnyakov T.D. Using strain gages to assess the bearing properties of underlying surface with a robot crawler IOP, *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 820.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.А. Каляев.

Носков Владимир Петрович – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +7 9166766057; НИИ Специального машиностроения; зав. сектором; кафедра специальной робототехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Рубцов Иван Васильевич – e-mail: noskov_mstu@mail.ru; тел.: 84992636019; НИИ Специального машиностроения; начальник отдела; кафедра специальной робототехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Машков Константин Юрьевич – e-mail: makon111@rambler.ru; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

Вазаев Александр Викторович – e-mail: vazaev@bmstu.ru; тел.: +7 9153976550; НИИ Специального машиностроения; инженер; кафедра специальной робототехники и мехатроники; аспирант.

Noskov Vladimir Petrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; NIISM sector head; the department of special robotics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rubtsov Ivan Vasil'evich – e-mail: noskov_mstu@mail.ru; phone: +74992636019; the department of special robotic and mechatronics; chief of department; cand. of eng. sc.; associate professor.

Moshkov Konstantin Yur'evich – e-mail: makon111@rambler.ru; phone: +79161943368; the department of multi-purpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vazaev Alexander Viktorovich – e-mail: vazaev@bmstu.ru; phone: +79153976550; NIISM, engineer; the department of special robotics and mechatronics; post-graduate.

УДК 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-19-30

Г.П. Виноградов, А.С. Емцев, И.С. Федотов

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ В ЗАЩИЩАЕМЫХ ЗОНАХ

В военных целях беспроводные сенсорные сети позволяют «связать автономные системы» в комплекс, обладающий свойством самоорганизации, когда объекты «умеют» сами находить друг друга и формировать сеть, а случае выхода из строя какого-либо из узлов могут устанавливать новые маршруты для передачи сообщений. Достичь желаемой эффективности подобных комплексов возможно, главным образом, путем совершенствования интеллектуальной составляющей их системы управления в целом и отдельным узлом в частности. Однако следует отметить, что подавляющее число исследований в этой области остается на теоретическом уровне. Цель состоит: 1) в исследовании и разработке алгоритмов построения архитектуры сети с мобильными узлами и с возможными их отказами вследствие выполнения боевой задачи; 2) в исследовании и разработке использования узла сенсорной сети для сбора, анализа, передачи данных об обстановке и принятия решения в зоне своей ответственности; 3) предложить в условиях ограничений по энергопотреблению и быстрдействию сравнительно простые алгоритмы для придания узлу сети свойства интеллектуального поведения. Показано, что требуемые алгоритмы можно разработать, если выявить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях. На этой основе появляется возможность разработки формальных моделей (паттернов) для реализации в системе управления узлом. Предложена двухуровневая структура интеллектуальной системы управления сетью. Верхний уровень, реализуемый оператором, соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств согласно миссии, накопление и корректировка базы знаний в виде эффективных паттернов поведения. Объектом управления для нее является сеть, рассматриваемая как некоторая функциональная система.

Паттерн; беспроводная сеть; сенсор; искусственный интеллект.

G.P. Vinogradov, A.S. Emtsev, I.S. Fedotov

WIRELESS SENSOR NETWORKS IN PROTECTED AREAS

For military purposes, wireless sensor networks allow you to "link autonomous systems" into a complex that has the property of self-organization, when objects "know" how to find each other and form a network, and in the event of a failure of any of the nodes can establish new routes for transmitting messages. It is possible to achieve the desired efficiency of such complexes, mainly by improving the intellectual component of their control system in general and individual node in particular. However, it should be noted that the vast majority of research in this area remains at the theoretical level. The goal is to: 1) the study and development of algorithms for network design with mobile nodes and their possible failures due to the combat mission; 2) the study and development of site use sensor network to collect, analyze, and transmit data about the situation and decision-making in the area of responsibility; 3) to offer relatively simple algorithms for giving the network node the prop-

erty of intelligent behavior under the conditions of restrictions on power consumption and speed. It is shown that the required algorithms can be developed if the classes of typical situations and successful methods of action in real conditions are identified. On this basis, it becomes possible to develop formal models (patterns) for implementation in the node management system. A two-level structure of an intelligent network management system is proposed. The upper level, implemented by the operator, corresponds to such properties as survival, security, fulfillment of mission obligations, accumulation and adjustment of the knowledge base in the form of effective behavior patterns. The object of control for it is the network, considered as a functional system.

Pattern; wireless network; sensor; artificial intelligence.

Введение. Беспроводные сенсорные сети (WSN – Wireless Sensor Network) стали возможны за счет результатов в области разработки MEMS-сенсоров, информационных технологий и систем связи на базе радиоканалов и беспроводных протоколов. Типичная структура WSN включает многофункциональные моты (узлы) с малым уровнем энергопотребления, способных к коммуникации друг с другом, и сетевой архитектуры для передачи данных в удаленные компьютерные сети [1, 20]. Архитектура сенсорного узла, состоит из четырех основных компонентов: 1) сенсорной подсистемы, включающей датчики: сейсмический, магнитный, тепловой, визуальный, инфракрасный, акустический и радар, для контроля состояния внешней среды с соответствующими аналого-цифровыми преобразователями; 2) подсистемы обработки, включающая микроконтроллеры и память для местной обработки данных; 3) радиопередатчика для беспроводной передачи данных; 4) устройства электропитания. В зависимости от определенного конкретного применения сенсорные узлы могут включать в себя дополнительные компоненты, такие как систему позиционирования, мобилизатор, чтобы изменить их местоположение или конфигурацию и т. п. Сенсорные узлы образуют сенсорное поле и, как правило, они находятся в спящем положении. Когда происходит событие, или по расписанию в определенное время, эти узлы просыпаются, самоорганизуются в сеть и передают информацию в центр сбора данных. Сенсорная сеть поддерживает основные интерфейсы и протоколы, которые применяются в настоящее время в глобальных и локальных сетях. Это позволяет интегрировать ее в существующую сеть.

Постановка задачи. Область применения БСС – это, как правило, неопределенные и плохо формализуемые среды, поэтому достичь желаемой эффективности подобных комплексов возможно, главным образом, путем совершенствования интеллектуальной составляющей их системы управления в целом и отдельным узлом в частности. Однако следует отметить, что существует разрыв между примитивными моделями поведения искусственных существ, например, в роевой робототехнике, моделями их взаимодействия и ожиданиями со стороны практики. Ситуация усугубляется требованиями скрытности, миниатюризации, малого энергопотребления.

На практике требуется в качестве мота сети иметь автономный узел (далее агент) должен обладать свойством интеллектуального поведения, быть способным на изучение обстановки и принятию решений, как самостоятельно с учетом получаемых от других устройств сети данных, так и в составе группы.

Система управления узлом, использующая паттерны. Жесткие требования в ряде предметных областей к времени реагирования, объему памяти, быстродействию микрочипа и уровню энергопотребления предполагают использование сравнительно простых алгоритмов, построенных путем описания лучшего опыта человека при выполнении функциональных задач. В работах [2–4] показано, что такое описание можно реализовать, если выявить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях для формирования моделей поведения (паттернов).

В работе [5] дана следующая обобщенная логическая схема описания паттерна
Имя паттерна:

$$\begin{aligned}
 & \text{так как [мотивы M]} \\
 & \text{поскольку [цели G]} \\
 & \text{если [предусловия U']} \\
 & \text{то способ действия } r_q(t) \\
 & \text{из-за чего [постусловие U'']} \\
 & \dots \\
 & \text{есть альтернатива [} r_p(t) \text{]}
 \end{aligned} \tag{1}$$

В этой модели все составляющие, кроме логических связей, могут представлять собой языковые конструкции на естественном или естественно-профессиональном языке. Следовательно, модель (1) – типовая естественно-языковая модель паттерна.

Формальная модель паттерна поведения в типовой ситуации приведена в [6, 7]. Там же показано, что модель предметной области и модель принятия решений человеком в условиях дефицита времени можно формализовать с помощью нечетких продукционных сетей.

Мотивы в модели (1) – это причины, определяемые потребностями и/или обязательствами. Они побуждают агента к активности, в рамках которой потребовался паттерн. Описание мотивов и целей в модели (1) представляет контекст повторного применения паттерна с позиции необходимости и возможности его применения (потребности → мотивы → цели). Контекст определяется «ожидаемыми» постусловиями. Постусловия связаны с целями, затребовавшими паттерн, но отражает их в форме возможного состояния, к которому приведет применение паттерна. Цели определяют желаемое состояние и могут быть причиной, определяющей необходимость и полезность стремления к их достижению. Способ действия представляет собой код как естественно-языковое описание схемы действия, реализация которой приводит к выполнению паттерна. Такое описание имеет вид методик, реализованных на языке программирования. Набор моделей или паттернов поведения, образуют опыт или базу знаний его носителя.

Модель индивидуального поведения автономного узла предполагает формирование базы паттернов на основе экспериментального опыта, что позволяет реализовать эволюцию «кооперативного интеллекта» благодаря использованию искусственного когнитивного процесса, аналогичного тому, что имеет место у естественных существ. Отметим, что эта возможность отсутствует в системах на основе знаний, так как в ней отсутствует компьютерная модель адаптивного поведения.

Общая архитектура интеллектуальной системы управления БСС имеет иерархическую структуру. Верхний уровень, реализуемый оператором, соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств согласно миссии, накопление и корректировка базы знаний в виде эффективных паттернов поведения. Объектом управления для нее является БСС, рассматриваемая как некоторая функциональная система. Она осуществляет: 1) расчет текущих показателей удельной ценности по результатам и эффективности в момент t [6]; 2) расчет и реализацию способа действия (поведения) в момент t согласно заданному паттерну поведения; 3) мониторинг результатов реализации паттерна поведения.

Оператор обрабатывает паттерны поведения в ТС при выполнении миссии и выполняет анализ выполнения миссии. Узел рассчитывает последовательности состояний $y(t)$, реализует задачи миссии и выполняет расчет оценки удельной ценности и эффективности [6, 7] обработки фактических ситуаций.

Такой подход к моделированию поведения узлов в сети на основе паттернов аналогичен подходу в прагматической эпистемологии, согласно которому знания рассматриваются как множество теорий или моделей, каждая из которых представляет собой описание поведения при решении определенного класса задач. Теории, описывающие класс явлений, могут «перекрываться», и возникает проблема выбора способа решения задач в конкретной предметной области. Критерием выбора становится ожидаемая удельная ценность возможного результата [7].

Процесс получения знания в предлагаемой схеме аналогичен процессу биологической эволюции. Следовательно, критерием истинности знания искусственной сущности является «*приспособленность*» знания для решения задач предметной области.

Модель данных. Реализация этого подхода связана: 1) с правильным соотношением вектора координат ситуации ($x_i, i = \overline{1, n}$) с тем или иным паттерном, как по их количеству, так и по форме предъявления каждой координаты; 2) полнотой описания вектором ситуации (количество учитываемых параметров n). Связь конкретного класса и конкретного паттерна устанавливается при работе с лидером – действительным носителем знания. Соответствующая методика изложена в [7]. Так как человек описывает ситуацию средствами естественного языка, то координаты ситуационного вектора – это лингвистические переменные. Они используются для преобразования количественных шкал, используемых в сенсорах, в лингвистические шкалы, используемые человеком для описания значений наблюдаемого параметра-понятия в виде термов.

База знаний на основе паттернов. Пусть состояние ситуации описывается ситуационным вектором $x_i, i = \overline{1, n}$, каждая координата которого лингвистическая переменная x_i с множеством термов $A_i = \{a_i^k, k = \overline{1, K^i}\}$. Пусть определен набор классов реализаций ситуационного вектора, при котором есть паттерн поведения с успешным разрешением любой ситуации класса (кластера). При этом значения удельной ценности по результату превышают некоторый пороговый уровень. То же самое относится и к удельной ценности по эффективности при реализации паттерна.

Пусть накоплено множество $d_j, j = \overline{1, p}$ паттернов, каждый из которых связан с множеством кластеров ситуаций, для разрешения которых он был выбран. В соответствии с подходом, описанным в [7] можно составить матрицу соответствия кластеров ситуаций и располагаемым множеством паттернов поведения.

Если сгруппировать строки матрицы по паттернам, где каждая строка матрицы представляет собой конкретный ситуационный кластер, при котором успешно реализован соответствующий паттерн, то результатам можно получить кластер типовой ситуации. Для него паттерн поведения по структуре будет один и тот же, отличие будет в значениях параметров.

Как правило, микрочипы узлов имеют операционную систему, подобную Tiny Os. Анализ возможных вариантов построения базы знаний в виде паттернов и их моделирование в среде Tiny Os показал, что наиболее приемлемым является подход, изложенный в [3, 8], поэтому дальнейшее изложение материала будет соответствовать работам [3, 8].

Пронумеруем строки блока паттерна d_j двумя индексами: первый индекс – номер паттерна (он же номер блока); второй индекс – это номер ситуации, входящий в j -й кластер.

Такая матрица определяет систему логических высказываний вида Если ... То, Иначе ... Например, строка матрицы $j.1$ – это высказывание

$$\text{Если } x_1 = a_1^{j1} \text{ и } x_2 = a_2^{j2} \text{ и } \dots \text{ и } x_n = a_n^{jn} \text{ То } d_j \quad (2)$$

Иначе выражение для следующей строки.

Полученную упорядоченную таким образом систему логических высказываний будем называть нечеткой матрицей знаний или базой паттернов.

Алгоритм вычисления функции принадлежности паттерна. Каждое логическое высказывание типа (2) – это нечеткое отношение соответствующих нечетких множеств. Например, для строки j это будет

$$a_1^{j1} \times a_2^{j2} \times \dots \times a_n^{jn}.$$

Функция принадлежности нечеткого множества, образованного этим нечетким отношением, будет

$$\mu_{a_1}^{j1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{a_i}^{ji}(x_i) \wedge \dots \wedge \mu_{a_n}^{jn}(x_n).$$

Здесь вычисление этого выражения осуществляется с помощью операции *min*.

Блок логических высказываний, относящийся к паттерну d_j , представляет собой объединение соответствующих нечетких множеств, образованных строками выделенного блока. Тогда функция принадлежности этого объединения будет определяться

$$\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n}) = \bigvee_{p=1}^j \bigwedge_{n=1}^p \mu_i^{jK_j}(x_i),$$

где « \bigvee » означает операцию *max*.

Формально представленный алгоритм определения функции принадлежности паттерна d_j можно записать в виде:

- а) фиксируем произвольную точку $x_i^*, i = \overline{1, n} \in \times_{n=1}^{i=1} U_i$.
- б) для каждого блока матрицы знаний, соответствующего d_j , определим $\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n})$ в этой точке.

Заметим, что для фиксированной точки $x_i^*, i = \overline{1, n} \in \times_{n=1}^{i=1} U_i$ блок матрицы, является числовым, так как вместо каждого термина a_i^{js} из этого блока поставлено значение его функции принадлежности $(a_i^{js})^*$, вычисленное в точке x_i^* . Операция $\min_i(a_i^{js})^*$ производится над числами, стоящими в строках « i » $\overline{1, n}$ и в столбец « \min » заносится минимальное число в соответствующей строке. Операция $\max_{js} \min_i(a_i^{js})^*$ определяет в полученном массиве строчных минимумов $j_s \in \overline{1, K_j}$ наибольшее значение. Проводя такие вычисления для каждой точки универсального множества, получим требуемые значения функции принадлежности.

Алгоритм выбора паттерна в текущей ситуации. Бортовая интеллектуальная система с помощью своих измерительных средств формирует вектор $x_i^*, i = \overline{1, n}$ с количественными характеристиками координат. В этой точке, полученной на момент t , требуется определить значение функции принадлежности паттерна $d_j(x_i, i = \overline{1, n}), j \in \overline{1, p}$.

В этом случае функция принадлежности рассчитывается для каждого блока. Наиболее предпочтительный паттерн для разрешения проблемной ситуации будет паттерн d_j^* , вычисленный по правилу $d^*(x_i^*, i = \overline{1, n}) = \max_{j \in \overline{1, p}} d_j(x_i, i = \overline{1, n})$

Описанный подход реализован в форме программного продукта, который позволяет смоделировать произвольную проблемную ситуацию (субситуацию), задавая ее ситуационным вектором с полным описанием его координат (для каждой

координаты вводится набор термов, относящаяся к каждому терму функция принадлежности, выбираемая из заданного списка, универсальное множество, на котором она определена) и матрица знаний.

Ниже в качестве примера рассматриваются алгоритмы некоторых паттернов.

Паттерн определения местоположения узла относительно пункта управления БСС. Одной из основных в интеллектуальной БСС является задача конфигурирования сети и определение зоны ответственности для каждого узла, для чего требуется знать координаты размещения узлов. Они рассчитываются относительно координат пункта управления БСС по степени удаленности от него.

Наиболее простым методом решения этой задачи является индикация уровня принятого сигнала (Received Strength Signal Indication). Любой беспроводной канал по стандарту IEEE 802.15.4 имеет протокольную функцию оценки качества связи (Link Quality Indicator), действие которой сводится к определению мощности принятого сигнала. Результат этого измерения можно вывести, откалибровать по известному расстоянию, оценить дальность до источника и определить координаты нахождения узла.

Измерение расстояния производится следующим образом. Приемник с логарифмической амплитудной характеристикой принимает сигналы, по которым встроенный индикатор $RSSI$ формирует 8-разрядный код $RSSI_{VAL}$. Этот код получается в результате усреднения по восьми периодам (128 мкс) принятого сигнала и снабжается битом состояния, указывающим, когда $RSSI_{VAL}$ является валидным (т.е. приемник имел возможность принять, по крайней мере, восемь периодов). Мощность принятого сигнала P (дБм) вычисляется по формуле:

$$P = RSSI_{VAL} + RSSI_{OFFSET},$$

где $RSSI_{OFFSET}$ – эмпирически подбираемая постоянная (порядка – 45 дБм).

Поскольку в идеальных условиях мощность обратно пропорциональна квадрату расстояния, то логарифм мощности просто пропорционален расстоянию с некоторым коэффициентом, который устанавливается также эмпирически. Данный подход реализован в микроконтроллерах ZigBee фирмы TI серии CC2431 [9].

Паттерн самоорганизации БСС. Основное требование к алгоритму размещения сенсорных узлов для двумерных (2D) и трехмерных (3D) БСС – это обеспечение, по крайней мере, 90 % покрытие пространства в зависимости от соотношения плотности размещения и радиуса действия сенсорного узла RS . Для динамической БСС с ячеистой топологией сети в этом смысле перспективным следует считать алгоритм адаптивной кластеризации LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy). LEACH – протокол с контролем топологии и кластеризацией с низким потреблением, предназначен для сетей с иерархической структурой.

Узлы полагаются однородными и имеют ограниченный запас энергии. В сети имеется базовая станция, и все узлы знают о ее физическом местоположении. Для придания БСС с изменяемой структурой для предотвращения чрезмерного потребления энергии и придания свойств самоорганизации и адаптации под различные состояния сети по распределению энергии узлы динамически объединяются в кластеры, внутри которых происходит выбор головного узла.

Головной узел выбирается для каждого кластера. Его функция – сбор данных с узлов-матов кластера, обработка и передача информации на шлюз или базовую станцию. Такое агрегирование данных в головных узлах значительно уменьшает энергопотребление в сети и увеличивает длительность жизненного цикла. Поэтому выбор головного кластера является основной задачей при разработке алгоритмов для иерархических беспроводных сенсорных сетей. Для этого работа LEACH разделена на раунды. Каждый из раундов состоит из фазы настройки и стационарной фазы. В фазе

настройки производится выбор главных узлов и объединение их с соседними устройствами. Решение о выборе принимается независимо всеми узлами в одно и то же время с помощью следующего алгоритма.

Каждому из n узлов присваивается случайное значение N от 0 до 1. Рассчитывается значение порога $T(n)$ по формуле [10]

$$T(n) = \frac{P}{1 - P * (r \bmod P^{-1})}, \forall n \in G; T(n) = 0, \forall n \notin G,$$

где r – номер текущего раунда; P – вероятность выбора узла головным; n – указатель на текущий узел; G – число узлов, которые не были головными узлами в последних $1/P$ раундах.

Если $N < T(n)$, то узел становится головным кластером. Такой алгоритм гарантирует, что каждый узел будет выбран главным узлом только один раз в течение $1/P$ раундов.

Узлы, которые были головными узлами в нулевом раунде, не могут быть ими снова в течение раундов $1/P$. После этого все определенные узлы могут становиться головным узлом.

После выбора головного узла другие сенсорные узлы определяют, в какой кластер они будут входить на основе мощности получаемого сигнала RSS (Received Signal Strength) от головного узла. Когда все узлы самоорганизовались в кластеры, головной узел создает расписание передачи информации на основе метода TDMA, что гарантирует отсутствие коллизий при передаче сообщений.

Головной узел рассылает расписание передачи и запрашивает своих членов кластера о передаче данных. Узлы передают данные в отведенные для этого интервалы TDMA. После получения сообщений от всех узлов головной узел формирует свои сообщения и передает эти сообщения на шлюз или базовую станцию.

В стационарной фазе раунда данные передаются базовой станции. По сравнению с фазой настройки, стационарная фаза более продолжительна для того, чтобы минимизировать расход энергии. Для этого используется протокол MAC-уровня – CSMA (Carrier Sense Multiple Access), в котором каждый узел проверяет отсутствие передачи другими узлами, до начала передачи на транспортном уровне. Критическим параметром сети является процент узлов, которые являются головным узлом. В случае среднего и большого процента, и если расстояние до головного узла длиннее, чем между узлами и стоком, то тратится больше энергии. Оптимальным считается 5% головных узлов от количества всех узлов сети. В таком случае протокол помогает достигнуть уменьшение потребления общей энергии сети в семь – восемь раз в случае однонаправленной передачей, в четыре – восемь раз, при передаче пакетов по нескольким узлам сразу.

Если требуется, то все узлы становятся неработоспособными (сеть переходит в спящий режим), благодаря последовательному разделению ролей головных узлов.

Общий расход энергии сети минимизируется с помощью разделения нагрузки между всеми узлами в разные моменты времени.

Рассматриваемая радио-модель описывается следующими уравнениями:

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-elec} * k + E_{amp} * k * d^2,$$

$$E_{RX}(k) = E_{TX-elec}(k) * E_{RX}(k)$$

где E_{TX} – энергия, затрачиваемая на передачу; E_{RX} – энергия, потребляемая при приеме; $E_{TX-elec}$ и $E_{RX-elec}$ – энергии, необходимые для работы электронной схемы передатчика и приемника, соответственно; E_{amp} – энергия, необходимая для схемы усилителя; k – размер пакета; d – расстояние между передатчиком и приемником [10].

После установки, определения положения и кластеризации с определением головных узлов, каждый узел БСС может приступать к мониторингу обстановки в зоне ответственности и выполнению задач.

Паттерн построения рабочего канала. Для проектирования алгоритмов на уровне специализированной среды необходим канал передачи данных между контроллером и средой проектирования. Построение рабочего канала для наблюдения и обработки сигналов в реальном времени предполагает использование двух буферов для накопления и передачи данных позволяет организовать без разрывов сбор, обработку и визуализацию данных (для избежания потери данных скорость последующего процесса должна быть не ниже скорости предыдущего процесса).

Примером применения такой организации может быть модуль E14-440 [11–14] для многоканального ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации, подключаемый к компьютеру через шину USB.

Входные данные сначала заносятся в первую половину FIFO буфера АЦП [17–19]. После ее заполнения данные начинают передаваться в регистр процессора, в тоже время не прекращается сбор данных во вторую половину FIFO буфера. После накопления данных во второй половине FIFO буфера опять начинается передача данных в регистр процессора и параллельно продолжается сбор данных уже в первую половину.

Программы паттернов отправки сообщения о движении и определения направления движения написаны в среде Arduino. При обнаружении сигналов происходит сверка с базой сигнатур.

Описанный подход использован при проектировании системы управления группой автономных необитаемых аппарата при проведении разведывательно спасательных операций.

Пример использования программной реализации алгоритма вывода по паттерну. Решается проблема тактики поведения узла – автономного необитаемого аппарата (АНПА) на основании приведенных следующих данных. Входная информация:

а) *ситуационный вектор* $x_i, i = \overline{1,10}$ – Дальность до цели; Видимость; Глубина; Скорость; Запас хода; Количество боеприпасов; Состояние АНПА; Видимость противником; Метеорологические условия; Возможность атаки.

б) *термы*. Для каждой координаты ситуационного вектора определены термы (табл. 1).

Таблица 1

№ п/п	Координаты ситуационного вектора	Термы
1	Дальность до цели	Очень малая; Малая; Средняя; Большая; Очень Большая
2	Видимость	Нулевая; Малая; Средняя; Большая; Отличная
3	Глубина	Минимальная; Малая; Средняя; Большая; Максимальная
4	Скорость	Минимальная; Малая; Средняя; Большая; Максимальная
5	Запас хода	Почти нет; Малый; Средний; Достаточный; Максимальный
6	Количество боеприпасов	Почти нет; Мало; Среднее; Достаточное; Полный боезапас
7	Состояние АНПА	Авария; Пока движется; Без крит. Повреждений; Хорошее; Очень хорошее
8	Видимость противником	Оч. Низкая; Низкое; Среднее; Высокое; Оч. хорошее
9	Метеорологические условия	Оч. Плохие; Плохие; Нормальные; Хорошие; Отличные
10	Возможность атаки	Почти нет; Слабая; Средняя; Высокая; Оч. высокая

в) *функции принадлежности*. В качестве функций принадлежности выбраны трапецевидные функции принадлежности координат ситуационного вектора.

г) *Паттерны*: Залечь на дно; Вернуться на базу; Продолжать, но быть готовым вернуться; Продолжать, соблюдая осторожность; Продолжать выполнять задание в штатном режиме.

Каждое логическое высказывание – это нечеткое отношение соответствующих нечетких множеств. Например, для строки j это будет

$$a_1^{j1} \times a_2^{j2} \times \dots \times a_n^{jn}.$$

Функция принадлежности нечеткого множества, образованного этим нечетким отношением, будет

$$\mu_{a_1}^{j1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{a_i}^{ji}(x_i) \wedge \dots \wedge \mu_{a_n}^{jn}(x_n).$$

Здесь вычисление этого выражения осуществляется с помощью операции *min*.

Блок логических высказываний, относящийся к паттерну d_j , представляет собой объединение соответствующих нечетких множеств, образованных строками выделенного блока. Тогда функция принадлежности этого объединения будет определяться

$$\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n}) = \bigvee_{p=1}^j \bigwedge_{i=1}^n \mu_i^{pK_j}(x_i),$$

где « \bigvee » означает операцию *max*.

Формально представленный алгоритм определения функции принадлежности паттерна d_j можно записать в виде:

а) фиксируем произвольную точку

$$x_i^*, i = \overline{1, n} \in \times_{i=1}^n U_i.$$

б) для каждого блока матрицы знаний, соответствующего d_j , определим $\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n})$ в этой точке согласно табл. 2 [2, 3].

Таблица 2

№ п/п	Координаты ситуационного вектора					min	max	d_j
	x_1	...	x_i	...	x_n			
...
$j_1 \dots$ j_s \dots j_{K_j}	$(a_1^{j1})^*$... $(a_1^{js})^*$... $(a_1^{jK_j})^*$...	$(a_i^{ji})^*$... $(a_i^{js})^*$... $(a_i^{jK_j})^*$...	$(a_n^{jn})^*$... $(a_n^{js})^*$... $(a_n^{jK_j})^*$	$\min_i(a_i^{j1})^*$... $\min_i(a_i^{js})^*$... $\min_i(a_i^{jK_j})^*$	$\max_{j_s} \min_i(a_i^{jss})^*$	μ_{d_j}
...

Заметим, что для фиксированной точки $x_i^*, i = \overline{1, n} \in \times_{i=1}^n U_i$ блок матрицы, представленный в табл. 2, является числовым, так как вместо каждого терма a_i^{js} из этого блока поставлено значение его функции принадлежности $(a_i^{js})^*$, вычисленное в точке x_i^* . Операция $\min_i(a_i^{js})^*$ производится над числами, стоящими в строках « i » $\overline{1, n}$ и в столбец «min» заносится минимальное число в соответствующей

строке. Операция $\max_{j_s} \min_i(a_i^{j_s})^*$ определяет в полученном массиве строчных минимумов $j_s \in \overline{1, K_j}$ наибольшее значение. Проводя такие вычисления для каждой точки универсального множества, получим требуемые значения функции принадлежности.

Заключение. На основе подходов нечетких рассуждений представлен алгоритм оперативного вывода по выбору паттерна поведения в ситуации, соответствующей типовой ситуации. Он ориентирован как на автономное его использование, так и на встраивание его в бортовую интеллектуальную систему. В статье рассмотрены принципы работы БСС, определены модели индивидуального поведения автономного узла БСС. Предложены алгоритмы паттернов автономного интеллектуального устройства в составе БСС для решения следующих задач: 1) Динамического определения структуры сети в зависимости от текущего ее состояния; 2) Оперативного определения текущих координат узлов; 3) Определения местоположения узлов кластера с учетом топологии сети; 4) Установки узла в режим обнаружения сигнатур; 5) Определения при появлении сигнатур их типа путем сверки с базой паттернов, определения направления движения и местоположения; 6) Принятия решения о необходимости отслеживания или игнорирования сигнатуры; 7) Связи с другими узлами для выработки согласованных действий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акулдиз И.Ф. Беспроводные сенсорные сети: обзор. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128601003024> (дата обращения: 09.01.2021).
2. Федунов Б.Е., Прохоров М.Д. Вывод по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 3. – С. 63-72.
3. Федунов Б.Е. Механизмы вывода в базе знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем // Известия РАН ТиСУ. – 2002. – № 4.
4. Виноградов Г.П., Прохоров А.А., Шепелев Г.А. Паттерны в системах управления автономными системами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 1 (17). – С. 40-54. – Doi: 10.38028/ESI.2020.17.1.003.
5. Соснин П.И. Моделирование рассуждений: Конспект лекций. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 74 с.
6. Виноградов Г.П. Паттерны в автономных системах при выполнении миссий // VIII Международная научно-практическая конференция «Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии» НСМВИТ-2020 (29 июня – 1 июля 2020 г., г. Смоленск, Россия): Тр. конференции. В 2-х т. Т. 2. – Смоленск: Универсум, 2020.
7. Vinogradov G.P. Pattern control system // Software Journal: Theory and Applications. – 2020. – No. 2. – P. 10-19. – <http://swsys-web.ru/en/pattern-control-system.html>.
8. Федунов Б.Е. Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). – М.: Де Либри, 2018. – 246 с.
9. Еркин А. Расширение возможностей беспроводных сетей ZigBee: измерение координат узлов // Беспроводные технологии. – 2011. – № 1.
10. Сафронов П.С. Анализ характеристик протокола функционирования беспроводных сенсорных сетей LEACH: автореф. дисс. Южно-Уральский государственный университет, 2017.
11. Галкин П.В. Алгоритм управления и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 3.
12. Галкин П.В. Модель и алгоритм управления информационными потоками в беспроводной сенсорной сети // Наукові праці ДонНТУ. – 2015. – № 1.
13. Муксунов Т.Р. Программно-аппаратные методы обработки сигналов для повышения эффективности радиоэлектронных датчиков: автореф. дисс. – Томск, 2015.
14. Тараканов Е.В. Экспериментальные исследования протокола передачи данных с приоритетами в беспроводной сенсорной сети в системе Tossim // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 5.

15. Программирование Ардуино – документация. – <http://arduino.ru/Reference> (дата обращения: 27.12.2020).
16. Обработка данных с датчика в режиме квазиреального времени – статья. – <https://lhs-blog.info/programming/dlang/obrabotka-dannyih-s-datchika-v-rezhime-kvazirealnogo-vremeni/> (дата обращения: 29.12.2020).
17. Цветков А.А. Алгоритмы эффективного кодирования информационных источников в сенсорных сетях.
18. Еркин А. Расширение возможностей беспроводных сетей ZigBee: измерение координат узлов // Беспроводные технологии. – 2011. – № 1.
19. Сафронов П.С. Анализ характеристик протокола функционирования беспроводных сенсорных сетей LEACH: автореф. дисс. Южно-Уральский государственный университет, 2017.
20. Кучерявый А.Е. Интернет вещей // Электросвязь. – 2013. – №. 1. – С. 21-24.

REFERENCES

1. Akuldiz I.F. Besprovodnye sensornye seti: obzor [Беспроводные сенсорные сети: обзор]. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128601003024> (accessed 09 January 2021).
2. Fedunov B.E., Prokhorov M.D. Vyvod po pretsedentu v bazakh znaniy bortovykh intellektual'nykh sistem [Conclusion on the precedent in the knowledge bases of on-board intelligent systems], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision-making], 2010, No. 3, pp. 63-72.
3. Fedunov B.E. Mekhanizmy vyvoda v baze znaniy bortovykh operativno sovetuyushchikh ekspertnykh sistem [Mechanisms of inference in the knowledge base of on-board operationally advising expert systems], *Izvestiya RAN TiSU* [Izvestiya RAS TiSU], 2002, No. 4.
4. Vinogradov G.P., Prokhorov A.A., Shepelev G.A. Patterny v sistemakh upravleniya avtonomnymi sistemami [Patterns in control systems of autonomous systems]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical Technologies in Science and Management], 2020, No. 1 (17), pp. 40-54. Doi: 10.38028/ESI.2020.17.1.003.
5. Sosnin P.I. Modelirovanie rassuzhdeniy: Konspekt lektsiy [Modeling reasoning: Lecture notes]. Ulyanovsk: UIGTU, 2000, 74 p.
6. Vinogradov G.P. Patterny v avtonomnykh sistemakh pri vypolnenii missiy [Patterns in Autonomous Systems when performing missions], *VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nechetkie sistemy, myagkie vychisleniya i intellektual'nye tekhnologii» NSMVIT-2020 (29 iyunya – 1 iyulya 2020 g., g. Smolensk, Rossiya): Tr. Konferentsii* [VIII International Scientific and Practical Conference "Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technologies" NSMVIT-2020 (June 29 – July 1, 2020, Smolensk, Russia): Proceedings of the conference]. In 2nd vol. Vol. 2. Smolensk: Universum, 2020.
7. Vinogradov G.P. Pattern control system, *Software Journal: Theory and Applications*, 2020, No. 2, pp. 10-19. Available at: <http://swsys-web.ru/en/pattern-control-system.html>.
8. Fedunov B.E. Bortovye intellektual'nye sistemy takticheskogo urovnya dlya antropotsentricheskikh ob"ektov (primery dlya pilotiruemykh letatel'nykh apparatov) [On-board intelligent systems of the tactical level for anthropocentric objects (examples for manned aircraft)]. Moscow: De Libri, 2018, 246 p.
9. Erkin A. Rasshirenie vozmozhnostey besprovodnykh setey ZigBee: izmerenie koordinat uzlov [Expanding the capabilities of ZigBee wireless networks: measuring the coordinates of nodes], *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless technologies], 2011, No. 1.
10. Safronov P.S. Analiz kharakteristik protokola funktsionirovaniya besprovodnykh sensornykh setey LEACH: avtoref. diss. Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet, 2017 [Analysis of the characteristics of the protocol for the functioning of wireless sensor networks LEACH: abstract dissertation. South Ural State University, 2017].
11. Galkin P.V. Algoritm upravleniya i optimizatsii informatsionnykh potokov v besprovodnoy sensornoy seti [An algorithm for controlling and optimizing information flows in a wireless sensor network], *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies], 2014, No. 3.
12. Galkin P.V. Model' i algoritm upravleniya informatsionnymi potokami v besprovodnoy sensornoy seti [Model and algorithm of information flow control in a wireless sensor network], *Naukovi pratsi DonNTU* [Scientific works of DonNTU], 2015, No. 1.

13. *Muksunov T.R.* Programmno-apparatnye metody obrabotki signalov dlya povysheniya effektivnosti radioelektronnykh datchikov: avtoref. diss. [Software and hardware methods of signal processing for improving the efficiency of radio-electronic sensors: abstract of the dissertation]. Tomsk, 2015.
14. *Tarakanov E.V.* Eksperimental'nye issledovaniya protokola peredachi dannykh s prioritetaми v besprovodnoy sensornoy seti v sisteme Tossim [Experimental studies of the data transmission protocol with priorities in the wireless sensor network in the Tossim system], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University], 2012, Vol. 321, No. 5.
15. Programmirovanie Arduino – dokumentatsiya [Arduino programming-documentation]. Available at: <http://arduino.ru/Reference> (accessed 27 Desember 2020).
16. Obrabotka dannykh s datchika v rezhime kvazireal'nogo vremeni – stat'ya [Processing data from the sensor in the quasi-real-time mode-article]. Available at: <https://lhs-blog.info/programming/dlang/obrabotka-dannyih-s-datchika-v-rezhime-kvazirealnogo-vremeni/> (accessed 29 Desember 2020).
17. *Tsvetkov A.A.* Algoritmy effektivnogo kodirovaniya informatsionnykh istochnikov v sensornykh setyakh [Algorithms for efficient encoding of information sources in sensor networks].
18. *Erkin A.* Rasshirenie vozmozhnostey besprovodnykh setey ZigBee: izmerenie koordinat uzlov [Expanding the capabilities of ZigBee wireless networks: measuring the coordinates of nodes], *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless technologies], 2011, No. 1.
19. *Safonov P.S.* Analiz kharakteristik protokola funktsionirovaniya besprovodnykh sensornykh setey LEACH: avtoref. diss. Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet, 2017 [Analysis of the characteristics of the protocol for the functioning of wireless sensor networks LEACH: autoref. diss. South Ural State University, 2017].
20. *Kucheryavyu A.E.* Internet veshchey [Internet of Things], *Elektrosvyaz'* [Telecommunications], 2013, No. 1, pp. 21-24.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Семенов.

Виноградов Геннадий Павлович – НИИ «Центрпрограммсистем»; e-mail: wgp272ng@mail.ru; г. Тверь, Россия; д.т.н.; зав. лабораторией.

Емцев Александр Сергеевич – e-mail: emcev@cps.tver.ru; инженер-программист.

Федотов Илья Сергеевич – e-mail: twlucifer@gmail.com; инженер-программист.

Vinogradov Gennady Pavlovich – Research Institute "Tsentrprogramsistem"; e-mail: wgp272ng@mail.ru; Tver, Russia, dr. of eng. sc.; head of the laboratory.

Emtsev Alexander Sergeevich – e-mail: emcev@cps.tver.ru; software engineer.

Fedotov Ilya Sergeevich – e-mail: twlucifer@gmail.com; software engineer.

УДК 007.52:62.503.51

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-30-47

А.М. Маевский, Р.О. Морозов, В.А. Рыжов, А.Е. Горелый

РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ АНПА В НЕИЗВЕСТНОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Рассматривается проблема организации группового движения морских робототехнических комплексов (МРТК), в частности автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), в априори неизвестной среде с препятствиями. Выполнен краткий анализ существующих проектов по тематике группового управления МРТК, и алгоритмов планирования движения. Наличие многочисленных исследований по данному направлению подтверждает актуальность обозначенной проблемы. Приведена формальная постановка задачи движения четырех роботов строем. Предлагаемый в работе метод планирования

движения группы основан на комбинированном подходе, который организует многоуровневое решение к организации перемещения МРТК. На верхнем уровне разработана система глобального планирования и обработки миссии на основе метода случайных деревьев которая обеспечивает общее перемещение группы на основе априорной информации о состоянии среды. Система планирования нижнего уровня корректирует глобальную траекторию, позволяя объектам на локальном уровне осуществлять передвижение и взаимодействие агентов в группе, в том числе обеспечивает их безаварийное перемещение в пространстве и выход из областей локальных минимумов. В работе приводится подробное аналитическое описание разработанного алгоритма и блок-схема его функционирования. Проведено численное моделирование движения группы из 4 АНПА в недетерминированной среде с неподвижными препятствиями. Моделирование проводилось с учетом препятствий различной формы и сложности. Результаты математического моделирования продемонстрировали решение задачи выхода группы АНПА из области локального минимума. Приведены натурные испытания на примере группы из трёх безэкипажных катеров, в результате которых группа подвижных объектов сформировала строй и осуществила перемещение заданным строем в целевые позиции и вернулась в конечную зону. Кроме того, разработанный в рамках данной статьи модуль локального планирования был интегрирован в программное обеспечение системы планирования подводного глайдера «Тень». В конце рассматриваются полученные результаты работы предложенного метода и его дальнейшее развитие, в частности его применение в трехмерной постановке задачи.

АНПА; групповое управление; система управления; планирование пути; RRT метод; потенциальные поля.

A.M. Maevskiy, R.O. Morozov, V.A. Ryzhov, A.E. Gorelyi

DEVELOPMENT OF A HYBRID METHOD FOR PLANNING THE MOVEMENT OF A GROUP OF MARINE ROBOTIC COMPLEXES IN AN A PRIORI UNKNOWN ENVIRONMENT WITH OBSTACLES

The article discusses the problem of organizing the group movement of marine robotics (MRS), in particular, unmanned autonomous underwater vehicles (AUV), in an a priori unknown environment with obstacles. A brief analysis of existing projects on the subject of MRS group control, and path-planning algorithms have been carried out. The presence of numerous studies in this area confirms the relevance of the indicated problem. The formal statement of the problem of the movement of four robots in formation is presented. The proposed method for a group path planning is based on a combined approach that organizes a multi-level solution to organizing the movement of MRS. At the upper level, a system for global path planning and mission control was developed based on the random tree method, which provides the general movement of the group based on a priori information about the state of the environment. The lower-level planning system adjusts the global path, allowing objects at the local level to carry out the group agents' movement and interaction, including ensuring their collision-free movement in environment and exit from the areas of local minima. The article provides a detailed analytical description of the developed algorithm and a block diagram of its functioning. Numerical simulation of the movement of a group of 4 AUVs in a non-deterministic environment with fixed obstacles is carried out. The simulation was carried out taking into account obstacles of various shapes and complexity. The results of mathematical modeling demonstrated the solution to the problem of the exit of the AUV group from the area of the local minimum. Full-scale tests are presented on the example of a group of three unmanned boats: a group of mobile objects formed a formation and carried out a movement in a given formation to target positions and returned to the final zone. In addition, the local planning module developed within the framework of this article was integrated into the software of the "Shadow" underwater glider control system. In the conclusion, the results of the proposed method and its further development, in particular, its application in 3D environment, are considered.

AUV; group control; control system; path planning; RRT method; potential fields.

Введение. В настоящее время, актуальна проблема построения структур групп объектов и организация их перемещения в пространстве в различных средах. В частности, в настоящее время ведется большое количество разработок, свя-

занных с организацией группового взаимодействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и морских робототехнических комплексов [1–10]. Но несмотря на это, в связи со сложностью проблем, связанных с планированием движения групповых РТК сегодня не существует единого подхода дающего эффективного решения поставленных задач.

Сегодня для организации группового взаимодействия используются различные методы планирования траектории движения, разрабатываются методы интеллектуального планирования на основе нейронных технологий [11–13], другим направлением являются мультиагентные технологии [14], также распространены методы биоинспирированных подходов и методы на основе физических явлений, например, метод потенциальных полей и вытекающие из него [15–17].

Многие из перечисленных методов требуют предварительного процесса картографирования местности и могут осуществить полноценную работу исключительно по имеющейся карте, что существенно увеличивает время подготовительных работ для развертки МРТК и его вычислительные бортовые мощности [18]. Все это ведет к необходимости разработки таких методов планирования траектории движения групп МРТК, которые способны обеспечить функционирование группы в априори неизвестной среде с возможными препятствиями.

Рассматривая практическую сферу применения групп АНПА можно выделить несколько типовых задач:

- ◆ Мониторинг загрязнения заданного района акватории;
- ◆ Разведка углеводородов по их следам в водной толще акватории;
- ◆ Контроль биоресурсов и или картирование донных поверхностей;
- ◆ Патрулирование заданного района акватории, в том числе акустический контроль и наблюдение за движением в акватории биологических и не биологических объектов;
- ◆ Обзорно поисковые исследования. При крушении транспортных средств на территории акватории большой площади.

Пример решения задачи получения океанологических данных группой АНПА приводится в работе [19]. В данной работе использовалась распределенная система планирования, выдающая отдельные управляющие воздействия каждому АНПА с целью их выхода в определенную площадь акватории и проведения картографирования местности.

Взаимосвязанная работа группы из 2 АНПА типа Iver2 в целях наблюдения за акулами приводится в [20]. С помощью системы гидроакустической навигации аппарат вычисляет собственные координаты и ориентацию, и получает относительно них координаты расположения акул. Затем формируется общий массив входных данных подаваемый в систему управления, которая на основе этих данных формирует управляющее воздействие на исполнительные механизмы управления и движения АНПА.

В проекте [21] разработана система управления группой АНПА планерного типа. Не имея связи во время движения, аппараты уточняли свою позицию каждые 2 часа во время всплытия для сеанса связи. Система управления в данной работе генерирует набор путевых координат для каждого из аппаратов, что позволяет формировать глобальную миссию. Не зависимо от того что система планирования основана на градиентном методе, аппараты все равно привязаны к «виртуальному» лидеру группы, который координирует действия каждого из аппаратов. Лидером в группе выбирается тот АНПА который первым вышел на поверхность и определил свои координаты. После этого по времени восстановления связи с другими аппаратами он вносит уточнения в систему планирования каждого АНПА. В начале миссии оператор задает необходимый строй всем АНПА, после чего начинается процесс распределения позиций в формации.

В связи со сложностью проблем, связанных с планированием движения группы АНПА сегодня не существует единого подхода дающего эффективного решения поставленных задач. Целесообразна разработка многоуровневого метода планирования траектории движения группы АНПА.

Формальная постановка задачи. Сформируем целевую задачу для группы МРТК. Как правило, в работах, перечисленных выше применяется виртуальный лидер, который используется как центр группы. В рамках данной работы в качестве центра группы представлен волновой глайдер. Особенность его конструкции (наличие как подводной, так и надводной частей) позволяет использовать данный тип МРТК в качестве межсредного ретранслятора связи. В таком случае подводные глайдеры могут осуществлять взаимодействие с наземным пунктом управления через волновой глайдер.

Пусть в некотором пространстве глобальных координат R имеется N количество роботов с координатами

$$P_{AUV}(i) = [x(i)_{start}, y(i)_{start}]. \quad (1)$$

Массив точек P_{AUV} которые должны образовать определенного рода строй H , центром которой является волновой глайдер P_{USV} , в которой заданы координаты расположения формации $x(i)_{form}, y(i)_{form}$ и осуществить перемещение в заданную целевую точку P_{goal} с сохранением структуры строя. Под строем понимается пространственная структура аппаратов в группе. В целях согласованного взаимодействия элементам группы необходимо иметь информационный канал связи, однако его расстояние имеет физическое ограничение. В таком случае, необходимо построить такой тип строя, который не будет позволять аппаратам удаляться друг от друга больше чем на радиус r представляющий собой максимально-допустимое расстояние функционирования системы связи.

Проиллюстрированная задача изображена на рис. 1.

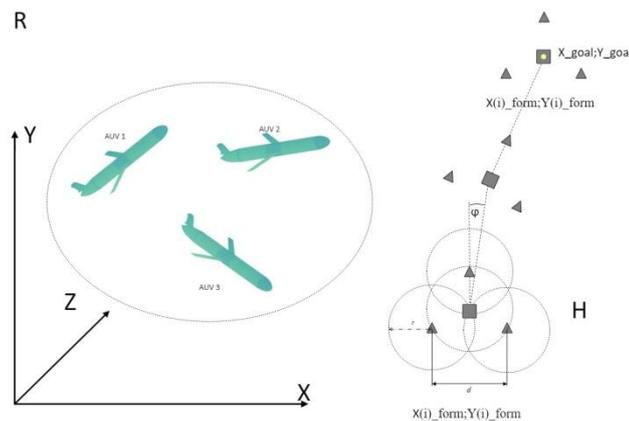


Рис. 1. Формальная постановка задачи

Для поставленной задачи необходимо решить ряд подзадач:

- ◆ задача оптимального построения формации, а именно минимизации времени $t \rightarrow \min$ построения строя и энергозатрат со стороны АНПА;
- ◆ задача оптимального перемещения строя в среде с сохранением его структуры, в том числе с возможностью реконфигурации строя;
- ◆ задача обнаружения и обхода возможных препятствии в режиме реального времени.

Разработка многоуровневого метода планирования пути группы МРТК.

Для решения поставленных задач был сформирован многоуровневый подход к организации структуры строя АНПА и их последующему перемещению в целевую позицию. Процесс работы предложенного двухуровневого алгоритма планирования можно проиллюстрировать с помощью схемы на рис. 2.

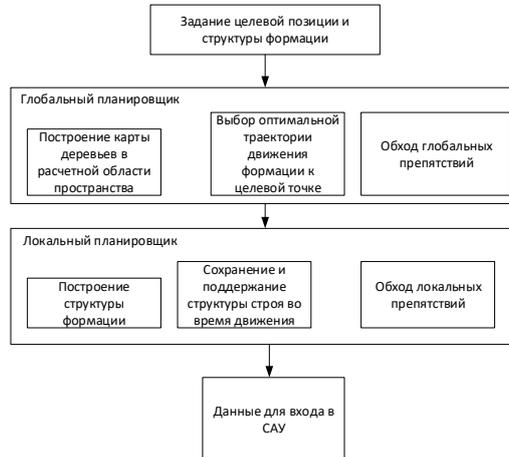


Рис. 2. Схема разрабатываемого алгоритма двухуровневого планирования

Как показано на схеме, предлагаемый алгоритм имеет несколько систем (уровней) планирования. На уровне глобального планирования в предполагаемой области пространства, формируется структура случайных ветвей RRT метода, в результате чего система выдает минимальное допустимое значение траектории движения из всех предложенных, после чего подается необходимое воздействие на исполнительные механизмы МРТК. Формирование строя группы и позиций в группе МРТК, происходит на основе метода потенциальных полей, аналогично данный метод отвечает и за удержание структуры формации и безаварийности движения каждого отдельного МРТК.

Рассмотрим процесс разработки каждого уровня системы планирования отдельно.

Разработка системы локального планирования группы АНПА. Для конфигурации строя и сохранение структуры строя во время движения каждый из АНПА ($AUV(i)$) рассчитывает свое положение на основе матрицы размерностью $n \times m$ где $m=n=9$, что является коэффициентом области функционирования. Расстояние между объектами в строе примем как $d = 1$, пример сконфигурированной формации изображен на рис. 3.

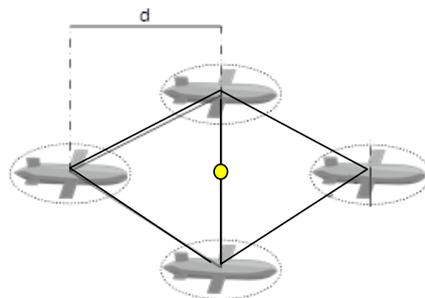


Рис. 3. Схема системы построения строя АНПА

На основании составленной матрицы формации можно получить двухмерный массив координат:

$$Coord_{form} = [x(i)_{form}, y(i)_{form}]. \quad (2)$$

На рисунке желтая точка O_{centr} – центр формации $O_{centr} = [x_{center}, y_{center}]$, рассчитанный как:

$$O_{centr} = \left[\frac{\sum_i^1 x_i}{i}, \frac{\sum_i^1 y_i}{i} \right], \quad (3)$$

где x_i, y_i – точки каждого из элементов формации.

Данная область строится относительно вектора стартовых координат $P_s = [x_{start}, y_{start}]$ заданных оператором в соответствии с выражением:

$$Coord_{form} = P_s + size(Am) * \frac{d}{2}. \quad (4)$$

Следует отметить, что формация также может быть сконфигурирована под определённым углом θ_{form} в качестве центра вращения выступает ранее рассчитанная точка O_{centr} .

Для вращения на заданный угол θ_{form} используется типичная матрица поворота M на плоскости XY относительно глобальной системы координат. После чего находятся точки формации на основании произведения матрицы M и матрицы начальных точек строя Am :

$$A_{form} = M * Am. \quad (5)$$

Полученные значения точек в A_{form} являются целевыми значениями координат для каждого АНПА. Для организации перемещения каждого $AUV(i)$ данное значение передается в систему планирования локальной траектории движения $AUV(i)$, на основе выражения:

$$F_{att} = \begin{cases} -0.4 * AUV - \frac{AUV}{D}, D_{att} > \varepsilon \\ 0, D_{att} < \varepsilon \end{cases}. \quad (6)$$

$$D_{att} = |AUV - P_f|. \quad (7)$$

Суть данного метода заключается в следующем. Движение объекта к цели осуществляется под действием притягивающей силы F_a , являющейся функцией координат АНПА и целевой точки. Точки препятствия, попавшие в зону действия сенсорной системы аппарата формируют отталкивающие виртуальные силы F_{ri} с равнодействующей F_r , являющейся функцией координат АНПА, его скорости и координат точек препятствий. Для каждого из АНПА сформирована притягивающая сила, зависящая от параметра $\varepsilon = 0.2$, который описывает радиус вхождения в окрестность целевой точки P_s и дистанции АНПА D_{att} до целевой точки P_f .

В свою очередь сила отталкивания, обеспечивающая безаварийное движение АНПА, формируется на основании данных об обнаруженных препятствиях и других элементах группы. Также следует отметить, что закон отталкивающей силы сформирован на основе экспоненциальной функции что увеличивает силу отталкивания при приближении АНПА к препятствию.

$$F_{rep_AUV} = \begin{cases} c * e^{(-\beta * D_{rep})} * \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{bmatrix}, D_{rep_near_AUV} > \varepsilon \\ 0, D_{rep_near_AUV} < \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

$$D_{rep_near_AUV} = \sqrt{(x_{AUV} - x_{near_AUV})^2 + (y_{AUV} - y_{near_AUV})^2} \quad (9)$$

$$D_{rep_near_obs} = \sqrt{(x_{AUV} - x_{near_obs})^2 + (y_{AUV} - y_{near_obs})^2}, \quad (10)$$

где β, c – коэффициенты настройки силы отталкивания, D_{rep} – дистанция АНПА до препятствия (или других агентов группы АНПА), γ – угол направления между АНПА и обнаруженным препятствием рассчитанный как $\gamma = atan2(y_{AUV} - y_{near_obs}, x_{AUV} - x_{near_obs})$.

Аналогичным образом рассчитывается силы отталкивания АНПА от обнаруженных препятствий F_{rep_obs} с учетом дистанции до препятствия $D_{rep_near_obs}$. Таким образом общая составляющая силы отталкивания F_{rep} находится как сумма всех сил отталкивания действующих на АНПА в процессе его движения.

$$F_{rep} = \sum_1^{i+n} F_{rep_AUV(i)} + F_{rep_obs(n)}, \quad (11)$$

где $i+n$ – общее количество АНПА и препятствий, входящих в области epsilon для каждого АНПА.

Таким образом общая сила, действующая на каждый АНПА из группы может быть записана как сумма общих сил притяжения и отталкивания с учетом угла ориентации аппарата.

$$F_{total} = F_{att} + F_{rep}. \quad (12)$$

Исходя из полученных уравнений 11 и 12, можно составить уравнения для движения каждого агента группы АНПА:

$$\dot{x} = F_{total(1)} * \cos(\varphi) - F_{total(2)} * \sin(\varphi) \quad (13)$$

$$\dot{y} = F_{total(1)} * \sin(\varphi) + F_{total(2)} * \cos(\varphi) \quad (14)$$

$$\dot{\varphi} = atan2(F_{total(2)}, F_{total(1)}) \quad (15)$$

Движение группы в целом происходит за счет получения новой целевой точки центра группы $O_{goal} = [x_{group_goal}, y_{group_goal}]$ и общей силы, притягивающей формацию как это описывается в выражении:

$$F_{att_group} \begin{cases} k_{group} * O_{centr} - \frac{O_{goal}}{D}, D_{group} > \varepsilon \\ 0, D_{group} < \varepsilon \end{cases} \quad (16)$$

$$D_{group} = |O_{centr} - O_{goal}| \quad (17)$$

$$\theta_{group} = atan2(O_{centr}^{-1} - O_{goal}^{-1}) \quad (18)$$

Параллельно с этим, на основании выражений 13-15 происходит пересчет целевых точек в формации для каждого из АНПА, после чего полученные параметры новых значений $x_{aUV_target}; y_{aUV_target}; \theta_{aUV_target}$ передаются в систему управления АНПА. Процесс построения группы и движения группы в целевую точку [30;20] приводится на рис. 4.

Как известно, градиентные методы имеют существенную проблему, связанную с попаданием системы планирования в области локальных минимумов, в виду чего могут образовываться ситуации связанные с невозможностью продолжения движения отдельных аппаратов из группы или группы в целом, пример изображен на рис. 5.

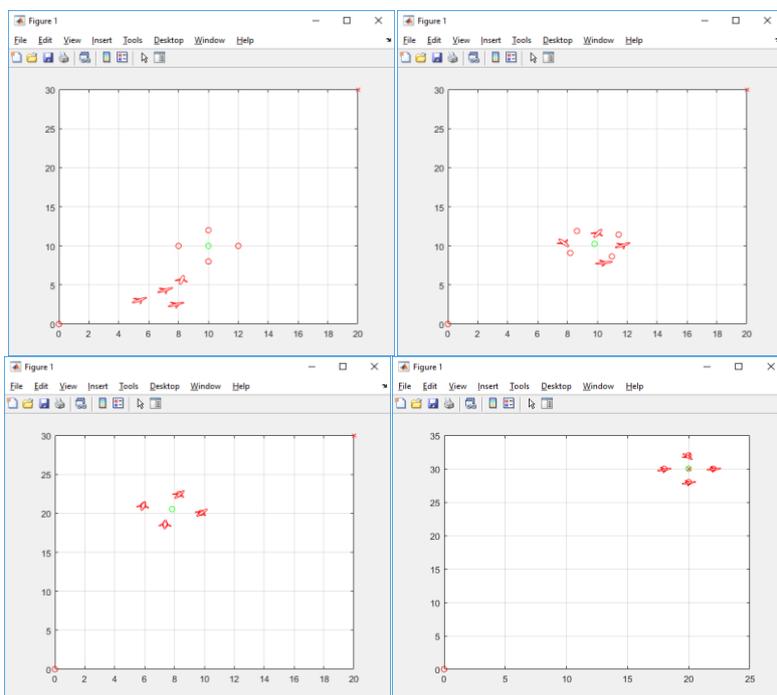


Рис. 4. Моделирование построения строя АНПА и его движение в целевую точку

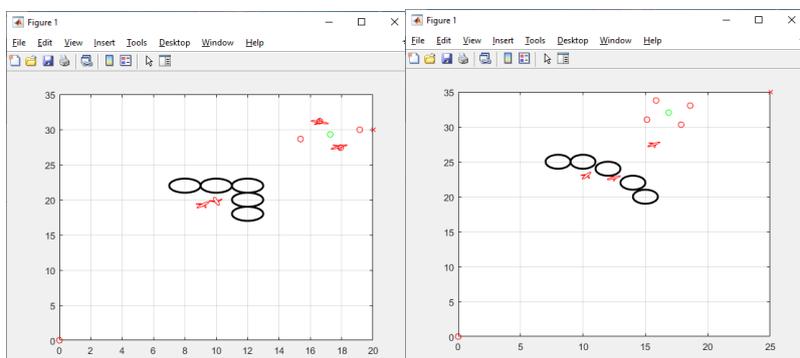


Рис. 5. Иллюстрирование проблемы локальных минимумов

Как видно из приведенных рисунков, подобная проблема в рамках функционирования группы АНПА может привести к потере структуры строя или повреждению одного, или нескольких аппаратов. В таком случае, является невозможным выполнение многих задач, поставленных перед группой.

Существует несколько способов решения данной проблемы [22], большинство из которых могут быть успешно применены к высокоманевренным аппаратам, в частности к БПЛА, но в виду конфигурации АНПА они обладают пониженной маневренностью и ходкостью по сравнению с воздушными аппаратами, такие методы сложно реализуемы в реальных условиях и требуют учёта в принимаемых архитектурно-конструкционных решениях непосредственно по АНПА.

Для оптимизации решения этой проблемы авторами предлагается введение более высокого уровня планирования глобальной траектории.

Разработка системы глобального планирования. Исходя из постановки задачи, основная цель группы АНПА переместиться из начальной точки пространства R в конечную точку. Система глобального планирования основана на модификации алгоритма RRT^x , рассмотренный в работе [23]. В результате применения этого метода строится карта ветвей случайного дерева, которая охватывает всю исследуемую область. Данный процесс не занимает много времени и может быть произведен во время предпусковых работ. Блок-схема работы алгоритма планирования верхнего уровня представлена на рис. 6.

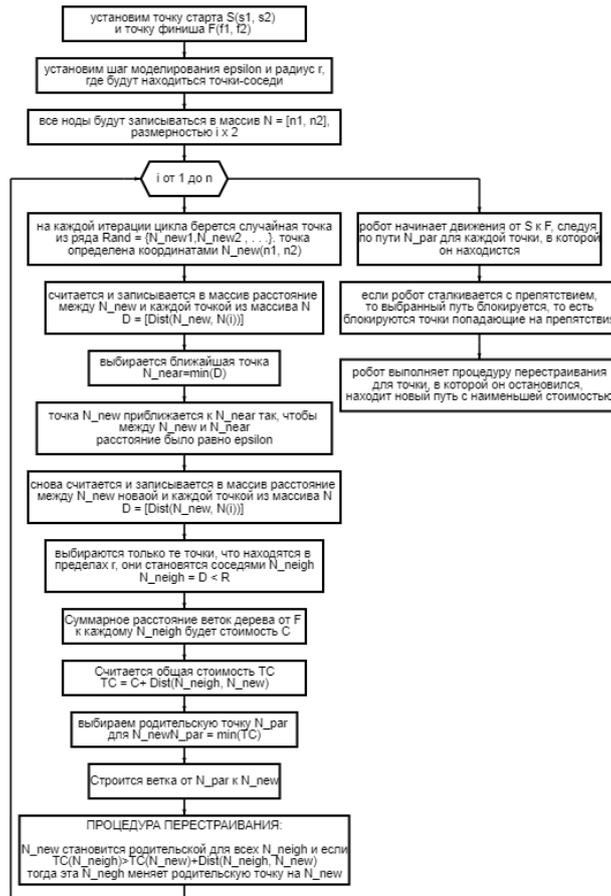


Рис. 6. Схема системы планирования верхнего уровня

В качестве входных параметров для работы алгоритма используются: R – размер области функционирования; P_s – точка старта группы; P_f – точка финиша группы; ϵ – шаг моделирования; r – радиус в пределах области пространства G в которой будет производится поиск соседних узлов дерева.

Сформируем множество случайных точек:

$$A_{rand} = \{N_{rand\ i1}, N_{rand\ i2}, \dots, N_{rand\ in}\}, i = 1..n, \quad (19)$$

где n – количество итераций цикла (плотность построенных точек в пространстве функционирования группы R), $N_{rand\ i1}$ – случайная точка с координатами $[x_{rand}, y_{rand}]$.

Множество точек всего дерева, построенных во время работы, обозначим как

$$T_{tree} = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{in}\}, i = 1..n, \quad (20)$$

где $T_{i1} = [x_{Ti}, y_{Ti}]$ – i точка из массива T_{tree} .

Вычислим массив дистанций D от каждой точки $N_{rand\ i1} \in A_{rand}$ до каждой точки $T_{i1} \in T_{tree}$

$$D = |N_{rand\ i1} - T_{i1}| \quad (21)$$

$$Dist = [D, id],$$

где id – номер соответствующей точки.

Из полученных значений $Dist$ находится минимальное и присваивается соответствующий id для ближайшей точки N_{near}

$$N_{near\ i} = \min(Dist). \quad (22)$$

В результате получаем координаты $N_{near} = [x_{near}, y_{near}]$ и вычисляется перемещение точки N_{rand} на величину ϵr_s к точке N_{near} с учетом следующего условия

$$T_{i1} = N_{near\ i} + (-1) * e * \frac{N_{near\ i} - N_{rand\ i1}}{Dist}. \quad (23)$$

Полученные координаты точки $T(i)$ также являются новой точкой для расширения ветвей дерева $T_{i1} = N_{new}$.

Для точки N_{new} рассчитаем дистанцию до всех остальных точек из массива T_{tree}

$$D^* = |N_{new} - T_{i1}| \quad (24)$$

Для построения минимальной траектории пути в регионе рассчитанной точки N_{new} введем круглую область пространства G радиусом r с центром в точке N_{new} . Выберем массив точек N_{neigh} , которые удовлетворяют условию

$$N_{neigh} = T_{tree\ i}, T_{tree\ i} \in G. \quad (25)$$

Получив массив точек N_{neigh} определим общую стоимость перехода K_{total} между точками из массива N_{neigh} до точки финиша P_f как

$$K_{total} = K + D^* \quad (26)$$

где K – количество переходов до точки N_{near} .

Полученный результат позволяет сформировать массив точек N_{par} , которые описывают вершины веток деревьев используемых в построении траектории в целом, на основе выбора минимальных значений из K_{total}

$$N_{par} = \min(K_{total}). \quad (27)$$

После чего строится новая ветвь дерева T_{tree} от точки N_{new} к точке N_{par} .

На заключительной стадии алгоритма происходит процесс перестроения дерева, с целью оптимизации построенной траектории. Для этого рассчитаем значения стоимости перехода $K_{total\ neigh}$ по отношению к каждой точке массива N_{neigh} с условием того, что данный массив будет заканчиваться в точке N_{new} .

$$K_{total\ neigh} = K_{total\ new} + D^*. \quad (28)$$

Сравним затраченную стоимость перехода если $K > K_{total\ neigh}$ то строим соответствующую ветвь дерева и удаляем предыдущую, если $K < K_{total\ neigh}$ то оставляем все без изменений.

Заканчивая процесс перестроения ветвей дерева, с учетом прохождения всех итераций алгоритма, группа АНПА начинает перемещение по полученной траектории.

В случае возникновения препятствий алгоритм повторяет процедуру перестроения для точки, в которой он обнаружил препятствие, таким образом находясь самый оптимальный путь в рамках построенного дерева.

Схематичный процесс основных этапов выполнения алгоритма и процесса перестроения ветвей дерева в случае обнаружения глобального препятствия представлен на рис. 7 и 8.

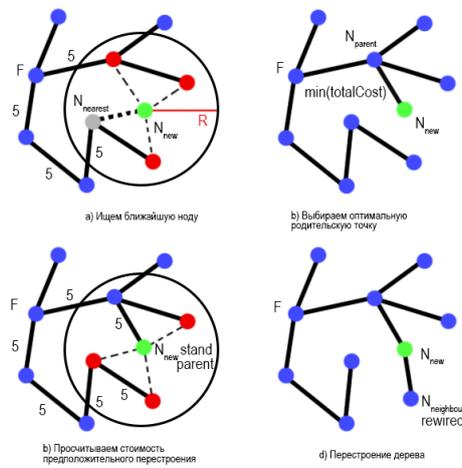


Рис. 7. Визуализация процесса перестроения ветвей

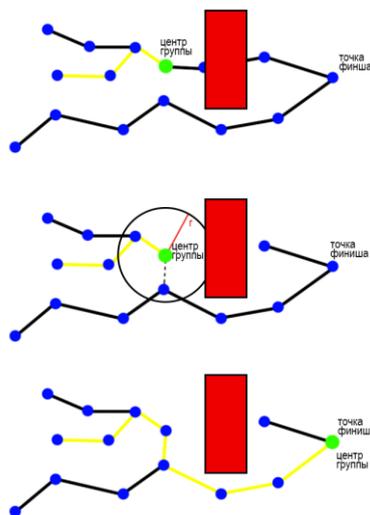


Рис. 8. Визуализация процесса перестроения ветвей в случае обнаружения препятствия

Рассмотрим процесс моделирования движения группы АНПА (в данном случае под структурой группы рассматривается область, выделенная красным пунктирным кругом, которая также является радиусом восприятия системы технического зрения на основе активной гидролокации), изображенный на рис. 9.

С начала алгоритм заполняет область пространства R ветвями дерева на данном этапе система планирования ничего не знает об окружающей среде.

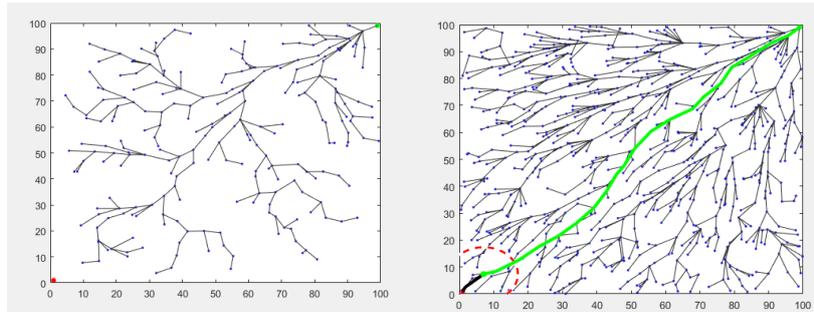
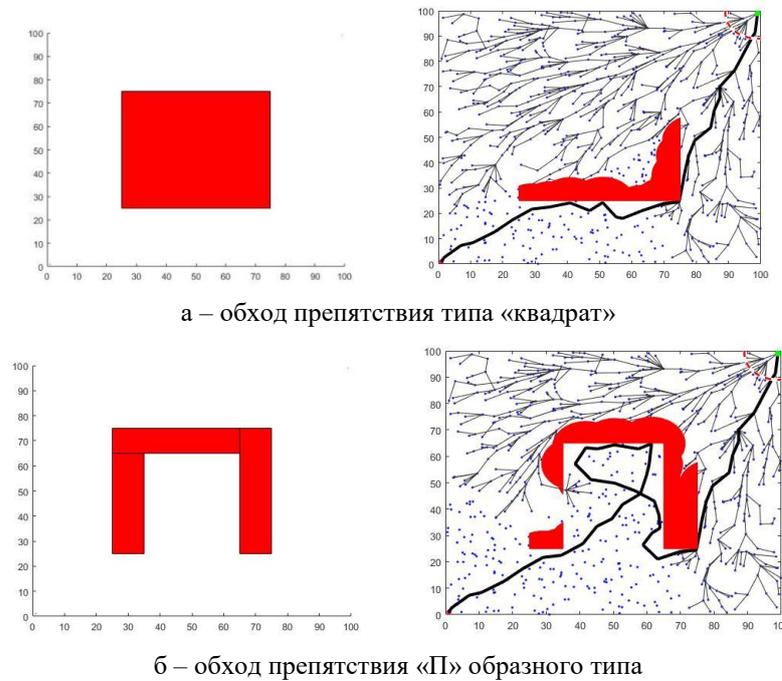
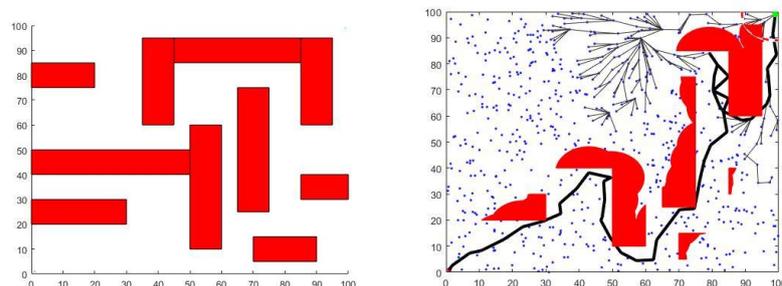


Рис. 9. Первый этап моделирования. Процесс построения ветвей дерева и начало движения по выбранной траектории

На следующем этапе работы алгоритма осуществляется перемещение группы АНПА по выбранной траектории. Конфигурация формы препятствий была выбрана таким образом, чтобы исследовать работоспособность разработанного алгоритма, как при условии препятствий легкой структуры, так и в условиях препятствий сложной формы, в которых система локального планирования попадала бы в условия локального минимума.

Формы препятствий и траектории движения группы АНПА, с учетом их обхода представлены на рис. 10.





в – выход группы в целевую точку из области сложной конфигурации

Рис. 10. Пример работоспособности алгоритма в условиях неизвестной среды в режиме реального времени с препятствиями различной сложности

Разработанная система локального планирования была успешно апробирована в ходе испытаний, проведенных в октябре 2020 года. Модуль локального планирования был интегрирован в программное обеспечение системы планирования подводного глайдера «Тень». Пример планирования миссии представлен на рис. 11.

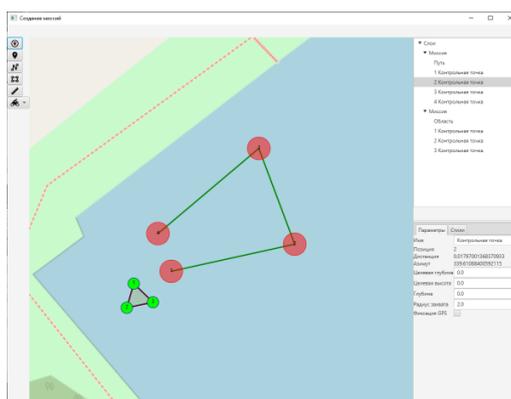


Рис. 11. Создание миссии

На рис. 11 зелеными точками обозначены координаты элементов группы. Красными точками выделены целевые позиции, в которые должна была прийти группа с учетом сохранения сконфигурированного строя. В виду погрешности системы GPS радиус входа в целевую точку задан как 2 м. В качестве объектов группы были выбраны безэкипажные катера (БЭК). Изображенные на рис. 12.



Рис. 12. Группа БЭК

Результаты движения группы БЭК представлены на рис. 13. Общая длина пройденной дистанции 62 м, время прохождения 60 сек, средняя скорость 1 м/с.

Как видно из приведенных иллюстраций и алгоритм продемонстрировал устойчивую работу во время движения группы БЭК. Группа прошла все целевые точки с сохранением структуры заданного строя. Траектория движения как это отображено на рис. 13 более сглаженная в виду особенностей разрабатываемого алгоритма.



Рис. 13. Натурные испытания движения группы БЭК

Заключение. В работе рассмотрен процесс разработки многоуровневого принципа планирования движения группы АНПА в среде с препятствиями.

Система глобального планирования МРТК осуществляет построение целевой траектории движения группы путем заполнения общей карты пространства расчетными ветвями деревьев, что позволяет планировщику осуществлять перестроения траектории движения группы АНПА в режиме реального времени на основе данных получаемых от системы технического зрения на базе активной гидролокации АНПА. Система планирования нижнего уровня отвечает за формирование и поддержание строя АНПА во время движения и за возможный обход локальных препятствий единичными АНПА.

В совокупности разработанный метод планирования применим в режиме реального времени, также он позволяет организовать перемещение группы МРТК в условиях сложных сред с препятствиями и обеспечить сохранение структуры строя и ее мобильное перестроение в случае необходимости.

В рамках дальнейших работ предполагается доработка сопряженного процесса работы двух систем планирования, предложенных в данной статье, оптимизации алгоритма по критериям скорости работы планирования, оптимальности построения маршрутов (сглаживание полученных траекторий, для того чтобы САУ АНПА могла их отработать) и вычислительных затрат. Также планируется исследование работоспособности предложенного метода планирования в трехмерной среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Занин В.Ю., Кожемякин И.В., Маевский А.М.* Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии. Отечественный и зарубежный опыт // Морские информационно-управляющие системы. – 2020. – № 1 (17). – С. 39-49.
2. *Маевский А.М., Копылов С.А.* Аспекты использования группировки подводных глайдеров для экологического мониторинга мирового океана // Матер. всероссийской конференции и школы молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности». – Таганрог: ЮФУ, 2014. – С. 11-12.
3. *Волошин С.Б., Занин В.Ю. Маевский А.М. и др.* Аспекты применения гетерогенных групп робототехнических комплексов повышенной автономности, в том числе из состава обсерваторий, с целью получения океанографических данных и их дальнейшего использования для освоения Арктической зоны // Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2020 года. – М.: Министерство энергетики Российской Федерации, ООО «Технодевелоп», 2020. – С. 62-77.
4. *Гайкович Б.А.* Разработка модульноунифицированного семейства подводных глайдеров. Новый оборонный заказ. 2017, 05.
5. *Гайкович Б.А.* Подводные глайдеры-роботы для исследования и мониторинга арктических акваторий // Корабел.ру. – 2015. – № 4 (30). – С. 126-12.
6. *Гайкович Б.А., Занин В.Ю.* Вопросы создания семейства морских глайдеров как элементов глобальной системы морской безопасности // Матер. 9 научнопрактической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2014. – С. 211-218.
7. *Devitt D., Morozov R., Medvedev M., Shapovalov I., Kononov G.* Implementation of the hybrid technology for quadcopter motion control in a complex non-deterministic environment // International Conference on Control, Automation and Systems. – 2018. – Vol. 18. – P. 451-456.
8. *Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhopov V., Morozov R.* Method of formation of quantitative indicators of complexity of the environment by a group of autonomous mobile robots // Journal of Robotics. – 2020. – Vol. 2020. – P. 6874291.
9. *Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А.* Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. – 2020. – № 4. – С. 31-41. – Doi: 10.31799/1684-8853-2020-4-31-41.
10. *Киселев Н.К., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В.* Математическая модель функционирования гибридной системы энергообеспечения в составе стенда отладки и сопровождения АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 170-187.
11. *Gaiduk A.R., Martjanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Hamdan N., Farhood A.* Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment // Mechatronics, Automation, Control. – 2020. – Vol. 21, No. 8. – P. 470-479.
12. *Пищухов В.Х., Медведев М.Ю., Пархоменко В.Б., Васильева М.А.* Исследование интеллектуальной системы управления автономного наземного робота с нейронной сетью глубокого обучения // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018): Матер. конференции. – 2018. – С. 176-182.
13. *Джунусов И.А., Фрадков А.Л.* Синхронизация в сетях линейных агентов с обратными связями по выходам // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 8. – С. 41-52.
14. *Тимофеев А.В.* Адаптивное управление и интеллектуальный анализ информационных потоков в компьютерных сетях. – М.: Анатолия, 2012. – 280 с.
15. *Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А.* Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2001. – 32 с.
16. *Богуславский А.А., Боровин Г.К., Карташев В.А., Павловский В.Е., Соколов С.М.* Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2019. – 228 с. – <https://doi.org/10.20948/mono-2019-boguslav>.
17. *Пищухов В.Х., Медведев М.Ю.* Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Тр. СПИИРАН. – 2018. – № 5 (60). – С. 39-63.

18. *Маевский А.М., Гайкович Б. А.* Разработка легкого интервенционного ав-тономного обитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во: ЮФУ, 2019. – С. 83-98.
19. *Schultz B. & Hobson B. & Kemp, Mathieu & Meyer J. & Moody R. & Pinnix H. & Clair M.* Multi-UUV missions using RANGER MicroUUVs. – 2003.
20. *Shinzaki, Dylan & Gage, Chris & Tang, Sarah & Moline, Mark & Wolfe, Barrett & Lowe, Christopher & Clark, Christopher.* A multi-AUV system for cooperative tracking and following of leopard sharks // Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2013. – P. 4153-4158. – Doi: 10.1109/ICRA.2013.6631163.
21. *Leonard N.E., Paley D.A., Davis R.E., Fratantoni D.M., Lekien F. and Zhang F.* Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in Monterey Bay // J. Field Robotics. – 2010. – Vol. 27. – P. 718-740. – Doi: 10.1002/rob.20366.
22. *Белоглазов Д.А., Гайдук А.П., Косенко Е.Ю., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Соловьев В.В., Титов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О.* Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. – 305 с.
23. *RRTX: Asymptotically Optimal Single-Query Sampling-Based Motion Planning with Quick Replanning.* Michael Otte and Emilio Frazzoli // The International Journal of Robotics Research. – 2016. – Vol. 29, Issue 7. – P. 797-822.

REFERENCES

1. *Zanin V.Yu., Kozhemyakin I.V., Maevskiy A.M.* Ispol'zovanie morskoy robototekhniki v zadachakh operativnoy okeanografii. Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt [The use of marine robotics in operational oceanography tasks. Domestic and foreign experience], *Morskie informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Marine information and control systems], 2020, No. 1 (17), pp. 39-49.
2. *Maevskiy A.M., Kopylov S.A.* Aspekty ispol'zovaniya gruppirovki podvodnykh glyyderov dlya ekologicheskogo monitoringa mirovogo okeana [Aspects of using the grouping of underwater gliders for environmental monitoring of the world ocean], *Mater. vserossiyskoy konferentsii i shkoly molodykh uchennykh «Sistemy obespecheniya tekhnosfernoy bezopasnosti»* [Materials of the All-Russian conference and school of young scientists "Systems for ensuring Technosphere security"]. Taganrog: YuFU, 2014, pp. 11-12.
3. *Voloshin S.B., Zanin V.Yu. Maevskiy A.M. i dr.* Aspekty primeneniya geterogennykh grupp robototekhnicheskikh kompleksov povyshennoy avtonomnosti, v tom chisle iz sostava observatoriy, s tsel'yu polucheniya okeanograficheskikh dannykh i ikh dal'neyshego ispol'zovaniya dlya osvoeniya Arkticheskoy zony [Aspects of the application of heterogeneous groups of robotic complexes of increased autonomy, including from the composition of observatories, for the purpose of obtaining oceanographic data and their further use for the development of the Arctic zone], *Sb. rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitie i osvoenie Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2020 goda* [Collection of works of laureates of the International Competition of Scientific, Scientific-technical and Innovative Developments aimed at the development and development of the Arctic and Continental Shelf in 2020]. Moscow: Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii, OOO «Tekhnodevelop», 2020, pp. 62-77.
4. *Gaykovich B.A.* Razrabotka modul'nounifitsirovannogo semeystva podvodnykh glyyderov. Novyy oboronnyy zakaz. 2017, 05 [Development of a modularunified family of underwater gliders. A new defense order. 2017, 05].
5. *Gaykovich B.A.* Podvodnye glydery-roboty dlya issledovaniya i monitoringa arkticheskikh akvatoriy [Underwater gliders-robots for research and monitoring of Arctic waters], *Korabel.ru* [Korabel.ru], 2015, No. 4 (30), pp. 126-12.
6. *Gaykovich B.A., Zanin V.Yu.* Voprosy sozdaniya semeystva morskikh glyyderov kak elementov global'noy sistemy morskoy bezopasnosti [Issues of creating a family of marine gliders as elements of the global maritime security system], *Mater. 9 nauchnoprakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the 9th scientific and practical conference "Perspective systems and management tasks"], 2014, pp. 211-218.

7. Devitt D., Morozov R., Medvedev M., Shapovalov I., Konovalov G. Implementation of the hybrid technology for quadcopter motion control in a complex non-deterministic environment, *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2018, Vol. 18, pp. 451-456.
8. Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhopov V., Morozov R. Method of formation of quantitative indicators of complexity of the environment by a group of autonomous mobile robots, *Journal of Robotics*, 2020, Vol. 2020, pp. 6874291.
9. Martynova L.A., Kiselev N.K., Myslivyy A.A. Metod vybora arkhitektury mul'tiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Method of selecting the architecture of a multi-agent control system of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2020, No. 4, pp. 31-41. Doi: 10.31799/1684-8853-2020-4-31-41.
10. Kiselev N.K., Martynova L.A., Pashkevich I.V. Matematicheskaya model' funktsionirovaniya gibridnoy sistemy energoobespecheniya v sostave stenda otladki i soprovozhdeniya ANPA [Mathematical model of the functioning of a hybrid power supply system as part of the ANPA debugging and maintenance stan], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1, pp. 170- 187.
11. Gaiduk A.R., Martjanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Hamdan N., Farhood A. Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment, *Mechatronics, Automation, Control*, 2020, Vol. 21, No. 8, pp. 470-479.
12. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Parkhomenko V.B., Vasil'eva M.A. Issledovanie intellektual'noy sistemy upravleniya avtonomnogo nazemnogo robota s neyronnoy set'yu glubokogo obucheniya [Research of the intelligent control system of an autonomous ground robot with a neural network of deep learning], *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2018): Mater. konferentsii* [Information technologies in management (ITU-2018): Materials of the conference], 2018, pp. 176-182.
13. Dzhunusov I.A., Fradkov A.L. Sinkhronizatsiya v setyakh lineynykh agentov s obratnymi svyaziyami po vykhodam [Synchronization in networks of linear agents with feedback on outputs], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2011, No. 8, pp. 41-52.
14. Timofeev A.V. Adaptivnoe upravlenie i intellektual'nyy analiz informatsionnykh potokov v komp'yuternykh setyakh [Adaptive management and intelligent analysis of information flows in computer networks]. Moscow: Anatoliya, 2012, 280 p.
15. Platonov A.K., Kiril'chenko A.A., Kolganov M.A. Metod potentsialov v zadache vybora puti: istoriya i perspektivy [The method of potentials in the problem of choosing a path: history and prospects]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2001, 32 p.
16. Boguslavskiy A.A., Borovin G.K., Kartashev V.A., Pavlovskiy V.E., Sokolov S.M. Modeli i algoritmy dlya intellektual'nykh sistem upravleniya [Models and algorithms for intelligent control systems]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2019, 228 p. Available at: <https://doi.org/10.20948/mono-2019-boguslav>.
17. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nykh robotov v neopredelennoy srede s ispol'zovaniem neustoychivyykh rezhimov [Group control of the movement of mobile robots in an uncertain environment using unstable modes], *Tr. SPIIRAN* [Works of SPIIRAS], 2018, No. 5 (60), pp. 39-63.
18. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. Razrabotka legkogo interventsionnogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v tselyakh ispol'zovaniya v podvodnykh rezidentnykh sistemakh [Development of a light interventional autonomous uninhabited underwater vehicle for use in underwater resident systems], *Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference and the X Youth School-seminar "Information Management and Processing in Technical systems"]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo: YuFU, 2019, pp. 83-98.
19. Schultz B. & Hobson B. & Kemp, Mathieu & Meyer J. & Moody R. & Pinnix H. & Clair M.. Multi-UUV missions using RANGER MicroUUVs, 2003.
20. Shinzaki, Dylan & Gage, Chris & Tang, Sarah & Moline, Mark & Wolfe, Barrett & Lowe, Christopher & Clark, Christopher. A multi-AUV system for cooperative tracking and following of leopard sharks, *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 4153-4158. Doi: 10.1109/ICRA.2013.6631163.

21. Leonard N.E., Paley D.A., Davis R.E., Fratantoni D.M., Lekien F. and Zhang F. Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in Monterey Bay, *J. Field Robotics*, 2010, Vol. 27, pp. 718-740. Doi: 10.1002/rob.20366.
22. Beloglazov D.A., Gayduk A.R., Kosenko E.Yu., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Solov'ev V.V., Titov A.E., Finaev V.I., Shapovalov I.O. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami v neopredelennykh sredakh [Group control of mobile objects in indeterminate environments], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2015, 305 p.
23. RRTX: Asymptotically Optimal Single-Query Sampling-Based Motion Planning with Quick Replanning. Michael Otte and Emilio Frazzoli, *The International Journal of Robotics Research*, 2016, Vol. 29, Issue 7, pp. 797-822.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н. Л.А. Мартынова.

Маевский Андрей Михайлович – АО НПП ПТ «Океанос»; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; Санкт-Петербург, Россия; м.н.с.; аспирант ЮФУ.

Морозов Роман Олегович – e-mail: morozov.r.o.23@yandex.ru; м.н.с.; аспирант ЮФУ.

Горелый Артем Евгеньевич – e-mail: gorelyj1409@gmail.com; магистрант БГТУ «Военмех»; инженер по робототехнике.

Рыжов Владимир Александрович – СПбГМТУ; e-mail: ryzhov@smtu.ru; Санкт-Петербург, Россия; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Maevsky Andrey Mikhailovich – “Oceanos” JSC; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; junior researcher; post-graduate student of SFedU.

Morozov Roman Olegovich – e-mail: morozov.r.o.23@yandex.ru; junior researcher; post-graduate student of SFedU.

Gorely Artem Evgenievich – e-mail: gorelyj1409@gmail.com; master's student of BSTU "Voenmeh"; robotics engineer.

Ryzhov Vladimir Alexandrovich – SMTU; e-mail: ryzhov@smtu.ru; Saint Petersburg, Russia; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-47-59

А.И. Наговицин, Б.Б. Молоткова

ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НАЗЕМНЫХ РТК ВН СРЕДСТВАМ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОРАЖЕНИЯ (ПОДАВЛЕНИЯ) ПРОТИВНИКА

Проведен анализ уязвимых систем и элементов типового робототехнического комплекса. Сделан вывод о том, что наибольшую опасность представляют уязвимости каналов управления РТК ВН от средств радиоэлектронного подавления. Приведены классификация основных угроз для каналов управления РТК, а также результаты анализа возможных эффектов от воздействия описанных выше угроз на каждый из каналов. Проведена оценка эффективности канала радиопередачи при использовании станций активных маскирующих помех (САП), а также оценка эффективности функционирования канала передачи данных при применении САП. На основе оценки эффективности канала радиопередачи и канала передачи данных при применении противником станций активных маскирующих помех определена возможная зона эффективного управления, представляющая собой окружность различного радиуса с центром в точке расположения ПУ. С учетом общих технических требований к видам вооружения и военной техники сформулированы основные оперативно-тактические требования к системе противодействия РТК ВН в части радиоэлектронной защиты такие как электромагнитная совместимость (ЭМС), помехозащищенность и помехоустойчивость, радиотехническая маскировка радиоэлектронных средств (РЭС), зашпице-

ность РЭС от радиоэлектронного противодействия противника, защищенность РЭС от электромагнитных и ионизирующих излучений ядерного взрыва, снижение эффективности радиоэлектронной разведки противника, защищенность компьютерных средств ППДУ и образцов НРТС ВН от деструктивных информационных воздействий и другие. Определены требования к РЭС ППДУ и образцов НРТК ВН по ограничению плотности потока мощности электромагнитного поля, создаваемого излучением гетеродина приемопередающего устройства в целях исключения распознавания аппаратурой непосредственной разведки (обнаружения) средств РЭП и СНО противника. В заключении сформулирован вывод о том, что предложенный перечень оперативно-тактических требований к системе противодействия РТК ВН средствам радиоэлектронного поражения (подавления) противника и рекомендации по ограничению плотности потока мощности электромагнитного поля, создаваемого излучениями радиопередающих устройств систем управления НРТК ВН должны в полной мере учитываться при разработке и создании систем управления наземных робототехнических комплексов военного назначения. Кроме того, при разработке робототехнических комплексов военного назначения необходимо учитывать все возрастающие возможности перспективных средств радиоэлектронного поражения (подавления) противника.

Робототехнические комплексы военного назначения; оперативно-тактические требования; уязвимости каналов управления РТК ВН; радиоэлектронная защита; зона подавления; эффективное управление.

A.I. Nagovitsin, B.B. Molotkova

OPERATIONAL AND TACTICAL REQUIREMENTS FOR THE SYSTEM OF COUNTERING GROUND-BASED RTK VN MEANS OF ELECTRONIC DESTRUCTION (SUPPRESSION) OF THE ENEMY

The analysis of vulnerable systems and elements of a typical robotic complex is carried out. It is concluded that the greatest danger is represented by the vulnerabilities of the control channels of the RTK HV from the means of electronic suppression. The classification of the main threats for the RTK control channels, as well as the results of the analysis of possible effects from the impact of the threats described above on each of the channels are presented. The evaluation of the effectiveness of the radio control channel when using active masking interference stations (SAP) and the evaluation of the effectiveness of the data transmission channel when using SAP. Based on the evaluation of the effectiveness of the radio control channel and the data transmission channel when the enemy uses active masking interference (SAP) stations, a possible effective control zone is determined, which is a circle of different radii with the center at the location of the PU. Taking into account the general technical requirements for types of weapons and military equipment, the main operational and tactical requirements for the RTC VN counteraction system in terms of radio-electronic protection are formulated, such as electromagnetic compatibility(EMC), noise immunity and noise immunity, radio-technical masking of radio-electronic means (RES), protection of RES from enemy radio-electronic counteraction, protection of RES from electromagnetic and ionizing radiation of a nuclear explosion, reduction in the effectiveness of enemy radio-electronic reconnaissance, the security of computer means of PPDU and samples of NRTS VN from destructive information influences and others. Taking into account the general technical requirements for types of weapons and military equipment, the main operational and tactical requirements for the anti-RTK VN system in terms of electronic protection are formulated. The requirements for the RES of the PPDU and the samples of the NRTC of the HV for limiting the power flux density of the electromagnetic field created by the radiation of the heterodyne of the transceiver device in order to exclude the recognition by the equipment of direct reconnaissance (detection) of the enemy's REP and SNO means are defined. In conclusion, the conclusion is formulated that the proposed list of operational and tactical requirements for the system of countering the RTC VN means of electronic destruction (suppression) of the enemy and recommendations for limiting the power flux density of the electromagnetic field created by the radiation of radio transmitting devices of the control systems of the RTC VN should be fully taken into account when developing and creating control systems for ground-based robotic complexes for military use. In addition, when developing military robotic systems, it is necessary to take into account the ever-increasing capabilities of promising means of electronic destruction (suppression).

Military robotic systems; operational and tactical requirements; vulnerabilities of the control channels of the RTK VN; electronic protection; suppression zone; effective management.

Введение. На сегодняшний день исследованиями и разработками в области робототехнических комплексов (РТК) специального назначения занимаются порядка 900 научно-исследовательских организаций и предприятий промышленности из 50 технологически развитых стран. Интенсивные исследования в области создания специальных роботов проводятся в России, США, Великобритании, Германии, Франции, Израиле, Китае, Японии и Южной Корее [1, 2].

Широкий спектр потенциального применения робототехнических комплексов, специфика задач, решаемых в условиях боевого противостояния, накладывает на устройства военной робототехники требование способности работы в реальной обстановке при частичном или полном отсутствии исходной информации о среде функционирования и определяет повышенные требования к функциональным возможностям соответствующих систем управления [3–8]. Однако на сегодняшний день практически все робототехнические комплексы военного назначения и в особенности их системы управления по-прежнему остаются достаточно уязвимыми системами прежде всего от средств радиоэлектронной борьбы [9–12]. Поэтому разработка и внедрение в Вооруженные Силы робототехнических комплексов требует системного подхода и всестороннего военно-технического обоснования требований к их функционированию в условиях воздействия мощной группировки РЭБ противника [13–18].

Поэтому, одной из актуальных задач сегодняшнего дня, является задача определения перечня оперативно-тактических требований к системе противодействия РТК ВН средствам радиоэлектронного поражения (подавления) противника.

Постановка задачи. РТК ВН может быть представлен совокупностью достаточно уязвимых систем и элементов. Типовой робот состоит из следующих систем, состоящих из отдельных элементов:

- ◆ информационно-измерительная (сенсорная) система;
- ◆ управляющая система;
- ◆ система связи с человеком или другими роботами;
- ◆ исполнительная (моторная) система.

В зависимости от поражения тех или иных уязвимых элементов РТК ВН может потерять огневую мощь (способность вести разведку – для разведывательных РТК), подвижность или оба свойства одновременно, что приведет к потере боеспособности.

В качестве элементов сенсорной системы РТК обычно используются телевизионные и оптико-электронные устройства, лазерные и ультразвуковые дальномеры, тактильные и контактные датчики, датчики положения, тахометры, акселерометры, гироскопы, передатчики GPS и т.п. Повреждение данных элементов может привести к частичной или полной дезориентации РТК на местности, способности к точному наведению вооружения в цель и др.

Управляющая система служит для выработки закона управления приводами (двигателями) механизмов исполнительной системы на основе сигналов обратной связи от сенсорной системы, а также для организации общения робота с оператором. Обычно управляющая система реализуется на базе управляющих ЭВМ. Такие ЭВМ строятся в малогабаритном, транспортабельном исполнении и обладают повышенной надежностью. Вывод из строя данной ЭВМ может привести к потере возможности управлять вооружением (средствами разведки), передвижением РТК или к полной потере его боеспособности.

Система связи организует обмен информацией между роботом и оператором или другими роботами. Связь может осуществляться по оптоволоконному кабелю, по радио или на основе атмосферных оптических линий связи (АОЛС). Повреждение элементов, обеспечивающих связь с оператором, может привести к потере боеспособности РТК при отсутствии дублирующих каналов связи.

Исполнительная система, определяющая «моторику» робота, может включать приводы управления вооружением (средствами разведки), манипуляторы, двигатель, трансмиссию, ходовую часть (гусеничную или колесную), приводы управления движением робота и многое другое. Повреждение данных элементов может привести к потере огневой мощи, подвижности или других свойств РТК.

Особенностью расположения уязвимых элементов РТК, в отличие от обитаемых образцов ВВТ, является их компактное размещение.

Помимо перечисленных уязвимых элементов потеря боеспособности РТК ВН может быть достигнута выводом из строя оператора (операторов), осуществляющего управление роботом, который может находиться на расстоянии от 300 м до 1–1,5 км при управлении по радио или с применением АОЛС.

При этом наибольшую опасность представляют уязвимости каналов управления робототехническими комплексами от средств радиоэлектронного подавления [19, 20].

В связи с тем, что РТК ВН по степени защищенности сравнимы с легкобронированными образцами ВВТ [21] и вопросы противодействия которых, средствам огневого поражения противника достаточно хорошо изучены, необходимо сформулировать оперативно-тактические требования только к системе противодействия РТК ВН средствам радиоэлектронного поражения (подавления) противника.

В связи с тем, что РТК ВН по степени защищенности сравнимы с легкобронированными образцами ВВТ [21] и вопросы противодействия которых, средствам огневого поражения противника достаточно хорошо изучены, целесообразно рассмотреть оперативно-тактические требования к системе противодействия РТК ВН только средствам радиоэлектронного поражения (подавления) противника.

Предварительный анализ [22] существующих и перспективных способов противодействия с помощью радиоэлектронных средств на робототехнические комплексы разведки и огневой поддержки и их системы управления показывает, что основными объектами подавления (или поражения) рассматриваемого РТК могут быть:

- ◆ каналы радиоуправления РТК;
- ◆ каналы передачи данных с РТК оператору;
- ◆ другие информационные каналы (разведывательный канал, канал спутниковой навигационной системы и др.).

Следовательно основные угрозы для РТК и их систем могут представлять:

- ◆ станции маскирующих помех;
- ◆ станции имитирующих помех;
- ◆ средства функционального поражения.

В табл. 1 приведены результаты анализа возможных эффектов от воздействия описанных выше угроз на каждый из каналов.

Для выработки требований к системе противодействия РТК ВН необходимо оценить эффективность подавления различных каналов РТК, рассмотрим наиболее важные из них, характеристики которых известны - канала передачи данных с РТК на пункт управления (ПУ) и канала управления РТК.

Оценка эффективности канала радиоуправления при использовании станций активных маскирующих помех (САП). Известно [9, 12], что граница зон подавления и неподавления для рассматриваемой ситуации описывается выражением:

$$C^2 = \frac{D_{\text{непод}}^2}{D_{\text{п}}^2}, \quad (1)$$

где $D_{\text{непод}}$ – расстояние от управляемого РТК до пункта управления, при нахождении, в пределах которого управляемый объект может эффективно принимать команды управления в условиях радиоэлектронного противодействия (РЭП); $D_{\text{п}}$ – расстояние от станции помех до управляемого средства (объекта подавления).

Таблица 1

Возможные эффекты от использования средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ)

Виды используемых воздействий	Достижимый эффект при воздействии на каналы	
	Управления РТК с ПУ	Передачи данных с РТК оператору
Создание маскирующих помех	Сокращение зоны в пределах которой возможно эффективное управление РТК	Сокращение области, в пределах которой возможна передача данных, необходимых оператору для управления
Создание имитирующих помех	Нарушение управления РТК (даже при правильных командах оператора). Возможность увода РТК от объектов атаки (целей)	Передача оператору ложных данных (даже если разведывательной аппаратурой была выявлена истинная обстановка)
Использование средств функционального поражения	Невозможность управления РТК из-за вывода из строя системы управления	Затруднение управления РТК из-за отсутствия у оператора данных об обстановке (даже если она выявлена РТК)

Анализ показывает, что описываемая (1) зона надежного управления может иметь 3 различных вида. В нашем случае величина $C < 1$.

Можно показать, что при этом граница зоны подавления представляет собой окружность радиусом

$$R = \frac{C^2 D}{1 - C^2}, \quad (2)$$

центр которой размещен на линии САП – ПУ за пунктом управления на расстоянии от нее

$$\Delta D = \frac{C^2}{1 - C^2} D. \quad (3)$$

При некоторых упрощениях (без учета особенностей диаграмм направленностей антенных систем САП, приемной и передающей антенн канала управления РТК) можно считать, что

$$C^2 = \frac{P_c G_c}{P_n G_n} \frac{K_n}{\gamma_n K_f}, \quad (4)$$

Где P_c и P_n – соответственно мощности передатчиков сигналов управления и САП;

G_c и G_n – коэффициенты усиления их антенных систем;

K_n – коэффициент подавления канала управления;

γ_n – коэффициент, учитывающий разницу поляризаций сигнала управления и САП;

K_f – коэффициент, учитывающий разницу спектров сигнала управления и помех;

D – расстояние между САП и ПУ.

Будем считать, что спектр заградительной помехи перекрывает весь возможный диапазон рабочих частот канала радиоуправления

$$\Delta F_n = \Delta F_p = (800 - 600) \text{ МГц} = 200 \text{ МГц}. \quad (5)$$

Тогда значение коэффициента

$$K_{\uparrow} = \frac{\Delta F_c}{\Delta F_{\Pi}} = \frac{20}{200} = 0,1. \quad (6)$$

Коэффициент усиления антенны САП рассчитываем для типовых значений ширины ДНА в азимутальной и угломестных плоскостях

$$\theta_{0,5} = \varphi_{0,5} = 30^\circ.$$

В этом случае

$$G_{\Pi} = \frac{25000}{\theta_{0,5}\varphi_{0,5}} = \frac{25000}{30 \times 30} = 28. \quad (7)$$

Для $P_{\Pi}=1$ кВт и $\gamma_{\Pi}=0,5$ и исходных данных передатчика канала управления $P_c=5$ Вт и $G_c=10$ для $K_{\Pi} = 2$ получим :

$$C^2 = \frac{5 \times 10}{1000 \times 28} \times \frac{2}{0,5 \times 0,1} = 0,071; C=0,27.$$

Рассчитанные для этого случая значения величины R и ΔD для удалений САП от ПУ на 3;5;10 и 20 км представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зоны работы системы управления РТК для различных удалений постановщика помех

Удаление САП от ПУ, км	Радиус зоны работы системы управления, км	Смещение центра зоны работы системы управления относительно ПУ, км
3	0,9	0,22
5	1,5	0,38
10	2,9	0,75
20	5,8	1,5

Таким образом, требуемая зона эффективного управления, представляющая собой окружность радиусом 3 км с центром в точке расположения ПУ.

Видно, что при удалении САП на расстояние, меньше, чем 11–12 км, размер зоны эффективной работы системы управления (СУ) сокращается. Если САП находится в 3 км от ПУ, то реальная зона управления составляет всего 9 % от требуемой.

Оценка эффективности функционирования канала передачи данных при применении САП. Оценка эффективности подавления канала передачи данных с РТК на ПУ может быть определена аналогично предыдущему случаю.

Для САП с такими же параметрами, как и ранее, при $P_c = 5$ Вт, $\Delta F_c = 300$ МГц и использовании диапазона частот 2,6–4,2 ГГц, при допущении, что весь диапазон перекрывается 4 передатчиками помех, можно получить, что $C^2 = 0,15$, а $C = 0,39$.

Можно показать, что зона подавления (зона, при нахождении в пределах которой РТК, канал передачи данных от него будет подавлен) представляет собой всю территорию, за исключением круга радиусом R с центром в точке размещения ПУ (рис. 1).

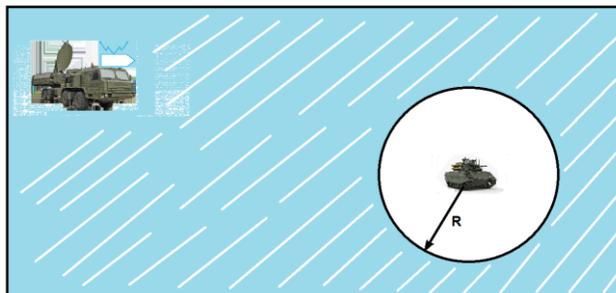


Рис. 1. Зона подавления САП

Радиус зоны неподавления определяется в этом случае выражением

$$R = CD.$$

Рассчитанные с учетом определенных выше значений C величины радиуса зоны неподавления для различных удалений САП от ПУ показаны в табл. 3.

Таблица 3

Размеры зон неподавления канала передачи данных

Удаление САП от ПУ, км	Радиус зоны неподавления канала передачи данных, км
3	1,2
5	2
10	3,9
20	7,8

Видно, что даже при достаточно удаленном расположении САП от ПУ (при $D \approx 7,7$ км) надежное управление РТК на дальности до 3 км от ПУ не обеспечивается, так как канал передачи данных, необходимый для управления РТК, будет подавлен.

С учетом изложенного и материалов представленных в [23, 24] сформулируем требования к системе противодействия РТК ВН в части радиоэлектронной защиты.

Радиоэлектронная защита РЭС установленных в ППДУ и на образцах НРТК ВН должна обеспечивать:

- ◆ **электромагнитную совместимость (ЭМС)** установленного в ППДУ и на образцах НРТК ВН всех классификационных группировок радиоэлектронного, электронного и электрооборудования при совместной одновременной их работе, а также между образцами НРТК ВН и образцами ВВТ взаимодействующих общевойсковых формирований в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 20.39.309-98 [25];
- ◆ **помехозащищенность и помехоустойчивость** РЭС НРТК ВН в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 20.39.309 и ГОСТ В 25232 [25, 26];
- ◆ **радиотехническую маскировку** РЭС при воздействии преднамеренных помех в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 20.39.308 [27];
- ◆ **защищенность РЭС от радиоэлектронного противодействия** противника в соответствии с требованиями ОТТ 1.1.3 [28];
- ◆ **защищенность РЭС от электромагнитных и ионизирующих излучений** ядерного взрыва и других электромагнитных излучений от внешних полей естественного и искусственного происхождения, в том числе устойчивость функционирования РЭС в условиях изменения среды распространения указанных излучений в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 20.39.302 и ГОСТ РВ 20.39.305 [29, 30];

- ♦ **снижение эффективности радиоэлектронной разведки противника** в соответствии с требованиями ОТТ 1.1.6 [31];

- ♦ **уровень напряжения промышленных помех в сети электропитания**, а также уровни напряженности электромагнитных полей радиопомех, создаваемые электрическими установками и другим оборудованием пункта управления (пультов управления) и образцов НРТК ВН, в соответствии с требованиями ГОСТ В 25803 [32];

- ♦ **уровень низкочастотных и высокочастотных помех**, создаваемых РЭС пункта управления (пультов управления) и образцов НРТК ВН, не должен превышать величин, установленных ГОСТ В 25803 и ГОСТ В 21999 [33];

- ♦ **защищенность компьютерных средств ППДУ и образцов НРТС ВН** от деструктивных информационных воздействий.

Кроме того, должен выполняться весь комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению **скрытности и устойчивости** функционирования РЭС ППДУ (ПДУ) и образцов НРТС ВН при воздействии средств радиоразведки противника в условиях радиоэлектронного противодействия противника.

В образцах НРТК ВН должны быть предусмотрены устройства, позволяющие осуществлять секторный режим работы передатчиков РЭС с шириной сектора от 30° до 60° в горизонтальной и вертикальной плоскостях, затрудняющие распознавание аппаратурой непосредственной разведки (обнаружения) средств РЭП и СНО противника, а также устройства ориентирования антенн передатчиков образцов на пункт управления (ретранслятор).

В РЭС ППДУ и образцов НРТК ВН должно обеспечиваться ограничение плотности потока мощности электромагнитного поля, создаваемого излучением гетеродина приемопередающего устройства через антенну, на уровне не более 10–16 Вт/м² на расстоянии до 1000 м при работе ее на всех рабочих частотах в целях затруднения распознавания аппаратурой непосредственной разведки (обнаружения) средств РЭП и СНО противника.

В РЭС НРТК ВН должно обеспечиваться ограничение плотности потока мощности электромагнитного поля, создаваемого излучениями радиопередающего устройства в полосе частот от 0.5 ф_р до 1.5 ф_р в режиме работы на эквивалент антенны и в паузах излучения полезного сигнала на уровне не более 10–16 Вт/м² на расстоянии до 1000 м в целях исключения распознавания аппаратурой непосредственной разведки (обнаружения) средств РЭП и СНО противника.

В РЭС НРТК ВН должно обеспечиваться ограничение плотности потока мощности электромагнитного поля, создаваемого излучениями радиопередающего устройства в полосе рабочих частот в режиме работы на эквивалент антенны и в паузах излучения полезного сигнала на уровне не более 10–16 Вт/м² на расстоянии до 1000 м в целях исключения распознавания аппаратурой непосредственной разведки (обнаружения) средств РЭП и СНО противника.

Заключение. Подводя итог вышеизложенному отметим, что предложенный перечень оперативно-тактических требований к системе противодействия РТК ВН средствам радиоэлектронного поражения (подавления) противника и рекомендации по ограничению плотности потока мощности электромагнитного поля, создаваемого излучениями радиопередающих устройств систем управления НРТК ВН должны в полной мере учитываться при разработке и создании систем управления наземных робототехнических комплексов военного назначения.

Кроме того, при разработке робототехнических комплексов военного назначения необходимо учитывать все возрастающие возможности перспективных средств радиоэлектронного поражения (подавления) противника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чиров Д.С., Новак К.В.* Перспективные направления развития робототехнических комплексов специального назначения // Вопросы безопасности. – 2018. – № 2. – С. 50-59.
2. *Никитин В.Н., Любарчук Ф.Н., Кузьмов Е.В.* [и др.] Беспилотные летательные аппараты вооруженных сил мира. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2019622386, 17.12.2019. Заявка № 2019622342 от 10.12.2019.
3. *Анисимов В.Г., Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М.* Оптимизация внедрения новых технологий в перспективные образцы артиллерийского вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2012. – № 4 (74). – С. 39-44.
4. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А.* [и др.]. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств // Тр. Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – № 648. – С. 6-12.
5. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Бажин Д.А.* [и др.]. Модель оценки эффективности информационного обеспечения применения высокоточного оружия в контртеррористических операциях // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 1-2 (79-80). – С. 44-53.
6. *Анисимов В.Г., Ведерников Ю.В.* [и др.]. Научно-методическое сопровождение интеграции высокотехнологичных инноваций в процессы разработки высокоточного оружия // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 3-4 (69-70). – С. 66-75.
7. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гарькушев А.Ю., Проценко Д.С.* Модель и метод оптимизации плана подготовки космических систем // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2015. – № 4 (89). – С. 34-39.
8. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* [и др.]. Пространственно-временной закон поражения и его применение для оценивания ущерба объектам // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. Четвертой Всероссийской научно-практической конференции. – 2001. – С. 342-346.
9. *Алексеев О.Г.* [и др.]. Модели распределения средств поражения в динамике боя. – Л.: Министерство обороны СССР, 1989. – 109 с.
10. *Бобриков А.А., Авотынь Б.А.* [и др.]. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии. – СПб.: Академия военных наук, Санкт-Петербургское региональное отделение, 2006. – 421 с.
11. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Герцев В.Н.* Оценивание эффективности системы ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии // Военная мысль. – 2001. – № 4. – С. 39-46.
12. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Белов А.С., Трахинин Е.Л.* Моделирование возможных последствий внешних информационных воздействий на распределенную сеть связи // Телекоммуникации. – 2020. – № 12. – С. 32-38.
13. *Дормидонтов А.А., Анисимов В.Г., Чубасов В.А.* Устройство для расчета оценивания живучести проектируемых, модернизируемых противотанковых наземных робототехнических комплексов. Патент на полезную модель RU 195893 U1, 07.02.2020. Заявка № 2019128846 от 13.09.2019.
14. *Зегжда П.Д.* [и др.]. Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2018. – № 1. – С. 43-47.
15. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* [и др.]. Показатели эффективности защиты информации в системе информационного взаимодействия при управлении сложными распределенными организационными объектами // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2016. – № 4. – С. 140-145.
16. *Зегжда П.Д., Супрун А.Ф.* [и др.]. Методический подход к построению моделей прогнозирования показателей свойств систем информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – № 4. – С. 45-49.
17. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Гречишников Е.В., Белов А.С.* [и др.]. Способ моделирования и оценивания эффективности процессов управления и связи. Патент на изобретение RU 2673014 C1, 21.11.2018. Заявка № 2018103844 от 31.01.2018.

18. Зегжда П.Д. [и др.]. Модель оптимального комплексирования мероприятий обеспечения информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2020. – № 2. – С. 9-15.
19. Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Белов А.С., Скубьев А.В. Эффективность обеспечения живучести подсистемы управления сложной организационно-технической системы // Телекоммуникации. – 2020. – № 11. – С. 41-47.
20. Гонтарь Д.Н., Шибанов В.Е., Петрунин Д.В. Определение и анализ уязвимостей робототехнических комплексов военного назначения // Альманах мировой науки. – 2018. – № 6 (26). – С. 17-19.
21. Наговицин А.И., Молоткова Б.Б. Робототехнические комплексы военного назначения, перспективы их применения в РВ и А ВС РФ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1 (186). – С. 6-19.
22. Барабанов М.С., Денисенцев С.А. [и др.]. Радиоэлектронная борьба. От экспериментов прошлого до решающего фронта будущего. – М.: Центр анализа стратегий и технологий, 2015. – 248 с.
23. Система общих технических требований к видам вооружения и военной техники. Наземные робототехнические комплексы военного назначения. – М.: ФБГУ "3 ЦНИИ" МО РФ, 2015.
24. Подтелкина О.А. Средства противодействия робототехническим комплексам // Вестник науки и образования. – 2019. – № 8 (62). – Ч. 2. – С. 12-14.
25. ГОСТ РВ 20.39.309-98 Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Конструктивно-технические требования.
26. ГОСТ В 25232-82 Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Порядок обеспечения электромагнитной совместимости.
27. ГОСТ РВ 20.39.308-98.
28. ОТТ 1.1.3-94.
29. ГОСТ РВ 20.39.302-98 Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к программам обеспечения надежности и стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений.
30. ГОСТ РВ 20.39.305-98.
31. ОТТ 1.1.6-2000, часть 1.
32. ГОСТ В 25803-91.
33. ГОСТ В 21999-86 Система электроснабжения военных гусеничных машин. Нормы качества электрической энергии и методы контроля.

REFERENCES

1. Chirov D.S., Novak K.V. Perspektivnye napravleniya razvitiya robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya [Promising areas of development of special-purpose robotic systems], *Voprosy bezopasnosti* [Security issues], 2018, No. 2, pp. 50-59.
2. Nikitin V.N., Lyubarchuk F.N., Kuz'mov E.V. [i dr.]. Bepilotnye letatel'nye apparaty vooruzhennykh sil mira. Svidetel'stvo o registratsii bazy dannykh RU 2019622386, 17.12.2019. Zayavka № 2019622342 ot 10.12.2019 [Unmanned aerial vehicles of the armed forces of the world. Certificate of registration of the database RU 2019622386, 17.12.2019. Application no. 2019622342 dated 10.12.2019].
3. Anisimov V.G., Gar'kushev A.Yu., Sazykin A.M. Optimizatsiya vnedreniya novykh tekhnologiy v perspektivnye obraztsy artilleriyskogo vooruzheniya [Optimization of the introduction of new technologies in advanced models of artillery weapons], *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of rocket and artillery Sciences], 2012, No. 4 (74), pp. 39-44.
4. Anisimov V.G., Anisimov E.G., Bazhin D.A. [i dr.]. Modeli organizatsii i provedeniya ispytaniy elementov sistemy informatsionnogo obespecheniya primeneniya vysokotochnykh sredstv [Models of organization and testing of elements of the information support system for the use of high-precision tools], *Tr. Voенно-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky], 2015, No. 648, pp. 6-12.

5. *Anisimov V.G., Anisimov E.G., Bazhin D.A. [i dr.]. Model' otsenki effektivnosti informatsionnogo obespecheniya primeneniya vysokotochnogo oruzhiya v kontrterroristicheskikh operatsiyakh* [A model for evaluating the effectiveness of information support for the use of high-precision weapons in counter-terrorism operations], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism], 2015, No. 1-2 (79-80), pp. 44-53.
6. *Anisimov V.G., Vedernikov Yu.V. [i dr.]. Nauchno-metodicheskoe soprovozhdenie integratsii vysokotekhnologichnykh innovatsiy v protsessy razrabotki vysokotochnogo oruzhiya* [Scientific and methodological support for the integration of high-tech innovations in the development of high-precision weapons], *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense equipment. Series 16: Technical means of countering terrorism], 2014, No. 3-4 (69-70), pp. 66-75.
7. *Anisimov V.G., Anisimov E.G., Gar'kushev A.Yu., Protsenko D.S. Model' i metod optimizatsii plana podgotovki kosmicheskikh sistem* [Model and method of optimization of the plan of preparation of space systems], *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of rocket and artillery Sciences], 2015, No. 4 (89), pp. 34-39.
8. *Anisimov V.G., Anisimov E.G. [i dr.]. Prostranstvenno-vremennoy zakon porazheniya i ego primeneniye dlya otsenivaniya ushcherba ob"ektam* [Spatio-temporal law of destruction and its application for assessing damage to objects], *Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti: Tr. Chetvertoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of protection and security: Tr. of the Fourth All-Russian Scientific and Practical Conference], 2001, pp. 342-346.
9. *Alekseev O.G. [i dr.]. Modeli raspredeleniya sredstv porazheniya v dinamike boya* [Models of distribution of weapons of destruction in the dynamics of combat]. Leningrad: Ministerstvo oborony SSSR, 1989, 109 p.
10. *Bobrikov A.A., Avoty'n' B.A. [i dr.]. Otsenka effektivnosti ogneвого porazheniya udarami raket i ognem artillerii* [Evaluation of the effectiveness of fire damage by missile strikes and artillery fire]. Saint Petersburg: Akademiya voennykh nauk, Sankt-Peterburgskoe regional'noe otdelenie, 2006, 421 p.
11. *Anisimov V.G., Anisimov E.G., Gertsev V.N. Otsenivanie effektivnosti sistemy raketno-artilleriyskogo vooruzheniya raketnykh voysk i artillerii* [Evaluation of the effectiveness of the missile and artillery weapons system of missile troops and artillery], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2001, No. 4, pp. 39-46.
12. *Anisimov V.G., Anisimov E.G., Belov A.S., Trakhinin E.L. Modelirovanie vozmozhnykh posledstviy vneshnikh informatsionnykh vozdeystviy na raspredelennuyu set' svyazi* [Modeling of possible consequences of external information impacts on a distributed communication network], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2020, No. 12, pp. 32-38.
13. *Dormidontov A.A., Anisimov V.G., Chubasov V.A. Ustroystvo dlya rascheta otsenivaniya zhivuchesti proektiruemykh, moderniziruemykh protivotankovykh nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov. Patent na poleznuyu model' RU 195893 U1, 07.02.2020. Zayavka № 2019128846 ot 13.09.2019* [A device for calculating the survivability assessment of designed, modernized anti-tank ground-based robotic systems. Utility model patent RU 195893 U1, 07.02.2020. Application No. 2019128846 of 13.09.2019].
14. *Zegzhda P.D. [i dr.]. Modeli i metod podderzhki prinyatiya resheniy po obespecheniyu informatsionnoy bezopasnosti informatsionno-upravlyayushchikh sistem* [Models and methods of decision-making support for information security of information management systems], *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of information security. Computer systems], 2018, No. 1, pp. 43-47.
15. *Anisimov V.G., Anisimov E.G. [i dr.]. Pokazateli effektivnosti zashchity informatsii v sisteme informatsionnogo vzaimodeystviya pri upravlenii slozhnyimi raspredelennymi organizatsionnymi ob"ektami* [Indicators of the effectiveness of information protection in the system of information interaction in the management of complex distributed organizational objects], *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of information security. Computer systems], 2016, No. 4, pp. 140-145.
16. *Zegzhda P.D., Suprun A.F. [i dr.]. Metodicheskyy podkhod k postroeniyyu modeley prognozirovaniya pokazateley svoystv sistem informatsionnoy bezopasnosti* [Methodological approach to the construction of models for predicting indicators of properties of information security systems], *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of information security. Computer systems], 2019, No. 4, pp. 45-49.

17. Anisimov V.G., Anisimov E.G., Grechishnikov E.V., Belov A.S. [i dr.]. Sposob modelirovaniya i otsenivaniya effektivnosti protsessov upravleniya i svyazi. Patent na izobrenenie RU 2673014 C1, 21.11.2018. Zayavka № 2018103844 ot 31.01.2018 [A method for modeling and evaluating the effectiveness of management and communication processes. Patent for the invention RU 2673014 C1, 21.11.2018. Application No. 2018103844 of 31.01.2018].
18. Zegzhda P.D. [i dr.]. Model' optimal'nogo kompleksirovaniya meropriyatiy obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti [Model of optimal integration of information security measures], *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of information security. Computer systems], 2020, No. 2, pp. 9-15.
19. Anisimov V.G., Anisimov E.G., Belov A.S., Skub'ev A.V. Effektivnost' obespecheniya zhivuchesti podsistemy upravleniya slozhnoy organizatsionno-tekhnicheskoy sistemy [Efficiency of ensuring the survivability of the management subsystem of a complex organizational and technical system], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2020, No. 11, pp. 41-47.
20. Gontar' D.N., Shibanov V.E., Petrunin D.V. Opredelenie i analiz uyazvimostey robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Definition and analysis of vulnerabilities of military-purpose robotic complexes], *Al'manakh mirovoy nauki* [Almanac of World Science], 2018, No. 6 (26), pp. 17-19.
21. Nagovitsin A.I., Molotkova B.B. Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya, perspektivy ikh primeneniya v RV i A VS RF [Robotics complexes of military purpose, prospects of their application in the RV and A of the Armed Forces of the Russian Federation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1 (186), pp. 6-19.
22. Barabanov M.S., Denisentsev S.A. [i dr.]. Radioelektronnaya bor'ba. Ot eksperimentov proshlogo do reshayushchego fronta budushchego [Electronic warfare. From experiments of the past to the decisive front of the future]. Moscow: TSentr analiza strategiy i tekhnologiy, 2015, 248 p.
23. Sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy k vidam vooruzheniya i voennoy tekhniki. Nazemnye robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya [The system of general technical requirements for types of weapons and military equipment. Ground-based robotic complexes for military purposes]. Moscow: FBGU "3 TSNII" MO RF, 2015.
24. Podtelkina O.A. Sredstva protivodeystviya robototekhnicheskim kompleksam [Means of countering robotic complexes], *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education], 2019, No. 8 (62), Part 2, pp. 12-14.
25. GOST RV 20.39.309-98 Kompleksnaya sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Konstruktivno-tekhnicheskie trebovaniya [GOST RV 20.39.309-98 Comprehensive system of general technical requirements. Equipment, devices, devices and equipment for military purposes. Design and technical requirements].
26. GOST V 25232-82 Sovmestimost' radioelektronnykh sredstv elektromagnitnaya. Poryadok obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti [GOST B 25232-82 Electromagnetic compatibility of radio-electronic means. Procedure for ensuring electromagnetic compatibility; 27. GOST RV 20.39.308-98].
27. GOST RV 20.39.308-98.
28. OTT 1.1.3-94.
29. GOST RV 20.39.302-98 Kompleksnaya sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Trebovaniya k programmam obespecheniya nadezhnosti i stoykosti k vozdeystviyu ioniziruyushchikh i elektromagnitnykh izlucheniy [GOST RV 20.39.302-98 Comprehensive system of general technical requirements. Equipment, devices, devices and equipment for military purposes. Requirements for programs to ensure reliability and resistance to ionizing and electromagnetic radiation].
30. GOST RV 20.39.305-98.
31. OTT 1.1.6-2000, chast' 1.
32. GOST V 25803-91.
33. GOST V 21999-86 Sistema elektrosnabzheniya voennykh gusenichnykh mashin. Normy kachestva elektricheskoy energii i metody kontrolya [GOST B 21999-86 Power supply system for military tracked vehicles. Electrical energy quality standards and control methods].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.А. Злотников.

Наговицин Александр Иванович – РВиА МВАА; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88125421433 (сл.), 89112160000 (моб.); кафедра автоматизированного управления; к.в.н.; доцент.

Молоткова Баира Борисовна – e-mail: bbmolotkova@bk.ru; тел.: +79818035441; кафедра автоматизированного управления; к.п.н.; доцент.

Nagovitsin Aleksandr Ivanovich – RViA MVAА; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +78125421433 (sl.), 89112160000 (mob.); the department of automated control; cand. of milit. sc.; associate professor.

Molotkova Baira Borisovna – e-mail: alexander@nagovitsin.ru; phone: +79818035441; the department of automated control; cand. of ped. sc.; associate professor.

УДК 629.127.4, 623.958.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-59-72

Н.А. Соколов, А.В. Рычков

ПОВЫШЕНИЕ ПОИСКОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье обосновывается актуальность решения задач поиска неразорвавшихся боеприпасов, а также археолого-геологических изысканий в акваториях внутренних вод и прибрежных зон Российской Федерации. На примерах выполнения работ по разминированию в акватории Балтийского моря и детального магнитометрического обследования акватории Фанатории показываются широкие возможности современной аппаратуры по локализации объектов, перекрытых донными отложениями и визуально незаметных на поверхности дна. Рассматриваются преимущества применения автономных необитаемых подводных аппаратов для метода поиска ферромагнитных предметов, основанного на регистрации пространственно распределенных магнитных аномалий. Показаны направления развития многоканальных магнитометрических средств поиска. Выявлены потенциальные возможности многоканальных магнитометрических систем по идентификации объектов поиска. На примере существующей технологии поиска водолазным способом показывается, что обеспечиваемый таким способом темп разведки является крайне низким даже при наиболее благоприятных условиях: наилучшей видимости, пологом склоне дна с твердым основанием. При этом время на разведку участка акватории водолазным способом вдоль одного берега составит около 5 часов в благоприятных условиях, а следовательно, такой способ не может применяться при обследовании больших акваторий. С учетом достигнутого на современном этапе уровня технологий для автоматизации подводных работ предлагается применять автономные необитаемые подводные аппараты с установленной в качестве целевой нагрузки многоканальной магнитометрической системой. Кроме автоматизации процесса выполнения задач, применение необитаемых подводных аппаратов позволит или полностью исключить, или существенно снизить опасное воздействие на человека мероприятий по поиску неразорвавшихся боеприпасов и вредных факторов глубоководных работ, а так же снизить материальные и временные затраты за счет сокращения операций по обслуживанию водолазного оборудования. Обработка результатов съемки и создание карты магнитных аномалий позволит выявить структуры, геомагнитные свойства которых заметно отличаются от естественного магнитного фона. Подобная методика позволяет значительно повысить информативность и достоверность результатов обследования акваторий, обеспечивая выявление визуально незаметных объектов, обладающих собственным магнитным полем. На основе теории электромагнитного поля и магнитостатики разработана методика расчетной оценки параметров и эффективности функционирования многоканальной магнитометрической системы для необитаемых подводных аппаратов. Методика предназначена для оценки параметров и возможностей по обнаружению ферромагнитных объектов и предварительной оценки эффективности ведения поиска. В качестве критерия (достижение

положительного результата оценки параметров и эффективности функционирования многоканальной магнитометрической системы), в соответствии со Стандартами противоминной деятельности IMAS, принято условие: обнаружение объекта определенного типа на заданной глубине. Влияние вышеперечисленных данных на решение задачи оценивалось в результате имитационного компьютерного моделирования в программной среде системы автоматизированного проектирования MathCAD с дальнейшей визуализацией результатов.

Поиск объектов в воде; подводный поиск; необитаемый подводный аппарат; целевая нагрузка; магнитометрическая целевая нагрузка; магнитометрическая система; магнитный момент; магнитная индукция.

N.A. Sokolov, A.V. Rychkov

INCREASING THE SEARCH CAPABILITIES OF AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES THROUGH THE USE OF MULTI-CHANNEL MAGNETOMETRIC SYSTEMS

The article substantiates the relevance of solving the problems of searching for unexploded ordnance, as well as archaeological and geological surveys in the waters of inland waters and coastal zones of the Russian Federation. Using examples of mine clearance operations in the Baltic Sea and a detailed magnetometric survey of the Phanagoria water area, the extensive capabilities of modern equipment for localization of objects covered by bottom sediments and visually invisible on the bottom surface are shown. The advantages of using autonomous uninhabited underwater vehicles for the method of searching for ferromagnetic objects based on the registration of spatially distributed magnetic anomalies are considered. The directions of development of multichannel magnetometric search tools are shown. The potential capabilities of multichannel magnetometric systems for identifying search objects are revealed. Using the example of the existing technology of diving search, it is shown that the rate of exploration provided in this way is extremely low even under the most favorable conditions: the best visibility, a gentle slope of the bottom with a solid base. At the same time, the time for exploration of a section of the water area by diving along one shore will be about 5 hours in favorable conditions, and, therefore, this method cannot be used when examining large water areas. Taking into account the level of technology achieved at the present stage, it is proposed to use autonomous uninhabited underwater vehicles with a multi-channel magnetometric system installed as a target load for automating underwater operations. In addition to automating the process of performing tasks, the use of uninhabited underwater vehicles will either completely eliminate or significantly reduce the dangerous impact on humans of measures to search for unexploded ordnance and harmful factors of deep-sea operations, as well as reduce material and time costs by reducing operations for servicing diving equipment. Processing the survey results and creating a map of magnetic anomalies will allow you to identify structures whose geomagnetic properties are markedly different from the natural magnetic background. Such a technique can significantly increase the information content and reliability of the results of the survey of water areas, providing the identification of visually invisible objects that have their own magnetic field. Based on the theory of the electromagnetic field and magnetostatics, a method for calculating the parameters and efficiency of the multichannel magnetometric system for uninhabited underwater vehicles has been developed. The method is designed to evaluate the parameters and capabilities for detecting ferromagnetic objects and to make a preliminary assessment of the search efficiency. As a criterion (achieving a positive result of evaluating the parameters and efficiency of the multi-channel magnetometric system), in accordance with the IMAS Mine Action Standards, the following condition is accepted: detection of an object of a certain type at a given depth. The influence of the above data on the solution of the problem was evaluated as a result of computer simulation in the software environment of the computer-aided design system MathCAD with further visualization of the results.

Object search in water; underwater search; uninhabited underwater vehicle; target load; magnetometric target load; magnetometric system; magnetic moment; magnetic induction.

Введение. Поиск неразорвавшихся боеприпасов (НВБ), а также археолого-геологические изыскания в акваториях внутренних вод и прибрежных зонах являются в настоящее время для Российской Федерации весьма насущными. По оцен-

кам специалистов, в первой половине XX века в акватории Балтийского моря было установлено свыше 130 000 морских мин, в том числе около 7 000 магнитных и около 4 000 магнитно-акустических [1].

За период с 1941 по 1945 гг. силами ВМФ было потоплено около 1 200 судов и кораблей противника, в том числе 581 боевой корабль, на борту которых находились штатный боезапас и вооружение, боеприпасы для снабжения сил армии и флота.

Значительные потери в войне на море понес и Советский флот. Всего за годы войн в акватории Балтийского моря потоплено свыше 1 500 боевых кораблей, около 1 600 торговых и пассажирских судов, около 100 подводных лодок, сбито несколько сотен самолетов, имеющих на борту десятки тысяч снарядов, мин, торпед, бомб.

Общее количество крупных затопленных объектов в российской части Финского залива достигает более 5 000 ед. [1].

Минная опасность в акватории Балтийского моря постепенно меняется вследствие проведения минно-тральных операций и влияния естественных факторов, к которым относятся обрыв минрепов якорных мин, «старение» взрывчатых веществ, разрушение материалов под воздействием морской среды (химическая, электрохимическая, биологическая коррозия), саморазряд источников электропитания мины.

Время, в течение которого корпус мины прокоррозирует до уровня, обеспечивающего его дальнейшее разрушение гидростатическим давлением, составляет для якорных мин 65–87 лет, для донных мин 105–140 лет.

По современным представлениям срок службы взрывчатого вещества (ВВ) при хранении его в условиях без попадания воды составляет 100 лет [1].

Надежных моделей поведения ВВ в условиях проникновения воды нет, поэтому мировая практика рекомендует считать их исправными и опасными, пока не доказано обратное.

Особую опасность представляют боеприпасы времен Первой мировой войны, снаряженные пироксилиновыми взрывчатыми веществами, чувствительность которых к механическому воздействию со временем увеличилась в несколько раз.

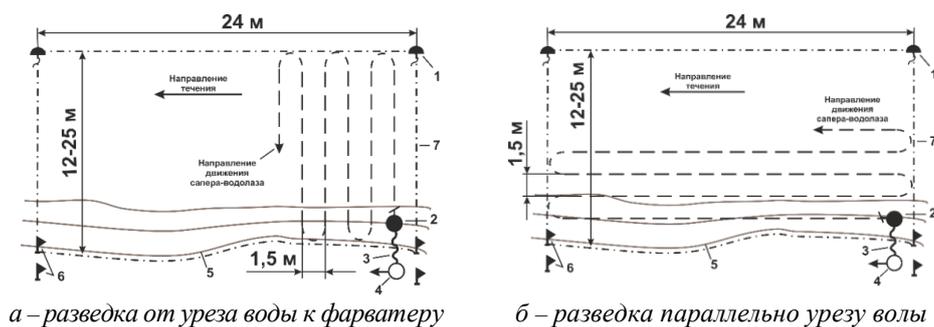
В части археолого-геологических изысканий пример подводных работ, проводившихся в акватории Таманского залива в период с 1999 по 2005 гг., показал, что затопленный культурный слой оказался перекрыт песчано-иловыми наносами в ходе многовековой абразии берегов Таманского залива. Это значительно снижает достоверность результатов визуального осмотра дна и высокочастотной гидролокации, так как искомые объекты в момент проведения исследования могут быть полностью укрыты донными отложениями. Дополнительные сложности для визуального и гидроакустического обследования создают значительная площадь затопленной части обследуемой территории (более 20 га) и густой покров водорослей [2].

С учетом вышеизложенного, в период с 2002 по 2003 гг. в Фанагории был испытан буксируемый морской цезиевый магнитометр Geometrics G-881, что позволило обнаружить ряд ферромагнитных объектов, затонувших во время Великой Отечественной войны, и три зоны площадных магнитных аномалий, идентифицировать которые не удалось. Следующий этап магнитометрических исследований состоялся в Фанагории в 2013 г. Для гидромагнитной разведки был избран полигон размерами 1300 × 300 м, общей площадью 48 га, с диапазоном глубин от 0,7 до 4,5 м. Примененный приборный комплекс состоял из буксируемого морского магнитометра Marine Magnetics SeaSpy; вариационной станции на базе протонного магнитометра ММП-203; феррозондового магнитометра Foerester Ferex [2].

Задачей работ стал не поиск отдельных магнитных аномалий, а создание детальной высокоточной карты магнитной съемки для всей обследованной акватории с минимальной погрешностью, что потенциально дает возможность выявить даже

относительно слабые аномалии, наиболее интересные как потенциально археологические объекты [3]. Гидромагнитная съемка велась с борта 6-метровой надувной моторной лодки на скорости 6–8 км/ч, продольными галсами с интервалом в 5 м, магнитометр Sea Spy буксировался в 15 м от лодки на глубине от 0,7 до 1,5 м [2].

В настоящее время мероприятия поиска опасных объектов и навигационных препятствий при проведении инженерной разведки акваторий выполняются инженерным разведывательным дозором (ИРД), в состав которого входит от 3 до 5 специалистов-водолазов [4]. При этом ИРД оснащен только одним водолажным индукционным металлоискателем. Поиск выполняется методом галсов, фактически без средств автоматизации работ (рис. 1).



а – разведка от уреза воды к фарватеру

б – разведка параллельно урезу воды

- 1 – буйки, обозначающие границы участка, 2 – сапер-водолаз с металлоискателем,
3 – сигнальный конец, 4 – обеспечивающий водолаз, 5 – урез воды,
6 – створные вехи на границах участка, 7 – граница участка

Рис. 1. Схема разведки прибрежного участка водолазом

Темп инженерной разведки таким способом не превышает $120 \text{ м}^2/\text{ч}$, целесообразно отметить, что это значение достижимо только при наиболее благоприятных условиях: наилучшей видимости, пологом склоне дна с твердым основанием. При этом время на разведку участка акватории водолажным способом вдоль одного берега составит около 5 часов в благоприятных условиях, а, следовательно, такой способ не может применяться при обследовании больших акваторий.

Опыт разминирования в акватории Балтийского моря и детального магнитометрического обследования акватории Фанагории наглядно продемонстрировал широкие возможности современной аппаратуры по локализации объектов, перекрытых донными отложениями и визуально незаметных на поверхности дна. Этот вид неразрушающего исследования, помимо обнаружения современных ферромагнитных объектов, способен выявить скопления керамики и камней, обладающие несвойственным для этого района уровнем намагниченности [2].

Обработка результатов съемки и создание карты магнитных аномалий позволили выявить структуры, геомагнитные свойства которых заметно отличаются от естественного магнитного фона. Подобная методика позволяет значительно повысить информативность и достоверность результатов обследования акваторий, обеспечивая выявление визуально незаметных объектов, обладающих собственным магнитным полем [3].

Постановка задачи. С учетом достигнутого на современном этапе уровня технологий эффективным средством автоматизации подводных работ считаются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [5]. Кроме автоматизации процесса выполнения задач, применение АНПА позволяет или полностью исключить, или существенно снизить опасное воздействие на человека мероприятий по

поиску НВБ и вредных факторов глубоководных работ, а так же снизить материальные и временные затраты за счет сокращения операций по обслуживанию водозлазного оборудования.

На АНПА, как правило, устанавливается полный комплекс систем и устройств, обеспечивающих самостоятельное движение под водой, большинство из них имеют торпедообразную форму, оснащены энергетической установкой, состоящей из литиевой аккумуляторной батареи и гребного электродвигателя (рис. 2).

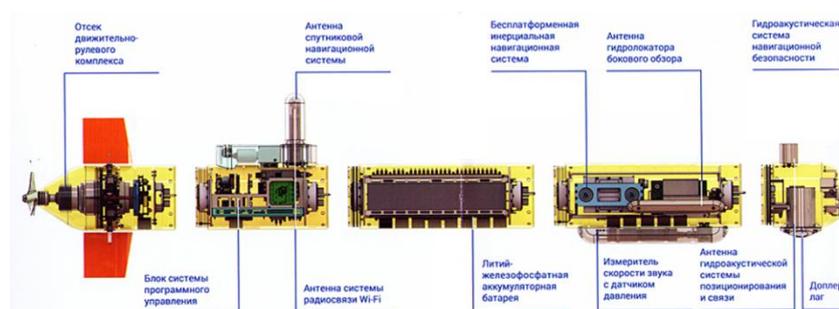


Рис. 2. Конструкция АНПА

Управление осуществляется автономно по программе, заложенной в память бортовой ЭВМ, с использованием инерционной навигационной системы, доплеровского лага и с периодическим уточнением местоположения по данным космической радионавигационной системы при подвсплытии [5].

В качестве базовых платформ для построения перспективного поискового комплекса могут быть взяты за основу разработки отечественных предприятий промышленности. Так, например, ЦКБ «Рубин» (г. Санкт-Петербург) разрабатывается серия мобильных комплексов с АНПА «Амулет» и «Талисман» [6], обеспечивающих решение широкого круга поисковых и исследовательских задач, в том числе в условиях мелководья (рис. 3).

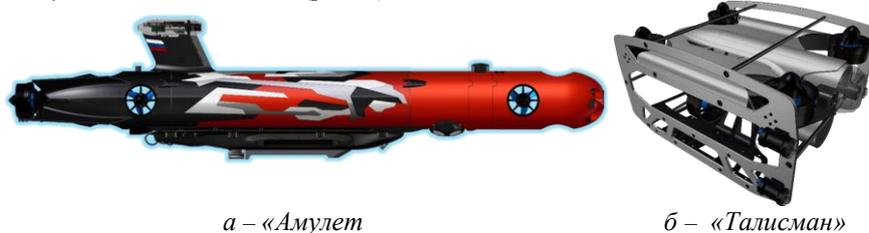


Рис. 3. Общий вид АНПА, разрабатываемых ЦКБ «Рубин»

Технические характеристики АНПА ЦКБ «Рубин»: максимальная скорость подводного хода до 1,5 м/с, рабочая глубина погружения до 50 м [7, 8].

В качестве целевой нагрузки для АНПА с учетом опыта выполнения поисковых задач по обнаружению и идентификации большинства типов ферромагнитных объектов, ведения гидромагнитной разведки и сбора магнитографической информации необходимо применить многоканальную магнитометрическую сенсорную систему, состоящую из нескольких чувствительных элементов (ЧЭ), пространственно расположенных по принципу градиентометра.

Чтобы повысить точность измерений необходимо одновременно регистрировать сигналы с нескольких, не менее трех, ЧЭ, закрепленных на единой «жесткой» конструкции, раме АНПА, расположенных рядом на некотором расстоянии друг

от друга перпендикулярно траектории движения. Дополнительным преимуществом такой системы является увеличение ширины зоны поиска вдоль направления движения, обеспечивая пропорциональное увеличение темпа ведения разведки и сокращение времени поиска (рис. 4).

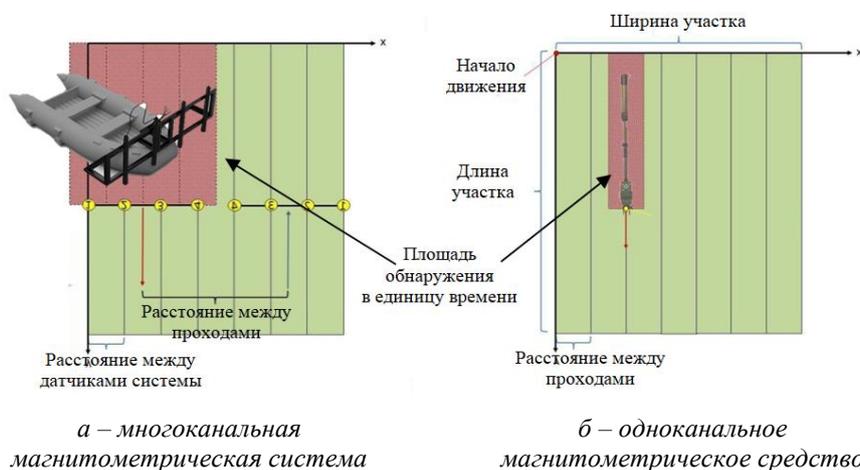


Рис. 4. Зависимость темпа поиска от количества каналов магнитометрического средства

Текущее направление исследований. В настоящее время большинство поисковых магнитометрических средств обнаружения являются, по сути, только индикаторами наличия потенциальных объектов в локализованной двухмерной области пространства. Имеются изделия, частично и с определенными ограничениями решающие задачи определения координат для специфических объектов. Известны теоретические работы, посвященные определению координат объекта с высокой точностью при неподвижной приемной антенне. Известные решения имеют ряд ограничений в технической реализации, что сужает их практическую применимость [9–11].

На основе теории электромагнитного поля и магнитостатики разработана методика расчетной оценки параметров и эффективности функционирования многоканальной магнитометрической системы (ММС) [12]. Методика предназначена для оценки параметров и возможностей по обнаружению ферромагнитных объектов и предварительной оценки эффективности ведения поиска.

В качестве критерия (достижение положительного результата оценки оптимальных параметров и эффективности функционирования ММС), в соответствии со Стандартами противоминной деятельности IMAS, принято условие: обнаружение объекта определенного типа на заданной глубине.

Влияние вышеперечисленных данных на решение задачи оценивалось в результате имитационного компьютерного моделирования в программной среде системы автоматизированного проектирования MathCAD с дальнейшей визуализацией результатов [13].

Оценка параметров и эффективности функционирования ММС проводится в несколько этапов:

- ◆ на первом этапе проводится первичное получение и обработка данных по магнитной индукции сигналов для каждого чувствительного элемента магнитометра;
- ◆ на следующем этапе проводится системная оценка и построение магнитуд полезных сигналов, расчет глубины залегания и магнитного момента объекта поиска;

◆ далее проводится оценка плотности распределения вероятности распознавания объекта поиска по его магнитному моменту и принимается решение о соответствии расчетных данных объекту поиска.

Структурно-логическая схема методики представлена на рис. 5.

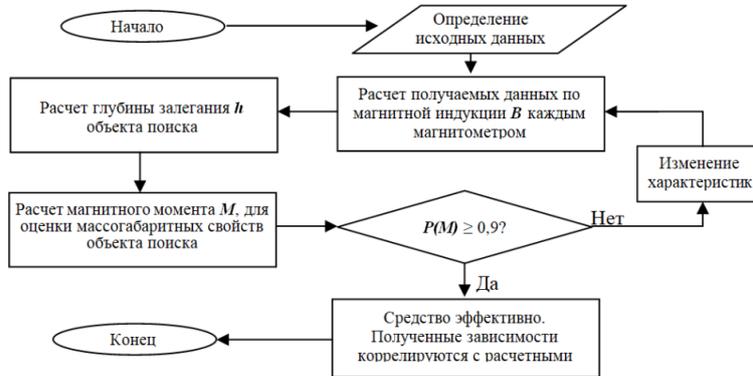


Рис. 5. Структурно-логическая схема методики расчетной оценки ММС

Исходя из критерия надежного обнаружения ММС объекта поиска в соответствии с разработанной расчетной методикой возможно определить требования к конструкции ММС, а именно:

- ◆ определить величину r – расстояния между соседними чувствительными элементами;
- ◆ определить значение базы l – расстояния между магнитометрическими датчиками в чувствительном элементе.

Применяя функции множественного регрессивного анализа, обрабатывались 180 реализаций (магнитуд) моделируемых сигналов, варьировались 6 вариаций значений базы чувствительного элемента l в диапазоне от 0,4 до 1,5 м, и 10 значений расстояний между чувствительными элементами в диапазоне от 0 до 1 м, для 3 типовых объектов поиска с известным значением магнитного момента $M = (0,1; 1,8; 50 \text{ Ам}^2)$.

Для типовой окружающей обстановки (эквивалентный шум не более 2...3 нТл), возможна реализация порога обнаружения $(dB/dr)_{\min} = 10 \text{ нТл/м}$ [14, 15].

$$B_{\text{порог}}(l, r) = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_3 \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Результаты анализа сведены в графики, показанные на рис. 6.

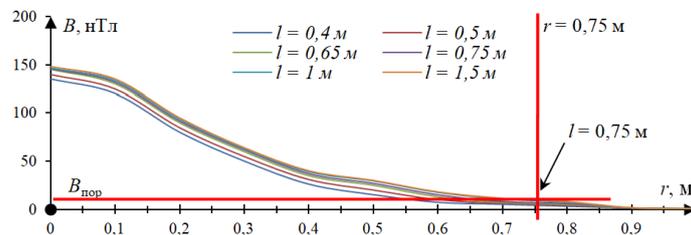


Рис. 6. Зависимость амплитуды регистрируемого сигнала от топологии расположения магнитометрических датчиков (l – база ЧЭ, r – расстояние между ЧЭ)

Из графиков следует, что с учетом среднего (типового) шума трассы и надежного обнаружения на уровне порога чувствительности (превышение сигнала над порогом не менее 4 дБ) [14] выбирается радиус обнаружения в плане для чувствительного элемента в соответствии с описанной в расчетной методике схемой функционирования ММС (рис. 6): $r = 0,75$ м.

Так же из результатов анализа моделирования следует, что величина базы чувствительного элемента оказывает влияние на величину полезных сигналов, начиная только с глубины залегания диполя $h \geq 3l$. Поэтому увеличение l является одним из способов создания чувствительных градиентометров типа Ferex 4.032 с чувствительным модулем CON160 (база 1,6 м) и Vallon VET2 (база 1,7 м) [16–19]. Однако их эксплуатация на скорости около 1 м/с и более затруднительна.

Исходя из результатов расчета амплитуд сигналов по выражению (1) при варьировании базы в пределах $l = 0,4 \dots 1,5$ м, применяемых в известных зарубежных изделиях, сделан выбор $l = 0,75$ м, т.е. величина базы равна расстоянию между чувствительными элементами в ММС.

По определенным параметрам базы и расстояния между соседними чувствительными элементами в соответствии с расчетной методикой предложена модель технического облика ММС для размещения в качестве целевой нагрузки АНПА (рис. 7).



Рис. 7. Модель технического облика ММС для АНПА

Проведенные компьютерные и натурные экспериментальные исследования предложенного метода анализа и обработки данных в макете ММС, разработанного в соответствии с предложенной конструкцией (рис. 8), показали возможность построения карты магнитных аномалий с последующей оценкой ориентации и глубины залегания в грунте объектов поиска [20].

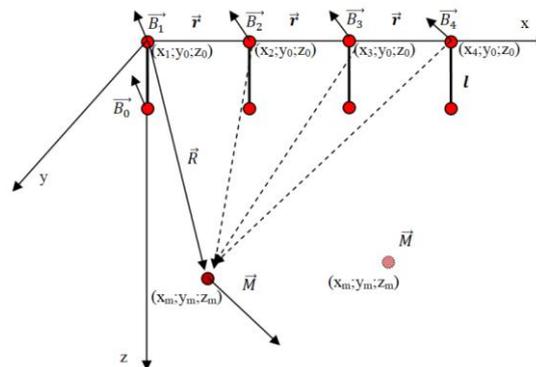


Рис. 8. Схема функционирования ММС

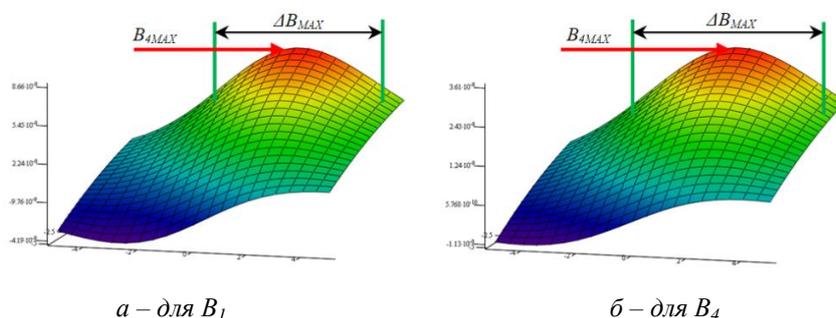


Рис. 12. Модель зависимости магнитуд сигналов от глубины обнаружения $h = 3$ м для случая обнаружение 500 кг фугасной бомбы

Анализ графиков (рис. 9–12) показывает, что изменение глубины обнаружения и ориентации объекта поиска существенно изменяет не только форму (магнитуду), но и амплитуду полезного сигнала. Зависимости магнитуд V_1 , V_4 , от расстояния до объекта поиска весьма велики, особенно в сравнении относительно малых $h \leq 1,5 \dots 3$ и больших глубин $h \geq 5$.

Из графиков видно, что чем меньше глубина расположения диполя h , тем резче спадает амплитуда сигнала по магнитной индукции B .

Таким образом, результаты компьютерного моделирования сигналов в многоканальном магнитометрическом бомбоискателе подтвердили возможность построения с помощью программы обработки сигналов карты магнитных аномалий для оценки не только глубины залегания взрывоопасного предмета, но и характера ориентации объекта поиска в грунте.

«Идеальный» магнитный момент M , который характеризует объект поиска, приложен в точке, у него нет полюсов, так как они условно слиты. Реальные объекты поиска, в том числе взрывоопасные предметы, имеют полюса – положительный, откуда силовые линии выходят, и отрицательный, куда силовые линии входят, здесь концентрация силовых линий максимальная (рис. 13) [22].

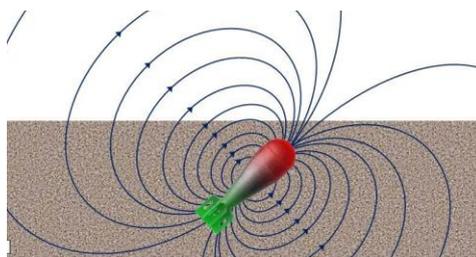


Рис. 13. Условная полярность объекта поиска

Следовательно, вблизи этих точек магнитная индукция также максимальная, что и должно выявляться по карте магнитных аномалий. Если на карте выявляется только один полюс, это значит, что предмет расположен вертикально и второй полюс (невидимый) находится под первым.

Для подтверждения данных компьютерного моделирования проведены экспериментальные исследования макета ММС на суше, результаты экспериментальных исследований зависимости полученных магнитограмм реальных объектов (формы сигнала) от их типа показаны на рис. 14–16.

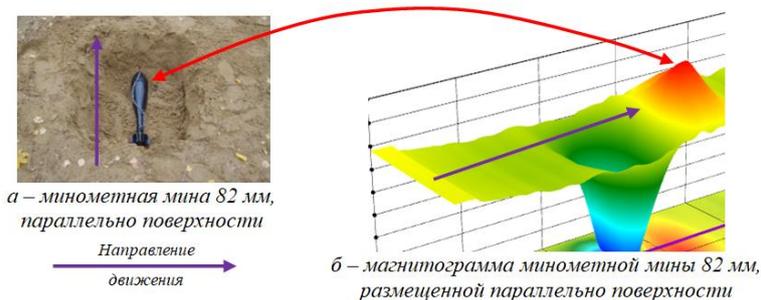


Рис. 14. Зависимость формы магнитограммы объекта от его типа и ориентации

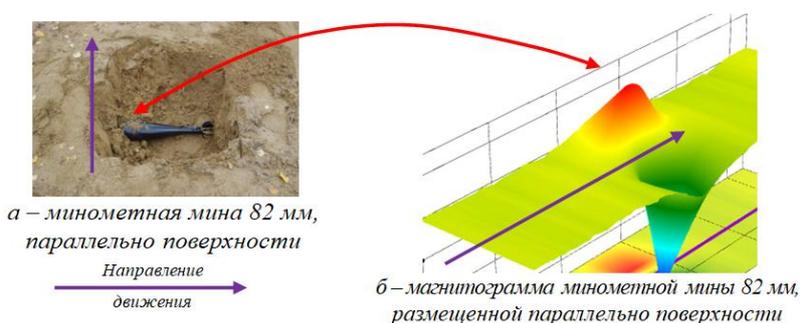


Рис. 15. Зависимость формы магнитограммы объекта от его типа и ориентации

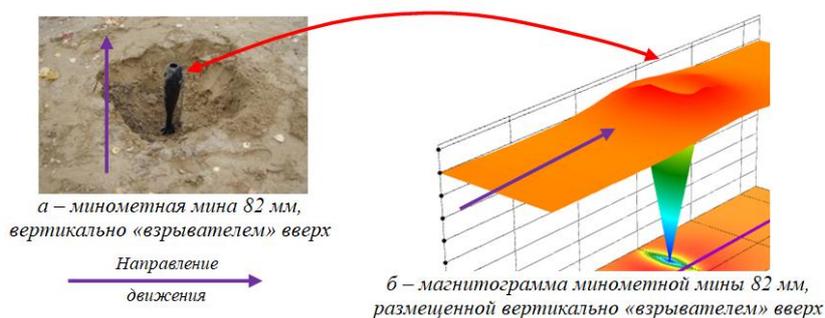


Рис. 16. Зависимость формы магнитограммы объекта от его типа и ориентации

Как видно из рисунков 14–16, форма магнитограмм объектов поиска зависит не только от типа, но и от ориентации объекта относительно поверхности. Эта зависимость позволяет распознавать (идентифицировать) объекты поиска, определять их ориентацию и глубину залегания.

Заключение. Таким образом, опыт проведения подводных поисковых работ в акватории Балтийского моря и Таманского залива показывает, что создание детальной высокоточной карты магнитной съемки для всей обследованной акватории с минимальной погрешностью потенциально дает возможность выявить даже относительно слабые аномалии, наиболее интересные как потенциально объекты поиска даже в неблагоприятных условиях разведки, когда затопленные объекты перекрыты песчано-иловыми наносами, что значительно снижает достоверность результатов визуального осмотра дна и высокочастотной гидролокации, так как искомые объекты могут быть полностью укрыты донными отложениями.

Потому применение АНПА для решения задач поиска НВБ и археолого-геологических изысканий в акваториях прибрежных зон, оснащенных в качестве целевой нагрузки предложенной ММС, будет обладать рядом преимуществ перед существующими изделиями и применяемыми в настоящее время методами поиска, а именно: возможностью распознавания типа объекта, прогнозирование его ориентации и глубины залегания в грунте; по сравнению с работой водолаза и применением одиночного магнитометра более высоким темпом разведки до $16\ 000\ \text{м}^2/\text{ч}$ при скорости движения АНПА не менее $1,5\ \text{м/с}$.

Кроме того, применение АНПА позволяет или полностью исключить, или существенно снизить опасное воздействие на человека мероприятий по поиску НВБ и вредных факторов глубоководных работ, а так же снизить материальные и временные затраты за счет сокращения операций по обслуживанию водолазного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добротворский А.Н., Бочкарев Е.Н., Никишов В.Н. Методы оценки риска убытков от повреждения минами и взрывоопасными объектами при строительстве подводных нефтегазопроводов // Современное состояние и проблемы навигации и океанографии (НО-2004): Сб. науч. трудов. – СПб., 2004. – Т. 2. – С. 256-265.
2. Ольховский С.В., Степанов А.В. Магнитометрические разведки в акватории Фанагории // Вопросы подводной археологии. – 2013. – № 1. – С. 53-58.
3. Соколов Н.А. Применение магнитометрических датчиков при поиске взрывоопасных предметов с беспилотных воздушных носителей // Сб. материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и X молодежной школы семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 152-160.
4. Руководство по водолажным работам в сухопутных войсках. Ч. 1. – М.: Военное издательство, 2007. – 224 с.
5. Робототехника. – <http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/>.
6. Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин». – http://ckb-rubin.ru/ckb_mt_rubin/.
7. Необитаемый подводный аппарат «Амулет». – http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/apra_amulet/.
8. Необитаемый подводный аппарат «Талисман». – http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/tpa_talisman/.
9. Арбузов О.И. Магниточувствительные поисковые приборы // Специальная техника. – 2000. – № 6. – С. 18-24.
10. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н., и др. Применение магнитной томографии в проходных металлодетекторах // Специальная техника. – 2007. – № 6. – С. 38-40.
11. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Оценка предельной глубины обнаружения ферромагнитных объектов искусственного происхождения в толще полупроводящей среды // Специальная техника. – 2004. – № 2. – С. 38-40.
12. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 187 с.
13. Mathcad Resources. – <https://www.mathcad.com/ru>.
14. Магниторазведка. Справочник геофизика / под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глабовского. – М.: Недра, 1980.
15. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1961.
16. Humanitarian mine clearance. – <https://ebingergroup.de/en/products/humanitarian-mine-clearance/>.
17. МБИ-П. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БИВР.411172.001ТО. – 71 с.
18. Ferex 4.032. Technical description. Foerster Institute Dr.Foerster. Edition 09/2000. – 16 p.
19. Модульный УХО-детектор-комплект для применения в скважинах и под водой. – <https://www.vallon.de/ru/magnetometer>.

20. Соколов Н.А. Многоканальная магнитометрическая система для разминирования больших территорий // Сб. материалов XV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и XI молодежной школы семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 214-220.
21. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. – М.: НТ Пресс, 2006.
22. Звездинский С.С., Парфенцев И.В. Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов // Специальная техника. – 2008. – № 2. – С. 8-17.

REFERENCES

1. Dobrotvorskiy A.N., Bochkarev E.N., Nikishov V.N. Metody otsenki riska ubytkov ot povrezhdeniya minami i vzyvooopasnymi ob"ektami pri stroitel'stve podvodnykh neftegazoprovodov [Methods for assessing the risk of losses from damage by mines and explosive objects in the construction of underwater oil and gas pipelines], *Sovremennoe sostoyanie i problemy navigatsii i okeanografii (NO-2004): Sb. nauch. trudov* [The current state and problems of navigation and oceanography (NO-2004): Collection of scientific papers]. Saint Petersburg, 2004, Vol. 2, pp. 256-265.
2. Ol'khovskiy S.V., Stepanov A.V. Magnitometricheskie razvedki v akvatorii Fanagorii [Magnetometric surveys in the waters of Phanagoria], *Voprosy podvodnoy arkheologii* [Questions of underwater archeology], 2013, No. 1, pp. 53-58.
3. Sokolov N.A. Primenenie magnitometricheskikh datchikov pri poiske vzyvooopasnykh predmetov s bespilotnykh vozdushnykh nositeley [Application of magnetometric sensors in the search for explosive objects from unmanned aerial vehicles], *Sb. materialov XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» i X molodezhnoy shkoly seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Collection of materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective Systems and Management Tasks" and the X Youth School Seminar "Management and Information Processing in Technical Systems"]. Rostov-on-Donu Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 152-160.
4. Rukovodstvo po vodolaznym rabotam v sukhoputnykh voyskakh [Manual on diving operations in the land forces]. Part 1. – Moscow: Voennoe izdatel'stvo, 2007, 224 p.
5. Robototekhnika [Robotics]. Available at: <http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/>.
6. Tsentral'noe konstruktorskoe byuro morskoy tekhniki «Rubin» [Central Design Bureau of Marine equipment "Rubin"]. Available at: http://ckb-rubin.ru/ckb_mt_rubin/.
7. Neobitaemy podvodnyy apparat «Amulet» [Uninhabited underwater vehicle "Amulet"]. Available at: http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/anpa_amulet/.
8. Neobitaemy podvodnyy apparat «Talisman» [Uninhabited underwater vehicle "Talisman"]. Available at: http://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/tnpa_talisman/.
9. Arbutov O.I. Magnitochuvstvitel'nye poiskovye pribory [Magnetosensitive search devices], *Spetsial'naya tekhnika* [Special equipment], 2000, No. 6, pp. 18-24.
10. Shcherbakov G.N., Antselevich M.A., Udintsev D.N., i dr. Primenenie magnitnoy tomografii v prokhodnykh metallodetektorakh [Application of magnetic tomography in pass-through metal detectors], *Spetsial'naya tekhnika* [Special technique], 2007, No. 6, pp. 38-40.
11. Shcherbakov G.N., Antselevich M.A., Udintsev D.N. Otsenka predel'noy glubiny obnaruzheniya ferromagnitnykh ob"ektov iskusstvennogo proiskhozhdeniya v tolshche poluprovodnyashchey sredy [Estimation of the maximum depth of detection of ferromagnetic objects of artificial origin in the thickness of a semi-conducting medium], *Spetsial'naya tekhnika* [Special equipment], 2004, No. 2, pp. 38-40.
12. Afanas'ev Yu.V. Ferrozondovye pribory [Ferrosonde devices]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 187 p.
13. Mathcad Resources. Available at: <https://www.mathcad.com/ru>.
14. Magnitorazvedka. Spravochnik geofizika [Magnetic exploration. Handbook of geophysics], ed. by V.E. Nikitskogo, Yu.S. Glabovskogo. Moscow: Nedra, 1980.
15. Nikol'skiy V.V. Teoriya elektromagnitnogo polya [Theory of the electromagnetic field]. Moscow: Vysshaya shkola, 1961.
16. Humanitarian mine clearance. Available at: <https://ebingergroup.de/en/products/humanitarian-mine-clearance/>.

17. MBI-P. Tekhnicheskoe opisaniye i instruksiya po ekspluatatsii BIVR.411172.001TO [MBI-P. Technical description and operating instructions BIVR. 411172. 001 TO], 71 p.
18. Ferex 4.032. Technical description. Foerster Institute Dr.Foerster. Edition 09/2000, 16 p.
19. Modul'nyy UXO-detektor-komplekt dlya primeneniya v skvazhinakh i pod vodoy [Modular UXO detector-kit for use in wells and under water]. Available at: <https://www.vallon.de/ru/magnetometer>.
20. Sokolov N.A. Mnogokanal'naya magnitometricheskaya sistema dlya razminirovaniya bol'shikh territoriy [Multichannel magnetometric system for mine clearance of large territories], *Sb. materialov XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» i XI molodezhnoy shkoly seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Collection of materials of the XV All-Russian Scientific and practical Conference "Perspective Systems and Management Tasks" and the XI Youth School Seminar "Management and Information Processing in Technical Systems"]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, pp. 214-220.
21. Alekseev E.R., Chesnokova O.V. Reshenie zadach vychislitel'noy matematiki v paketakh Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9 [Solving problems of computational mathematics in packages Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9]. Moscow: NT Press, 2006.
22. Zvezhinskiy S.S., Parfentsev I.V. Metod magnitometricheskogo obnaruzheniya vzryvoopasnykh predmetov [Method of magnetometric detection of explosive objects], *Spetsial'naya tekhnika* [Special technique], 2008, No. 2, pp. 8-17.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.С. Звездинский.

Соколов Николай Александрович – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск» Минобороны России; e-mail: cniii_iv@mail.ru; 143432, Московская обл., Нахабино, Россия; тел.: 89163658920.

Рычков Андрей Владимирович – Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая ордена Жукова академия Вооруженных Сил Российской Федерации»; e-mail: cniii_iv@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84997665759; д.т.н.; доцент.

Sokolov Nikolay Aleksandrovich – Federal State Budgetary Institution "Central Research and Testing Institute of Engineering Troops" of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: cniii_iv@mail.ru; Nakhabino, Moscow Region, Russia; phone: +79163658920.

Rychkov Andrey Vladimirovich – Military Training and Research Center of the Land Forces "Combined Arms Order of Zhukov Academy of the Armed Forces of the Russian Federation"; e-mail: cniii_iv@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74997665759; dr. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.883

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-72-81

В.Д. Сытенький, И.И. Маркович, Е.Е. Завтур

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАССИВНЫХ РЛС АМПЛИТУДНЫМ МЕТОДОМ

Рассматривается амплитудный метод определения координат источников излучения в пассивной радиолокации. Синтезирован алгоритм вычисления координат источников излучения в пассивном режиме радиолокационных станций, основанный на приёме закономерно затухающих в пространстве электромагнитных колебаний антеннами в коллинеарном расположении. Необходимые для определения координат цели математические соотношения получены путем решения соответствующих треугольников, образованных базами антенн и целью. Это позволило определить местоположение источника излучения (цели) точкой пересечения гипербол с фокусами в местах расположения приёмных антенн. Приведены аналитические выражения для определения координат целей в декартовых и полярных системах координатах. Анализ погрешности предлагаемого алгоритма осуществлён с

учётом методики косвенных измерений. Исследуется случай равномерного распределения помех по пространству, аддитивно связанных с сигналом и некоррелированных с ним. Получена формула для среднеквадратичного отклонения дальности до цели. Приведены результаты расчетов оценок абсолютных погрешностей определения местоположения источника излучения, зависящие от его расположения на плоскости и показывающие, что абсолютная погрешность определения местоположения источника излучения минимальна вблизи начала координат и возрастает при удалении от нее. Синтезированный и исследованный алгоритм ввиду простоты аппаратной реализации может применяться в пассивных локационных системах как самостоятельно, так и в дополнении к широко распространенному на практике разностно-дальномерному методу, основанному на измерении взаимных временных задержек принятых сигналов.

Определение координат; источник излучения; разностно-дальномерный метод; среднеквадратическое отклонение.

V.D. Sytenky, I.I. Markovich, E.E. Zavtur

DETERMINATION OF THE COORDINATES OF RADIATION SOURCES IN PASSIVE RADARS BY THE AMPLITUDE METHOD

An amplitude method for determining the radiation sources coordinates in passive radar is considered. An algorithm for calculating the coordinates of radiation sources in the passive mode of radar stations based on the reception of electromagnetic oscillations regularly damped in space by antennas in a collinear arrangement is synthesized. The mathematical relationships necessary to determine the coordinates of the target are obtained by solving the corresponding triangles formed by the antenna bases and the target. This made it possible to determine the location of the radiation source (target) by the point of intersection of the hyperbolas with the foci at the locations of the receiving antennas. Analytical expressions are given for determining the coordinates of targets in Cartesian and polar coordinate systems. The error analysis of the proposed algorithm was carried out taking into account the method of indirect measurements. The case of uniform distribution of noise over space, additively related to the signal and uncorrelated with it, is investigated. The formula for the root-mean-square deviation of the target range is obtained. The results of calculations of estimates of the absolute errors in determining the location of the radiation source, which depend on its location on the plane and show that the absolute error in determining the location of the radiation source, is minimal near the origin and increases with distance from it, are presented. Synthesized and investigated algorithm, due to the simplicity of the hardware implementation, can be used in passive location systems both independently and in addition to the widely used differential rangefinder method based on measuring the mutual time delays of the received signals.

Determination of coordinates; radiation source; differential-range finder method; standard deviation.

Введение. В пассивной радиолокации широкое распространение получили методы, основанные на прямолинейности распространения электромагнитных волн в пространстве, а также на постоянстве их скорости. Это триангуляционный и разностно-дальномерный методы [1–11]. В последнее время разрабатывается метод, основанный на закономерном затухании колебаний в пространстве – радиально-базовый [12].

Триангуляционный метод использует антенную базу из двух разнесенных антенн и позволяет вычислить дальность до источника излучения (ИИ) и его координаты по задержке принятого сигнала одной антенны относительно другой и по полученному пеленгу на ИИ любой антенны [5, 6]. Однако точность данного метода существенно зависит от точности определения направления на ИИ и требует применения направленных антенн.

Разностно-дальномерный метод (РДМ), основанный на измерении кривизны волнового фронта сигнала, использует коллинеарно расположенные антенны и по полученным трем задержкам сигналов относительно друг друга позволяет опреде-

лить дальность до цели и ее координаты. РДМ использует три антенны, расположенные коллинеарно и не требует определения пеленга на цель [1, 10]. Авторами разработан также алгоритм определения координат целей РДМ с учетом неточностей установки приемных антенн [11].

Радиально-базовый метод относится к амплитудным и основан на измерении напряженности поля сигнала, либо его мощности приёмными устройствами. Используется, как минимум два приёмных устройства, расположенных на известном базовом расстоянии друг от друга и направленном на источник излучения [13]. Данный метод предпочтительно использовать для определения местоположения цели в дальней зоне [14]. Точность метода зависит от характеристик измерителей амплитуды и мощности.

Представляет научный интерес рассмотреть возможности амплитудного метода, основанного на закономерном затухании колебаний в пространстве и предназначенного для работы в ближней зоне при неизвестном направлении на источник излучения.

Синтез алгоритма определения координат источника излучения.

На рис.1 показано типовое расположение антенн при использовании амплитудного метода. Здесь обозначено: A_1 , A_2 , и A_3 – коллинеарно расположенные антенны; Ц – цель (ИИ); R_1 , R_2 и R_3 – дальности до цели от соответствующей антенны; θ_1 , θ_2 – направления на цель; L_1 и L_2 – известные базовые расстояния между антеннами. Сумма базовых расстояний может быть соизмерима с дальностью до цели. Начало координат соответствует точке расположения A_2 , (x, y) – искомые координаты источника излучения.

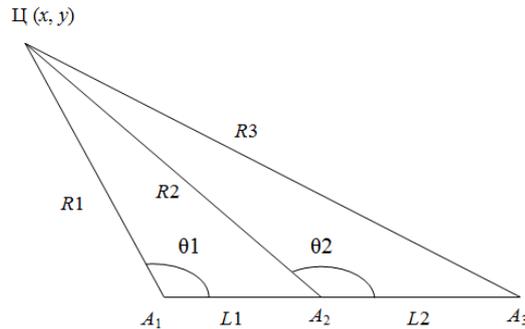


Рис. 1. Геометрия амплитудного метода

Необходимые соотношения для определения координат цели можно получить, используя теорему косинусов для треугольников $A_1 A_2 Ц$ и $A_1 A_3 Ц$ относительно угла θ_1 [12–14]:

$$\cos(\theta_1) = \frac{R_1^2 + L_1^2 - R_2^2}{2R_1L_1}. \quad (1)$$

$$\cos(\theta_1) = \frac{R_1^2 + (L_1 + L_2)^2 - R_3^2}{2R_1(L_1 + L_2)}. \quad (2)$$

Поделив числители на знаменатели в (1) и (2) выражениях, получим

$$\cos(\theta_1) = \frac{R_1}{2L_1} + \frac{L_1}{2R_1} - \frac{R_2^2}{2L_1R_1}, \quad (3)$$

$$\cos(\theta_1) = \frac{R_1}{2(L_1 + L_2)} + \frac{(L_1 + L_2)}{2R_1} - \frac{R_3^2}{2(L_1 + L_2)R_1}. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что амплитуда $A1$ электромагнитных колебаний [5, 6] в первом приемнике определяется как $A1 = \frac{\sqrt{W}}{4\pi R1}$, во втором – $A2 = \frac{\sqrt{W}}{4\pi R2}$, в третьем – $A3 = \frac{\sqrt{W}}{4\pi R3}$, где W – мощность ИИ, и учитывая соотношения $\frac{R2}{R1} = \frac{A1}{A2}$, $\frac{R3}{R1} = \frac{A1}{A3}$, а также, что $R2 = R1 \frac{A1}{A2}$ и $R3 = R1 \frac{A1}{A3}$, перепишем (3) и (4) в виде

$$\cos(\theta1) = \frac{R1}{2L1} + \frac{L1}{2R1} - \frac{R1A1^2}{2L1A2^2}, \quad (5)$$

$$\cos(\theta1) = \frac{R1}{2(L1+L2)} + \frac{(L1+L2)}{2R1} - \frac{R1A1^2}{2(L1+L2)A3^2}. \quad (6)$$

Приравнивая правые части (5) и (6), получаем

$$\frac{R1}{2L1} + \frac{L1}{2R1} - \frac{R1A1^2}{2L1A2^2} = \frac{R1}{2(L1+L2)} + \frac{(L1+L2)}{2R1} - \frac{R1A1^2}{2(L1+L2)A3^2}. \quad (7)$$

Решая (7) относительно $R1$, получаем выражение для вычисления $R1$

$$R1 = \sqrt{\frac{L2}{\left[\frac{1}{L1}\left(1-\frac{A1^2}{A2^2}\right) - \frac{1}{L1+L2}\left(1-\frac{A1^2}{A3^2}\right)\right]}}. \quad (8)$$

Учитывая, что $R2 = R1 \frac{A1}{A2}$, получаем выражение для вычисления $R2$

$$R2 = \sqrt{\frac{A1^2L2}{\left[\frac{1}{L1}\left(1-\frac{A1^2}{A2^2}\right) - \frac{1}{L1+L2}\left(1-\frac{A1^2}{A3^2}\right)\right]A2^2}}. \quad (9)$$

Если базовые расстояния равны, т.е. $L1 = L2 = L$, то выражение (8) несколько упрощается, т.е.

$$R1 = \sqrt{\frac{L^2}{\left[\frac{1}{2}\frac{A1^2}{A2^2} + \frac{A1^2}{2A3^2}\right]}}. \quad (10)$$

Аналогично и для (9) при $L1 = L2 = L$, выражение (9) тоже упрощается, т.е.

$$R2 = \sqrt{\frac{A1^2L^2}{\left[\frac{1}{2}\frac{A1^2}{A2^2} + \frac{A1^2}{2A3^2}\right]A2^2}}. \quad (11)$$

Направление на источник излучения может быть определено также с помощью теоремы косинусов. Найдём угол $\theta2$ (рис. 1). Для этого возьмём треугольник $A2, A3, Ц$ и запишем выражение

$$\cos(\theta2) = \frac{R2^2+L^2-R3^2}{2R2L} = \frac{R2}{2L} + \frac{L}{2R2} - \frac{R3A2}{2LA3}. \quad (12)$$

Выразив $R3$ в (12) через $R2$ и соотношения амплитуд,

$$\cos(\theta2) = \frac{R2}{2L} + \frac{L}{2R2} - \frac{R2A2^2}{2LA3^2} \quad (13)$$

получим направление на источник излучения

$$\theta2 = 180^0 - \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{R2}{L} + \frac{L}{R2} - \frac{R2A2^2}{LA3^2} \right) \right]. \quad (14)$$

Координаты источника излучения определяются из найденных величин $R2$ и $\theta2$, т.е.

$$x = R2\cos(\theta2); y = R2\sin(\theta2). \quad (15)$$

Анализ погрешностей алгоритма определения координат источника излучения. При измерении значений амплитуд A_i ($i = 1, 2, 3$) возникают погрешности, как в силу неточности измерений, так и вследствие наличия помех, поэтому встает вопрос о точности измерения искомых параметров R_2 и θ_2 . Эту точность можно получить, зная абсолютную погрешность измерения дальности, для определения которой воспользуемся методикой расчета при косвенных измерениях [18–20]. При косвенных измерениях результаты, полученные прямыми измерениями (в данном случае измерение амплитуд электромагнитных колебаний в приёмных антеннах) являются исходными данными для дальнейших вычислений. Погрешности прямых измерений амплитуд вследствие наличия внешних помех и аппаратных воздействий, приводят к тому, что окончательный результат расчета дальностей R_1 , R_2 и угла θ_2 будет иметь погрешность.

Выражение для расчёта абсолютной погрешности дальности σ_{R_2} , т.е. среднеквадратического отклонения величины R_2 , имеет следующий вид:

$$\sigma_{R_2} = \sqrt{\left[\frac{\partial R_2}{\partial A_1}\right]^2 \sigma_{A_1}^2 + \left[\frac{\partial R_2}{\partial A_2}\right]^2 \sigma_{A_2}^2 + \left[\frac{\partial R_2}{\partial A_3}\right]^2 \sigma_{A_3}^2}, \quad (16)$$

где $R_2 = \sqrt{\frac{A_1^2 L_2}{\left[\frac{1}{L_1} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right) - \frac{1}{L_1 + L_2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_3^2}\right)\right] A_2^2}}$ – анализируемая функция (9);

σ_{A_1} , σ_{A_2} и σ_{A_3} – среднеквадратические отклонения измеряемых величин A_1 , A_2 и A_3 , учитывающие действие аппаратуры и помех.

Получим аналитическое выражение для вычисления абсолютной погрешности дальности σ_{R_2} , т.е. среднеквадратического отклонения величины R_2 . В выражении (16) необходимо вычислить три частных производные по соответствующим аргументам A_1 , A_2 , A_3 . Осуществим это в такой же последовательности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_2}{\partial A_1} &= \left(\sqrt{\frac{A_1^2 L_2}{\left[\frac{1}{L_1} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right) - \frac{1}{L_1 + L_2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_3^2}\right)\right] A_2^2}} \right)'_{A_1} = \\ &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[A_1 (L_1^{-1} A_2^{-2} (A_2^2 - A_1^2) - (L_1 + L_2)^{-1} A_3^{-2} (A_3^2 - A_1^2))^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A_1}. \end{aligned}$$

Для упрощения дальнейших вычислений введем обозначение:

$$Y_2 = (L_1^{-1} A_2^{-2} (A_2^2 - A_1^2) - (L_1 + L_2)^{-1} A_3^{-2} (A_3^2 - A_1^2)).$$

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_2}{\partial A_1} &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[A_1 Y_2^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A_1} = \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[A_1' Y_2^{-\frac{1}{2}} + A_1 \left(Y_2^{-\frac{1}{2}} \right)'_{A_1} \right] = \\ &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[Y_2^{-\frac{1}{2}} + A_1 \left(-\frac{1}{2} Y_2^{-\frac{3}{2}} Y_2'_{A_1} \right) \right] = \\ &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[Y_2^{-\frac{1}{2}} - \frac{A_1}{2} Y_2^{-\frac{3}{2}} (-2A_1 (L_1^{-1} A_2^{-2} - (L_1 + L_2)^{-1} A_3^{-2})) \right] = \\ &= \frac{\sqrt{L_2}}{A_2} \left[\frac{1}{(Y_2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{A_1^2}{(Y_2)^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{1}{L_1 A_2^2} - \frac{1}{(L_1 + L_2) A_3^2} \right) \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sqrt{L2}}{A2} \left[\frac{1}{(Y2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{A1^2}{L1A2^2(Y2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{A1^2}{(L1+L2)A3^2(Y2)^{\frac{3}{2}}} \right] = \\
 &= \frac{\sqrt{L2}}{(Y2)^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{1}{A2} + \frac{A1^2}{L1A2^3Y2} - \frac{A1^2}{(L1+L2)A2A3^2Y2} \right] \\
 \frac{\partial R2}{\partial A2} &= \left(\frac{\sqrt{\frac{A1^2L2}{\left[\frac{1}{L1} \left(1 - \frac{A1^2}{A2^2} \right) - \frac{1}{L1+L2} \left(1 - \frac{A1^2}{A3^2} \right) \right] A2^2}}}{A2} \right)'_{A2} = \\
 &= \sqrt{L2}A1 \left[A2^{-1}(L1^{-1}A2^{-2}(A2^2 - A1^2) - (L1+L2)^{-1}A3^{-2}(A3^2 - A1^2))^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A2} = \\
 &= A1\sqrt{L2} \left[A2^{-1}Y2^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A2} = A1\sqrt{L2} \left[-A2^{-2}Y2^{-\frac{1}{2}} + A2^{-1} \left(Y2^{-\frac{1}{2}} \right)'_{A2} \right] = \\
 &= A1\sqrt{L2} \left[-A2^{-2}Y2^{-\frac{1}{2}} + A2^{-1} \left(-\frac{1}{2} Y2^{-\frac{3}{2}} Y2'_{A2} \right) \right] = \\
 &= A1\sqrt{L2} \left[-A2^{-2}Y2^{-\frac{1}{2}} + A2^{-1} \left(-\frac{1}{2} Y2^{-\frac{3}{2}} (2L1^{-1}A1^2A2^{-3}) \right) \right] = \\
 &= \frac{A1\sqrt{L2}}{(Y2)^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{-1}{A2^2} - \frac{A1^2}{L1A2^4Y2} \right], \\
 \frac{\partial R2}{\partial A3} &= \left(\frac{\sqrt{\frac{A1^2L2}{\left[\frac{1}{L1} \left(1 - \frac{A1^2}{A2^2} \right) - \frac{1}{L1+L2} \left(1 - \frac{A1^2}{A3^2} \right) \right] A2^2}}}{A3} \right)'_{A3} = \\
 &= \sqrt{L2} \frac{A1}{A2} \left[(L1^{-1}A2^{-2}(A2^2 - A1^2) - (L1+L2)^{-1}A3^{-2}(A3^2 - A1^2))^{-\frac{1}{2}} \right]'_{A3} = \\
 &= \sqrt{L2} \frac{A1}{A2} \left[\left(-\frac{1}{2} \right) \left(Y2^{-\frac{3}{2}} \right) \frac{-2A1^2}{(L1+L2)A3^3} \right] = \sqrt{L2} \frac{A1}{A2} \left[\frac{A1^2}{(Y2)^{\frac{3}{2}}(L1+L2)A3^3} \right].
 \end{aligned}$$

Подставляя в (16) полученные выражения частных производных и осуществляя соответствующие преобразования, получаем формулу расчета абсолютной погрешности измеряемого расстояния R2 до цели:

$$\sigma_{R2} = \frac{\sqrt{L2}}{\sqrt{Y2}} \sqrt{\left[\frac{1}{A2} + \frac{A1^2}{A2Y2} Z1 \right]^2 \frac{A1^2}{q_1^2} + \left[\frac{-A1}{A2^2} - \frac{A1^3}{A2^4L1Y2} \right]^2 \frac{A2^2}{q_2^2} + [Z2]^2 \frac{A3^2}{q_3^2}}, \quad (17)$$

где $Z1 = \frac{1}{L1A2^2} - \frac{1}{A3^2(L1+L2)}$;

$$Z2 = \frac{A1^3}{A2A3^3Y2(L1+L2)};$$

$q_1 = \frac{A1}{\sigma_{A1}}, q_2 = \frac{A2}{\sigma_{A2}}, q_3 = \frac{A3}{\sigma_{A3}}$ – отношения сигнал/помеха в соответствующих антеннах.

В выражении (12) присутствует отношение сигнал/помеха в соответствующих антеннах. Анализ алгоритма определения местоположения источника излучения в таком виде предполагает, что отношения сигнал/помеха во всех приёмных антеннах равны друг другу. В реальных условиях это отношение может зависеть от местоположения источника излучения относительно приёмных антенн пассивного локатора и от расположения источника помех в пространстве.

Рассмотрим случай равномерного распределения помех по пространству, аддитивно связанных с сигналом и некоррелированных с ним, что позволит при вычислении среднеквадратического значения погрешности координат ИИ учесть изменение отношения сигнал/помеха.

Так в (17) $q_1 = \frac{A_1}{\sigma_{A_1}}, q_2 = \frac{A_2}{\sigma_{A_2}}, q_3 = \frac{A_3}{\sigma_{A_3}}$ – отношения сигнал/помеха в соответствующих антеннах. При принятых условиях $\sigma_{A_1} = \sigma_{A_2} = \sigma_{A_3}$ и при условии, что эти значения постоянны, отношения сигнал/помеха зависят от амплитуд колебаний в антеннах. Для учёта этого изменения амплитуд необходимо ввести коэффициенты, учитывающие расположение ИИ относительно приёмных антенн. Так как значение амплитуды принимаемых колебаний зависит от расстояния до ИИ и учитывая, что начало координат соответствует точке расположения A_2 (см. рис. 1), коэффициент $K_1 = R_2/R_1$, коэффициент $K_2 = R_2/R_2 = 1$, а коэффициент $K_3 = R_2/R_3$. Умножение коэффициентов на соответствующие значения отношения сигнал/помеха, т.е. $q_1 \cdot K_1$ и $q_3 \cdot K_3$ в выражении (17) позволяют учесть изменение амплитуд колебаний в приёмных антеннах от пространственного расположения ИИ.

Произведём вычисление значений абсолютной погрешности измерения координат ИИ при следующих параметрах: $L_1 = L_2 = 3000$ м, расстояния до ИИ $R_2 = 5000$ м, 4000 м, 3000 м, 2000 м, 1000 м, отношение сигнал/помеха $q = 100$ (40 дБ). Результаты вычислений для разных положений ИИ приведены на рис. 2.

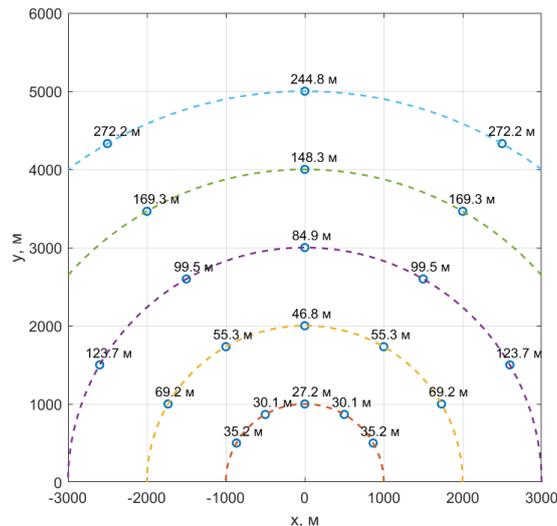


Рис. 2. Абсолютная погрешность определения местоположения источника излучения от его расположения на плоскости

Представленные на рис. 2 графики показывают, что абсолютная погрешность определения местоположения источника излучения минимальна вблизи начала координат, расположенного в точке A_2 , и возрастает при удалении от нее. На одинаковых расстояниях наименьших значений абсолютная погрешность достигает на нормали (к антенной базе), проходящей через начало координат, и увеличивается при отклонении от нее. При нахождении ИИ на значительном расстоянии (более 4 км), измерение его дальности выполняется с большой погрешностью (более 148 м).

Заключение. На основе аналитических выражений синтезирован алгоритм определения координат источника излучения в двумерном пространстве при коллинеарном расположении антенн, использующий закономерное затухание колеба-

ний в пространстве. Абсолютная погрешность измерения дальности рассчитана по методике косвенных вычислений. Приведенный алгоритм ввиду простоты аппаратной реализации может применяться в пассивных локационных системах как самостоятельно, так и в дополнение к широко известному РДМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.* Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы. – СПб.: Наука, 2004. – 410 с.
2. *Carter G.C.* Passive Ranging Errors due to Receiving Hydrophone Position Uncertainty // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1979. – Vol. 65, No. 2. – P. 528-530.
3. *Картер Дж. К.* Обработка сигналов в пассивной гидролокации // Подводная акустика и обработка сигналов. – М.: Мир, 1985. – С. 415-421.
4. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / под ред. Ширмана Я.Д. – М., Советское радио, 1970. – 560 с.
6. *Бакулев П.А.* Радиолокационные системы: учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
7. *Караваев В.В., Сазонов В.В.* Статистическая теория пассивной локации. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
8. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
9. *Беляевский Л.С., Новиков В.С., Олянюк П.В.* Основы радионавигации: учебник для вузов гражд. авиации. – М.: Транспорт, 1982. – 288 с.
10. *Марьев А.А., Маркович И.И., Завтур Е.Е.* Исследование погрешностей разностно-дальномерного метода пассивной локации // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Тр. Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 391-395.
11. *Маркович И.И., Завтур Е.Е.* Алгоритм определения координат целей разностно-дальномерным методом с учетом неточностей установки приемных гидроакустических антенн // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 8. – С. 162-171.
12. *Сытенький В.Д.* Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2011. – Вып. 1. – С. 69-76.
13. *Сытенький В.Д., Бакаев А.В.* Определение координат объекта по известным параметрам источников излучения // Вестник воздушно-космической обороны. – 2018. – № 3 (19). – С. 94-101.
14. *Сытенький В.Д.* Определение местоположения источника излучения в космическом пространстве // Матер. Всероссийской научно-технической конференции «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» КомТех-2019. – Таганрог: ИРТСУ ЮФУ, 2019. – С. 250-256.
15. *Понарин Я.П.* Элементарная геометрия: В 2 т. Т. 1: Планиметрия, преобразования плоскости. – М.: МЦНМО, 2004. – 312 с.
16. *Корн Г.А., Корн Т.М.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
17. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
18. *Мирский Г.Я.* Радиоэлектронные измерения. – М.: Энергия, 1975. – 265 с.
19. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / под ред. *Ю.М. Казаринова.* – М.: Сов. радио, 1975. – 296 с.
20. Электрорадиоизмерения: учеб. пособие для вузов / под ред. В.И. Винокурова. – М.: Высшая школа, 1976. – 264 с.

REFERENCES

1. *Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V.* Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika: Sostoyanie i aktual'nye problem [Shipboard hydroacoustic equipment: Current state and current problems]. Saint Petersburg: Nauka, 2004, 410 p.
2. *Carter G.C.* Passive Ranging Errors due to Receiving Hydrophone Position Uncertainty, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1979, Vol. 65, No. 2, pp. 528-530.

3. *Karter Dzh.K.* Obrabotka signalov v passivnoy gidrolokatsii [Signal processing in passive sonar], *Podvodnaya akustika i obrabotka signalov* [Underwater acoustics and signal processing]. M.: Mir, 1985, pp. 415-421.
4. *Shirman Ya.D., Manzhos V.N.* Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh [Theory and technique of processing radar information against the background of interference]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 416 p.
5. Teoreticheskie osnovy radiolokatsii: ucheb. posobie dlya vuzov [Theoretical foundations of radar: a textbook for universities], ed. by Shirmana Ya.D. Moscow: Sovetskoe radio, 1970, 560 p.
6. *Bakulev P.A.* Radiolokatsionnye sistemy: uchebnyk dlya vuzov [Radar systems: textbook for universities]. Moscow: Radiotekhnika, 2004, 320 p.
7. *Karavaev V.V., Sazonov V.V.* Statisticheskaya teoriya passivnoy lokatsii [Statistical theory of passive location]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 240 p.
8. *Chernyak V.S.* Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya [Multi-position radar]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 416 p.
9. *Belyaevskiy L.S., Novikov V.S., Olyanyuk P.V.* Osnovy radionavigatsii: uchebnyk dlya vuzov grazhd. Aviatsii [Fundamentals of radio navigation: a textbook for higher education institutions of the Russian Federation. Aviation]. Moscow: Transport, 1982, 288 p.
10. *Mar'ev A.A., Markovich I.I., Zavtur E.E.* Issledovanie pogreshnostey raznostno-dal'nomernogo metoda passivnoy lokatsii [Research of errors of the difference-range-measuring method of passive location], *Izlučenje i rasseyaniye elektromagnitnykh voln: Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izlučenje i rasseyaniye elektromagnitnykh voln» IREMV-2015* [Radiation and scattering of electromagnetic waves: Proceedings of the International Scientific Conference "Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves" IREMV-2015]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 391-395.
11. *Markovich I.I., Zavtur E.E.* Algoritm opredeleniya koordinat tseley raznostno-dal'nomernym metodom s uchedom netochnostey ustanovki priemnykh gidroakusticheskikh antenn [Algorithm for determining the coordinates of targets by the difference-range-measuring method, taking into account the inaccuracies of the installation of receiving hydroacoustic antennas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 8, pp. 162-171.
12. *Syten'kiy V.D.* Passivnaya lokatsiya na osnove amplitudnykh izmereniy [Passive location based on amplitude measurements], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Izvestiya vuzov Rossii. Radio electronics], 2011, Issue 1, pp. 69-76.
13. *Syten'kiy V.D., Bakaev A.V.* Opredelenie koordinat ob"ekta po izvestnym parametram istochnikov izlucheniya [Determining the coordinates of an object based on known parameters of radiation sources], *Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony* [Bulletin of Aerospace Defense], 2018, No. 3 (19), pp. 94-101.
14. *Syten'kiy V.D.* Opredelenie mestopolozheniya istochnika izlucheniya v kosmicheskom prostranstve [Determining the location of a radiation source in outer space], *Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» KomTekh-2019* [Materials of the All-Russian scientific and Technical conference "Computer and Information Technologies in Science, engineering and Management" Komtech-2019]. Taganrog: IRTSU YuFU, 2019, pp. 250-256.
15. *Ponarin Ya.P.* Elementarnaya geometriya: V 2 t. T. 1: Planimetriya, preobrazovaniya ploskosti [Elementary geometry: In 2 vol. Vol. 1: Planimetry, plane transformations]. Moscow: MTSNMO, 2004, 312 p.
16. *Korn G.A., Korn T.M.* Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of mathematics for researchers and engineers]. Moscow: Nauka, 1974, 832 p.
17. *Bronshhteyn I.N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov [Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions]. 13 ed. Moscow: Nauka, 1986, 544 p.
18. *Mirskiy G.Ya.* Radioelektronnye izmereniya [Radioelectronic measurements]. Moscow: Energiya, 1975, 265 p.
19. Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov v radionavigatsionnykh sistemakh [Search, detection and measurement of signal parameters in radio navigation systems], ed. by Yu.M. Kazarinova. Moscow: Sov. radio, 1975, 296 p.
20. *Elektro-radioizmereniya: ucheb. posobie dlya vuzov* [Electro-radio measurements: a textbook for universities], ed. by V.I. Vinokurova. Moscow: Vysshaya shkola, 1976, 264 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Федосов

Сытенский Василий Дмитриевич – Институт радиотехнических систем и управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vdsytenkiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

Маркович Игорь Ильич – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: marko@sfedu.ru, г. Таганрог, Россия; тел.: 88634394055; директор-главный конструктор; к.т.н.; с.н.с.

Завтур Евгений Евгеньевич – e-mail: zavtur90@mail.ru; тел.: 88634393075; начальник сектора.

Syten'kiy Vasilij Dmirtievich – Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Federal State-Owned Educational of Higher Education «Southern Federal University»; e-mail: vdsytenkiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone.: +78634371632; the department of theoretical foundations of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Markovich Igor Il'ich – SFEDU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational of Higher Education «Southern Federal University»; e-mail: marko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634394055; cand. of eng. sc.; senior fellow; director – chief designer.

Zavtur Evgeny Evgenevich – e-mail: zavtur90@mail.ru; phone: +78634393075; head of section.

УДК 681.518.3

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-81-93

В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, А.В. Зуев, А.С. Губанков, Д.Д. Минаев

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ*

Предложена архитектура цифровой платформы для реализации распределенных систем управления и навигации подводных робототехнических комплексов (ПРК), выполняющих технологические операции в условиях неопределенности окружающей среды. Предлагаемая цифровая платформа предназначена для автоматизации следующих видов деятельности: мониторинг состояния объектов подводной инфраструктуры (линии связи, трубопроводы, добычное оборудование и т.д.), картографические и геодезические работы, определение параметров и границ физических полей, зон распространения химических соединений (зон загрязнения) и биоресурсов, охрана объектов подводной и надводной инфраструктуры (подводные фермы марикультур, границы водных заповедников и т.п.), сопровождение движущихся объектов, поиск объектов заданного типа (биологических, техногенных и др.), выполнение подводных технологических операций (сварка, резка, очистка и т.п.). Для этой платформы разработана система команд, обеспечивающая гибкое задание миссий ПРК различного типа и назначения. Выделены пять типов сообщений цифровой платформы: команды управления порядком выполнения миссии, команды управления загрузкой миссии, информационные сообщения, команды миссии и группового управления. Предложена концепция создания распределенных систем управления ПРК, обеспечивающая совместимость существующих бортовых систем ПРК с предлагаемым решением на основе компактных гидроакустических систем глобальной гидроакустической навигации, разработанных в ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток). Указанные системы управления состоят из двух основных частей. Первая часть представляет собой исходную бортовую информационно-управляющую систему ПРК, обеспечивающую его движение в заданную точку пространства с заданной скоростью, получение данных от бортовых датчиков, а также управление работой бортового оборудования. Вторая часть – система управления верхнего уровня, обеспечивает возможность взаимодейст-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 20-38-70161, 19-08-00347.

вия ПРК через акустический канал связи с глобальной гидроакустической навигационной системой и автоматизированным рабочим местом оператора. Исследования передачи данных в симуляторе (CoppeliaSim) между оператором и ПРК в рамках предложенной цифровой платформы показали, что обеспечивается надежная загрузка миссий и получение информации о состоянии ПРК при различных скоростях и в различных условиях работы акустического канала связи.

Подводный робототехнический комплекс; цифровая платформа; информационно-управляющая система; гидроакустическая информационно-навигационная система.

V.F. Filaretov, D.A. Yukhimets, A.V. Zuev, A.S. Gubankov, D.D. Minaev

DIGITAL PLATFORM FOR THE CREATION OF DISTRIBUTED CONTROL AND NAVIGATION SYSTEMS FOR UNDERWATER VEHICLES

The paper proposes the architecture of a digital platform for the implementation of distributed control and navigation systems of underwater vehicles (UV), that perform technological operations in an uncertain environment. The proposed digital platform is designed to automate the following activities: monitoring the state of underwater infrastructure objects (communication lines, pipelines, mining equipment, etc.), cartographic and geodesic works, determining the parameters and boundaries of physical fields, zones of distribution of chemical compounds (pollution zones) and bioresources, protection of underwater and surface infrastructure objects (underwater mariculture farms, borders of water reserves, etc.), tracking moving objects, searching for objects of a given type (biological, man-made, etc.), performing underwater technological operations (welding, cutting, cleaning, etc.). For this platform, a command system has been developed that provides flexible assignment of various types and purposes of UV missions. There are five types of digital platform messages: mission order management commands, mission load management commands, information messages, mission and group control commands. The concept of building distributed control systems of the UV is proposed, which ensures the compatibility of existing on-board UV systems with the proposed solution based on the combined hydroacoustic systems of global hydroacoustic navigation developed in PAO "Dalpribor" (Vladivostok). These control systems consist of two main parts. The first part is the initial on-board information and control system of the UV, which ensures its movement to a given point in space at a given speed, receiving data from on-board sensors, as well as controlling the operation of on-board equipment. The second part – the high level control system, provides the possibility of interaction of the control system through an acoustic communication channel with the global hydro-acoustic navigation system and the operator's automated workplace. Simulation of the data transfer in CoppeliaSim between the operator and the UV within the proposed digital platform have shown that reliable mission loading and receiving information about the state of the UV is provided at different speeds and under different operating conditions of the acoustic communication channel.

Underwater vehicle; digital platform; information and control system; hydroacoustic information and navigation system.

Введение. В настоящее время в шельфовой зоне России (и особенно в арктических морях) разворачиваются работы по добыче углеводородов и других полезных ископаемых с помощью надводных и подводных робототехнических комплексов. Ведутся работы по эффективной проводке судов в сложной ледовой обстановке северных морей. Технические средства подводной добычи и транспортировки этого сырья (особенно подо льдом) и проводки судов во льдах требуют непрерывного контроля их работоспособности, возможного ремонта и обеспечения безопасности (защиты от несанкционированного проникновения). Традиционное использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) пока в основном позволяет выполнять относительно простые обзорные операции, а более сложные, реализуемые вблизи подводных сооружений и объектов, выполняются с помощью телеуправляемых аппаратов, использование которых возможно только при отсутствии ледяного покрова, а также при наличии дорогостоящих судов обеспечения и многочисленного высококвалифицированного обслуживающего персонала [1, 2].

При этом для решения задач управления, навигации и связи с АНПА сейчас используют традиционные гидроакустические системы, требующие длительного развертывания и настройки, специальные акустические системы связи, имеющие очень низкую пропускную способность и ограниченную дистанцию этой связи. Все это не позволяет обеспечивать эффективную высококачественную навигацию и управление АНПА при выполнении сложных подводных технологических работ (особенно при наличии переменных и неизвестных подводных течений). Решением возникшей проблемы является использование гидроакустических станций и комплексов, оснащаемых датчиками (приемниками и излучателями) большого радиуса действия, которые могут определять точные координаты всех надводных и подводных объектов, а также обеспечивать обмен навигационной информацией между этими объектами, реализуя глобальную навигационную систему контроля на протяженных морских акваториях.

Выполненный анализ мирового уровня исследований в данной области науки показал, что в настоящее время проводятся широкомасштабные исследования по созданию многофункциональных АНПА практически для всех видов подводных работ. В частности, в Массачусетском и Лиссабонском технологических институтах эти комплексы разрабатываются на основе автономных роботов Bluefin и MARES. Компанией Lockheed Martin разработан комплекс Marlin, предназначенный для инспектирования и обследования различных гидросооружений. Успешно решаются задачи создания морских робототехнических комплексов для выполнения технологических операций, оснащаемых одним или несколькими подводными манипуляторами [3-6]. Близкие работы ведутся и в ряде других мировых центров подводной робототехники (MBARI /USA/, WHOI /USA/, IFREMER /FRANCE/, ATLAS/GERMANY/ и др.). Эти подводные комплексы проектируются для выполнения многих технологических и исследовательских операций. Уже разработаны и исследованы системы навигации и автоматического управления перемещениями АНПА [7-10]. Известны подходы к реализации информационно-управляющих систем (ИУС) для АНПА разработки ФГБУН ИПМТ ДВО РАН [11, 12], а также НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, НПО «Аврора», НПП ПТ «Океанос», Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет, ЦКБ «Рубин».

В настоящее время одной из ключевых задач является снижение трудоемкости применения АНПА, что достигается применением гидроакустических навигационных систем нового типа, позволяющих исключить длительную процедуру установки и калибровки традиционных систем с длинной базой в зоне работ. Эта задача сейчас решается в двух направлениях. Первое заключается в создании сетей стационарных донных гидроакустических станций, позволяющих обеспечить освещение подводной обстановки в заданном районе Мирового океана. Примером реализации подводной акустической сети служат системы Telesonar и SeaWeb [13-17]. Telesonar соединяет распределенные подводные узлы, объединяет их в один ресурс, обрабатывает информацию и передает ее в подводное пространство. SeaWeb обеспечивает передачу команд, связь и навигационную инфраструктуру для координирования автономных узлов с целью выполнения поставленных задач в любой точке подводной среды. Однако использование подобных сетей имеет существенные недостатки, заключающиеся в высокой стоимости развертывания и эксплуатации, а также привязки их к конкретному району работ. Другой подход заключается в использовании мобильных автономных навигационных систем, которые обеспечивают навигацию АНПА в процессе его работы с помощью надводных автономных аппаратов [18]. Однако такие системы, формируя навигационную поддержку АНПА при выполнении ими работ в заранее неподготовленных районах, не могут реализовать освещение подводной и надводной обстановки, отследить текущее положение АНПА, а также выдать ему новые целеуказания в соответствии с полученной информацией.

В настоящее время на ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток) уже разработаны и частично испытаны основные элементы базовых компонентов компактных гидроакустических систем глобальной гидроакустической навигации. Эти компоненты позволяют создать подводную инфраструктуру связи и мониторинга, реализующую сложные цифровые системы для комплексной автоматизации выполнения многих подводных технологических операций.

Для успешного использования таких станций требуется создание новых принципов построения ИУС АНПА, обеспечивающих их эффективное взаимодействие между собой и с элементами подводной инфраструктуры для успешного решения указанных выше задач. В работе описывается архитектура предлагаемой цифровой платформы (ЦП) для реализации распределенных систем навигации и управления ПРК на основе указанных станций, а также приводятся результаты предварительных исследований ее работы.

Концепция распределенной системы управления и навигации ПРК на основе гидроакустических информационно-навигационных систем. Линейка разработанных ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток) высокоточных гидроакустических информационно-навигационных систем (ГИНС) показана на рис. 1, а их основные характеристики приведены в табл. 1.



Рис. 1. Общий вид новых гидроакустических станций, разработанных на ПАО «Дальприбор»

Таблица 1

Основные характеристики ГИНС

	а	б	с
Дистанция	до 1500 м	700 м	≈ 40,0 км (глубокое море, Японское и Охотское моря) ≈ 15,0 км (мелкое море, Баренцево море)
Точность	± 0.1м (до дистанций 1500 м) 0.5°	пеленг 1,0° дальность 2% от шкалы	пеленг 1,0° дальность 2% от шкалы
Сектор обзора	120°	360°	360°
Потребляемая мощность	не более 20 Вт	не более 100 Вт	не более 3...5кВт
Вес в воздухе	9 кг	9.4 кг	не более 3.0 т

На основе указанных систем и станций предполагается создать базовую подводную инфраструктуру мониторинга, связи и управления для комплексной автоматизации выполнения многих подводных технологических операций. Однако отсутствие современных робототехнических комплексов, способных эффективно взаимодействовать с подводными гидроакустическими станциями и элементами подводной инфраструктуры пока не позволяет успешно решать указанные выше задачи.

Таким образом, создание ПРК, включающего в свой состав АНПА, ГИНС, модули полезной нагрузки, а также средства обеспечения и обслуживания позволит обеспечить отработку перспективных решений в области управления, навигации и связи для автономных подводных роботов, выполняющих технологические операции в различных, в том числе арктических, условиях.

Разрабатываемая ЦП предназначена для автоматизации следующих видов деятельности: мониторинг состояния объектов подводной инфраструктуры (линии связи, трубопроводы, добычное оборудование и т.д.), картографические и геодезические работы, определение параметров и границ физических полей, зон распространения химических соединений (зон загрязнений) и биоресурсов, охрана объектов подводной и надводной инфраструктуры (подводные фермы марикультур, границы водных заповедников и т.п.), сопровождение движущихся объектов, поиск объектов заданного типа (биологических, техногенных и др.), выполнение подводных технологических операций (сварка, резка, очистка и т.п.).

Общая схема построения системы цифровой платформы взаимодействия с ПРК на основе использования ГИНС показана на рис. 2.

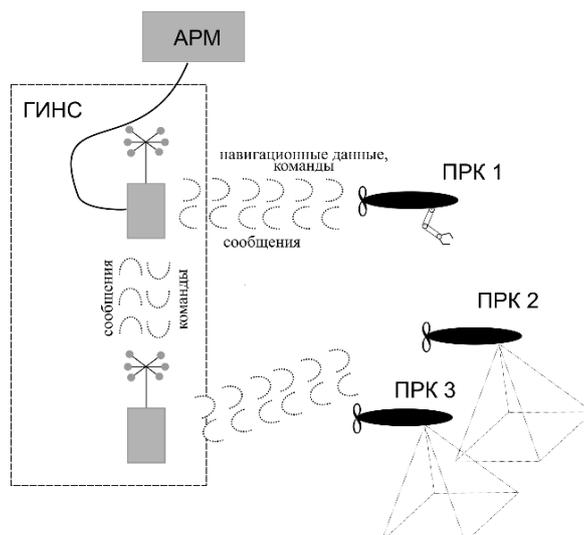


Рис. 2. Схема взаимодействия ПРК с ГИНС

Как видно из представленной схемы, взаимодействие между автоматизированным рабочим местом оператора (АРМ) и ПРК происходит через акустический канал связи, реализованный в ГИНС. По этому каналу связи от АРМ на ПРК передаются сформированные миссии и отдельные команды, требующие выполнения с прерыванием текущей миссии, а от ГИНС передается информация о положении ПРК в глобальной системе координат. При этом по указанным каналам от ПРК на АРМ передается информация о текущем состоянии ПРК, оборудования и возникновении заданных событий (обнаружение искомого объекта, окончание миссии и т.д.).

Для реализации описанной концепции был разработан подход к созданию ИУС ПРК, обеспечивающий совместимость существующих бортовых информационно-управляющих систем (БИУС) ПРК с предлагаемым решением на основе ГИНС, а также предложена система команд, обеспечивающая гибкое задание миссий ПРК различного типа.

Реализация ИУС ПРК, совместимых с цифровой платформой для реализации распределенных систем управления и навигации. Общая схема реализации ИУС, обеспечивающая совместимость БИУС ПРК с цифровой платформой показана на рис. 3.

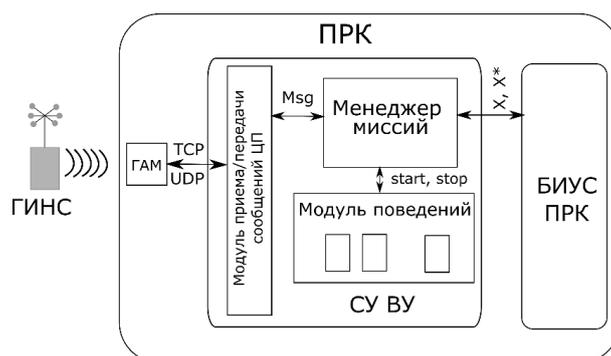


Рис. 3. Общая схема реализации ИУС ПРК, совместимой с цифровой платформой

Как видно из представленного рисунка ИУС ПРК состоит из двух основных частей. Первая часть представляет собой исходную БИУС ПРК, обеспечивающую его движение в заданную точку пространства с заданной скоростью, получение данных от бортовых датчиков, а также управление работой бортового оборудования. Вторая часть – система управления верхнего уровня (см. СУ ВУ на рис. 3), обеспечивает возможность взаимодействия ПРК через акустический канал связи с ГИНС и АРМ. Указанная часть имеет модульную структуру, каждый модуль работает независимо друг от друга в отдельных потоках. Модуль приема/передачи сообщений выполняет следующие задачи:

- ◆ прием данных по протоколу TCP/IP или UDP/IP от гидроакустического модема (ГАМ) ПРК, поддерживающего связь с ГИНС по акустическому каналу связи;
- ◆ декодирование полученных данных и формирование сообщения, который может быть обработан менеджером, и сохранение его в очереди сообщений, доступной менеджеру;
- ◆ выборка сообщения из очереди сообщений, формируемой менеджером в процессе его работы, кодирование сообщения в формат цифровой платформы и передача по протоколу TCP (UDP) в акустический модем для отправки на АРМ.

Менеджер миссий выполняет следующие задачи:

- ◆ анализ очереди сообщений, полученных от ГИНС, и выполнение действий, предписываемых этими сообщениями (формирование и коррекция миссий, пересылка данных, полученных в сообщениях, в БИУС ПРК);
- ◆ контроль выполнения текущей миссии и запуск поведения, соответствующего текущей команде миссии;
- ◆ выявление и обработка внешних событий, требующих формирования очереди сообщений, входящих в систему сообщений цифровой платформы для отсылки по акустическому каналу на пульт оператора;

♦ формирование и отправка внутренних сообщений БИУС ПРК, содержащих навигационную информацию, полученную от ГИНС, и сообщений, содержащих программные сигналы движения ПРК, сформированные поведением, реализующим текущую команду миссии.

Основная задача, выполняемая модулем поведений, является формирование программных сигналов движения, заданных соответствующей командой миссии, в соответствии с параметрами этой команды.

Алгоритм работы каждого поведения состоит в расчете в реальном масштабе времени положения программной точки, задающей желаемое положение ПРК, на траектории, соответствующей типу команды. При этом перемещение указанной программной точки осуществляется со скоростью, заданной в команде. При выходе ПРК в заданную окрестность конечной точки траектории поведение выставляет флаг успешного выполнения команды, после чего менеджер миссии активирует выполнение следующей команды миссии.

Основой предлагаемой цифровой платформы является система сообщений, обеспечивающей передачу информации и взаимодействие оператора и ПРК в рамках этой цифровой платформы.

Сообщение представляет собой телеграмму (пакет, кадр) переменной длины (зависит от типа команды), имеющей следующую структуру:

заголовок – данные – контрольная сумма.

Заголовок команды имеет одинаковую структуру для всех типов команд и состоит из следующих последовательно расположенных полей:

- ♦ код типа сообщения – 8 бит;
- ♦ адрес получателя – 15 бит;
- ♦ адрес отправителя – 15 бит;
- ♦ флаг подтверждения (CF) – 2 бита (1 бит – является ли сообщение подтверждением, 2 бит – нужно ли подтверждение);
- ♦ размер данных – фиксированный для каждой команды;
- ♦ номер команды – 8 бит;
- ♦ контрольная сумма (CRC) – 8 бит.

Выделяются следующие типы сообщений цифровой платформы.

1. Команды управления порядком выполнения миссии – позволяют изменить предписанный порядок выполнения команд в миссии, приостановить или досрочно ее прекратить. В качестве таких команд выступают:

OK – подтверждение успешного выполнения команды миссии.

FAILURE – завершение команды с ошибкой (невозможность выполнения команды).

GOTO – безусловный переход к заданной команде миссии.

BACK – возвращение к точке старта.

STOP – прервать выполнение текущей миссии и ожидать поступление команд или новой миссии.

PAUSE – приостановить миссию. Возобновить с текущей команды после команды START.

START – запустить миссию на выполнение или продолжить выполнение миссии после PAUSE.

UP – аварийное всплытие.

WAIT – режим ожидания в течение заданного промежутка/до заданного момента времени.

ACKN – подтверждение получения команды.

2. Команды, управляющие загрузкой миссии – обеспечивают процесс удаленной загрузки и коррекции миссии ПРК.

LOAD_MISS_ST – начало загрузки миссии.

LOAD_MISS_END – окончание загрузки миссии.

REMOVE_CMD – удаление последовательности команд из миссии.

UPLOAD_MISS_ST – начало выгрузки миссии.

UPLOAD_MISS_END – окончание выгрузки миссии.

NON_CORRECT_MISS_TRANSF – полученная миссия некорректна.

GET_HASH_MISS – запрос хэша миссии.

HASH_MISS – хэш миссии.

3. Информационные сообщения - используются для запроса и передачи информации между ПРК и пультом оператора. Информационные сообщения не включаются в состав миссии и могут передаваться независимо от выполняющейся команды миссии.

NAVIG – информация о текущем положении ПРК, полученная от гидроакустической станции

GET_STATUS – запрос текущего статуса ПРК.

STATUS_00 – текущий состав оборудования ПРК.

STATUS_01 – номер выполняемой команды миссии.

STATUS_02 – текущие навигационные данные.

STATUS_03-STATUS_35 – состояние оборудования.

EVENT_HAPPEN – сообщение о наступлении события.

SET_EVENT – задание события и его порогового значения, на которое ПРК должен реагировать.

REMOVE_EVENT – удалить событие, на которое ПРК должен реагировать.

SET_PARAM – установка значения параметра.

4. Команды миссии задают маршрут и режим движения ПРК [19]. Каждая команда обеспечивает переход ПРК из его текущего положения в положение, заданное командой, в соответствии с желаемым режимом движения [20]. В качестве основных примитивов движения выделяются: движение в заданную точку (результатирующая траектория не имеет значения), движение по прямой, движение по сплайну.

Способ реализации режимов движения ПРК, заданных в командах миссии, не оговаривается и зависит от особенностей информационно управляющей системы конкретного ПРК.

В качестве базовых команд определены следующие:

MOVE2P – движение к точке с заданными координатами с заданной скоростью.

MOVE_STR – движение в точку с заданными координатами с заданной скоростью по прямой.

MOVE_SMOOTH – выход в точку с заданными координатами с заданной ориентацией.

SEARCH_SPR – поиск в заданном районе по архимедовой спиральной траектории.

SEARCH_SNAKE – поиск расходящейся змейкой.

MOVE_ALONG – движение вдоль протяженного объекта.

EQUIP – управление оборудованием.

TRACKING – слежение за заданным объектом.

5. Команды группового управления. В качестве группового управления рассматривается режим строевого управления, реализующий стратегию «лидер-ведомые». В этом режиме в группе ПРК задается один ПРК-лидер, а все остальные

задаются как ПРК-ведомые. Миссия загружается только на ПРК-лидер, а ПРК-ведомые должны следовать за лидером, соблюдая заданную позицию относительно лидера. Они имеют следующий вид:

GR_SET_ROLE – установить роль ПРК в группе (лидер или ведомый).

GR_LIDER_FOLLOWING – следование за лидером.

GR_MOVE2IP – выход в начальное положение для движения за лидером.

GR_DISMISSED – расформирование группы.

Следует отметить, что описанный набор сообщений может быть расширен при условии сохранения формата сообщения.

Исследование передачи данных между АРМ и ПРК в рамках предложенной цифровой платформы. При проведении исследований в симуляторе (CorreliaSim) размещались два узла, на разных расстояниях (см. колонку «Дистанция» табл. 2 и 3). Первым узлом является ГИНС, которая осуществляет передачу тестовой миссии второму узлу в виде последовательности команд (сообщений) в формате ЦП через моделируемый гидроакустический канал связи. Координаты положения ГИНС во всех экспериментах были постоянными со значением (0,0,0) в прямоугольной трехмерной системе координат. Вторым узлом является ПРК, который осуществляет приём тестовой миссии для ее выполнения от ГИНС через гидроакустический канал связи.

Таблица 2

Передача миссии

№	Дистанция, м	Скорость передачи, кБ/с	Вероят. получения сообщ.	Среднее кол-во команд, сообщ./мин	Кол-во пропущенных сообщ.	Время передачи основной миссии, с
1	100	7	0.99	268.9454243	2	9.36993074
2	400	4	0.9	75.70242279	7	33.2882345
3	400	0.8	0.8	36.02922293	25	69.9432237
4	1500	0.8	0.8	17.60655195	13	143.128536
5	7000	0.2	0.65	2.120489948	46	1188.4046

Таблица 3

Корректировка миссии

№	Дистанция, м	Скорость передачи, кБ/с	Вероят. получения сообщ.	Среднее кол-во команд, сообщ./мин	Кол-во пропущенных сообщ.	Время коррекции миссии, с
1	100	7	0.99	290.9631414	0	2.47454023
2	400	4	0.9	58.89287018	5	12.2255886
3	400	0.8	0.8	33.25837225	9	21.6486843
4	1500	0.8	0.8	12.74355427	8	56.4991512
5	7000	0.2	0.65	2.253563759	12	319.493956

При проведении испытаний осуществлялась проверка двух режимов работы: загрузка миссии на ПРК и ее корректировка. При этом была выбрана типовая для АНПА обзорно-поисковая миссия, состоящая из последовательности прямолинейных галсов, покрывающих заданную морскую акваторию траекторией движения в форме меандра (см. рис. 4). Основная миссия состояла из 40 команд MOVE2P, которые задавали координаты узловых точек меандра и скорость движения ПРК (1.5 м/с) на каждом прямолинейном участке. Координаты по оси Y для всех узловых точек были постоянными, как показано на рис. 4, а по оси X координаты сме-

щались относительно начального положения ПР. Кроме того, передавались еще две дополнительные команды для включения и отключения режима загрузки миссии: `LOAD_MISS_ST` и `LOAD_MISS_END`, соответственно. То есть сначала от ГИНС на борт ПРК пересылалась команда `LOAD_MISS_ST`, далее передавалась основная миссия из 40 команд движения в заданную точку с заданной скоростью, и в конце пересылалась последняя команда – `LOAD_MISS_END`. В процессе передачи миссии на каждую полученную команду от ГИНС с борта ПРК передавалось ответное подтверждающее сообщение, таким образом обеспечивалась гарантированная доставка заданной миссии. А корректность всей миссии обеспечивалась за счет проверки хэш-суммы по всем командам переданной миссии.

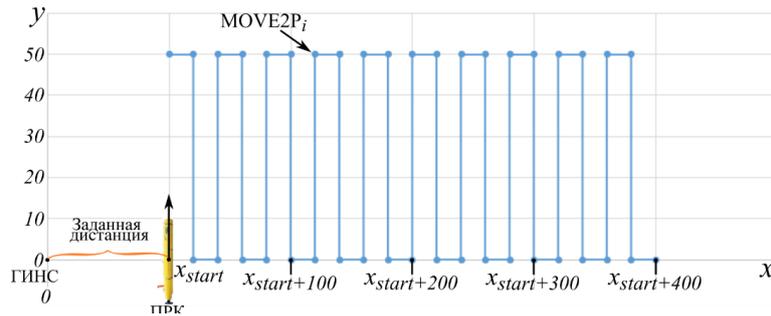


Рис. 4. Траектория движения, формируемая основной миссией

Основная миссия была сформирована автоматически, благодаря использованию унифицированных команд, предложенных в рамках ЦП, которые были реализованы в виде библиотеки функций.

Вторым режимом, который был проверен на испытаниях, являлся режим корректировки миссии. Для этого были изменены последние 10 команд основной миссии, так что была сформирована траектория движения, показанная на рис. 5. При этом для корректировки основной миссии также, как и для загрузки, передавались дополнительные две команды `LOAD_MISS_ST` и `LOAD_MISS_END`, между которыми передавался откорректированный участок миссии.

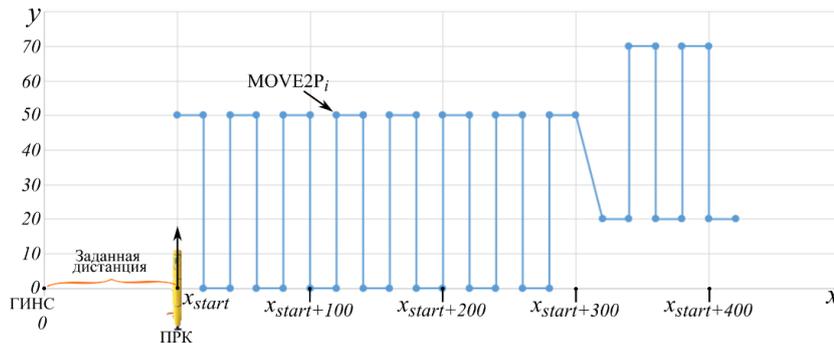


Рис. 5. Траектория движения, после корректировки основной миссии

Передача всех сообщений между ГИНС и ПРК осуществлялась через моделируемый гидроакустический канал связи. При этом моделировались следующие параметры этого канала связи: скорость передачи данных, вероятность получения сообщения и скорость распространения звуковой волны в воде, которая была постоянной и составляла 1500 м/с.

Исследования передачи данных между АРМ и ПРК в рамках предложенной ЦП показали, что обеспечивается надежная загрузка миссий и получение информации о состоянии ПРК при различных скоростях и в различных условиях работы акустического канала связи.

Заключение. В работе предложена архитектура ЦП для реализации распределенных систем управления и навигации для автономных подводных аппаратов, выполняющих технологические операции в различных, в том числе арктических, условиях, а также предложена система команд, обеспечивающая гибкое задание миссий ПРК различного типа. Предложенная ЦП построена на базе компактных гидроакустических систем глобальной гидроакустической навигации, разработанных в ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток). Выполненные исследования подтвердили работоспособность, эффективность и надежность предложенной архитектуры и решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Yuh J., Marani G., Blidberg R.* Applications of marine robotic vehicles // *Intellegent Service Robotics*. – 2011. – No. 2. – P. 221-231.
2. *Button R., Kamp J., Curtin T., Driden J.* A Survey of Missions for Underwater Undersea Vehicles. PA: RAND Corporation, USA, Santa Monica, CA, Arlington, VA, Pittsburgh. 2009. – 223 p.
3. *Simetti E., Casalino G.* Manipulation and Transportation With Cooperative Underwater Vehicle Manipulator Systems // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. – 2017. – Vol. 42, No. 4. – P. 782-799.
4. *Filaretov V.F., Konoplin N.Yu., Konoplin A.Yu.* System for automatic soil sampling by AUV equipped with multilink manipulator // *International Journal of Energy Technology and Policy*. – 2019. – Vol. 15, No. 2/3. – P. 208-223.
5. *Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A.* Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles // *Proceedings of 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – 2019. – P. 1-6.
6. *Farivarnejad H., Moosavian S.* Multiple impedance control for object manipulation by a dual arm underwater vehicle–manipulator system // *Ocean Engineering*. – 2014. – Vol. 89. – P. 82-98.
7. *Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А.* Системы и устройства управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005. – 270 с.
8. *Fossen T.I.* Guidance and control of oceanic vehicles. – New York, USA: John Willei and Sons, 1994. – 494 p.
9. *Sun Y.C., Cheah C.C.* Adaptive control schemes for autonomous underwater vehicle // *Robotica*. – 2008. – Vol. 27. – P. 119-129.
10. *Fossen T.I., Blanke M.* Nonlinear output feedback control of underwater vehicle propellers using feedback form estimated axial flow velocity // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. – 2000. – Vol. 25, No. 2. – P. 241-255.
11. *Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф.* Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. – Владивосток: Изд-во ИПМТ ДВО РАН, 2018. – 368 с.
12. Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева, отв. ред. Л.В. Киселев. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
13. *Kulhandjian H., Kuo L., Melodia T.* Extended Abstract: Development of a Reconfigurable Underwater Networking Testbed // *Proc. of ACM Intl. Conf. on UnderWater Networks and Systems (WUWNet)*. – 2012. – P. 1-2.
14. *Melodia T., Kulhandjian H., Kuo L., and Demirors E.* Advances in Underwater Acoustic Networking // *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, Eds. S. Basagni, M. Conti, S. Giordano and I. Stojmenovic, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ. – 2013. – P. 804-852.
15. *Kulhandjian H., Kuo L., Melodia T., Pados D., Green D.* Towards Experimental Evaluation of Software-Defined Underwater Networked Systems // *Proc. of IEEE UComms. Sestri Levante, Italy*. – 2012. – P. 12-14.

16. Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M. Underwater Sensor Networks: Applications, Advances, and Challenges // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2012. – Vol. 370, No. 1958. – P. 158-175.
17. Rice J.A., Creber R.K., Fletcher C.L., Baxley P.A., Davison D.C., Rogers K.E. Seaweb Undersea Acoustic Nets // *Biennial Review, SSC San Diego Technical Document TD 3117.* – 2001. – P. 234-250.
18. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. About accuracy estimation of AUV single-beacon mobile navigation using ASV, equipped with DGPS // *OCEANS 2016. Shanghai, China.* – 2016. – P. 1-4.
19. Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A. Method of spatial path planning for mobile robot in unknown environment // *Proc. of the 28th DAAAM Int. Symp.* – 2017. – P. 0258-0267.
20. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed // *Proc. of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016).* – 2016. – P. 93-96.

REFERENCES

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles, *Intelligent Service Robotics*, 2011, No. 2, pp. 221-231.
2. Button R., Kamp J., Curtin T., Driden J. A Survey of Missions for Underwater Undersea Vehicles. PA: RAND Corporation, USA, Santa Monica, CA, Arlington, VA, Pittsburgh. 2009, 223 p.
3. Simetti E., Casalino G. Manipulation and Transportation With Cooperative Underwater Vehicle Manipulator Systems, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, Vol. 42, No. 4, pp. 782-799.
4. Filaretov V.F., Konoplin N.Yu., Konoplin A.Yu. System for automatic soil sampling by AUV equipped with multilink manipulator, *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2019, Vol. 15, No. 2/3, pp.208-223.
5. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles, *Proceedings of 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2019, pp. 1-6.
6. Farivarnejad H., Moosavian S. Multiple impedance control for object manipulation by a dual arm underwater vehicle–manipulator system, *Ocean Engineering*, 2014, Vol. 89, pp. 82-98.
7. Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A. Sistemy i ustroystva upravleniya podvodnykh robotov [Underwater robot control systems and devices]. Moscow: Nauka, 2005, 270 p.
8. Fossen T.I. Guidance and control of oceanic vehicles. New York, USA: John Willei and Sons, 1994, 494 p.
9. Sun Y.C., Cheah C.C. Adaptive control schemes for autonomous underwater vehicle, *Robotica*, 2008, Vol. 27, pp. 119-129.
10. Fossen T.I., Blanke M. Nonlinear output feedback control of underwater vehicle propellers using feedback form estimated axial flow velocity, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, Vol. 25, No. 2, pp. 241-255.
11. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic complexes: systems, technologies, application]. Vladivostok: Izd-vo IPMT DVO RAN, 2018, 368 p.
12. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots: systems and technologies], ed. by M.D. Ageeva, L.V. Kiselev. Moscow: Nauka, 2005, 398 p.
13. Kulhandjian H., Kuo L., Melodia T. Extended Abstract: Development of a Reconfigurable Underwater Networking Testbed, *Proc. of ACM Intl. Conf. on UnderWater Networks and Systems (WUWNet)*, 2012, pp. 1-2.
14. Melodia T., Kulhandjian H., Kuo L., and Demirors E. Advances in Underwater Acoustic Networking, *Mobile Ad Hoc Networking: Cutting Edge Directions*, Eds. S. Basagni, M. Conti, S. Giordano and I. Stojmenovic, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2013, pp. 804-852.
15. Kulhandjian H., Kuo L., Melodia T., Pados D., Green D. Towards Experimental Evaluation of Software-Defined Underwater Networked Systems, *Proc. of IEEE UComms. Sestri Levante, Italy*, 2012, pp. 12-14.
16. Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M. Underwater Sensor Networks: Applications, Advances, and Challenges, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2012, Vol. 370, No. 1958, pp. 158-175.
17. Rice J.A., Creber R.K., Fletcher C.L., Baxley P.A., Davison D.C., Rogers K.E. Seaweb Undersea Acoustic Nets, *Biennial Review, SSC San Diego Technical Document TD 3117*, 2001, pp. 234-250.

18. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. About accuracy estimation of AUV single-beacon mobile navigation using ASV, equipped with DGPS, *OCEANS 2016. Shanghai, China*, 2016, pp. 1-4.
19. Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A. Method of spatial path planning for mobile robot in unknown environment, *Proc. of the 28th DAAAM Int. Symp.*, 2017, pp. 0258-0267.
20. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed, *Proc. of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016)*, 2016, pp. 93-96.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Жирабок.

Филаретов Владимир Федорович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ); e-mail: filaretov@inbox.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: 84232652424; д.т.н.; профессор; директор департамента.

Юхимец Дмитрий Александрович – e-mail: undim@dvo.ru; тел.: 84232313783; д.т.н.; доцент; в.н.с.

Зуев Александр Валерьевич – e-mail: alvzuev@yandex.ru; тел.: 84232432416; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Губанков Антон Сергеевич – e-mail: gubankov@dvo.ru; тел.: 89024884000; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Минаев Дмитрий Дмитриевич – Публичное акционерное общество «Дальприбор»; e-mail: minaev@dalpribor.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: 84232326368; к.т.н.; зам. главного конструктора.

Filaretov Vladimir Fedorovich – Far Eastern Federal University (FEFU); e-mail: filaretov@inbox.ru; Vladivostok, Russia; phone: +74232652424; dr. of eng. sc.; professor; director of the department.

Yukhimets Dmitry Aleksandrovich – e-mail: undim@dvo.ru; phone: +74232313783; dr. of eng. sc.; associate professor; leading researcher.

Zuev Alexander Valer'evich – e-mail: alvzuev@yandex.ru; phone: +74232432416; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Gubankov Anton Sergeevich – e-mail: gubankov@dvo.ru; phone: +79024884000; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Minaev Dmitry Dmitrievich – Public Joint Stock Company “Dalpribor”; e-mail: minaev@dalpribor.ru; Vladivostok, Russia; phone: +74232326368; cand. of eng. sc.; deputy chief designer.

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-93-101

В.С. Быкова, А.И. Машошин, И.В. Пашкевич

АЛГОРИТМ МАНЕВРИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОВОДКЕ СУДНА ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН*

Одной из задач, возлагаемых на автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), является борьба с минной опасностью, которая включает: 1) поиск и уничтожение мин в заминированном районе; 2) обеспечение собственной безопасности при проходе через заминированный район либо при работе в этом районе; 3) обеспечение проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район. АНПА можно рассматривать в качестве дальнейшего развития средств борьбы с минной опасностью, поскольку они имеют ряд преимуществ перед противоминными кораблями: 1) исключают гибель людей

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253).

при взрыве мины; 2) обладают более низким уровнем физических полей, на которые реагируют взрыватели морских мин; 3) способны маневрировать на оптимальной глубине для поиска и классификации мин. Ввиду этого создание специализированных АНПА для борьбы с минной опасностью весьма актуально. Поиск мин при помощи АНПА может осуществляться либо в интересах их уничтожения (разминирования района) либо в целях проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район. В настоящей статье рассматривается вторая задача. Приведено описание алгоритма маневрирования АНПА при обеспечении прохода судна через заминированный район. Задача решается путём обнаружения мин разных типов с использованием гидроакустических и магнитометрических средств поиска и классификации подводных объектов и их обхода на безопасном расстоянии. Для сокращения времени решения задачи классификация обнаруженных подводных объектов осуществляется на классы "миноподобный объект" и "прочие объекты". Использование класса "миноподобный объект", который включает как собственно мины, так и объекты, не отличимые от мин на дистанциях их обнаружения средствами поиска мин, позволяет не сближаться с обнаруженными подводными объектами на дистанцию их уверенной классификации с использованием высокочастотной гидроакустической и телевизионной аппаратуры и тем самым повысить безопасность АНПА и сократить время прохода через заминированный район. Алгоритм учитывает тот факт, что минимальная дистанция безопасного сближения типового судна с миной существенно превышает дистанции обнаружения мин разных типов, что не позволяет АНПА найти безопасный для судна проход через заминированный район путём его однократного пересечения и требует сложного маневрирования АНПА. Алгоритм предназначен для реализации в системе управления АНПА.

Автономный необитаемый подводный аппарат; морская мина; средства поиска морских мин; маневрирование АНПА при проходе через заминированный район.

V.S. Bykova, A.I. Mashoshin, I.V. Pashkevich

ALGORITHM FOR MANEUVERING AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WHEN NAVIGATING A SHIP THROUGH A MINED AREA

One of the tasks assigned to the autonomous underwater vehicles (AUV) is the fight against mine danger, which includes: 1) search for and destroy mines in the mined area; 2) ensure their own safety when passing through the mined area or when working in this area; 3) ensure the navigation of ships (including submarines) through the mined area. AUV can be considered as a further development of mine-fighting equipment, since they have a number of advantages over mine-fighting ships: 1) exclude the loss of life in the event of a mine explosion; 2) have a lower level of physical fields to which the fuses of sea mines react; 3) are able to maneuver at the optimal depth for searching and classifying mines. In view of this, the creation of specialized AUV to combat the mine danger is very important. The search for mines with the help of AUV can be carried out either in the interests of their destruction (clearing the area) or for the purpose of guiding ships through the mined area. This article deals with the second problem. The description of the maneuvering algorithm of the AUV when ensuring the passage of a vessel through a mined area is given. The task is solved by detecting different types of mines using hydroacoustic and magnetometric means of searching and classifying underwater objects and bypassing of the mines at a safe distance. To reduce the time required to solve the task, the detected underwater objects are classified into the "mine-like object" and "other objects" classes. The use of the "mine-like object" class, which includes both the actual mines and objects that are indistinguishable from mines at the distances of their detection by means of mine search, allows you to avoid approaching detected underwater objects at a distance of their confident classification using high-frequency sonar and television equipment, and thereby increase the safety of the AUV and reduce the time of passage through the mined area. The algorithm takes into account the fact that the minimum safe distance between vessel and mine greatly exceeds the range of detection of mines of different types that does not allow AUV to find a safe vessel passage through the mined area by a single crossing and requires complex maneuvering of the AUV. Algorithm is intended for implementation in the AUV control system.

Autonomous underwater vehicle; sea mine; means of searching for sea mines; maneuvering AUV when passing through a mined area.

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения океана [1, 2]. Также они широко применяются в военных целях [3–5].

Одной из задач, возлагаемых на АНПА, является борьба с минной опасностью [3–6], которая включает:

- ◆ поиск и уничтожение мин в заминированном районе;
- ◆ обеспечение собственной безопасности при проходе через заминированный район либо при работе в этом районе;
- ◆ обеспечение проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район.

Минная опасность на море возникает как следствие войн, локальных конфликтов и угрозы их возникновения. Ввиду этого борьба с минной опасностью актуальна как в военное время, так и в мирное время после завершения конфликтов либо угрозы их возникновения.

Для борьбы с минной опасностью традиционно использовались тральщики. Однако ввиду изобретения мин, устойчивых к тралению, в последние десятилетия на их место пришли противоминные корабли, которые, не отказываясь от траления, ориентированы, в первую очередь, на поиск и уничтожение отдельных мин [7].

Современные морские мины делятся на плавающие, якорные, донные и заиленные (самозакапывающиеся в грунт) [8, 9]. Разновидностью донных мин являются мины-торпеды. Наибольшую трудность вызывает обнаружение донных и заиленных мин, но ещё большую трудность вызывает их классификация, поскольку их трудно отличить от разнообразных донных и заиленных объектов естественного и искусственного происхождения.

Морские мины оснащены взрывателями, реагирующими на изменение гидроакустического, магнитного либо сейсмического поля. Для надёжности срабатывания мины, как правило, оборудуются несколькими типами взрывателей одновременно.

Для поиска и классификации якорных и донных мин применяются высокочастотные гидролокаторы (в частности, вперёдсмотрящие гидролокаторы, многолучевые эхолоты, гидролокаторы бокового обзора), магнитометры и телевизионная аппаратура [10, 11]. Поиск заиленных мин осуществляется низкочастотными гидролокаторами (профилографами) и магнитометрами [12]. Учитывая, что заранее, как правило, не известно, какие мины установлены в районе, приходится одновременно осуществлять поиск всех типов мин с применением комплекса поисковой аппаратуры.

Поскольку дальность эффективного обнаружения и классификации донных и заиленных мин лежит в пределах от десятков до сотен метров, необходимо, чтобы носители технических средств их поиска и классификации двигались в непосредственной близости от дна. Для этого современные противоминные корабли оснащаются телеуправляемыми и буксируемыми подводными аппаратами, заглубляемыми на нужную глубину.

АНПА можно рассматривать в качестве дальнейшего развития средств борьбы с минной опасностью, поскольку они имеют ряд преимуществ перед противоминными кораблями [13–18]:

- ◆ исключают гибель людей при взрыве мины;
- ◆ обладают более низким уровнем физических полей, на которые реагируют взрыватели морских мин;
- ◆ способны маневрировать на оптимальной глубине для поиска и классификации мин.

Ввиду этого создание специализированных АНПА для борьбы с минной опасностью весьма актуально.

Поиск мин при помощи АНПА может осуществляться либо в интересах их уничтожения (разминирования района) либо в целях проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район. В настоящей статье рассматривается вторая задача.

Постановка задачи. При поиске мин самой сложной задачей является её классификация, которая должна отличить мину от разнообразных малогабаритных донных предметов естественного и искусственного происхождения. Для надёжной классификации мин применяются либо очень высокочастотные гидролокаторы с рабочей частотой в районе одного мегагерца либо телекамеры. Для использования этой аппаратуры необходимо сближение с обнаруженным объектом на расстояние в единицы метров и обход вокруг него, что, с одной стороны, не безопасно, а, с другой стороны, требует большого времени. При решении задачи классификации с целью уничтожения мин такие процедуры необходимы. Однако при решении задач, не связанных с уничтожением мин, можно предложить другой подход. В алфавит распознаваемых классов вместо класса «мина» вводится класс "миноподобный объект", который включает как собственно мины, так и объекты, не отличимые от мин на дистанциях их обнаружения средствами поиска мин, что позволяет не сближаться с обнаруженными подводными объектами на дистанцию их уверенной классификации с использованием высокочастотной гидроакустической и телевизионной аппаратуры и тем самым повысить безопасность АНПА и сократить время прохода через заминированный район. Заметим, что при отнесении обнаруженного объекта к классу "миноподобный объект" должны приниматься такие же действия, как и при обнаружении мины.

Традиционно проводка судов через заминированный район осуществлялась при помощи тральщика, который двигался впереди, буксируя трал [19, 20]. Однако с некоторых пор такой способ проводки стал неэффективным ввиду создания тралустойчивых мин и существенного увеличения радиуса их реагирования. Поэтому в настоящее время единственным способом проводки судов через заминированный район является обнаружение мин, установленных в районе, и прокладка маршрута судна на безопасном расстоянии от них. Рассмотрим решение этой задачи с использованием АНПА.

Алгоритм решения задачи. Перед АНПА стоит задача найти безопасный для проводимого судна проход через заминированный район, при этом судно должно минимально отклоняться от заданного генерального курса K_{gen} (рис. 1). Кроме того, ширина прохода в каждой точке маршрута должна быть не меньше удвоенной минимально допустимой дистанции приближения судна к мине R_{min} . Причём эта дистанция R_{min} , как правило, существенно превышает дистанции обнаружения всех типов мин.

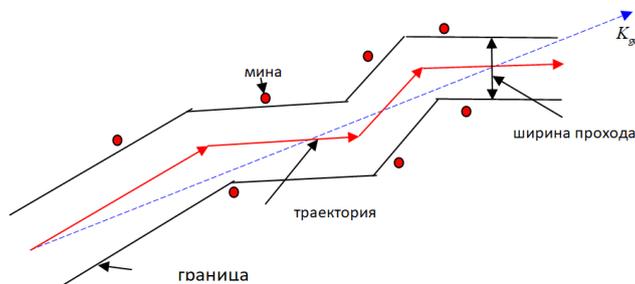


Рис. 1. Иллюстрация маршрута судна через заминированный район, проложенного АНПА

Последнее условие значительно усложняет алгоритм управления АНПА, поскольку не позволяет найти безопасный проход через заминированный район путём однократного прохода АНПА по нему. АНПА вынужден искать проход, осматривая его на всю ширину, двигаясь галсами, перпендикулярными заданному генеральному курсу судна.

Взаимодействие АНПА с проводимым судном выглядит следующим образом. При подходе к заминированному району судно стопорит ход, спускает на воду АНПА и ложится в дрейф в ожидании завершения работы АНПА по поиску безопасного прохода. АНПА, маневрируя определённым образом, ищет проход для судна, удовлетворяющий приведённым выше требованиям, и информацию о нём по радио либо гидроакустическому каналу сообщает на судно в виде координат обнаруженных мин и траектории движения судна через заминированный район. Судно, получив эту информацию, начинает движение по траектории, полученной от АНПА. Если заминированный район достаточно велик, проход судна через него может быть организован в несколько этапов с реализацией на каждом этапе описанного взаимодействия между судном и АНПА.

Идея алгоритма управления АНПА в рассматриваемом случае состоит в том, чтобы проложить кратчайший маршрут судна, при котором судно не приближается к минам на расстояние, меньшее чем R_{min} . Эта идея проиллюстрирована на рис. 2, на котором радиусы окружностей, построенных вокруг мин, равны R_{min} .

Рассмотрим, как должен маневрировать АНПА при прокладке маршрута, изображённого на рис. 2. Для начала подробно рассмотрим маневрирование АНПА до и после обнаружения первой мины (рис. 3). Обозначения на рис. 3: пунктирная линия изображает генеральный курс судна, чёрные сплошные линии – границы прохода, синяя линия – траектория АНПА, красная линия – траектория судна, красная точка – мина, радиус меньшей окружности равен дистанции обнаружения мины, радиус большей окружности – минимально допустимой дистанции между судном и миной R_{min} .

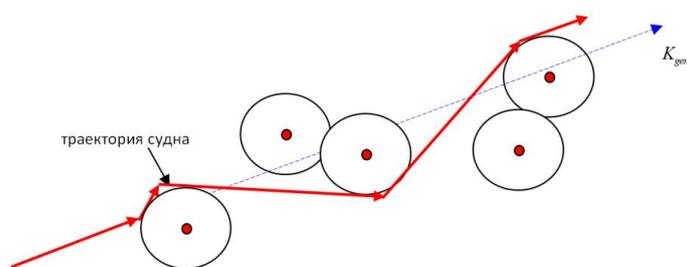


Рис. 2. Иллюстрация идеи алгоритма

В точке t_0 АНПА начинает движение галсами перпендикулярными заданному генеральному курсу прохода через район (синяя линия). Длина каждого галса равна заданной ширине прохода за вычетом удвоенной дистанции обнаружения мины. Расстояние между галсами равно удвоенной дистанции обнаружения мины. Одновременно с движением система управления АНПА строит траекторию движения судна (красная линия).

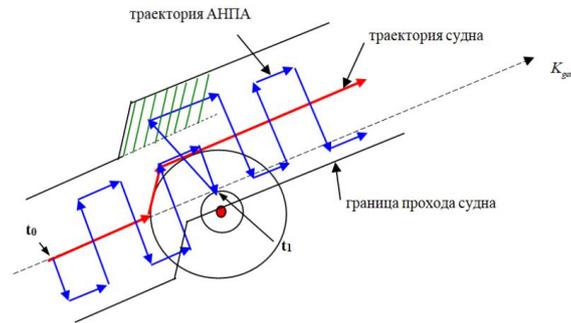


Рис. 3. Маневрирование АНПА до и после обнаружения 1-й мины (вариант 1)

В точке t_1 АНПА обнаруживает 1-ю мину. Система управления АНПА строит маршрут обхода судном обнаруженной мины, состоящий из двух галсов, проведенных по касательным к окружности большего радиуса. Причём курс, соответствующий второму галсу равен генеральному курсу судна. Одновременно с маршрутом обхода система управления строит границы прохода в процессе обхода мины. Далее система управления АНПА проверяет, вся ли площадь прохода обследована на предмет наличия мин. В результате проверки устанавливает, что заштрихованная зелёным цветом область прохода не обследована. Система управления рассчитывает траекторию АНПА, обеспечивающую просмотр не обследованной части прохода, и инициирует движение АНПА по этой траектории. После завершения просмотра не обследованной части прохода АНПА начинает маневрировать параллельными галсами, но уже в новых границах прохода.

Ситуация усложняется, если при просмотре не обследованной части прохода будет обнаружена новая мина (рис. 4).

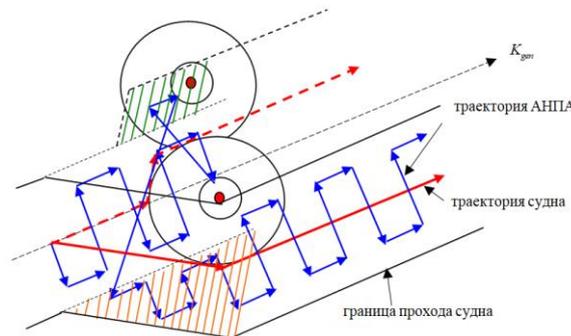


Рис. 4. Маневрирование АНПА до и после обнаружения 1-й мины (вариант 2)

В этом случае система управления АНПА корректирует траекторию судна при обходе 1-й обнаруженной мины (траектория судна, которая была построена до обнаружения 2-й мины показана штриховой красной линией, а новая траектория – сплошной красной линией). Также система управления АНПА выявляет не обследованную часть прохода судна, соответствующую новой траектории судна (заштрихована на рис. 4 светло коричневым цветом) и рассчитывает траекторию АНПА для её обследования с переходом на стандартное движение параллельным галсами поперёк построенной траектории судна. Если в процессе осмотра не обследованной части прохода будет обнаружена новая мина, описанные действия будут повторены.

Описанный алгоритм управления АНПА реализуется при обнаружении каждой новой мины. На рис. 5 показано маневрирование АНПА и построенный маршрут судна при проходе через район, в котором обнаружено 4 мины. Из рассмотрения рис. 5 следует, что при обнаружении каждой новой мины АНПА вынужден поворачивать назад для просмотра необследованной части прохода, построенного в результате обхода судном обнаруженной мины.

После преодоления всего заминированного района, как было отмечено выше, АНПА передаёт судну его маршрут и координаты обнаруженных мин.

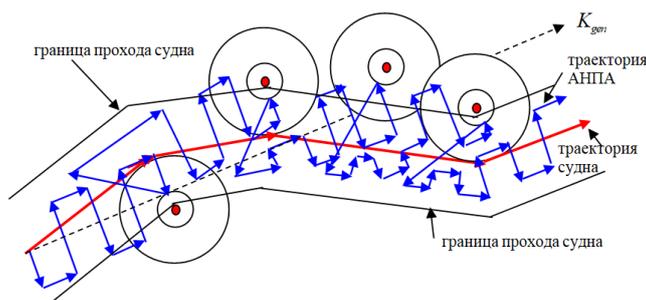


Рис. 5. Маневрирование АНПА при проходе заминированного района

Заключение. Одной из задач, возлагаемых на АНПА как в военное, так и в мирное время, является борьба с минной опасностью, состоящая как в поиске и уничтожении морских мин, так и в обеспечении проводки судов через заминированный район. Для решения этих задач АНПА оснащаются средствами поиска разного типа мин, а в систему управления АНПА закладываются алгоритмы маневрирования АНПА при решении этих задач.

В работе приведено описание реализуемого системой управления АНПА алгоритма маневрирования АНПА при обеспечении прохода (проводки) судна через заминированный район. Задача решается путём обнаружения мин разных типов с использованием гидроакустических и магнитометрических средств поиска и классификации подводных объектов и их обхода на безопасном расстоянии. Для сокращения времени решения задачи классификация обнаруженных подводных объектов осуществляется на классы "миноподобный объект" и "прочие объекты". Использование класса "миноподобный объект", который включает как собственно мины, так и объекты, не отличимые от мин на дистанциях их обнаружения средствами поиска мин, позволяет не сближаться с обнаруженными подводными объектами на дистанцию их уверенной классификации с использованием высокочастотной гидроакустической и телевизионной аппаратуры и тем самым повысить безопасность АНПА и сократить время прохода через заминированный район. Алгоритм учитывает тот факт, что минимальная дистанция безопасного сближения типового судна с миной существенно превышает дистанции обнаружения мин разных типов, что не позволяет АНПА найти безопасный для судна проход через заминированный район путём его однократного пересечения и требует сложного маневрирования АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / отв. ред. Л.В. Киселев. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – 368 с.
2. Боженов Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 4-68.
3. Jane's unmanned maritime vehicle. 2019-2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. 2020.
4. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с.

5. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – № 5. – С. 79-88.
6. Greenlaw J. Sea mines and naval mine countermeasures: are autonomous underwater vehicles the answer, and is the Royal Canadian Navy ready for the new paradigm? Canadian forces college. 2013.
7. Jane's fighting ships. 2019-2020. Ed. Alex Pape. IHS Markit. 2020.
8. Naval mine. – https://en.wikipedia.org/wiki/Naval_mine.
9. How do naval mines work. – <https://interestingengineering.com/how-do-naval-mines-work>.
10. Naval sonar ASW and mine hunting. – <https://www.kongsberg.com/maritime/products/naval-systems/ASW>.
11. Chapple P.B. Unsupervised detection of mine-like objects in seabed imagery from autonomous underwater vehicles // Proc. IEEE Oceans Conf. – 2009. – P. 1-6.
12. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Результаты применения акустического профилографа для мониторинга морских акваторий с использованием алгоритмов синтеза и фокусировки // Подводные исследования и робототехника. – 2014. – № 1 (17). – С. 33-38.
13. Pinto M. Current and Future Generation of Unmanned MCM Integrated Systems // Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13 - 15 May. 2019.
14. Brothers R. MCM planning and evaluation for a UxV Toolbox in a variable mine threat and environment // Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13-15 May 2019.
15. Remotely Operated Vehicles for Mine Countermeasures Operations // Naval Forces. – 2013. – Vol. 34, No. 3. – P. 22-26.
16. Babel, Luitpold, Zimmermann T. Planning Safe Navigation Routes Through Mined Waters // European Journal of Operational Research. – February 2015. – Vol. 241, No. 1. – P. 99-108.
17. Krogstad T.R., Wiig M. Autonomous survey and identification planning for AUV MCM operations // Proc. Undersea Defence Technology, Liverpool, UK, 2014.
18. Wiig M., Krogstad T.R., Midtgaard Ø. Autonomous identification planning for mine countermeasure // Proc. Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Southampton, UK, 2012.
19. Плехов А.М. Словарь военных терминов. – М.: Воениздат, 1988. – 337 с.
20. Хвоц В.А. Тактика ПЛ. – М.: Воениздат, 1989. – 264 с.

REFERENCES

1. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications], the executive ed. L.V. Kiselev. Vladivostok: Dal'nauka, 2018, 368 z.
2. Bozhenov Yu.A. Ispol'zovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya issledovaniya Arktiki i Antarktiki [The use of autonomous uninhabited underwater vehicles for the study of the Arctic and Antarctic], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 4-68.
3. Jane's unmanned maritime vehicle. 2019-2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. 2020.
4. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. Ugroza iz glubiny: XXI vek [The threat from the deep: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP «Khabarovskaya kraevaya tipografiya», 2011, 304 p.
5. Belousov I. Sovremennye i perspektivnye neobitaemye podvodnye apparaty VMS SShA [Modern and promising uninhabited underwater vehicles of the US Navy], *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review], 2013, No. 5, pp. 79-88.
6. Greenlaw J. Sea mines and naval mine countermeasures: are autonomous underwater vehicles the answer, and is the Royal Canadian Navy ready for the new paradigm? Canadian forces college. 2013.
7. Jane's fighting ships. 2019-2020. Ed. Alex Pape. IHS Markit. 2020.
8. Naval mine. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Naval_mine.
9. How do naval mines work. Available at: <https://interestingengineering.com/how-do-naval-mines-work>.
10. Naval sonar ASW and mine hunting. Available at: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/naval-systems/ASW>.

11. *Chapple P.B.* Unsupervised detection of mine-like objects in seabed imagery from autonomous underwater vehicles, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2009, pp. 1-6.
12. *Kasatkin B.A., Kosarev G.V.* Rezul'taty primeneniya akusticheskogo profilografa dlya monitoringa morskikh akvatoriy s ispol'zovaniem algoritmov sintezirovaniya i fokusirovki [Results of the application of an acoustic profiler for monitoring marine areas using synthesis and focusing algorithms], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2014, No. 1 (17), pp. 33-38.
13. *Pinto M.* Current and Future Generation of Unmanned MCM Integrated Systems // Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13 - 15 May. 2019.
14. *Brothers R.* MCM planning and evaluation for a UxV Toolbox in a variable mine threat and environment, *Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13-15 May 2019.*
15. Remotely Operated Vehicles for Mine Countermeasures Operation, *Naval Forces*, 2013, Vol. 34, No. 3, pp. 22-26.
16. *Babel, Luitpold, Zimmermann T.* Planning Safe Navigation Routes Through Mined Water, *European Journal of Operational Research*, February 2015, Vol. 241, No. 1, pp. 99-108.
17. *Krogstad T.R., Wiig M.* Autonomous survey and identification planning for AUV MCM operations // Proc. Undersea Defence Technology, Liverpool, UK, 2014.
18. *Wiig M., Krogstad T.R., Midtgaard Ø.* Autonomous identification planning for mine countermeasure, *Proc. Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Southampton, UK, 2012.*
19. *Plekhov A.M.* Slovar' voennykh terminov [Dictionary of military terms]. Moscow: Voenizdat, 1988, 337 p.
20. *Khvoshch V.A.* Taktika PL [Tactics of PL]. Moscow: Voenizdat, 1989, 264 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Л.А. Мартынова.

Быкова Валентина Сергеевна – АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"; e-mail: zvs2011@yandex.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213502298; инженер-программист.

Машошин Андрей Иванович – e-mail: aimashoshin@mail.ru; тел.: +79217632345; начальник научно-исследовательского центра; д.т.н.; профессор.

Пашкевич Иван Владимирович – e-mail: iv@bk.ru; тел.: +79119330006; главный специалист.

Bykova Valentina Sergeevna – JSC "Concern" Central research Institute "Electropribor"; e-mail: zvs2011@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213502298; software engineer.

Mashoshin Andrei Ivanovich – e-mail: aimashoshin@mail.ru; phone: +79217632345; head of the research center; dr. of eng. sc.; professor.

Pashkevich Ivan Vladimirovich – e-mail: iv@bk.ru; phone: +79119330006; chief specialist.

УДК 681.5.01

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-101-112

В.В. Косьянчук, В.В. Гласов, Е.Ю. Зыбин, Л. Тань

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ*

Большинство методов прогнозирования поведения динамических систем основаны на использовании информации о параметрах их математических моделей. Однако проблемы нестационарности, нелинейности и неидентифицируемости моделей реальных сложных систем приводят к тому что, традиционные параметрические методы применимы на практике только тогда, когда достоверно известны параметры и структура моделей систем, а неопределенности при постановке задачи существенно ограничены. В статье

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-58-53059.

описывается оригинальный непараметрический метод прогнозирования траектории полета летательного аппарата в условиях полного отсутствия априорной информации о параметрах его математической модели динамики полета. Предлагаемый метод, в отличие от аналогичных широко известных, не использует логические или статистические вычисления и не требует своего предварительного обучения или длительной настройки. Он построен только на основе ретроспективного анализа нескольких последовательных значений пространственных координат летательного аппарата и его сигналов управления, поэтому не подвержен влиянию модельных ошибок и может быть использован для прогнозирования траектории полета летательного аппарата в условиях полной параметрической неопределенности даже в случае неидентифицируемости модели его динамики полета. Приведены результаты численного моделирования решения задачи прогнозирования траектории полета беспилотного летательного аппарата наиболее распространенного типа квадрокоптера в условиях полной неопределенности параметров его математической модели. Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного метода и показывают высокие характеристики точности решения задачи и скорости настройки алгоритма. Описанный подход может быть использован для прогнозирования траектории движения любого другого транспортного средства (автомобиля, водного судна и т.д.) при условии линеаризуемости его модели на наблюдаемом интервале времени и наличия информации о его сигналах управления. Практическая реализация описываемого непараметрического метода совместно с традиционными параметрическими позволит повысить точность прогнозирования траектории полета и решить задачу высокоточной посадки беспилотного летательного аппарата на активно маневрирующее судно, в том числе, при возникновении различных критических ситуаций.

Летательный аппарат; прогнозирование траектории; непараметрический метод; параметрическая неопределенность.

V.V. Kosyanchuk, V.V. Glasov, E.Yu. Zybin, L. Tan

AIRCRAFT FLIGHT PATH PREDICTION UNDER COMPLETE PARAMETRIC UNCERTAINTY

Most of the methods for predicting the behavior of dynamic systems are based on the information about the parameters of their mathematical models. However, the problems of nonstationarity, nonlinearity and nonidentifiability of models of real complex systems lead to the fact that traditional parametric methods are applicable in practice only when the parameters and structure of models of systems are reliably known, and the uncertainties in the formulation of the problem are significantly limited. The article describes an original nonparametric method for predicting the aircraft flight path under absence of a priori information about the parameters of its mathematical flight dynamics model. The proposed method, unlike similar widely known ones, does not use logical or statistical calculations and does not require its preliminary training or long-term tuning. It is based only on the basis of a retrospective analysis of several sequential values of the spatial coordinates of the aircraft and its control signals, therefore it is not subject to model errors and can be used to predict the flight path of the aircraft under complete parametric uncertainty, even in the case of non-identifiability of its flight dynamics model. The results of numerical simulation of the solution to the problem of predicting the flight path of an unmanned aerial vehicle of the most common type of quadcopter under complete uncertainty in parameters of its mathematical model are presented. The results obtained confirm the efficiency of the developed method and show high performances of the accuracy of solving the problem and the speed of tuning the algorithm. The described approach can be used to predict the motion path of any other vehicle (car, ship, etc.), if its model is linearizable over the observed time interval and there is information about its control signals. Practical implementation of the described nonparametric method together with traditional parametric ones will improve the accuracy of flight path predicting and solve the problem of high-precision landing of an unmanned aerial vehicle on an actively maneuvering ship, and specifically in the event of various critical situations.

Aircraft, flight path prediction, non-parametric method, parametric uncertainty.

Введение. Подавляющее большинство методов прогнозирования поведения динамических систем основаны главным образом на использовании их математических моделей, параметры которых задаются априорно или оцениваются в процессе идентификации или наблюдения вектора состояния [1–3]. Однако проблемы нестационарности и нелинейности моделей реальных сложных объектов приводят к появлению модельных ошибок в задаваемых параметрах, а проблема их неидентифицируемости – к невозможности получения единственного решения задач идентификации и наблюдения вектора состояния [5–6]. В результате традиционные параметрические (parametric) или модельные (model-based) методы применимы на практике только тогда, когда достоверно известны параметры и структура математической модели системы, а неопределенности при постановке задачи существенно ограничены.

С бурным развитием информационных технологий все большее распространение получают непараметрические (nonparametric) методы решения задач теории динамических систем, которые в зарубежной литературе также известны как безмодельные (model-free), основанные на данных (data-driven, data-based), сигналах (signal-based) или прошлых измерениях (history-based) [6–15]. В отличие от традиционных параметрических, непараметрические методы не требуют никакой априорной информации о моделях динамических систем и основаны только на данных измерений их входных и выходных сигналов [16–20]. Такие методы относятся к интеллектуальным, так как рассматривают динамическую систему в виде «черного ящика» и позволяют решать различные задачи теории систем в условиях полной параметрической неопределенности. Поэтому наибольшую эффективность показывают комплексные подходы, основанные на совместном использовании параметрических и непараметрических методов [15].

Широко известные непараметрические методы прогнозирования траектории полета ЛА требуют либо предварительного обучения или длительной настройки, что обуславливает их узкую направленность, либо основаны на статистических (вероятностных) алгоритмах, использующих большие выборки данных измерений. В настоящей работе описан оригинальный непараметрический метод, который, в отличие от аналогичных интеллектуальных методов, не использует логические или статистические вычисления и не требует своего обучения или длительной настройки. Он построен только на основе ретроспективного анализа нескольких последовательных значений пространственных координат ЛА и его сигналов управления, поэтому не подвержен влиянию модельных ошибок и может быть использован для прогнозирования траектории полета ЛА в условиях полной параметрической неопределенности даже в случае неидентифицируемости его модели.

Непараметрический метод прогнозирования траектории полета ЛА. Пусть динамика полета ЛА описывается линейной дискретной моделью в пространстве состояний вида «вход-состояние-выход»

$$x_{i+1} = Ax_i + Bu_i, \quad (1)$$

$$y_i = Cx_i, \quad (2)$$

где x – неизвестный вектор состояния, u – известный вектор управления; y – измеряемые пространственные координаты ЛА; A, B, C – неизвестные матрицы собственной динамики, эффективности управления и измерений; i – дискретные моменты времени. Введем обозначение для блочных матриц Ганкеля вида

$$Z_i^{n,m} = \begin{bmatrix} z_{i-n-m} & z_{i-n-m+1} & \cdots & z_{i-n} \\ z_{i-n-m+1} & z_{i-n-m+2} & \cdots & z_{i-n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i-m} & z_{i-m+1} & \cdots & z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i-m}^{n,1} & Z_{i-m+1}^{n,1} & \cdots & Z_i^{n,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i-n}^{1,m} \\ Z_{i-n+1}^{1,m} \\ \vdots \\ Z_i^{1,m} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где m, n – количество блочных строк и столбцов, соответственно. Тогда с использованием матриц наблюдаемости \mathbf{C} и управляемости по выходу \mathbf{D} можно записать значения выходных сигналов модели (1)–(2) для $\nu + 1$ измерений в виде

$$Y_i^{\nu,1} = \mathbf{C}x_{i-\nu} + \mathbf{D}U_{i-1}^{\nu-1,1}, \quad (4)$$

где ν – индекс наблюдаемости,

$$Y_i^{\nu,1} = \begin{bmatrix} y_{i-\nu} \\ y_{i-\nu+1} \\ y_{i-\nu+2} \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix}, U_{i-1}^{\nu-1,1} = \begin{bmatrix} u_{i-\nu} \\ u_{i-\nu+1} \\ u_{i-\nu+2} \\ \vdots \\ u_{i-1} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^\nu \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{\nu-1}B & CA^{\nu-2}B & CA^{\nu-3}B & \cdots & 0 \end{bmatrix}.$$

С учетом предположения о наблюдаемости модели (1)–(2) зависимые столбцы у матрицы наблюдаемости \mathbf{C} отсутствуют, следовательно, ее можно представить в виде следующего канонического разложения [21]

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где I – единичная матрица, размер которой совпадает с рангом матрицы наблюдаемости; $\tilde{\mathbf{C}}^L, \bar{\mathbf{C}}^L$ – левые делители единицы и нуля, удовлетворяющие условию

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Подставим (5) в (4)

$$Y_i^{\nu,1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-\nu} + \mathbf{D}U_{i-1}^{\nu-1,1}, \quad (7)$$

и решим задачи наблюдения векторов состояния для искомого

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-\nu} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_i^{\nu,1} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{D}U_{i-1}^{\nu-1,1} \quad (8)$$

и следующего

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-\nu+1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{\nu,1} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{D}U_i^{\nu-1,1} \quad (9)$$

моментов времени, которые в соответствии с (1) также зависят друг от друга

$$x_{i-\nu+1} = Ax_{i-\nu} + Bu_{i-\nu}. \quad (10)$$

Подставим (10) в (9)

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} Ax_{i-\nu} + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} Bu_{i-\nu} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{\nu,1} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{D}U_i^{\nu-1,1} \quad (11)$$

и с учетом (8)

$$x_{i-v} = \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1} - \tilde{\mathbf{C}}^L \mathbf{D} U_{i-1}^{v,1} \quad (12)$$

запишем

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1} - \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L \mathbf{D} U_{i-1}^{v,1} + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} B u_{i-v} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{v,1} - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{D} U_i^{v,1}. \quad (13)$$

Выразим

$$Y_{i+1}^{v,1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1} + \left([0 \ \mathbf{D}] - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} [A \tilde{\mathbf{C}}^L \mathbf{D} \ 0] + \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} [B \ 0] \right) U_i^{v,1}.$$

Следовательно окончательно можно записать эквивалентную (1)–(2) модель вида «вход-выход»

$$Y_{i+1}^{v,1} = \mathbf{A} Y_i^{v,1} + \mathbf{B} U_i^{v,1}, \quad (14)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = [0 \ \mathbf{D}] - \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} [A \tilde{\mathbf{C}}^L \mathbf{D} \ 0] + \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \tilde{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} [B \ 0]. \quad (16)$$

Предположим, что наблюдение за ЛА ведется на протяжении некоторого времени $h+1$, тогда модель (14) примет вид выражения

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} = \mathbf{A} \mathbf{Y}_i^{v,h} + \mathbf{B} \mathbf{U}_i^{v,h}, \quad (17)$$

где

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} = [Y_{i-h+1}^{v,1} \ \dots \ Y_i^{v,1} \ Y_{i+1}^{v,1}], \quad (18)$$

$$\mathbf{Y}_i^{v,h} = [Y_{i-h}^{v,1} \ \dots \ Y_{i-1}^{v,1} \ Y_i^{v,1}], \quad (19)$$

$$\mathbf{U}_i^{v,h} = [U_{i-h}^{v,1} \ \dots \ U_{i-1}^{v,1} \ U_i^{v,1}], \quad (20)$$

из которого можно записать линейной матричное уравнение идентификации параметров эквивалентной модели

$$[\mathbf{A} \ \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^{v,h} \\ \mathbf{U}_i^{v,h} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{i+1}^{v,h}. \quad (21)$$

Известно [21], что любое матричное уравнение вида

$$ZQ = W$$

с известными матрицами Q , W разрешимо относительно Z тогда и только тогда, когда выполняется условие разрешимости

$$W \bar{Q}^R = 0, \quad (22)$$

где \bar{Q}^R – правый делитель нуля полного ранга, удовлетворяющий условию

$$Q \bar{Q}^R = 0. \quad (23)$$

Тогда согласно (22) для разрешимости уравнения (21) необходимо и достаточно обеспечить выполнение следующего условия

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^{v,h} \\ \mathbf{U}_i^{v,h} \end{bmatrix}^R = 0, \quad (24)$$

где правый делитель нуля определяется из выражения

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^{v,h} \\ \mathbf{U}_i^{v,h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^{v,h} \\ \mathbf{U}_i^{v,h} \end{bmatrix}^R = 0. \quad (25)$$

Тогда прогнозирование вектора измерений осуществляется по формуле

$$\hat{y}_{i+1} = -Y_i^{1,h} R_{i-1} r_i^+, \quad (26)$$

где $Y_i^{1,h} = [y_{i-h} \ \dots \ y_{i-1} \ y_i]$, r_i^+ – псевдообращение, а элементы делителя нуля определяются выражением

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{i-1}^{v,h-1} & Y_i^{v,1} \\ \mathbf{U}_{i-1}^{v,h-1} & U_i^{v,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ r_i \end{bmatrix} = 0. \quad (27)$$

Решение задачи прогнозирования траектории полета ЛА. Проверка работоспособности разработанного метода осуществлялась на модели наиболее распространенного беспилотного ЛА (БПЛА) типа «квадрокоптер», построенного по стандартной схеме «X» [22–23]



Рис. 1. Расположение осей связанной системы координат БПЛА

Начало связанной системы координат находится в центре тяжести квадрокоптера. Ось X указывает направление вдоль носовой части квадрокоптера. Ось Y направлена вправо, ось Z направлена вниз, следуя правилу правой руки. Двигатели №1 и №3 вращаются положительно относительно оси Z и расположены на -45 и 135 градусов от оси X . Двигатели №2 и №4 вращаются отрицательно относительно оси Z и расположены на -135 и 45 градусов от оси X .

Динамика полета БПЛА при интервале дискретизации $0,01$ с описывается упрощенной линейной моделью вида (1)–(2), где [24]:

$$u_i = Gv_i, \quad (28)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -a_2 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & a_2 & 0 & 0 & -a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_1 & b_1 & -b_1 & b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_2 & b_2 & -b_2 & -b_2 \\ b_3 & -b_3 & -b_3 & b_3 \\ -b_4 & -b_4 & -b_4 & -b_4 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & -g_3 & -g_4 \\ -g_1 & g_2 & g_3 & -g_4 \\ g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_1 & g_2 & -g_3 & g_4 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$a_1 = 0.01, a_2 = 0.0981, a_3 = 0.0014, a_4 = 0.9783, a_5 = 0.9838, b_1 = 0.000096, b_2 = 0.0042, b_3 = 0.00313, b_4 = 0.000115, g_1 = 0.3673, g_2 = 152.1807, g_3 = 8.3249, g_4 = 8.3249,$
 $x = [x_e \ y_e \ z_e \ V_x \ V_y \ V_z \ \gamma \ \vartheta \ \psi \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T, x_0 = 0, x_e, y_e, z_e$ – пространственные координаты (м), V_x, V_y, V_z – линейные скорости (м/с), γ, ϑ, ψ – углы крена, тангажа, рысканья (рад), $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости (рад/с), $u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T,$
 u_1, u_2, u_3, u_4 – скорости вращения двигателей, $v = [v_\tau \ v_\psi \ v_\vartheta \ v_\gamma]^T, v_\tau, v_\psi, v_\vartheta, v_\gamma$ – задающие воздействия по тяге двигателей, курсу, тангажу и крену.

Для решения задачи прогнозирования траектории полета использовались только сигналы управлений, поступающие с выхода вычислителя системы управления на двигатели, и данные измерений спутниковых или оптических датчиков пространственных координат БПЛА. Схема моделирования показана на рис. 2.

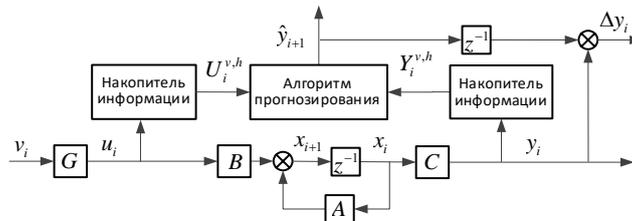


Рис. 2. Схема численного моделирования

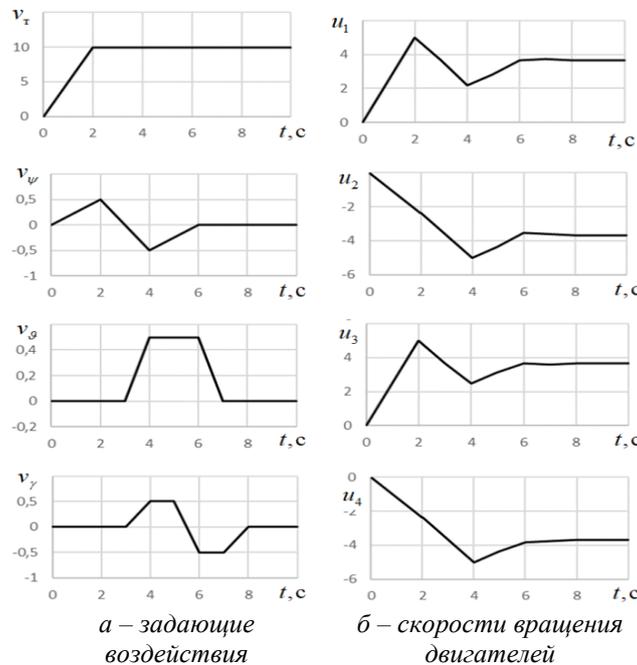


Рис. 3. Сигналы управления БПЛА

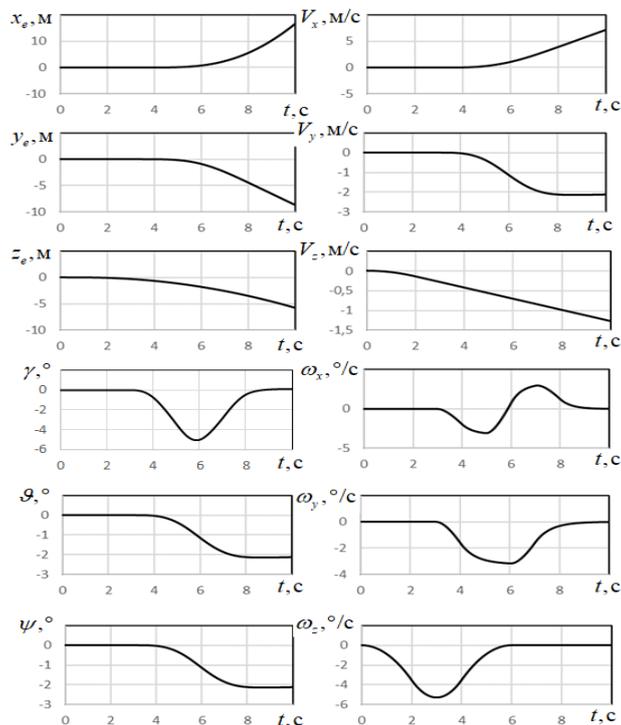


Рис. 4. Параметры полета БПЛА

Для формирования матриц управлений и измерений на интервале наблюдения применялись накопители информации. В блоке синтеза алгоритма прогнозирования реализованы формулы (26)–(27). Ширина окна наблюдения выбрана $h = 17$, индекс наблюдаемости $\nu = 3$. Сигналы управления и соответствующие им параметры полета БПЛА показаны на (см. рис. 3 и 4).

Ошибки прогнозирования траектории полета БПЛА приведены на рис. 5.

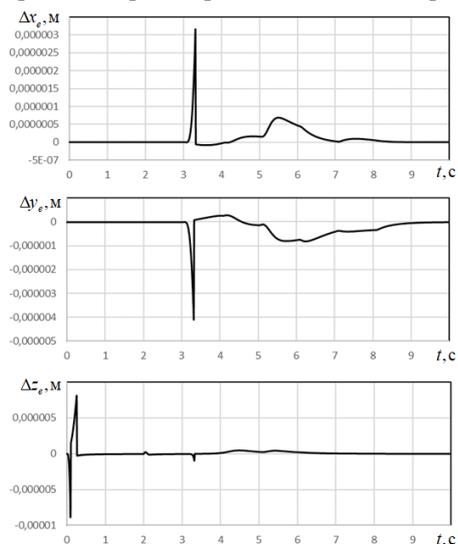


Рис. 5. Ошибки прогнозирования траектории полета БПЛА

Результаты численного моделирования показывают высокие характеристики точности и быстродействия решения задачи. Ошибки прогнозирования траектории полета БПЛА не превышают 5-го десятичного знака по всем пространственным координатам. Ранг матрицы Ганкеля данных не превышает 6, поэтому настройка алгоритма происходит в течение 8 измерений, то есть всего за 0,08 с, при появлении зависимых столбцов, а, следовательно, и правого делителя нуля вида (27).

Заключение. В результате проведенных исследований разработан новый непараметрический метод прогнозирования траектории полета ЛА, не использующий априорной информации о параметрах его модели и основанный только на ретроспективном анализе нескольких последовательных значений его пространственных координат и сигналов управления. Предлагаемый метод не подвержен модельным ошибкам, в отличие от аналогичных, не использует статистические вычисления, не требует обучения или длительной настройки и может быть использован даже при неидентифицируемости модели динамики полета ЛА. Полученные результаты численного моделирования решения задачи прогнозирования траектории полета БПЛА подтверждают работоспособность разработанного метода в условиях полной параметрической неопределенности. Описанный подход может быть использован для прогнозирования траектории движения любого другого транспортного средства (автомобиля, водного судна и т.д.) при условии линейности его модели на наблюдаемом интервале времени и наличия информации о его сигналах управления.

Дальнейшие исследования в данном направлении предполагают развитие подхода применительно к задачам прогнозирования траекторий движения БПЛА и судна посадки в условиях отсутствия информации о сигналах управления, только по результатам наблюдения их пространственных координат. Практическая реализация разрабатываемых непараметрических методов совместно с традиционными параметрическими позволит повысить точность прогнозирования и решить задачу высокоточной посадки БПЛА на активно маневрирующее судно, в том числе, при возникновении различных критических ситуаций: шквалистый ветер, потеря связи или включение режима радиомолчания, мелкие повреждения корпуса или несущих винтов и т.д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 232 с.
2. Рабочая книга по прогнозированию / Редкол.: Бестужев-Лада И.В. (отв. ред.). – М.: Мысль, 1982. – 430 с.
3. Roffel B., Betlem B. Process dynamics and control: modeling for control and prediction. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2006. – 543 p.
4. Зыбин Е.Ю. Об идентифицируемости линейных динамических систем в замкнутом контуре в режиме нормальной эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 4 (166). – С. 160-170.
5. Зыбин Е.Ю., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. О решении задачи идентификации линейных дискретных систем методом канонизации // Вестник ИГЭУ. – 2005. – № 5. – С. 192-196.
6. Hilgert N., Rossi V., Vila J.-P., Wagner V. Identification, Estimation, and Control of Uncertain Dynamic Systems: A Nonparametric Approach // Communications in Statistics – Theory and Methods. – 2007. – Vol. 36, No. 14. – P. 2509-2525.
7. Kutz J.N. Data-driven Modeling & Scientific Computation: Methods for Complex Systems & Big Data. – Oxford: Oxford University Press, 2013. – 638 p.
8. Schwabacher M. A Survey of Data-driven Prognostics // AIAA Infotech@Aerospace. – 2005. – P. 7002.
9. Yin S., Li X., Gao H., Kaynak O. Data-based Techniques Focused on Modern Industry: An Overview // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – Vol. 62, No. 1. – P. 657-667.

10. Hou Z., Jin S. Model Free Adaptive Control: Theory and Applications. – New-York: CRC press, 2013. – 372 p.
11. Satriawan Y.S., Machbub C., Hidayat E.M.I. Comparison of prediction methods for moving objects in 3D coordinates using Kalman filter and least square // 2016 6th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET). – IEEE, 2016. – P. 128-131.
12. Wang Z., Liang M., Delahaye D. Short-term 4d trajectory prediction using machine learning methods // Proc. SID. – 2017. – P. 1-10.
13. Shi Z. et al. LSTM-based flight trajectory prediction // 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – IEEE, 2018. – P. 1-8.
14. Lian K.Y., Yang C.Y. Image recognition system with predicting flying object path using 3D sensors // 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – IEEE, 2014. – P. 2317-2321.
15. Xie G. et al. Vehicle trajectory prediction by integrating physics-and maneuver-based approaches using interactive multiple models // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Vol. 65, No. 7. – P. 5999-6008.
16. Chekin A.Yu., Bondarenko Yu.V., Zybin E.Yu., Kiselev M.A. Nonparametric method for aircraft state prediction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 476. – P. 012003.
17. Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю., Чекин А.Ю., Бондаренко Ю.В. О прогнозировании вектора состояния воздушного судна в условиях полной параметрической неопределенности // Перспективные системы и задачи управления: Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 234-239.
18. Зыбин Е.Ю., Гласов В.В., Чекин А.Ю. Непараметрический метод прогнозирования движения судна посадки беспилотного летательного аппарата // Сб. тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем», 26–27 ноября 2020 г., г. Москва, 2020. – С. 212-213.
19. Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Карпенко С.С. О некоторых непараметрических методах теории управления динамическими объектами // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. – 2018. – № 6. – С. 288-298.
20. Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю., Гласов В.В., Чекин А.Ю., Карпенко С.С., Бондаренко Ю.В. Методы решения некоторых задач теории линейных динамических систем в условиях полной параметрической неопределенности // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Сб. трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 724-729.
21. Зыбин Е.Ю., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. О минимальной параметризации решений линейных матричных уравнений // Вестник ИГЭУ. – 2004. – № 6. – С. 127-131.
22. Prouty R. Helicopter Performance, Stability, and Control. – PWS Publishers, 2005.
23. Ponds P., Mahony R., Corke P. Modelling and control of a large quadrotor robot. Control Engineering Practice. – 2010.
24. Гласов В.В., Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В. Непараметрический метод стабилизации пространственного положения беспилотного летательного аппарата // Матер. конференции «Управление в аэрокосмических системах» (УАКС-2020) им. академика Е.А. Микрина. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. – С. 22-25.

REFERENCES

1. Bukov V.N. Adaptivnye prognoziruyushchie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control systems]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987, 232 p.
2. Rabochaya kniga po prognozirovaniyu [Working book on forecasting], ed. by Bestuzhev-Lada I.V. Moscoq: Mysl', 1982, 430 p.
3. Roffel B., Betlem B. Process dynamics and control: modeling for control and prediction. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006, 543 p.
4. Zybin E.Yu. Ob identifikatsionnosti lineynykh dinamicheskikh sistem v zamknutom konture v rezhime normal'noy ekspluatatsii [On the identifiability of linear dynamical systems in a closed circuit in the normal operation mode], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 4 (166), pp. 160-170.

5. Zybin E.Yu., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N. O reshenii zadachi identifikatsii lineynykh diskretnykh sistem metodom kanonizatsii [On solving the problem of identification of linear discrete systems by the method of canonicalization], *Vestnik IGEU* [Bulletin of the IGEU], 2005, No. 5, pp. 192-196.
6. Hilgert N., Rossi V., Vila J.-P., Wagner V. Identification, Estimation, and Control of Uncertain Dynamic Systems: A Nonparametric Approach, *Communications in Statistics – Theory and Methods*, 2007, Vol. 36, No. 14, pp. 2509-2525.
7. Kutz J.N. Data-driven Modeling & Scientific Computation: Methods for Complex Systems & Big Data. Oxford: Oxford University Press, 2013, 638 p.
8. Schwabacher M. A Survey of Data-driven Prognostics, *AIAA Infotech@Aerospace*, 2005, pp. 7002.
9. Yin S., Li X., Gao H., Kaynak O. Data-based Techniques Focused on Modern Industry: An Overview, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, Vol. 62, No. 1, pp. 657-667.
10. Hou Z., Jin S. Model Free Adaptive Control: Theory and Applications. New-York: CRC press, 2013. 372 p.
11. Satriawan Y.S., Machbub C., Hidayat E.M.I. Comparison of prediction methods for moving objects in 3D coordinates using Kalman filter and least square, *2016 6th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*. IEEE, 2016, pp. 128-131.
12. Wang Z., Liang M., Delahaye D. Short-term 4d trajectory prediction using machine learning methods, *Proc. SID*, 2017, pp. 1-10.
13. Shi Z. et al. LSTM-based flight trajectory prediction, *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. IEEE, 2018, pp. 1-8.
14. Lian K.Y., Yang C.Y. Image recognition system with predicting flying object path using 3D sensors, *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, 2014, pp. 2317-2321.
15. Xie G. et al. Vehicle trajectory prediction by integrating physics-and maneuver-based approaches using interactive multiple models, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, Vol. 65, No. 7, pp. 5999-6008.
16. Chekin A.Yu., Bondarenko Yu.V., Zybin E.Yu., Kiselev M.A. Nonparametric method for aircraft state prediction, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 476, pp. 012003.
17. Kos'yanchuk V.V., Zybin E.Yu. Chekin A.Yu., Bondarenko Yu.V. O prognozirovani vektora sostoyaniya vozdušnogo sudna v usloviyakh polnoy parametricheskoy neopredelennosti [On predicting the state vector of an aircraft under conditions of complete parametric uncertainty], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Perspective systems and management tasks: Materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference and the X Youth School-Seminar "Management and Information Processing in Technical Systems"]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 234-239.
18. Zybin E.Yu., Glasov V.V., Chekin A.Yu. Neparаметрический метод прогнозирования движения судна посадки беспилотного летательного аппарата [Nonparametric method of predicting the movement of the landing craft of an unmanned aerial vehicle], *Sb. tezisev dokladov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem», 26–27 noyabrya 2020 g., g. Moskva, 2020* [Collection of abstracts of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference "Modeling of Aviation Systems", November 26-27, 2020, Moscow, 2020], pp. 212-213.
19. Zybin E.Yu., Kos'yanchuk V.V., Karpenko S.S. O nekotorykh neparаметриcheskikh metodakh teorii upravleniya dinamicheskimi ob"ektami [On some non-parametric methods, control theory, dynamic objects], *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo* [Scientific readings in aviation, dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky], 2018, No. 6, pp. 288-298.
20. Kos'yanchuk V.V., Zybin E.Yu., Glasov V.V., Chekin A.Yu., Karpenko S.S., Bondarenko Yu.V. Metody resheniya nekotorykh zadach teorii lineynykh dinamicheskikh sistem v usloviyakh polnoy parametricheskoy neopredelennosti [Methods for solving some problems of the theory of linear dynamical systems under conditions of complete parametric uncertainty], *XIII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019: Sb. trudov XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019. Institut problem*

- upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2019 [XIII All-Russian Meeting on VSPU Management Problems-2019: Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on VSPU Management Problems-2019. V.A. Trapeznikov Institute of Control Problems of the Russian Academy of Sciences, 2019], pp. 724-729.*
21. Zybin E.Yu., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N. O minimal'noy parametrizatsii resheniy lineynykh matrichnykh uravneniy [On the minimal parametrization of solutions of linear matrix equations], *Vestnik IGEU* [Bulletin of the IGEU], 2004, No. 6, pp. 127-131.
 22. Prouty R. Helicopter Performance, Stability, and Control. PWS Publishers, 2005.
 23. Ponds P., Mahony R., Corke P. Modelling and control of a large quadrotor robot. *Control Engineering Practice*. 2010.
 24. Glasov V.V., Zybin E.Yu., Kos'yanchuk V.V. Neparаметрический метод стабилизации пространственного положения беспилотного летательного аппарата [Nonparametric method for stabilizing the spatial position of an unmanned aerial vehicle], *Mater. konferentsii «Upravlenie v aerokosmicheskikh sistemakh» (UAKS-2020) im. akademika E.A. Mikrina* [Proceedings of the conference "Management in Aerospace Systems " (UAKS-2020) named after Academician E.A. Mikrin]. Saint Petersburg: АО «Kontsern «TSNII «Elektroprigor», 2020, pp. 22-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Сельвесюк.

Косьянчук Владислав Викторович – ФУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»; e-mail: vvk@2100.gosniias.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74997590069; д.т.н.; профессор; зам. генерального директора.

Гласов Владислав Валерьевич – e-mail: aychekin@2100.gosniias.ru; к.т.н.; начальник лаборатории.

Зыбин Евгений Юрьевич – e-mail: eyzybin@2100.gosniias.ru; д.т.н.; начальник лаборатории.

Тань Лиго – Научно-исследовательский центр фундаментальных космических наук, Харбинский политехнический институт; e-mail: tanlihuo@hit.edu.cn; г. Харбин, Китай; тел.: +15504655181\0451-86402989; доцент.

Kosyanchuk Vladislav Viktorovich – FGUP «State Research Institute of Aviation Systems»; e-mail: vvk@2100.gosniias.ru; Moscow, Russia; phone: +74997590069; dr. of eng. sc.; professor; deputy director general.

Glasov Vladislav Valer'yevich – e-mail: vvglasov@2100.gosniias.ru; cand. of eng. sc.; head of laboratory.

Zybin Eugene Yuryevich – e-mail: eyzybin@2100.gosniias.ru; dr. of eng. sc.; head of laboratory.

Tan Ligu – Research Center of Basic Space Science, Harbin Institute of Technology; e-mail: tanlihuo@hit.edu.cn; Harbin, China; phone: +15504655181\0451-86402989; associate professor.

УДК 004.942

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-112-124

М.И. Мокрова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ ПОЖАРНОЙ ОБСТАНОВКИ НА КАЧЕСТВО НАБЛЮДЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЁТА БЛА

Авиационный мониторинг пожаров с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА), в частности, лесных, в процессе которого производится поиск различных объектов интереса: людей, автомобилей и пр., является одним из наиболее эффективных мероприятий по снижению уровня возможных потерь. В представленной работе рассматриваются подходы к формированию алгоритмов обработки и улучшения изображений, получаемых в процессе выполнения мониторинга пожарной обстановки, основанные на использовании нейросетей, а также алгоритмов фильтрации изображений, с целью поиска различных

объектов интереса. Мониторинг пожаров с помощью беспилотного летательного аппарата представляет собой двухкритериальную задачу: существует необходимость максимально обезопасить аппарат от теплового воздействия пожара, а также максимально улучшить наблюдаемость, что может быть достигнуто за счёт снижения высоты полёта. В настоящей работе представлены разработанные авторами эмпирические модели безопасности полета беспилотного летательного аппарата и наблюдаемости объектов интереса в процессе мониторинга пожарной обстановки. Предлагаемые модели позволяют учитывать особенности условий мониторинга, такие как приоритетность обнаружения объекта интереса к безопасности самого разведывательного аппарата, влажность воздуха, рельеф и вид местности, время суток и прочее. Рассмотрен пример применения модели контрастности на примере поиска и обнаружения метки «буква». На основе проведенного эксперимента по распознаванию метки в дыму, осуществлен анализ предлагаемых моделей, приведены количественные результаты. В работе описаны критерии оптимальности выбора высоты полёта аппарата над наблюдаемой сценой, которые формируются на основе базы экспертных оценок, а также предложенных моделей наблюдаемости и безопасности полёта БЛА. В зависимости от целевой задачи поиска возможна вариативность критерия оптимальности выбора высоты полёта БЛА над наблюдаемой сценой.

Беспилотный летательный аппарат; БЛА; высота; безопасность; контрастность; мониторинг; обработка изображений; поиск объектов; потери; критерий оптимальности.

M.I. Mokrova

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF COMPLEX FIRE CONDITIONS ON THE QUALITY OF SURVEILLANCE AND FLIGHT SAFETY OF UAVS

Aviation monitoring of fires with the help of unmanned aerial vehicles (UAVs), in particular, forest ones, during which the search for various objects of interest is carried out: people, cars, etc., is one of the most effective measures to reduce the level of possible losses. In this paper, we consider approaches to the formation of algorithms for processing and improving images obtained in the process of monitoring the fire situation, based on the use of neural networks, as well as image filtering algorithms, in order to search for various objects of interest. Fire monitoring using an UAV is a two-criteria task: there is a need to protect the device from the thermal effects of the fire as much as possible, as well as to maximize the observability, which can be achieved by reducing the altitude of the flight. This paper presents the empirical models developed by the authors for the flight safety of an unmanned aerial vehicle and the observability of objects of interest in the process of monitoring the fire situation. The proposed models allow us to take into account the features of the monitoring conditions, such as the priority of detecting the object of interest to the security of the reconnaissance vehicle itself, air humidity, terrain and type of terrain, time of day, and so on. An example of the application of the contrast model is considered on the example of the search and detection of the "letter" label. On the basis of the conducted experiment on the recognition of the mark in the smoke, the analysis of the proposed models is carried out, the quantitative results are given. The paper describes the criteria for the optimal choice of the altitude of the flight of the device over the observed scene, which are formed on the basis of the base of expert assessments, as well as the proposed models of the observability and safety of the UAV flight. Depending on the target search task, the optimality criterion for choosing the UAV flight altitude over the observed scene may vary.

High-speed bigradient method; tunable sliding mode; vibratory gyroscope; stability; Lyapunov function; robustness; modified reference model.

1. Введение. Динамичное развитие БЛА последних лет ставит все новые прикладные задачи перед различными инженерными областями. Целью компьютерного зрения в таких задачах является повышение информативности изображения, получаемого с камеры беспилотника. Особенно серьезные трудности возникают при использовании БПЛА в условиях высоких шумов в области видимого спектра, которые делают затруднительным применение алгоритмов распознавания цели без предварительной обработки входного видеопотока. В процессе мониторинга БЛА, оснащенные системами наблюдения (СН), облетают область поиска,

принимая на борту фото- или видеоматериалы о состоянии обследуемой поверхности [1–3]. На основе обработки и анализа принятых изображений принимается решение о присутствии или отсутствии объектов интереса.

Сложность авиационного поиска объектов определяется опасностью относительно низких полетов БЛА над источниками огня и изменяемой наблюдаемостью обследуемой поверхности от воздействия дыма [4]. Снижая высоту полета, можно повысить эффективность обнаружения объектов, но при этом ухудшится безопасность БЛА [5].

Множество современных технологий, а также классических методов обработки изображений, обеспечивающих их улучшение, позволяют без особого приближения к сцене, т.е. высоты полёта БЛА, распознать объект интереса. К таким методам можно отнести восстановление, производимое путем фильтрации изображений в частотной области с предварительным переходом в область Фурье [6], а также после создания сверточных нейронных сетей и роста вычислительных мощностей, нейросетевой подход стал повсеместно применяться в широком спектре задач обработки изображений. Одним из современных алгоритмов машинного обучения являются генеративно-состязательные сети. Последние представляют собой комбинацию из двух нейронных сетей, одна из которых генерирует образцы, а другая старается отличить правильные («подлинные») образцы от неправильных. Использование этой техники позволяет, в частности, генерировать фотографии, которые человеческим глазом воспринимаются как натуральные изображения. Кроме того, GAN может использоваться для улучшения качества нечетких или частично испорченных фотографий. В данной статье рассматривается использование генеративно-состязательных сетей для удаления дыма с изображений. Оба метода будут подробно рассмотрены в настоящей работе.

Однако остаются случаи, когда плотность дыма, не позволяет улучшить изображения до уровня, позволяющего распознать метку. В таком случае необходимо прибегать к снижению высоты полёта БЛА. В данной статье рассмотрена разработка алгоритма управления высотой полёта, выбор оптимальности высоты производится с учётом безопасности аппарата и наблюдаемости объекта. Для решения описанной задачи автором были разработаны [4]:

- ◆ модель наблюдаемости объектов интереса БЛА в условиях задымленности;
- ◆ модель безопасности полёта БЛА над очагами пожара;
- ◆ критерий выбора оптимальной высоты полёта БЛА над конкретным очагом пожара.

2. Подходы к повышению распознаваемости объектов в условиях плохой видимости.

2.1. Фильтрация в частотной области с предварительным переходом в область Фурье.

Частотная область цифрового изображения представляет собой пространство, в котором принимают значения переменные (u, v) Фурье-преобразования. Частота сигнала прямо связана со скоростью изменения сигнала, поэтому можно сказать, что частоты в Фурье-преобразовании связаны с вариацией яркости на изображении. Используя эти сведения, а также действительную симметричную фильтр-функцию, получим обработанное изображение. Для тестирования улучшения можно воспользоваться фильтрами высоких частот (ФВЧ) Баттерворта и Гаусса. Фильтр Баттерворта в стандартной форме является фильтром низких частот. Величину частоты среза фильтра рекомендуется устанавливать не более 2–5 % от величины меньшей стороны изображения, чтобы низкие частоты подавлялись, но не убирались полностью. Однако, в данной задаче изменения яркости, вызванные наличием дыма и тумана, имеют еще более маленькую частоту изменения и значенные частоты необходимо выставлять в пределах 1 %.

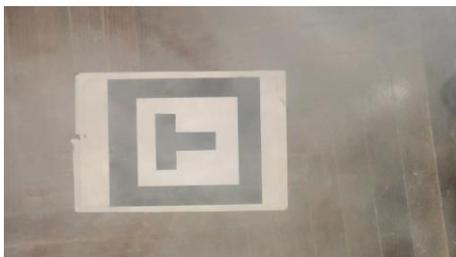


Рис. 1. Исходное изображение

Ниже представлен результат применения фильтра с данными параметрами на исходном изображении. Как и ожидалось, контраст резких деталей повысился. Однако, из-за конструкции высокочастотного фильтра, он обнуляет нулевой член, несущий информацию о средней яркости изображения, и общая его яркость падает.



Рис. 2. Результат применения ФВЧ Баттерворта

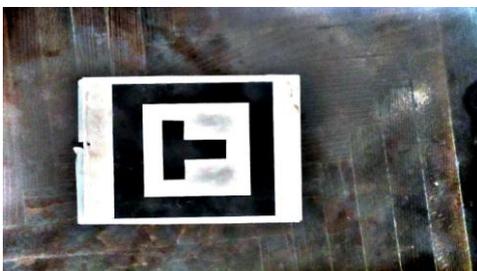


Рис. 3. Результат применения ФВЧ Гаусса

Ниже представленные результаты показал подход в процессе применения для распознавания образов (рис. 4, 5).



Рис. 4. Исходное изображение



Рис. 5. Распознавание на обработанном изображении

Из показанных результатов видно, что применение описанного подхода позволяет повысить вероятность обнаружения и распознавания объектов.

2.2. Восстановление зашумленного изображения с использованием генеративно-сопоставительных сетей.

2.2.1. Подход к решению задачи.

Помимо аналитических подходов к улучшению получаемых изображений наблюдаемой сцены, в данной задаче имеет место нейросетевой подход.

При решении поставленной задачи была использована генеративно-сопоставительная сеть *pix2pix*, предназначенная для преобразования исходного изображения, согласно тренировочным данным. Сбор или получение последних как раз являются ключевой проблемой, так как ручное создание выборки достаточно трудоёмкий процесс. Выходом из этого положения является программный синтез дыма на изображении. Однако большинство известных решений генерации дыма (шум Перлина, симплекс шум) не позволяют добиться требуемой для обучений нейросети реалистичности изображения. В свою очередь, дым и туман имеют близкую физическую природу и в рамках поставленной задачи могут быть взаимозаменяемы. В работе [7] показан способ моделирования тумана на изображении с использованием карты глубины на примере набора изображений [8]. На рис. 6 продемонстрированы результаты программного синтеза шумов описанными способами.

При обучении нейросети на выборке с высокой плотностью тумана (рис. 7) были получены неудовлетворительные результаты: сеть не смогла обучиться и на выходе наблюдались сильно зашумленные изображения. Для решения данной проблемы нейросеть была предобучена на выборке с низкой плотностью тумана (рис. 8), а уже после обучалась на основной выборке.



Рис. 6. Слева-направо: оригинальное изображение, наложение шума Перлина, моделирования тумана с помощью карты глубины



Рис. 7. Изображение из обучающей выборки с высокой плотностью сгенерированного тумана



Рис. 8. Изображение из обучающей выборки с низкой плотностью сгенерированного тумана

2.2.2. Оценка эффективности работы полученной модели.

Подобный приём позволил подстроить веса модели под конечную задачу и получить удовлетворительные результаты.

Оценивание эффективности работы модели проводилась на основе использования двух алгоритмов: выделения прямоугольников и распознавания классов объектов на изображении. В первом случае модель позволила заметно повысить количество кадров, на котором выделен прямоугольник (рис. 9), в то время как алгоритм распознавания объектов (рис. 10) показал незначительный прирост точности. Отсутствие влияние обработки изображения на алгоритм распознавания можно объяснить невысоким разрешением изображения, получаемого на выходе модели.

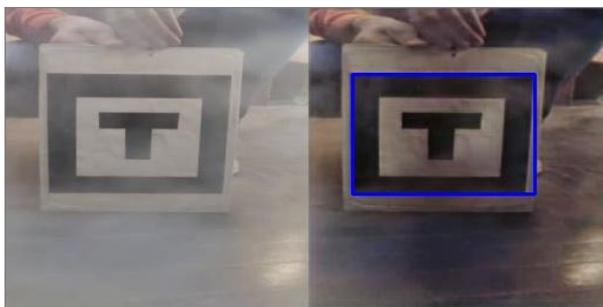


Рис. 9. Результат работы алгоритма детектирования прямоугольников

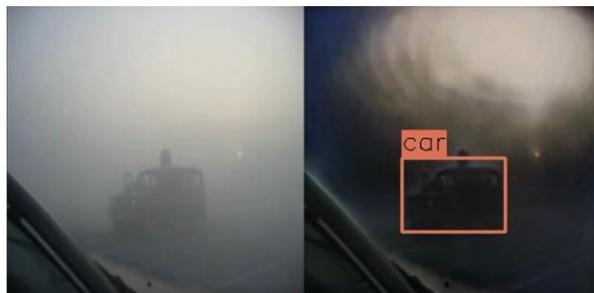


Рис. 10. Результат работы алгоритма распознавания образов

Результаты сравнения качества работы модели на тестовом видео приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количественные результаты работы алгоритма

Количество кадров	Оригинальные изображения	Обработанные
Успешно детектирован прямоугольник	346 (~ 46,9 %)	382(~51,8 %)
Прямоугольник не детектирован	392	356
Всего	738	738

Для каждого класса дыма была взята выборка размером в 100 кадров. Полученные результаты обнаружения объекта интереса представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты обнаружения для разных классов задымленности

Класс	Описание	Количество обнаружений на непродобработанном и предобработанном изображении	Количество обнаружений только на непродобработанном изображении	Количество обнаружений только на предобработанном изображении	Количество не обнаружений
1	Сплошной и плотный дым	0	0	5	95
2	Дым средней плотности	18	3	7	72
3	Слабый дым	32	27	11	30
4	Дымка	36	43	6	15
5	Практически задымление отсутствует	24	72	1	3

Проведенные эксперименты показали, что обученная модель будет малоэффективна при обработке данных, сильно отличающихся от тренировочной выборки. Этот недостаток можно устранить, разнообразив обучающие примеры изображениями с различной интенсивностью и способами генерации шума.

По приведённым в табл. 2 данным можно заметить, что в случае сплошной и средней задымленности наблюдаемой сцены алгоритм с использованием генеративно-состязательных сетей малоэффективен. Для улучшения изображений в данных случаях необходимо уменьшать количество дыма на наблюдаемой сцене путем снижения высоты полёта БЛА.

2.3. Выбор оптимальной высоты полёта БЛА.

В работе [9] предложен подход, позволяющий выбрать оптимальную высоту полета БЛА с учетом требований по наблюдаемости объектов интереса и безопасности БЛА.

Принимается, что эффективность мониторинга определяется потерями:

$$R_{\Sigma}(h) = a_a R_a(h) + a_s R_s(h), \quad (1)$$

где $R_a(h)$ – потери, связанные с ошибками поиска объектов; $R_s(h)$ – потери БЛА, связанные с высотой полета h ; a_s, a_a – коэффициенты ранжирования потерь.

Зависимости $R_a(h)$ и $R_s(h)$ – описываются соответствующими моделями наблюдаемости и безопасности.

Выбор коэффициентов a_s, a_a производится на основе экспертной оценки с учетом конкретных поисковых ситуаций.

Оптимальная высота полета БЛА h_{opt} определяется при минимальных потерях

$$h_{opt} = \arg [\min R_{\Sigma}(h)]. \quad (2)$$

Значение высоты, определяющей минимум функции общих потерь (1) зависит от вида и параметров функций $R_a(h)$ и $R_s(h)$, а также выбора коэффициентов ранжирования a_s, a_a .

В основе подхода лежит использование предложенных авторами моделей наблюдаемости и безопасности. Однако в этих работах не рассматриваются методы определения параметров моделей, что ограничивает возможность их практического использования.

2.3.1. Эвристическая модель наблюдаемости объекта интереса.

В общем случае наблюдаемость объектов зависит от контрастности наблюдаемых сцен. Контрастность принимаемых на борту БЛА изображений в условиях пожара уменьшается из-за наличия в дыме мелких твердых частиц [10], находящихся во взвешенном состоянии. Уменьшение контрастности и воздействие высокочастотных шумов увеличивают ошибки обнаружения объектов (вероятность пропуска целей, вероятность ложной тревоги).

В зависимости от постановки задачи в качестве потерь $R_a(h)$ могут быть приняты различные показатели, например, вероятность пропуска цели.

Потери, связанные с наблюдениями, определяются как

$$R_a(h) = \left[1 - \frac{1}{1 + e^{-k_f(h-h_f)}} \right] \left[\frac{1}{1 + e^{-\Delta\beta}} \right]. \quad (3)$$

где k_f – эмпирический коэффициент, зависящий от условий пожара; h_f – высота, при которой контрастность равна 0,5 K_{fmax} ; K_{fmax} – максимальная контрастность; $f \in F$ – индекс области пожара; F – количество участков с постоянными параметрами задымленности; $\beta = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_n}\right)^2$ – отношение сигнал/шум; $n(i, j)$ – белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением $\sigma_n(i, j)$.

2.3.2. Модель безопасности БЛА.

Примем, что относительная безопасность БЛА, определяемая тепловым воздействием и возможным воздействием внешних объектов, оценивается достоверностью потери (аварии) БЛА и изменяется в зависимости от высоты полета в диапазоне: 0÷1

$$R_s(h) = \frac{1}{1 + e^{-k_s(h-h_s)}} \quad (4)$$

где k_s – эмпирический коэффициент, определяемый с учетом интенсивности огня, расположения наземных объектов, условий полета; h_s – высота полета БЛА, при которой относительная безопасность полета равна 0,5, соответственно; s – индекс критерия безопасности полета.

При $R_s(h) = 1$ БЛА терпит аварию, приводящую к его разрушению, а при $R_s(h) = 0$ условия полета абсолютно безопасны.

3. Методика оценки параметров модели наблюдаемости

1. Выделение областей различной наблюдаемости и безопасности.

Разделение наблюдаемой сцены (рис. 1) на отдельные области (фрагменты) производится на основе оценки моментов [///]. Решение принимается при выполнении условий

$$|m_{0pq} - m_{pq}| \leq \Delta m_{pq}, \quad (5)$$

где m_{0pq} – pq -й момент, полученный при обработке эталонного изображения искомого объекта, m_{pq} – момент текущего изображения, Δm_{pq} – заданный порог.

Эталонные данные должны быть подготовлены заранее и включать условия основных поисковых ситуаций.

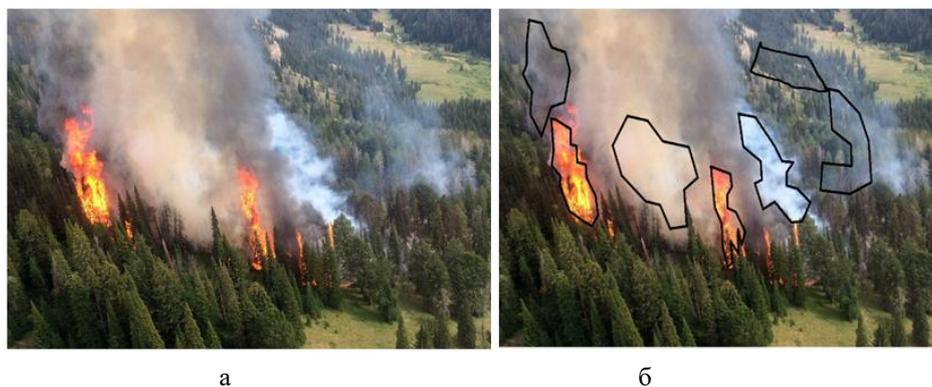


Рис. 1. Примеры пожарной обстановки

2. Классификация областей.

В рамках решаемых задач предлагается ввести следующую классификацию наблюдаемости (табл. 3). В последнем столбце представлены экспертные оценки достоверности (возможности) обнаружения малоразмерных контрастных объектов.

Таблица 3

Класс	Описание	Признаки	Пример	Достоверность обнаружения контрастных объектов площадью до 0,05 м ²
1	Сплошной и плотный дым	1-й момент показывает наличие плотного дыма; 2-й момент показывает наличие однородного поля	Фрагменты №	0
	Сплошное пламя	Наличие цветовых составляющих огня	Фрагменты №	

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

2	Дым средней плотности	1-й момент показывает наличие дыма; 2-й момент показывает наличие неоднородного поля; радиус корреляции существенно отличается от характеристик поверхности	Фрагменты №	0,2
3	Слабый дым	1-й момент показывает наличие слабого дыма; 2-й момент показывает наличие неоднородного поля; радиус корреляции не существенно отличается от характеристик поверхности	Фрагменты №	0,6
4	Дымка	1-й момент показывает наличие слабого дыма; 2-й момент показывает наличие неоднородного поля; радиус корреляции существенно не отличается от характеристик поверхности	Фрагменты №	0,8
5	Практически задымление отсутствует	Моменты, рассчитанные на фрагменте, соответствуют не задымленным эталонам	Нижняя область наблюдаемой сцены	1

Классификация производится на основе заранее подготовленной базы знаний.

Классификацию области по безопасности предлагается реализовать следующим образом:

1. Выделение категорий безопасности по

а. тепловому воздействию.

Данная категория выбирается, если идентифицируются визуальные признаки пламени.

б. воздействию внешних объектов, в частности, плотности леса и высоте деревьев.

Данная категория выбирается, если задымление присутствует, но визуальных признаков открытого пламени не обнаруживается.

2. Выбор обследуемых областей

На данном этапе производится оперативное планирование распределения поисковых средств:

◆ Исключение областей с наблюдаемостью класса 1,

◆ Оценка допустимых потерь наблюдаемости по условию:

$R_a(h) \leq R_{ra}$, где R_{ra} – допустимая вероятность пропуска цели.

Так, если $R_{ra} < 0,2$, то с учетом данных табл. 1, области класса 2 также исключаются из процесса поиска.

◆ Формирование списка обследуемых областей

4. Оценка параметров

Следующим этапом методики является оценка параметров моделей (3) и (4).

Значения параметров определяются на основании заранее подготовленной базы знаний (БЗ).

Ниже приведены примеры правил из БЗ, обеспечивающих оценку искомых параметров:

◆ Если поверхность – лес и пожар сильный, и влажность высокая, то $0.7 < k_f < 0.9$.

◆ Если поверхность – лес и пожар слабый, и лес редкий, и влажность низкая, то $h_f > 0.7 h_t$, $0.4 < k_f < 0.6$, где h_t – высота деревьев.

◆ Если поверхность – лес и высота деревьев h_t , то $h_f > h_t$.

◆ Если поверхность – поле, и пожар сильный, и влажность низкая, то $h_f > 3m$.

◆ Если поверхность – поле, пожар сильный, и влажность высокая, то $h_f > 5m$.

Коэффициент k_f (размерность 1/метр или $1/m$) и значения высот h_f (размерность – m) могут быть определены на основе сформированных заранее баз знаний исходя из предыдущего опыта обследования аналогичных особых ситуаций.

При отсутствии баз знаний, описываемые выше коэффициенты могут быть выбраны на основе визуального анализа пожарной обстановки. Так на рис. 1,а представлена ситуация, когда видимый уровень пламени (очаг 1) выше h_t , исходя из этого коэффициент k_f задается в диапазоне $0.7 < k_f < 0.9$, конкретное значение в данном диапазоне выбирается в зависимости от влажности воздуха в данной местности – чем влажность выше, тем коэффициент ближе к значению 0.9.

Примеры правил, для оценки параметров моделей безопасности:

◆ Если поверхность – лес и высота деревьев h_t , то $h_s > 0.8 h_t$;

◆ Если лес – редкий, то $k_s < 0,4$;

◆ Если лес – густой, то $k_s > 0,6$;

◆ Если пожар – сильный и высота пламени h_t , то $h_s > h_t$;

◆ Если лес – редкий и пожар – средний, то $0.2 < k_s < 0.4$;

◆

При $R_a(h) = 0$ обнаружение объектов производится без потерь, что означает $P_a(h) = 1$ – вероятность правильного обнаружения объекта. $R_a(h) \rightarrow \max$ соответствует случаю, когда условия наблюдения не позволяют обнаружить присутствующий объект ($P_a(h) = 0$).

При $R_s(h) = 0$ условия полета абсолютно безопасны, это означает что $P_s(h) = 0$ – вероятность аварии БЛА, при $R_s(h) \rightarrow \max$ БЛА терпит аварию, приводящую к его разрушению ($P_s(h) = 1$).

Заключение. Таким образом, актуальной является проблема организации полета БЛА при мониторинге пожарной обстановки, учитывающего указанные факторы и обеспечивающего выполнение поставленных целевых задач поиска с заданной надежностью и безопасностью поисковых средств.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научно-исследовательского проекта № 19-08-00613-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dilshad N., Hwang J., Song J., Sung N. Applications and Challenges in Video Surveillance via Drone: A Brief Survey // 11th International Conference on Information and Communication Technology Convergence, South Korea. – 2020. – P. 728-732.
2. Sudhakar S., Vijayakumar V., Sathiya Kumar C., Priya V., Ravi L., Subramaniaswamy V. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires // Computer Communications. – 2020. – Vol. 149. – P. 1-16.
3. Khan A., Gupta S., Gupta S.K. Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2020. – Vol. 47, art. no. 101642.

4. Kim N.V., Mikhailov N.A., Mokrova M.I. Drone Searches in Challenging Conditions // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40, No. 7. – P. 583-585. – ISSN 1068-798X.
5. Zhai Q., Ye Z.-S. How reliable should military UAVs be? // ISE Transactions. Taylor and Francis Ltd. – 2020. – Vol. 52 (11). – P. 1234-1245.
6. Zhou Z., Wang X., Li C., Zeng M., Li Z. Adaptive deep feature aggregation using Fourier transform and low-pass filtering for robust object retrieval // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2020.
7. Martin Hahner, Dengxin Dai, Christos Sakaridis, Jan-Nico Zaech, Luc Van Gool. Semantic Understanding of Foggy Scenes with Purely Synthetic Data // arXiv, 2020. – <https://arxiv.org/abs/1910.03997>.
8. Magnus Wrenninge, Jonas Unger. Synscapes: A Photorealistic Synthetic Dataset for Street Scene Parsing // arXiv, 2018. – <https://arxiv.org/abs/1810.08705>.
9. Evdokimenkov Veniamin N., Kim Nikolay V., Kozorez Dmitriy A., Mokrova Mariya I. Control of unmanned aerial vehicles during fire situation monitoring // INCAS Bulletin. – 2019. – Vol. 11, Special Issue. – P. 66-73. – Doi: 10.13111/2066-8201.
10. Сарманаев С.Х., Башарин В.А., Толкач П.Г., Щербашов К.А. Токсико-химические повреждения при пожаре // Биомедицинский журнал "Medline.ru". Т. 16. Токсикология. 26 марта 2015.
11. Некрасов О.Н. Прогнозирование пожарной обстановки и скорости распространения лесного пожара с учетом рельефа местности, погодных условий и мероприятий для пожарных // Научно-образовательные проблемы гражданской защиты. – 2014. – № 3.
12. Кудрин А.Ю., Подрезов Ю.В. Анализ современных средств и методов борьбы с природными пожарами // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – № 4.
13. Georgiev G.D., Hristov G., Zahariev P., Kinaneva D. Forest Monitoring System for Early Fire Detection Based on Convolutional Neural Network and UAV imagery // 28th National Conference with International Participation, TELECOM 2020 – Proceedings. – 2020. – P. 57-60.
14. Lee I.K., Trinder J.C., Sowmya A. Application of u-net convolutional neural network to bush-fire monitoring in Australia with sentinel-1/2 data // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. – 2020. – P. 573-578.
15. Adão T., Pinho T.M., Pádua L. et al. Using virtual scenarios to produce machine learnable environments for wildfire detection and segmentation // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. – Vol. 42, Issue 3/W8. – 20 August 2019. – P. 9-15.
16. Shobeiry P., Xin M., Hu X., Chao H. Uav path planning for wildfire tracking using partially observable Markov decision process // AIAA Scitech 2021 Forum. – P. 1-18.
17. Sousa M.J., Moutinho A., Almeida M. Thermal infrared sensing for near real-time data-driven fire detection and monitoring systems // 2020 Sensors, Switzerland. – Vol. 20 (23), 6803. – P. 1-29.
18. Gorelik A.L., Skripkin V.A. Recognition methods. – Moscow: Nauka. 2004.
19. Merino L., Caballero F., De Dios J.R.M., Maza I., Ollero A. An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2012. – Vol. 65 (1). – P. 533-548.
20. Rodin C.D., De Lima L.N., De Alcantara Andrade F.A., Haddad D.B., Johansen T.A., Storvold R. Object Classification in Thermal Images using Convolutional Neural Networks for Search and Rescue Missions with Un-manned Aerial Systems // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2018-July, 8489465.

REFERENCES

1. Dilshad N., Hwang J., Song J., Sung N. Applications and Challenges in Video Surveillance via Drone: A Brief Survey, *11th International Conference on Information and Communication Technology Convergence, South Korea, 2020*, pp. 728-732.
2. Sudhakar S., Vijayakumar V., Sathiy Kumar C., Priya V., Ravi L., Subramaniaswamy V. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires, *Computer Communications*, 2020, Vol. 149, pp. 1-16.
3. Khan A., Gupta S., Gupta S.K. Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, Vol. 47, art. no. 101642.

4. Kim N.V., Mikhailov N.A., Mokrova M.I. Drone Searches in Challenging Conditions, *Russian Engineering Research*, 2020, Vol. 40, No. 7, pp. 583-585. ISSN 1068-798X.
5. Zhai Q., Ye Z.-S. How reliable should military UAVs be?, *IISE Transactions. Taylor and Francis Ltd.*, 2020, Vol. 52 (11), pp. 1234-1245.
6. Zhou Z., Wang X., Li C., Zeng M., Li Z. Adaptive deep feature aggregation using Fourier transform and low-pass filtering for robust object retrieval, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2020.
7. Martin Hahner, Dengxin Dai, Christos Sakaridis, Jan-Nico Zaech, Luc Van Gool. Semantic Understanding of Foggy Scenes with Purely Synthetic Data, *arXiv*, 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/1910.03997>.
8. Magnus Wrenninge, Jonas Unger. Synscapes: A Photorealistic Synthetic Dataset for Street Scene Parsing, *arXiv*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1810.08705>.
9. Evdokimenkov Veniamin N., Kim Nikolay V., Kozorez Dmitriy A., Mokrova Mariya I. Control of unmanned aerial vehicles during fire situation monitoring, *INCAS Bulletin*, 2019, Vol. 11, Special Issue, pp. 66-73. Doi: 10.13111/2066-8201.
10. Sarmanaev S.Kh., Basharin V.A., Tolkach P.G., Shcherbashov K.A. Toksiko-khimicheskie povrezhdeniya pri pozhare [Toxico-chemical damage in a fire], *Biomeditsinskiy zhurnal "Medline.ru"* [Biomedical Journal "Medline.ru"], Vol. 16. Toksikologiya. 26 March 2015.
11. Nekrasov O.N. Prognozirovaniye pozharnoy obstanovki i skorosti rasprostraneniya lesnogo pozhara s uchetom rel'efa mestnosti, pogodnykh usloviy i meropriyatiy dlya pozharnykh [Forecasting of the fire situation and the speed of forest fire propagation taking into account the terrain, weather conditions and measures for firefighters], *Nauchno-obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity* [Scientific and educational problems of civil protection], 2014, No. 3.
12. Kudrin A.Yu., Podrezov Yu.V. Analiz sovremennykh sredstv i metodov bor'by s prirodnyimi pozharami [Analysis of modern means and methods of fighting natural fires], *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Technologies of civil security], 2006, No. 4.
13. Georgiev G.D., Hristov G., Zahariev P., Kinaneva D. Forest Monitoring System for Early Fire Detection Based on Convolutional Neural Network and UAV imagery, *28th National Conference with International Participation, TELECOM 2020 – Proceedings*, 2020, pp. 57-60.
14. Lee I.K., Trinder J.C., Sowmya A. Application of u-net convolutional neural network to bush-fire monitoring in Australia with sentinel-1/-2 data, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 2020, pp. 573-578.
15. Adão T., Pinho T.M., Pádua L. et al. Using virtual scenarios to produce machine learnable environments for wildfire detection and segmentation, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, Vol. 42, Issue 3/W8, 20 August 2019, pp. 9-15.
16. Shobeiry P., Xin M., Hu X., Chao H. Uav path planning for wildfire tracking using partially observable Markov decision process, *AIAA Scitech 2021 Forum*, pp. 1-18.
17. Sousa M.J., Moutinho A., Almeida M. Thermal infrared sensing for near real-time data-driven fire detection and monitoring systems, *2020 Sensors, Switzerland*, Vol. 20 (23), 6803, pp. 1-29.
18. Gorelik A.L., Skripkin V.A. Recognition methods. Moscow: Nauka. 2004.
19. Merino L., Caballero F., De Dios J.R.M., Maza I., Ollero A. An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2012, Vol. 65 (1), pp. 533-548.
20. Rodin C.D., De Lima L.N., De Alcantara Andrade F.A., Haddad D.B., Johansen T.A., Storvold R. Object Classification in Thermal Images using Convolutional Neural Networks for Search and Rescue Missions with Un-manned Aerial Systems, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2018-July*, 8489465.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. В.Н. Пащенко.

Мокрова Мария Игоревна – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: mary.mokrova@mail.ru; Москва, Россия; аспирант.

Mokrova Mariya Igorevna – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: mary.mokrova@mail.ru; Moscow, Russia; postgraduate student.

И.О. Шальнев**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ МАШИНЫ***

Проведен анализ подходов к построению робототехнических систем. Показано, что робототехнические системы можно рассматривать как распределенную систему взаимодействия отдельных компонентов робототехнической системы и взаимодействия робототехнических систем в рамках единого комплекса. В первом случае робототехническая система является совокупностью отдельных модулей в рамках одного робота. Так, например, отдельные моторы, сервоприводы для управления полезной нагрузкой беспилотного летательного аппарата (БЛА) можно рассматривать как отдельные модули всего БЛА в рамках распределенной робототехнической системы. Во втором случае робототехнической системой может считаться совокупность взаимодействующих робототехнических систем. Так, например, отдельно взятый БЛА является робототехнической системой в составе общей распределенной робототехнической системы, определяющей групповое взаимодействие. Необходим подход позволяющий единый способ описания такой иерархии робототехнических систем. В области робототехники существует множество подходов построения таких систем, каждый из которых определяет средства связи и передачи данных. Данная статья описывает существующие подходы, их достоинства и недостатки, а также предлагает иной подход для создания распределенных робототехнических систем. Связь отдельных узлов информационной сети, в существующих подходах, обеспечивается путем передачи данных с последующей их обработкой. В статье описывается подход, основанный на инкапсуляции исполнимого кода в передаваемые сетевые пакеты. Взаимодействие объектов осуществляется посредством передачи управляющей информации, интерпретируемой распределенной виртуальной машиной. Расширение парадигмы объектно-ориентированного программирования (ООП) понятием комплементарного объекта, позволяет создавать распределенную систему, абстрагируясь от особенностей сетевого программирования. Объектно-ориентированный подход, основанный на использовании комплементарных объектов, позволяет разрабатывать распределенную систему как единую программу, концентрируясь на реализации логики. В таком случае мы переходим от концепции распределенной системы как реализации отдельных модулей к концепции единой распределенной программы без «синтаксического разрыва». В статье предлагается подход, позволяющий представлять распределенную робототехническую систему в парадигме (ООП), как совокупность взаимодействующих через коммуникационную среду объектов, обеспечивающий передачу данных через аргументы удаленных вызываемых методов.

Робототехнические системы; распределенные системы; языковые виртуальные машины.

I.O. Shalnev**COMMUNICATION AND DATA TRANSFER IN DISTRIBUTED ROBOTICS
SYSTEMS**

The robotic systems building approaches is analyzed in this paper. Robotics systems can be considered as a distributed system which interacted between individual components of the robotic system and interacted between robotic systems within a single complex. In first case a robotic system can be a collection of individual modules within a single robot. For example, individual motors, servo drives for camera control, and the camera itself control of the unmanned aerial vehicle (UAV) can be considered as separate modules of the entire UAV within a distributed robotic system. In second case robotic system devoted to a massive of connected robotic system. For

* Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2021 г. № 0073-2019-0005.

example, each UAV is a robotic system which is a part of whole robotic system that define UAV group interaction. An approach that allows a unified way to describe such robotic systems hierarchy is needed. In the field of robotics systems, there are many approaches to building it, which defines the means of communication and data transfer. This paper describes the existing approaches, their advantages and disadvantages, and suggests another approach for creating distributed robotic systems. Each nodes network connection in the existing approaches is provided by transferring data with their subsequent processing. The article describes an approach based on the encapsulation of executable code in transmitted network packets. The object interaction is carried out through the control data transfer that interpreted by a distributed virtual machine. The object-oriented programming (OOP) paradigm extension by the concept of a complementary object, allows to create a distributed system that abstracted from the network programming difficulty. An object-oriented approach based on complementary object usage allows to develop a distributed system as a single program, concentrating on the implementation of logic. So we passing from the distributed system as an implementation of separate modules concept to the single distributed program concept without a "syntax breaking". The proposed approach allows to represent a distributed robotic system in the OOP paradigm as a set of objects interacting over a communication network.

Robotic systems; distributed systems; virtual machines.

Введение. В настоящее время активно развиваются технологии «интернета вещей» и робототехнические системы. Оба эти направления объединяет необходимость взаимодействия в инфокоммуникационной среде независимых агентов, что обуславливает появление модифицированных протоколов связи, соответствующих поставленным задачам. Так, разработчики робототехнических систем предлагают свои подходы к построению взаимодействующих элементов, определяют свою логику передачи данных и протоколов взаимодействия подсистем. Очевидно, что эти подходы отвечают требованиям, выдвинутым в рамках определённого круга поставленных задач.

В работе делается попытка разработки методологии представления целостной структуры системы как совокупности взаимодействующих атомарных информационных объектов. Такими объектами могут быть и логические программные объекты, и цифровые двойники объектов реального мира.

Особенностью работы является повышение уровня абстракции программного кода, что избавляет программиста от проблем реализации коммуникационных функций и синхронизации физических объектов.

В статье рассматриваются достоинства и недостатки существующих решений и предлагается способ построения программно-аппаратных комплексов на основе объектно-ориентированного взаимодействия робототехнических средств в распределенной среде. Проблемы, изучаемые в текущем исследовании, привели к необходимости заново осмыслить протокол взаимодействия объектов виртуальной среды.

Существующие протоколы взаимодействия. В настоящий момент наиболее стандартизованным протоколом для обмена информацией между наземной станцией и любыми малыми беспилотными аппаратами является MAVLink (Micro Air Vehicle Link) [1] – это легковесный протокол передачи сообщений для обеспечения взаимосвязи беспилотных летательных аппаратов – БЛА (в том числе и для бортовых компонентов БЛА). Протокол MAVLink придерживается стандартных шаблонов проектирования [2]: издатель-подписчик (publish-subscribe) и точка-точка (point-to-point).

Издатель-подписчик – это шаблон, обеспечивающий обмен сообщениями между издателем (publisher) и подписчиком (subscriber). Издатель публикует сообщения в канал, на который подписчики могут подписаться. На рис. 1 показан пример такого взаимодействия. Модуль ввода публикует сообщения в канал предварительной обработки. Модуль обработки подписывается на этот канал, чтобы получать все публикуемые модулем ввода сообщения. Модуль обработки, в даль-

нейшем, публикует результат обработки в канал пост-обработки. И, наконец, модули вывода подписываются на последний канал, для получения публикуемых в канал постобработки сообщений.

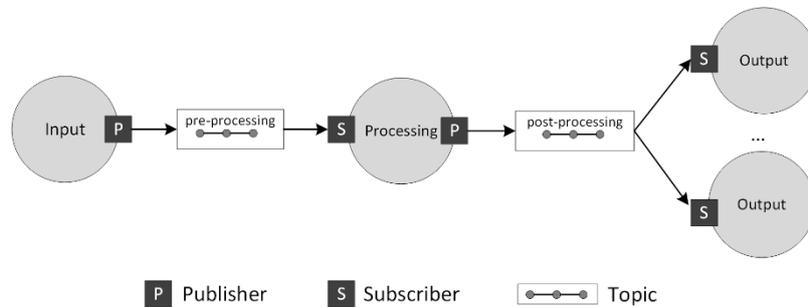


Рис. 1. Пример передачи сообщений в шаблоне «издатель-подписчик»

Основное преимущество шаблона «издатель-подписчик» заключается в том, что он позволяет отправлять сообщения между компонентами системы, которые не знают друг о друге. Такой подход позволяет создавать модули системы изолированно друг от друга, концентрируясь на реализации модуля и не задаваясь вопросом о маршрутизации сообщений. В таком подходе не источник определяет потребителей информации, а потребители подписываются на канал потока данных [2–4].

В основе шаблона «издатель-подписчик» лежат другие шаблоны проектирования, например, шаблон «очередь обработки сообщений», который реализует обмен сообщениями. Обмен сообщениями через очередь часто используется для безопасного межпроцессного и межпоточного взаимодействия, при этом очередь событий должна присутствовать у каждого участника взаимодействия. Во время публикации сообщения оно сначала отправляется в локальную очередь, а затем передается в очередь получателя сообщения [4–5].

В шаблоне «издатель-подписчик» подписчики получают подмножество всего множества публикуемых сообщений. Процесс отбора сообщений называют фильтрацией. Существуют две основные формы фильтрации: основанная на теме (топике) и основанная на содержанием.

В системе, основанной на содержимом, сообщения отправляются в специализированные логические каналы, именуемые топиками (тема канала). Все подписчики такого канала получают все сообщения, публикуемые в топик издателями.

Фильтрация сообщений, основанная на содержанием, предполагает, что сообщения маркируются атрибутами, которые определяют допустимость чтения сообщений теми или иными подписчиками. Ответственность за классификацию сообщений может брать на себя посредник (брокер) или же сам подписчик. В последнем случае осуществляется симуляция широкоэвещательной передачи данных.

Точка-точка – это шаблон взаимодействия, позволяющий передавать сообщения непосредственно между отправителем и получателем, который обеспечивает получение сообщений только одним приёмником (получателем). Если множество получателей пытается обработать одно сообщение, то реализация канала гарантирует, что только один из них сможет это сделать. Таким образом, у получателей нет необходимости во взаимодействии друг с другом (рис. 2). Хотя канал управляет совокупностью подписчиков, только один получатель способен принять уникальное сообщение [6].

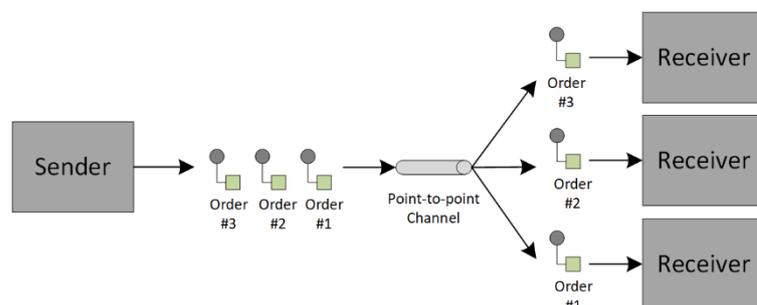


Рис. 2. Пример передачи сообщений в архитектуре точка-точка

В MAVLink потоки данных отправляются (публикуются) в определенные топики без гарантии доставки, однако существуют запросы, требующие гарантированной доставки (например, изменение конфигурации), что требует применения point-to-point канала с ретрансляцией. Структура сообщений задана в формате XML [7], где определяется набор сообщений (диалект), который поддерживается уникальной MAVLink системой. MAVLink использует XML-определение сообщений для генерации фрагментов кода, которые описывают формат обмена бинарными пакетами данных, выраженного на поддерживаемых языках программирования. Данные передаются в бинарном формате в виде последовательности сетевых пакетов, структура которого показана на рис. 3.

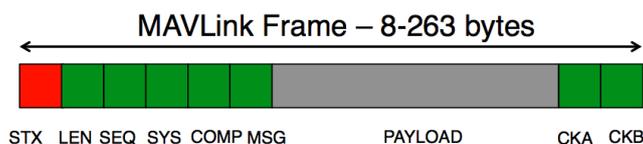


Рис. 3. Формат пакета MAVLink

Первый байт сетевого пакета (STX) – это символ начала сообщения. LEN – длина полезной нагрузки (сообщения). SEQ – содержит счётчик сетевого пакета (0–255), который выявляет потерю сообщения. SYS (System ID) – идентификатор отправляющей системы, а COMP (Component ID) – идентификатор отправляющего компонента. MSG (Message ID) – тип сообщения, от него зависит, какие данные будут лежать в полезной нагрузке сетевого пакета. PAYLOAD – полезная нагрузка пакета, сообщение, размером от 0 до 255 байт. Два последних байта пакета – CKA и CKB содержат контрольную сумму сетевого пакета.

В библиотеке MAVLink кодирование и декодирование сетевых пакетов производится согласно протоколу, но не регламентируется, какими аппаратными и программными средствами данные будут отправлены. Входные данные обрабатываются побайтово. Каждая система или компонент может одновременно обмениваться данными по разным источникам, тогда как для каждого источника назначается специальный идентификатор канала.

В области робототехники существует стандартизованное средство разработки Robot Operation System (ROS) [8]. Это набор инструментов для создания и взаимодействия узлов, а также методология разработки робототехнических систем. В качестве средства связи и передачи данных в ROS доступны следующие варианты: издатель-подписчик, сервис-ориентированный подход и взаимодействие через сервер параметров.

«Издатель-подписчик», описанный выше, используется как основной способ асинхронного взаимодействия узлов. Сервис-ориентированный подход предполагает взаимодействие в виде запрос-ответ и является синхронным. Сервер параметров — это разделяемый между узлами словарь переменных, который доступен через коммуникационную сеть. Обычно используется для хранения редко изменяемых данных, таких как конфигурационные параметры.

Глобальное использование сервис-ориентированного подхода приведет к уменьшению производительности отдельного узла из-за простоев процессора во время ожидания синхронного вызова. Сервис параметров также отличается низкой производительностью и рекомендован к использованию для конфигурации системы, а не для передачи данных в процессе обычной работы системы. Исходя из этого основным средством передачи данных в ROS является шаблон «издатель-подписчик».

Объектно-ориентированная парадигма описания распределенных систем. Описанные выше протоколы передачи данных реализуют взаимодействие модулей, связанных по сети через передачу и обработку полученных сообщений. Некоторые архитектурные решения упрощают разработку таких модулей, но не исключают наличия «синтаксического разрыва» программы, который устраняется протоколом передачи данных. В случае, когда модули являются частями программы, работающей на одном вычислительном устройстве, то данные могут передаваться через память. Стандартными средствами языков программирования для подобного взаимодействия является передача данных в процедуру, функцию или объект. Одним из возможных способов осуществления подобного взаимодействия в рамках сетевого программирования может стать вызов функций или процедур в адресном пространстве иного процесса. Такой класс технологий называют удаленным вызовом процедур (RPC от английского Remote Procedure Call) [9].

В языках объектно-ориентированного программирования (ООП) [10] объектная декомпозиция задачи является описанием предметной области. Если же отдельные классы предполагают исполнение на разных узлах распределенной системы, то в классическом случае это приводит к разрыву объектной декомпозиции. Иной подход предполагает наличие подмножества удалённых (remote) объектов, обладающих возможностью удаленного вызова методов (RMI от английского remote method invocation). При этом не нарушается декомпозиция объектов (рис. 4).

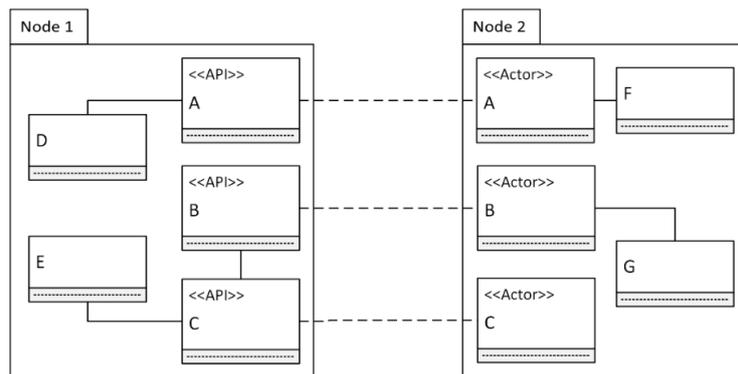


Рис. 4. Пример работы комплементарных объектов

Такие удалённые объекты будем называть «комплементарными», потому что состоят из двух частей, расположенных на разных узлах распределенной сети. Первая часть является программным интерфейсом (API) и отвечает за жизненный

цикл всего комплементарного объекта (его создание и удаление), а также, за вызов удаленных методов. Вторая – функциональная часть (Actor) – реализация объекта, отвечающая за исполнение вызванного на стороне программного интерфейса функционала [11]. Взаимодействие этих объектов обеспечивается путем передачи управляющей информации в виде последовательности команд псевдоассемблерного кода (байт-код). Управляющие данные интерпретируются языковой виртуальной машиной [12], находящейся на каждом узле распределенной системы. В качестве примера реализации может быть использована, в частности, технология «активных данных», основанная на инкапсуляции исполнимого кода в передаваемые сетевые пакеты [13].

Несмотря на некоторые особенности функционирования комплементарных объектов [14] данный подход позволяет использовать их как обычные объекты, скрывая от пользователя факт нахождения объекта в ином адресном пространстве удаленного узла. Это позволяет разрабатывать распределенную систему как единую программу, концентрируясь на реализации логики. В таком случае мы переходим от концепции распределенной системы как реализации отдельных модулей к концепции единой распределенной программы без «синтаксического разрыва».

Распределенная виртуальная машина (РВМ). Программа в объектно-ориентированной методологии представляет собой представление совокупности связанных между собой объектов. Когда мы разрабатываем распределенную систему как единую сетевую программу, то её объекты находятся на разных узлах сети. Обеспечение их взаимосвязи реализуется транспортным слоем сетевого взаимодействия и функциями виртуальной машины.

Уровень виртуальной машины занимается сбором управляющей информации и её интерпретацией. Он состоит из собственно виртуальной машины и слоя интерпретации-ассемблера байт-кода комплементарных объектов. Виртуальная машина хранит комплементарные объекты в таблице объектов и обеспечивает имплементацию команд вставки, удаления и извлечения комплементарных объектов в таблице объектов. Также виртуальная машина интерпретирует набор команд для работы с аргументами, переданными в метод или конструктор объекта. Слой интерпретации-ассемблера – это пара, обеспечивающая взаимодействие комплементарного объекта в сети. Ассемблер собирает байт-код, а интерпретатор исполняет байт-код, собранный на противоположной стороне. Интерпретатор и ассемблер находятся как на стороне программного интерфейса, так и на стороне функционального объекта (Actor).

Рассмотрим алгоритм вызова метода удаленного объекта:

1. Ассемблер программного интерфейса формирует байт-код, помещая в информационный пакет данные о идентификаторе объекта, идентификаторе метода объекта и упаковывает параметры в сообщение (parameter marshaling).

2. Виртуальная машина на стороне API определяет наличие сформированного пакета и отправляет его по нужному каналу связи.

3. Принятый на удаленной стороне информационный пакет обрабатывает виртуальная машина, которая по идентификатору объекта извлекает созданный ранее объект из таблицы и передает необходимую информацию интерпретатору функционального объекта.

4. Интерпретатор функционального объекта по идентификатору метода определяет вызываемый метод и после извлечения аргументов метода (demarshaling) вызывает метод функционального объекта.

Алгоритм отправки и обработки результата вызванного удаленного метода осуществляется по схожей схеме:

1. Функциональный объект формирует байт-код с информацией об идентификаторе объекта и методе, помещая результат в пакет данных.

2. После определения наличия сформированного пакета виртуальная машина отправляет байт-код по каналу связи.

3. После приема данных на стороне API виртуальная машина извлекает объект из таблицы объектов и передает информацию о методе и его результате в интерпретатор объекта.

4. По идентификатору метода при помощи интерпретатора объекта API определяется метод, по которому пришел результат.

5. Вызывается функция обратного вызова с результатом в качестве аргумента.

Здесь важно отметить, что функция обратного вызова определяется в момент вызова удаленного метода. Связь результата с функцией обратного вызова осуществляется при помощи событийно-ориентированной архитектуры. Событие, которым является получение результата удаленного метода, помещается в очередь обработки событий и будет обработано функцией обратного вызова в порядке очереди. Преимуществом такой обработки результата по сравнению с аналогичными [15, 16] является то, что она асинхронна и не имеет блокирующих функций.

Транспортный слой. В задачу транспортного слоя входит передача байт-кода между узлами. JVM не ограничивает разработчика в выборе протокола передачи данных, хотя накладывает ряд требований к нему. Во-первых, протокол передачи должен гарантировать последовательность приёма отправленных данных. Если байт-код придёт не в той последовательности, то поведение системы будет неопределенно и ошибочно. Во-вторых, он должен обеспечивать целостность данных, то есть данные не должны быть изменены в процессе передачи. В-третьих, протокол передачи данных должен уметь обнаружить разрывы соединения узлов в сети.

Также транспортный слой обеспечивает маршрутизацию передаваемого байт-кода. На рис. 5 показан пример объектной декомпозиции, объекты которой находятся на трёх разных узлах. Первый и второй узлы связаны с третьим, но прямое соединение между первым и вторым отсутствует. Классы на узлах 2 и 3 являются комплементарными и удаленно управляются пользовательским классом 3. Вызов метода «doSmtH» влечёт за собой вызов удаленного метода «foo» класса 2, в аргументы которого передаётся API объект класса 1. В таком случае, сформированный на стороне узла 3 байт-код будет передан узлу 2, который инициирует вызов метода «foo». Виртуальная машина узла 2 – API объект класса 1 (аргумент метода «foo») создается виртуальной машиной этого узла. При этом возникает проблема: каким образом в отсутствие прямого соединения между узлами 1 и 2 обеспечить удаленный вызов метода «bar»? Эта проблема может решаться двумя способами.

Первый способ предполагает передачу байт-кода через узел 3, имеющий соединение с узлом 1. В этом случае узел 3 выступает как прокси между узлом 1 и 2. Второе решение заключается в создании прямого соединения между узлами 1 и 2.

И первое, и второе решение реализуется при помощи передачи управляющей информации (байт-кода), которая инициирует создание API объекта первого или второго типа и определяет необходимость создания нового соединения. Иными словами, JVM подготавливает узел 2 в соответствии с настройками, указанными пользователем. В рамках примера, узел 3 формирует байт-код, который подготавливает виртуальную машину узла 2 и создает такой объект API класса, который во время удаленного вызова знает, как отправлять данные. Такой процесс называют связыванием объектов (binding).

Описанное взаимодействие порождает такую ситуацию, при которой с одним функциональным объектом связаны сразу два объекта программного интерфейса. Такой функциональный объект называется разделяемым и не удалится до тех пор,

пока существует хотя бы одна привязка. При удалении API объекта на узле 3 функциональный объект класса 1 не удалится, так как с ним связан API, находящийся на узле 2.

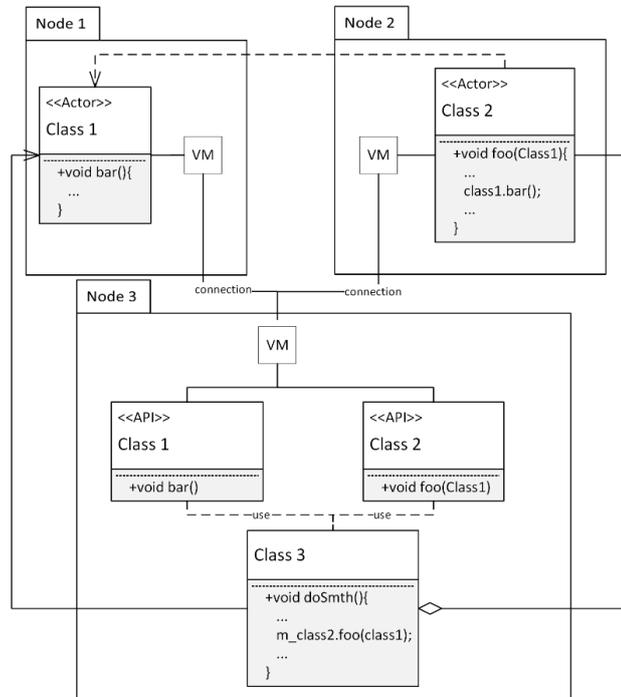


Рис. 5. Объектная декомпозиция, распределённая на трёх разных узлах

Модульность. Для обеспечения принципа модульности можно использовать систему взаимодействующих программных пакетов (по аналогии с ROS [8]). Все модули, которые предполагают работу на отдельном узле должны реализовываться внутри отдельного программного пакета, определяя необходимую логику посредством определения как локальных (обычных), так и комплементарных объектов. Любой другой пакет может использовать сгенерированные системой интерфейсные объекты этого пакета для управления удаленным объектом. Объекты можно представлять как библиотеки, дающие возможность удаленного взаимодействия с ними.

Протокол взаимодействия распределенных объектов обладает гибкостью с точки зрения повторного использования кода. Так, например, код для работы с одними и теми же датчиками, сервоприводами, моторами может быть использован в различных продуктах. Например, датчик давления может быть использован на производственном оборудовании, в быту, в системах интернета вещей и прочих автоматизированных системах. Специфика использования такого датчика в каждой из сфер порождает проблему однотипного кода, который отличается деталями, но не общими принципами. Эта проблема может быть частично решена путем реализации специфических особенностей на удаленном по отношению к датчику узлу. Код управления для самого датчика инкапсулируется в объект или объекты, удалённое использование которых обеспечивает возможность дистанционного программирования или реконфигурирования (перепрограммирования), если это необходимо для задачи. Таким образом, вместе с подключением самого датчика к

контроллеру устанавливается объект или набор объектов, обеспечивающий дистанционное управление этим датчиком. Такой подход позволяет решать задачи программирования в парадигме ООП используя модели объектов реального мира.

Реализация управляющего протокола поверх MAVLink. Вполне естественно, что технология PBM может работать поверх стека существующих сетевых протоколов. Например, она может работать на прикладном уровне модели OSI или модели DOD [17, 18]. Предположим, что удаленное объектное взаимодействие можно реализовать поверх протокола MAVLink. Управляющие данные, относящиеся к объектному протоколу, должны помещаться в секцию полезной нагрузки пакетов этого протокола и передаваться через каналы шаблона издатель-подписчик. Каждый узел подписывается на канал Input для приема управляющей информации, а для отправки результата или события возникающего на узле публикует пакеты в канал Output. В случае, когда множество узлов вызывают удаленный метод, то при публикации результата в канал Output возникает неопределенность адресата этого результата. В такой модели каждый подписчик получит результат, но не имеет возможности определить его адресата (рис. 6). В этом случае приходится искусственно вводить избыточную информацию об адресате как при вызове, так и при возврате результата удаленного метода, что не требуется при point-to-point соединении. В другом варианте предполагается создание топиков Input и Output для каждой пары узлов, что является организацией point-to-point соединения и нецелесообразно, так как шаблон издатель-подписчик создавался как альтернатива шаблону точка-точка.

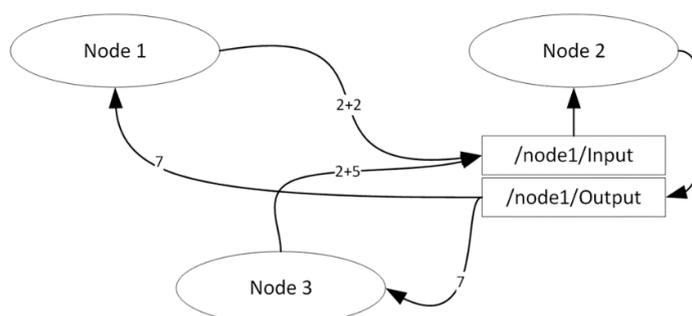


Рис. 6. Проблема определения адресата для взаимодействия комплементарных объектов

Протокол объектного взаимодействия может быть реализован поверх более простых протоколов, имея возможность определять структуру сетевого взаимодействия. К сожалению, какая-то одна архитектура не может являться универсальным решением для всего множества задач. Взаимодействие сервера с множеством клиентов предполагает наличие пула соединений, где виртуальная машина каждого соединения должна быть изолирована от другой для устранения возможных конфликтов или попыток взлома. Такой сценарий обычно используется для реализации однотипных терминалов [19], отличающихся наполнением, но не сутью. Другое взаимодействие может предполагать наличие одной виртуальной машины на несколько соединений. Подобное взаимодействие нарушает изолированность, но позволяет использовать комплементарные объекты в едином пространстве независимо от того, где именно эти объекты были созданы.

Использование PBM в робототехнике. В мире современных встраиваемых и робототехнических систем можно отметить общую проблему нехватки вычислительной мощности, ограниченной возможностями текущего уровня развития эле-

ментной базы. Даже для реализации логики согласованного взаимодействия подсистем робота для решения задач движения требуются значительные вычислительные ресурсы. Чем сложнее требования к движениям робота, тем сложнее алгоритмы и структура согласования двигательных подсистем. Кроме того, дополнительные вычислительные мощности необходимы для задачи анализа сцен и принятия решений для обеспечения автономного поведения, решения целевой задачи робота. Очевидно, что система с одним (даже очень мощным в текущий момент времени) вычислительным модулем не сможет обеспечить необходимый уровень вычислительной мощности. Таким образом, понимая ограничение текущего уровня технологического развития, необходимо поставить вопрос о решении задач создания робототехнических систем как совокупности распределенных, атомарных взаимодействующих подсистем, использующих отдельные вычислительные ядра. Таким образом, разделив логику отдельных подсистем и обеспечив их структурное и многоуровневое взаимодействие, можно преодолеть существующие ограничения элементной базы.

В такой архитектуре отдельный робот может быть представлен совокупностью отдельных подсистем, взаимодействующих по сети передачи данных. Отдельные подсистемы будут структурироваться в отдельные иерархические контуры, состоящие из атомарных групп вычислительных узлов, контроллеров и датчиков.

Сложность поведения таких систем требует другой логики описания алгоритмов поведения и отдельных подсистем, и отдельных контуров, и всего организма как единое целое.

Решить вопросы согласованного программирования разных подсистем и взаимодействующих контуров можно с использованием технологий и подходов РВМ.

Описанные проблемы ограниченности вычислительных возможностей куда более глубоки даже чем показано выше. Следует признать, что на практике даже решить задачи движения, которые должны быть реализованы «на борту» робота часто невозможно с достаточным уровнем сложности, что делает безальтернативной необходимость вынесения центров принятия решений на внешние вычислительные платформы, расположенные в стационарных центрах, не ограниченных энергоресурсами, процессорными объёмами и объёмами памяти.

Заключение. В работе предложен комплекс решений для взаимодействия робототехнических средств в распределенной системе. Впервые предложено использование инфраструктуры распределенной виртуальной машины для организации сетевого взаимодействия между территориально-распределенными физическими устройствами. В отличие от построения коммуникационного пространства с использованием взаимодействий типа «точка-точка» разработчик получает инструмент с новым уровнем абстракции, повышающий гибкость управления устройствами путем передачи управляющего кода.

Рассмотрено применение распределенной виртуальной машины и методология использования комплементарных объектов в качестве платформы взаимодействия группы робототехнических средств. Предложено расширение протокола MAVLink для устранения его основных недостатков.

Управление БЛА, основанное на протоколе MAVLink осуществляется через непрерывную передачу информации. Так в MAVLink для достижения БЛА заданной координаты и поддержания его в этой точке необходимо с определенной частотой отправлять пакет данных с этой координатой, а для определения достижимости БЛА заданной точки постоянно получать текущее местоположение и сравнивать его с заданным значением. В связи с этим в канале связи регулярно происходит передача одного и того же пакета. Такой подход сложно назвать рациональ-

ным с точки зрения экономии ресурса канала связи, хотя он может являться полезным для своевременного обнаружения разрыва соединения, если бы MAVLink не обязывал разработчиков реализовывать в своих системах передачу heartbeat сообщений, которые являются системными и разработаны для этой цели. Намного рациональней отправить координату единожды и асинхронно получить информацию о ее достижении БЛА.

Использование шаблона издатель-подписчик предполагает отправку данных вне зависимости от того нужны ли ему эти данные в текущий момент или нет. Из-за этого возникает проблема перерасхода не только ресурса канала связи, но и ресурса источника питания. Также постоянная публикация телеметрии в канал связи увеличивает загруженность внешнего канала связи или повышает риск обнаружения БЛА.

Групповое взаимодействие БЛА можно рассматривать как множество взаимодействующих самостоятельных программных модулей [20], следуя внутренней логике, но в совокупности подчиняющихся единым алгоритмам, определяющим структуру поведения всей системы как единого целого. В подходах к разработке распределенных систем существует тенденция разбиения большой системы на изолированные подсистемы. Такая тенденция наблюдается и в подходах MAVLink и ROS. Но возрастающее число взаимодействующих элементов, образующих единое логическое и поведенческое целое, неминуемо ведет к росту сложности управления и программирования. В данной ситуации становится сложно рассматривать программирование множества отдельных подсистем изолированно. Встаёт вопрос о единой точке структурной и программной разработки распределенной сетевой системы как совокупности взаимодействующих модулей.

Таким способом программирования может стать подход, рассматривающий многоуровневую иерархию взаимодействующих подсистем как единый, доступный для разработчика набор объектов, независимо существующих на множестве различных автономных устройств в рамках виртуальных языковых машин, взаимодействующих по сети. Такой набор объектов позволит разработчику представлять логику сколь угодно сложной распределенной системы как единое целое, описывая поведение отдельных подсистем как единый программно-аппаратный комплекс, абстрагируя программистов высокого уровня от низкоуровневых процессов и давая возможность оперировать абстракциями требуемого уровня в традиционной объектно-ориентированной парадигме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dronocode foundation. – Свободный режим доступа: <https://mavlink.io/en/> (дата обращения: 17.01.2021).
2. *Hohpe, G. and Woolf, B.* Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions. – Pearson Education, 2012. – P. 106. – ISBN 9780133065107.
3. *Matthew O'Riordan* Everything You Need To Know About Publish/Subscribe. – Свободный режим доступа: <https://www.ably.io/topic/pub-sub> (дата обращения: 09.02.2021).
4. *Robert Nystrom* Game Programming Patterns. – Genever Benning. – November 2014. – P. 354.
5. *Stevens R.W.* UNIX Network Programming – Interprocess Communication // Englewood Cliffs. Prentice Hall. – 2nd ed. – 1999, August. – 400 p.
6. *Pethuru Raj, Anupama Raman, Harihara Subramanian.* Architectural Patterns // Packt. – 2017, December. – P. 468.
7. Extensible Markup Language (XML). – Свободный режим доступа: <https://www.w3.org/XML/> <https://www.ably.io/topic/pub-sub> (дата обращения: 10.02.2021).
8. ROS Documentation. – Свободный режим доступа: <http://wiki.ros.org/>.
9. *Таненбаум Э., ван Стеен М.* Распределённые системы (принципы и парадигмы). – СПб.: Питер, 2003. – 880 с.

10. Буч Г., Максимчук Р.А., Энгл М.У., Янг Б.Дж., Коаллен Д., Хьюстон К.А. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2010. – 720 с.
11. Шальнев И.О. Подход к построению распределенной виртуальной машины на основе объектно-ориентированного программирования // Известия Тульского государственного университета. – 2020. – № 9. – С. 40-47.
12. Wei Chen, Weixia Wu, Zhiying Wang, Qiang Zhao A Formalization of An Emulation based Co-Designed Virtual Machine // Fifth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. – 2011. – P. 164-168.
13. Alexandrov V.V., Kuleshov S.V. and Zaytseva A.A. Active Data in Digital Software Defined Systems Based on SEMS Structures // Logical Analysis of Data and Knowledge with Uncertainties in SEMS – A.E. Gorodetskiy (ed.), Smart Electromechanical Systems, Studies in Systems, Decision and Control. – 2016. – Vol. 49. – P. 61-69.
14. Шальнев И.О. Особенности работы с комплементарными объектами в распределенной виртуальной среде // Матер. конференции «Информационные технологии в управлении». – 2020. – С. 224-226.
15. Henning M., Vinoski S. Advanced CORBA Programming with C++ // Addison-Wesley Professional; 1st edition. – 1999, February. – P. 560.
16. Grosso W. Java RMI // O'Reilly Media, Inc. – 2001, October. – P. 576.
17. Таненбаум Э. Компьютерные сети. – СПб.: Питер, 2020. – 992 с.
18. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2002. – 672 с.
19. Шальнев И.О., Аксенов А.Ю. Генерация пользовательского интерфейса на основе технологии распределенной виртуальной среды // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. – Т. 17, № 5. – С. 44-50. – Doi: 10.18127/j20700814-201905-06.
20. Kuleshov S.V., Zaytseva A., Akseonov A.Y. The conceptual view of unmanned aerial vehicle implementation as a mobile communication node of active data transmission network // International Journal of Intelligent Unmanned Systems. – Vol. 6, Issue 4. – P. 174-183. – Doi: 10.1108/IJUS-04-2018-0010.

REFERENCES

1. Dronecode foundation. Available at: <https://mavlink.io/en/> (accessed 17 January 2021).
2. Hohpe, G. and Woolf, B. Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions. Pearson Education, 2012, pp. 106. ISBN 9780133065107.
3. Matthew O'Riordan Everything You Need To Know About Publish/Subscribe. Available at: <https://www.ably.io/topic/pub-sub> (accessed 09 February 2021).
4. Robert Nystrom Game Programming Patterns. Geneva Benning. November 2014, pp. 354.
5. Stevens R.W. UNIX Network Programming – Interprocess Communication, *Englewood Cliffs*. Prentice Hall. 2nd ed., 1999, August, 400 p.
6. Pethuru Raj, Anupama Raman, Harihara Subramanian. Architectural Patterns, *Packt*, 2017, December, pp. 468.
7. Extensible Markup Language (XML). Available at: <https://www.w3.org/XML/> <https://www.ably.io/topic/pub-sub> (accessed 10 February 2021).
8. ROS Documentation. Available at: <http://wiki.ros.org/>.
9. Tanenbaum E., van Steen M. Распределенные системы (printsipy i paradigmy) [Distributed systems (principles and paradigms)]. Saint Petersburg: Piter, 2003, 880 p.
10. Buch G., Maksimchuk R.A., Engl M.U., Yang B.Dzh., Konallen D., Kh'yuston K.A. Ob"ektno-orientirovanny analiz i proektirovanie s primerami prilozheniy [Object-oriented analysis and design with examples of applications]. 3rd ed. Moscow: Vil'yams, 2010, 720 p.
11. Shal'nev I.O. Podkhod k postroeniyu raspredelennoy virtual'noy mashiny na osnove ob"ektno-orientirovannogo programmirovaniya [An approach to building a distributed virtual machine based on object-oriented programming], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Tula State University], 2020, No. 9, pp. 40-47.
12. Wei Chen, Weixia Wu, Zhiying Wang, Qiang Zhao A Formalization of An Emulation based Co-Designed Virtual Machine, *Fifth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, 2011, pp. 164-168.

13. *Alexandrov V.V., Kuleshov S.V. and Zaytseva A.A.* Active Data in Digital Software Defined Systems Based on SEMS Structures, *Logical Analysis of Data and Knowledge with Uncertainties in SEMS – A.E. Gorodetskiy (ed.), Smart Electromechanical Systems, Studies in Systems, Decision and Control*, 2016, Vol. 49, pp. 61-69.
14. Shal'nev I.O. Osobennosti raboty s komplementarnymi ob"ektami v raspredelennoy virtual'noy srede [Features of working with complementary objects in a distributed virtual environment], *Mater. konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v upravlenii»* [Materials of the conference "Information Technologies in Management"], 2020, pp. 224-226.
15. *Henning M., Vinoski S.* Advanced CORBA Programming with C++, *Addison-Wesley Professional; 1st edition*, 1999, February, pp. 560.
16. *Grosso W.* Java RMI, *O'Reilly Media, Inc.*, 2001, October, pp. 576.
17. *Tanenbaum E.* Komp'yuternye seti [Computer networks]. Saint Petersburg: Piter, 2020, 992 p.
18. *Olifer V.G., Olifer N.A.* Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, and protocols]. Saint Petersburg: Piter, 2002, 672 p.
19. *Shal'nev I.O., Aksenov A.Yu.* Generatsiya pol'zovatel'skogo interfeysa na osnove tekhnologii raspredelennoy virtual'noy srede [Generation of the user interface based on the distributed virtual environment technology], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2019, Vol. 17, No. 5, pp. 44-50. Doi: 10.18127/j20700814-201905-06.
20. *Kuleshov S.V., Zaytseva A., Aksenov A.Y.* The conceptual view of unmanned aerial vehicle implementation as a mobile communication node of active data transmission network, *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, Vol. 6, Issue 4, pp. 174-183. Doi: 10.1108/IJUS-04-2018-0010.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.С. Лебедев.

Шальнев Илья Олегович – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»; e-mail: shalnev.i@iias.spb.su; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79111756194; аспирант; м.н.с.

Shalnev Ilya Olegovich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; e-mail: shalnev.i@iias.spb.su; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79111756194; postgraduate student; junior researcher.

Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-138-149

О.В. Кофнов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов, П.М. Трефилов

СПЕЦИАЛЬНОЕ МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ПОВЕДЕНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Рассматривается проактивное управление групповым поведением робототехнических средств на основе поведенческих моделей, где интеллект формируется как результат поведения множества физических сущностей. Исследуемый комплекс представляет собой множество распределенных агентов, функционирующих в реальном масштабе времени в среде с возмущающими воздействиями. Для рассматриваемого сетевого объекта используется модель взаимодействия Дж. Бойда, описывающая цикл работы системы управления этого объекта. Исходными данными для решения поставленной задачи управления являются горизонт планирования, сценарий действия группы, множество агентов с сопоставленным им набором элементарных действий, множество предметно ориентированных ограничений на использование сценария и показатель качества решения задачи управления. Требуется осуществить распределение агентов в пространстве и во времени на множестве действий сценария с учетом всех возможных ограничений. Разработанная технология позволяет опережать возможные сценарии реализации возмущающих воздействий. Используется методология комплексного предсказательного моделирования процессов проактивного управления и координации поведения самоорганизующейся группы роботов, где в качестве базовых моделей используются новые логико-динамические модели. Одним из основных достоинств разработанных комбинированных моделей, методов, алгоритмов и программ является обеспечение на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации корректного согласования аналитико-имитационных моделей управления структурной динамикой сложных динамических объектов с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе интеллектуальных информационно-технологий. Также разработан специализированный язык описания и исследования как задач моделирования, планирования, проактивного мониторинга и управления указанными объектами, так и задач диалогового взаимодействия, планирования вычислений, обработки данных и знаний. Основное отличие и достоинство предложенного подхода состоит в том, что задачи моделирования, планирования и управления конфигурацией и реконфигурацией робототехнических средств решаются не изолированно, а интегрировано в рамках общей проблемы проактивного управления структурной динамикой.

Робототехнические средства; проактивное управление; цикл Бойда; групповое поведение; логико-динамическая модель; Behavior-Based Systems.

O.V. Kofnov, S.A. Potriasaev, B.V. Sokolov, P.M. Trefilov

SPECIAL MODELS, ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR PROACTIVE GROUP BEHAVIOR CONTROL OF ROBOTS

The paper describes the proactive control of robots group behavior using Behavior-Based System models, where the intellect is formed by a physical entities behavior. The observed complex is an array of distributed agents functioning in real time under disturbances. John Boyd's OODA loop model is used to describe the control system work cycle of such network object. The input data of the control task are a planning horizon, a group action scenario, an array of agents and their possible elementary operations, a set of scenarios using restrictions and a quality indicator of the control

problem solution. The output data is the distribution plan of agents in space and time to realize the scenario under restrictions. The developed technology predicts the environmental disturbances. The complex predictive modeling methodology for a self-organized robots group control is used with logical-dynamic models. One of the key advantages of developed combined models, methods, algorithms and software is the possibility to coordinate analytical and simulation control models of complex dynamic objects and their logical-algebraic analogs and models based on intelligent information technology. This coordination is on the conceptual, model-algorithmic, information and software detailing levels. The special language for modeling, planning, proactive monitoring and control task description is also developed. This language can be used for dialog interaction, calculation planning and data mining too. The proposed method main advantage is the non-isolated, but integrated solving of robotics configuration (reconfiguration) modeling, planning and management with the structural dynamics proactive control common problem solution.

Robots; proactive control; OODA loop; group behavior; logical-dynamic model; Behavior-Based Systems.

Введение. В основу созданного комплекса моделей, алгоритмов и прототипа программного обеспечения проактивного управления групповым поведением робототехнических средств (РТС) положены идеи и концепции, разработанные при создании и использовании систем, получивших, в свое время название систем, основанных на поведении (англ. Behavior-Based Systems, BBS) [1]. Соответствующие модели называются иногда для краткости поведенческими моделями. В указанных системах интеллект формируется как результат индивидуального поведения множества физических сущностей (в нашем случае РТС) и/или виртуальных сущностей (например, программных агентов в динамической среде) и их взаимодействия.

В работе [1], в связи с этим указывалось: «В отличие от своих предшественников (интеллектуальных агентов без модели рассуждений – агентов с реактивной структурой) BBS-системы, во-первых, рассматривают не отдельные шаги поведения в виде реакции на входную информацию, а паттерны поведения (многошаговые действия) и, во-вторых, они при формализации с помощью модели конечного автомата используют внутреннее состояние для учета предыстории. Поэтому при формировании стратегии поведения они обладают способностью планировать, обучаться и рассуждать». При этом главной особенностью исследуемых комплекса РТС является то, что они представляют сеть распределенных агентов (каждого отдельного РТС), функционирующих в реальном масштабе времени в среде с возмущающими воздействиями (в возмущающей среде).

Для рассматриваемого сетевого объекта все управленческие процессы привязаны к реальному времени и временные аспекты работы системы имеют решающее значение. В этой связи было предложено для указанных ситуаций использовать модель взаимодействия систем, предложенную Дж. Бойдом (J. Boyd) [1], в которой взаимодействующие системы имеют стандартный замкнутый цикл функционирования, состоящий из четырех фаз, а именно наблюдение, ориентация, решение, действие. Следует отметить, что данная технология была уже предложена ранее в 1984 г в работах наших отечественных ученых [2–5] применительно к проблематике управления гибкими автоматизированными производствами. На рисунке 1 эти фазы названы восприятие, оценка и прогноз ситуации, принятие решения, реализация решения (действий), соответственно. Из анализа рис. 1 следует, что каждый объект (в нашем случае РТС) должен иметь свою модель и средства отслеживания действий других РТС, которые позволяют им прогнозировать фазы цикла Бойда для каждого из РТС, выполнять прогнозирование своего поведения и поведения других РТС, оценивать ситуацию с позиций достижимости собственных целей в контексте построенного прогноза (в рамках собственного цикла Бойда) и далее вырабатывать (корректировать) собственное решение и исполнять его. Описанный цикл работы системы управления сетевого объекта задаёт схему (мета модель) управления в реальном времени.

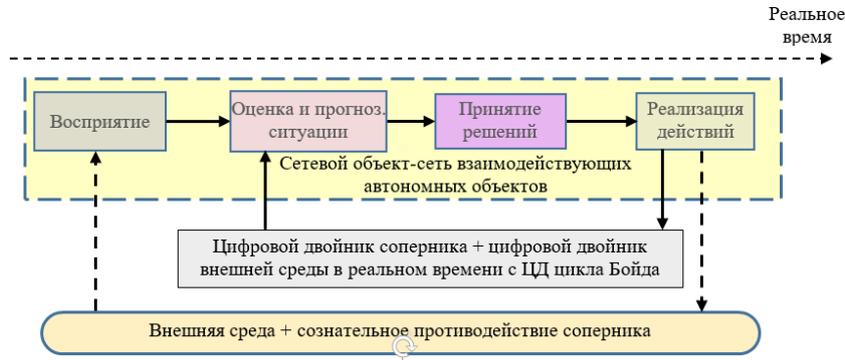


Рис. 1. Цикл Бойда в системе управления реального времени с цифровым двойником внешней среды

Постановка задачи. Следуя работе [1], содержательную постановку координации поведения группы РТС можно описать следующим образом.

Дано:

1) Горизонт планирования $[T_0, T_k]$, где T_0 и T_k – (календарное) время начала и окончания исполнения группового сценария поведения, причём значение T_k может задавать самое позднее допустимое время окончания выполнения сценария групповой работы РТС или в постановке задачи данное время может быть не задано.

2) Сценарий действий группы РТС, т.е. частично-упорядоченное множество действий X , которое должно быть выполнено на заданном временном горизонте для достижения поставленной цели. Сами возможные сценарии поведения группы РТС, задаются с помощью соответствующих динамических смешанных ограничений в рамках разработанных логико-динамических моделей (рис. 2).

3) Множество РТС, каждому из которых поставлен в соответствие список элементарных действий сценария (элементарные (неделимые) операции), которые он способен выполнять и интервалы времени доступности объекта.

4) Множество специфических предметно ориентированных ограничений на использование РТС на множестве действий сценария (например, по техническому состоянию, по погодным условиям и т.п.).

5) Показатель качества решения задачи планирования (коррекции плана, перепланирования) $F(P(X, D([T_0, T_k])))$, где $P(X, D([T_0, T_k]))$ – скоординированное в пространстве и во времени распределение множества РТС $D([T_0, T_k]) = \{D_j([T_0, T_k])\}_{j=1}^M$ на горизонте планирования $[T_0, T_k]$ по множеству действий $X = \{X_i\}_{i=1}^N$ сценария.

Требуется осуществить распределение $P(X, D([T_0, T_k]))$ РТС в пространстве и во времени на множестве действий сценария, с учётом всех наложенных динамических ограничений, которое оптимизирует показатель качества управления F , связанных с сервисным обслуживанием судов гражданского авиации.

Данное распределение должно поддерживаться на программном уровне как на этапе планирования, так и на этапе оперативного управления (коррекции ранее составленных планов, перепланирования). На последней фазе цикла Бойда принятое решение (план) исполняется. Эта компонента задачи группового поведения РТС в значительной части является предметно зависимой и исполняется в реальном времени на основе разработанного специального модельно-алгоритмического и программного обеспечения.

При этом за счет предложенной ранее технологии проактивного управления РТС исполнение запланированных действий каждым РТС на каждой фазе должно по возможности опережать возможные реализации сценариев возмущающих воз-

действий [6–9]. Данное опережение базируется на разработанных к настоящему времени моделях, методах и алгоритмах комплексного предсказательного моделирования развивающейся ситуации, описывающей структурную динамику объектов в различных предметных областях [10–17].

Следуя работам [1–5] принятие решений в цикле Бойда для сетевого объекта рассматриваемого класса (группировки РТС) в начальный момент времени состоит, во-первых, в решении задачи формирования сценария достижения цели и, во-вторых, в решении задачи динамического распределения операций, входящих в сценарий на множестве РТС. Формально эти задачи хорошо известны из литературы как компоненты задачи планирования действий, и для её решения предложено достаточно много подходов, моделей и алгоритмов. Алгоритм опережающего планирования в реальном времени в контексте цикла Бойда предложен, например, в [1–5].

В отличие от работ [2–5], где в качестве формального аппарата описания и решения перечисленных выше задач предлагалось использовать атрибутивную формальную грамматику либо модели и алгоритмы, в основе которых лежит поиск на графах типа «и – или», в рамках разработанного нами подхода используется методология и технологии комплексного предсказательного моделирования процессов проактивного (упреждающего) управления и координации поведения самоорганизующейся группы РТС, где в качестве базовых моделей используются новые логико-динамические модели, представленные на рис. 2 [6, 7, 18–21]. На данном рисунке приняты следующие обозначения

M_g – логико-динамические модели управления движением РТС (пространственные ограничения);

M_k – логико-динамические модели управления каналами РТС;

M_o – логико-динамические модели управления операциями сервисного обслуживания судов гражданской авиации с использованием РТС;

M_n – логико-динамические модели управления потоками (материальными, энергетическими, информационными) в РТС;

M_p – логико-динамические модели управления ресурсами РТС;

M_c – логико-динамические модели управления параметрами операций;

M_s – логико-динамические модели управления структурной динамикой как РТС, так и группы (комплекса) РТС;

M_n – логико-динамические модели управления вспомогательными операциями.

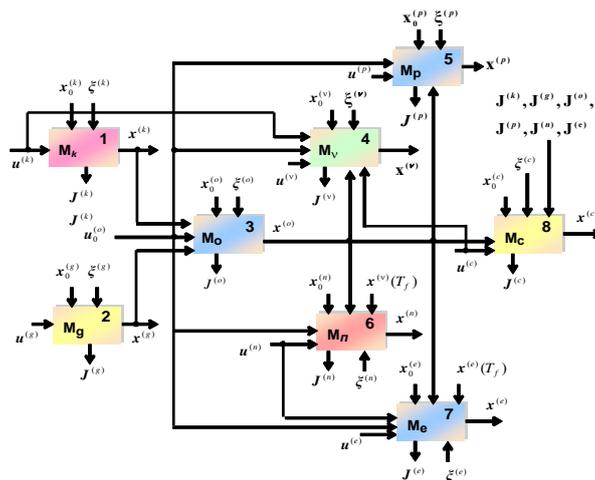


Рис. 2. Обобщенная структура полимодельного комплекса, описывающего функционирование РТС

Одно из основных достоинств разработанных комбинированных моделей, методов, алгоритмов и программ состоит в том, что они обеспечивают на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях детализации корректное согласование (в соответствии с критериями гомоморфизма отношений) математических (аналитико-имитационных) моделей управления структурной динамикой сложных динамических объектов (в нашем случае РТС) с их логико-алгебраическими и логико-лингвистическими аналогами (моделями), построенными на основе интеллектуальных информационных технологий. При этом в отличие от существующих поведенческих (сценарных) моделей РТС, базирующихся на конечно-автоматных и имитационных описаниях, предложенный логико-динамический подход позволяет на конструктивном уровне решать задачи оперативного структурно-функционального синтеза как облика РТС и систем управления (СУ) ими, так и соответствующих интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) мониторинга, прогнозирования и управления, а также синтеза сценариев их поведения. Для этого разработаны соответствующие комбинированные методы и алгоритмы, являющиеся новыми модификациями метода локальных сечений Болтянского В.Г., метода ветвей и границ, метода преобразований, метода основных осей Брента [22]. Другое достоинство предложенного варианта формализации управляемой структурной динамики РТС состоит в том, что на его основе разработан специализированный язык описания и исследования как задач моделирования, планирования (коррекции планов, перепланирования), проактивного мониторинга и управления указанными объектами, так и задач диалогового взаимодействия, планирования вычислений, обработки данных и знаний. На программном уровне реализации данный язык базируется на нотации BPMN (Business Process Modelling Notation) и языке BPEL (Business Process Execution Language) [23]. И, наконец, самое главное, предлагаемый новый математический аппарат управляемой структурной динамики РТС позволяет на данных объектах реализовать процессы целенаправленного выбора ими своей внутренней организации, что является проявлением основного свойства самоорганизующихся сложных технических объектов (СТО).

На рис. 3 и 4 представлены соответственно обобщенная и детальная структура разработанного программного комплекса проактивного управления групповым поведением комплекса РТС для организации процессов приема, передачи, обработки и хранения информации о состоянии объектов наблюдения при дистанционном зондировании заданного района Земли. В данном случае в качестве комплекса РТС рассматривалась группировка маломассоразмерных космических аппаратов (МКА) [21].

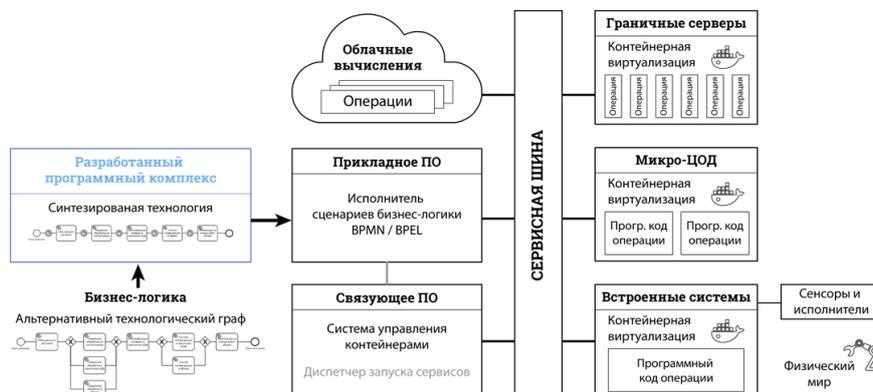


Рис. 3. Место разработанного программного комплекса в общей структуре модифицированной информационно-аналитической платформы

Пример решения задачи. Заданы технологические, топологические и функциональные структуры бортового комплекса управления (БКУ) и НКУ МКА ДЗЗ (для краткости дальнейшего изложения будем писать АСУ МКА), а также соответствующие пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с решением задач управления МКА ДЗЗ. На рис. 5 представлен пример графического задания технологии (функциональной структуры) сбора, обработки информации и формирования управляющих воздействий в АСУ МКА ДЗЗ. Каждому блоку на рисунке соответствует своя функция обработки информации и управления, а также соответствующий программный модуль.



Рис. 4. Структура разработанного программного комплекса проактивного управления групповым поведением комплекса РТС

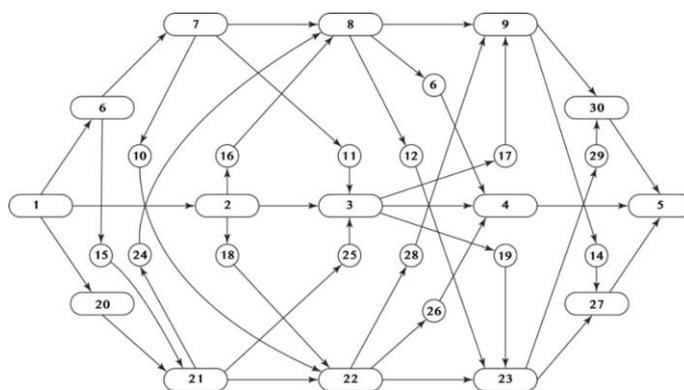


Рис. 5. Графическое описание обобщенной технологии решения задач сбора, обработки данных и формировании управляющих воздействий в АСУ МКА ДЗЗ

Применительно к перспективным системам сбора и обработки информации, создаваемым в настоящее время в отечественной космической отрасли на базе киберфизических систем (КФС) и облачных сервисов содержание перечисленных блоков представлено на рис. 6.

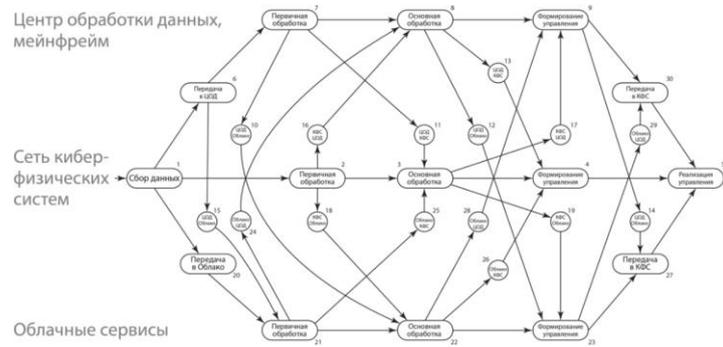


Рис. 6. Перечень и взаимосвязь выполняемых в АСУ МКА ДЗЗ функций обработки информации и управления, а также программных модулей, их реализующих на основе концепции КФС

Требуется найти наилучший вариант распределения функций обработки получаемых данных и управления, а также соответствующих программных модулей в АСУ МКА ДЗЗ. В данном случае мы рассматриваем не какие-то фиксированные варианты распределения данных функций, а все возможное множество указанных вариантов, предусмотренных в документации Главного конструктора МКА ДЗЗ. Другими словами, в данном случае должна быть решена, во-первых, задача многокритериального структурно-функционального синтеза технологии обработки получаемых данных и управления основными элементами и подсистемами АСУ МКА ДЗЗ, и, во-вторых, должен быть построен конкретный план работы бортовых систем МКА и средств НКУ МКА, реализующий данную технологию. В работах авторов данной статьи показано [6–9, 18–23] как с помощью разработанного полимодельного комплекса и комбинированных методов оптимизации удалось свести перечисленные прикладные задачи к задаче оптимального программного управления сложным динамическим объектом (АСУ МКА ДЗЗ), а ее, в свою очередь, к двухточечной краевой задаче.

На рис. 7–10 в графическом виде представлены (эвристические) и оптимальные планы распределения функций управления (программных модулей) для рассматриваемых сценариев изменения внешней обстановки. Из анализа результатов машинных экспериментов следует, что за счет оптимизации могут быть улучшены значения соответствующих показателей на 25–30 %.

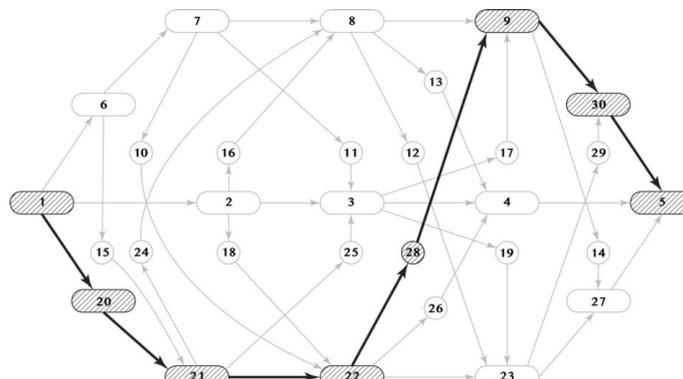


Рис. 7. Конфигурирование программных модулей по первому сценарию (эвристический план)

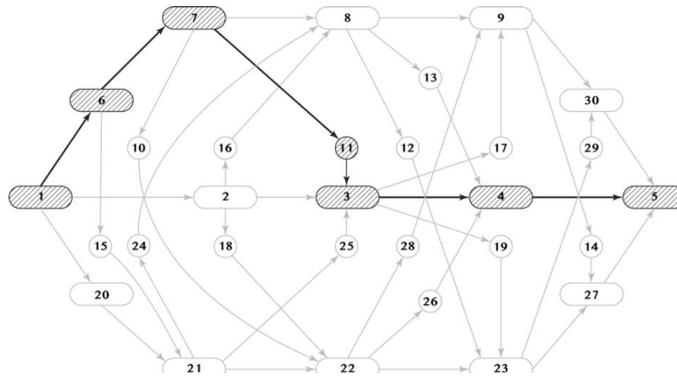


Рис. 8. Конфигурирование программных модулей по первому сценарию (оптимальный план)

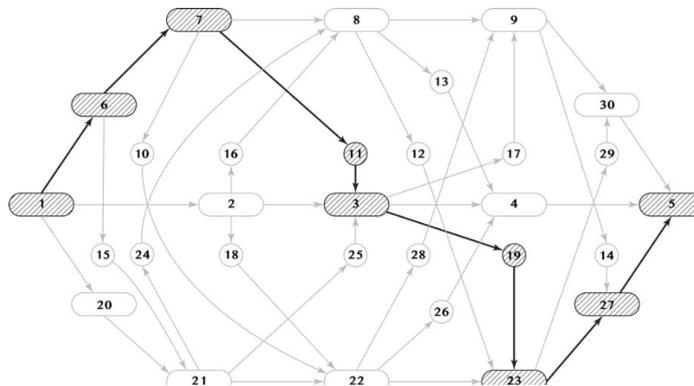


Рис. 9. Конфигурирование программных модулей по второму сценарию (эвристический план)

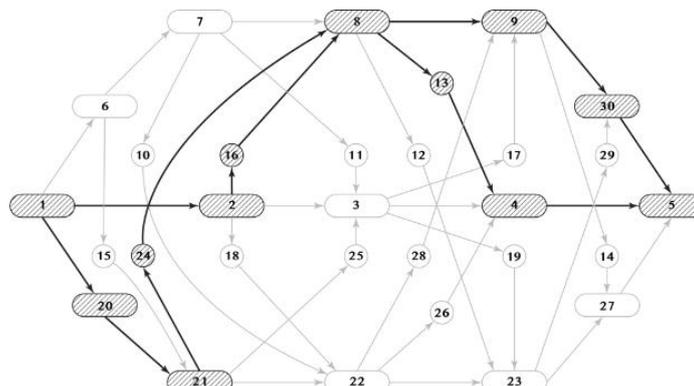


Рис. 10. Конфигурирование программных модулей по второму сценарию (оптимальный план)

Заключение. Основное отличие и достоинство предложенного подхода к оптимальному синтезу технологии и программ проактивного управления каждым РТС состоит в том, что задачи моделирования, планирования и управления конфигурацией и реконфигурацией РТС для повышения эффективности и устойчивости

функционирования в целом всего комплекса РТС решаются не изолировано, а интегрировано в рамках общей проблемы проактивного управления структурной динамикой РТС, что обеспечивает оперативность, обоснованность, полноту, замкнутость и непротиворечивость синтезируемых управленческих решений, базирующихся на фундаментальных и прикладных научных результатах, полученных к настоящему времени в междисциплинарной отрасли системных знаний.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-01046 А в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пантелеев М.Г.* Формальная модель опережающего интерактивного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени //XIV национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 октября 2014 г., Казань, Россия): Тр. конференции. В 3-т. Т. 1. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. – С. 323-333.
2. *Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В.* Базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и её расширения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2015. – № 5. – С. 102-121.
3. *Федунов Б.Е.* Интеллектуальные агенты в базах знаний бортовых оперативно-советующих экспертных системах типовых ситуаций функционирования антропоцентрического объекта // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 6. – С. 90-102.
4. *Федунов Б.Е.* Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов. – М.: Де`Либри, 2018. – 246 с.
5. *Городецкий В.И., Серебряков С.В., Троцкий Д.В.* Средства спецификации и инструментальной поддержки командного поведения автономных агентов // Известия ЮФУ. – 2011. – № 3. – С. 116-133.
6. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
7. *Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
8. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С.162-174.
9. *Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В.* Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 7-15.
10. *Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Швецова А.А.* О подходах к предсказательному моделированию сложных систем // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Экономика. Информатика». – 2018. – Т. 45, № 1. – С. 140-148.
11. *Кулешов А.П.* Когнитивные технологии в адаптивных моделях сложных объектов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2008. – Вып. 1. – С. 18-29.
12. *Кулешов А.П.* Технология быстрого вычисления характеристик сложных технических объектов // Информационные технологии. – 2006. – Вып. 3. – С. 4-11.
13. *Бернштейн А.В., Кулешов А.П.* Построение ортогональных нелинейных многообразий в задачах снижения размерности // Тр. VII Международной школы-семинара «Многомерный статистический анализ и эконометрика». Цахкадзор, 2008. – С. 25-27.
14. *Бернштейн А.В., Кулешов А.П.* Когнитивные технологии в проблеме снижения размерности описания геометрических объектов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2008. – № 2. – С. 6-19.
15. *Иванова Е.П., Чернова С.С.* Снижение размерности сложных геометрических объектов при наличии частных параметрических моделей // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 3. – С. 53-58.

16. Бухановский А.В., Ковальчук С.В., Марьин С.В. Интеллектуальные высокопроизводительные программные комплексы моделирования сложных систем: концепция, архитектура и примеры реализации // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 10. – С. 5-24.
17. Иванов С.В., Бухановский А.В. Анализ неопределенности предсказательного моделирования сложных систем: усвоение данных и ансамблевые технологии // Известия вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 12. – С. 66-68.
18. Павлов А.Н., Кулаков А.Ю., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 7. – С. 596-603.
19. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Multiple-model description of control processes for air-spacecrafts // Journal Computer System Science International. – 1996. – No. 6. – P. 192-199.
20. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects // Int. J. Differ. Equ. – 1985. – Vol. 21. – P. 502-506.
21. Научно-технический отчет (промежуточный) по теме “Разработка технологии и создание экспериментальных программных комплексов управления конфигурацией бортовых систем маломассогабаритных КА в интересах повышения их живучести” (шифр “Технология-СГ-3.3.3.1”). – СПб.: СПИИРАН, 2018. – 450 с.
22. Кокорин С.В., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Комбинированный метод планирования операций и распределения ресурсов системы управления активными подвижными объектами // Изв. высших учебных заведений. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 11. – С. 17-22.
23. Потрясаев С.А. Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN // Приборостроение. – 2016. – № 11. – С. 913-920.

REFERENCES

1. Pantelev M.G. Formal'naya model' operezhayushchego interaktivnogo planirovaniya deystviy intellektual'nykh agentov real'nogo vremeni [Formal model of advanced interactive planning of actions of intelligent real-time agents], *XIV natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2014 (24-27 oktyabrya 2014 g., Kazan', Rossiya): Tr. Konferentsii* [XIV National Conference on Artificial Intelligence with International participation CII-2014 (October 24-27, 2014, Kazan, Russia): Proceedings of the conference]. In 3 vol. Vol. 1. Kazan: Izd-vo RITS «Shkola», 2014, pp. 323-333.
2. Gorodetskiy V.I., Samoylov V.V., Trotskiy D.V. Bazovaya ontologiya kollektivnogo povedeniya avtonomnykh agentov i ee rasshireniya [Basic ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2015, No. 5, pp. 102-121.
3. Fedunov B.E. Intellektual'nye agenty v bazakh znaniy bortovykh operativno-sovetuyushchikh ekspertnykh sistemakh tipovykh situatsiy funktsionirovaniya antropotsentricheskogo ob"ekta [Intelligent agents in the knowledge bases of on-board operational-advising expert systems of typical situations of functioning of an anthropocentric object], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestiya RAS. Theory and control systems], 2019, No. 6, pp. 90-102.
4. Fedunov B.E. Bortovye intellektual'nye sistemy takticheskogo urovnya dlya antropotsentricheskikh ob"ektov [On-board intelligent systems of the tactical level for anthropocentric objects]. Moscow: De`Libri, 2018, 246 p.
5. Gorodetskiy V.I., Serebryakov S.V., Trotskiy D.V. Sredstva spetsifikatsii i instrumental'noy podderzhki komandnogo povedeniya avtonomnykh agentov [Means of specification and instrumental support of command behavior of autonomous agents], *Izvestiya YuFU* [Izvestiya SFedU], 2011, No. 3, pp. 116-133.
6. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamikoy slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow: Nauka, 2006, 410 p.
7. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov [Qualimetry of models and polymodel complexes]. Moscow: RAN, 2018, 314 p.

8. *Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M.* Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy kontseptsii proaktivnogo monitoringa i upravleniya slozhnymi ob"ektami [Theoretical and technological bases of the concept of proactive monitoring and management of complex objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 162-174.
9. *Okhtilev M.Yu., Mustafin N.G., Miller V.E., Sokolov B.V.* Kontseptsiya proaktivnogo upravleniya slozhnymi ob"ektami: teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy [The concept of proactive management of complex objects: theoretical and technological foundations], *Izvestiya Vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya Vuzov. Instrumentation], 2014, Vol. 57, No. 11, pp. 7-15.
10. *Averin G.V., Zvyagintseva A.V., Shvetsova A.A.* O podkhodakh k predskazatel'nomu modelirovaniyu slozhnykh sistem [On approaches to predictive modeling of complex systems], *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Ekonomika. Informatika»* [Scientific Bulletin of the Belgorod State University. Series "Economy. Informatics"], 2018, Vol. 45, No. 1, pp. 140-148.
11. *Kuleshov A.P.* Kognitivnye tekhnologii v adaptivnykh modelyakh slozhnykh ob"ektov [Cognitive technologies in adaptive models of complex objects], *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computing systems], 2008, Issue 1, pp. 18-29.
12. *Kuleshov A.P.* Tekhnologiya bystrogo vychisleniya kharakteristik slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Technology of fast calculation of characteristics of complex technical objects], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2006, Issue 3, pp. 4-11.
13. *Bernshteyn A.V., Kuleshov A.P.* Postroenie ortogonal'nykh nelineynykh mnogoobraziy v zadachakh snizheniya razmernosti [Construction of orthogonal nonlinear manifolds in dimension reduction problems], *Tr. VII Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Mnogomernyy statisticheskiy analiz i ekonometrika». Tsakhkadzor, 2008* [Proceedings of the VII International School-Seminar "Multidimensional Statistical Analysis and Econometrics". Tsakhkadzor, 2008], pp. 25-27.
14. *Bernshteyn A.V., Kuleshov A.P.* Kognitivnye tekhnologii v probleme snizheniya razmernosti opisaniya geometricheskikh ob"ektov [Cognitive technologies in the problem of reducing the dimension of the description of geometric objects], *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computational systems], 2008, No. 2, pp. 6-19.
15. *Ivanova E.P., Chernova S.S.* Snizhenie razmernosti slozhnykh geometricheskikh ob"ektov pri nalichii chastnykh parametricheskikh modeley [Reducing the dimension of complex geometric objects in the presence of private parametric models], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision-making], 2009, No. 3, pp. 53-58.
16. *Bukhanovskiy A.V., Koval'chuk S.V., Mar'in S.V.* Intellektual'nye vysokoproizvoditel'nye programmnye komplekсы modelirovaniya slozhnykh sistem: kontseptsiya, arkhitektura i primery realizatsii [Intelligent high-performance software complexes for modeling complex systems: concept, architecture, and Implementation examples], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2009, Vol. 52, No. 10, pp. 5-24.
17. *Ivanov S.V., Bukhanovskiy A.V.* Analiz neopredelennosti predskazatel'nogo modelirovaniya slozhnykh sistem: usvoenie dannykh i ansamblevye tekhnologii [Uncertainty analysis of predictive modeling of complex systems: data assimilation and ensemble technologies], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2013, Vol. 56, No. 12, pp. 66-68.
18. *Pavlov A.N., Kulakov A.Yu., Potryasaev S.A., Sokolov B.V.* Metody, algoritmy i tekhnologii rekonfiguratsii bortovykh sistem malomassorazmernykh kosmicheskikh apparatov [Methods, algorithms and technologies of reconfiguration of onboard systems of small-mass-sized spacecraft], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2018, Vol. 61, No. 7, pp. 596-603.
19. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* Multiple-model description of control processes for air-spacecrafts, *Journal Computer System Science International*, 1996, No. 6, pp. 192-199.
20. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects, *Int. J. Differ. Equ.*, 1985, Vol. 21, pp. 502-506.
21. Nauchno-tekhnicheskii otchet (promezhutochnyy) po teme "Razrabotka tekhnologii i sozdanie eksperimental'nykh programmnykh kompleksov upravleniya konfiguratsiey bortovykh sistem malomassogabaritnykh KA v interesakh povysheniya ikh zhivuchesti" (shifr "Tekhnologiya-

- SG-3.3.3.1”) [Scientific and technical report (interim) on the topic "Development of technology and creation of experimental software systems for controlling the configuration of onboard systems of small-mass spacecraft in the interests of increasing their survivability" (code "Technologia-SG-3.3.3.1")]. Saint Petersburg: SPIIRAN, 2018, 450 p.
22. *Kokorin S.V., Potryasaev S.A., Sokolov B.V.* Kombinirovannyi metod planirovaniya operatsiy i raspredeleniya resursov sistemy upravleniya aktivnymi podvizhnymi ob"ektami [Combined method of planning operations and resource allocation of the active mobile objects management system], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2012, Vol. 55, No. 11, pp. 17-22.
23. *Potryasaev S.A.* Kompleksnoe modelirovanie slozhnykh protsessov na osnove notatsii BPMN [Complex modeling of complex processes based on BPMN notation], *Priborostroenie* [Instrumentation], 2016, No. 11, pp. 913-920.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.И. Пименов.

Кофнов Олег Владимирович – Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: kofnov@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79219413288; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; к.т.н.; с.н.с.

Потрысаев Семен Алексеевич – e-mail: spotryasaev@gmail.com; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; д.т.н.; с.н.с.

Соколов Борис Владимирович – e-mail: sokolov_boris@inbox.ru; тел.: +79217918136; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; д.т.н.; профессор; Заслуженный деятель науки РФ; руководитель лаборатории.

Трефилов Петр Михайлович – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: petertrfi@gmail.com; Москва, Россия; лаборатория №80 «Киберфизических систем»; аспирант.

Kofnov Oleg Vladimirovich – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, e-mail: kofnov@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79219413288; laboratory of information technology in system analysis and modeling, senior researcher, cand. of eng. sc.

Potryasaev Semyon Alekseevich – e-mail: spotryasaev@gmail.com; laboratory of information technology in system analysis and modeling, senior researcher; dr. of eng. sc.

Sokolov Boris Vladimirovich – e-mail: sokolov_boris@inbox.ru; phone: +78127918136; laboratory of information technology in system analysis and modeling; dr. of eng. sc.; professor; head of laboratory.

Trefilov Peter Michailovich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: petertrfi@gmail.com; Moscow, Russia; laboratory 80; postgraduate student.

УДК 519.8.А

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-149-165

А.А. Петунин, Е.Г. Полищук, С.С. Уколов

НОВЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ ОБХОДА КОНЕЧНОГО МНОЖЕСТВА НЕПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ КОНТУРОВ НА ПЛОСКОСТИ*

Рассматривается проблема маршрутизации режущего инструмента машин листовой резки с ЧПУ для случая, когда точки врезки расположены на границах деталей, ограниченных отрезками прямых и дугами окружностей, при этом используется техника непре-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Государственный контракт № 075-03-2020-582/4.

рывной резки (ССР), т.е. каждый контур вырезается целиком, но не используется предварительная дискретизация, то есть резка может начинаться с любой точки контура. Общая задача поиска оптимального маршрута в этом случае сводится к минимизации длины холостого хода. Показано, что она эквивалентна поиску кратчайшей ломаной с вершинами, расположенными на контурах. Предложен новый эвристический алгоритм построения такой ломаной для заранее заданного порядка обхода контуров. Показано, что получающееся решение представляет собой локальный минимум. Описаны некоторые достаточные условия, того, что решение является также глобальным минимумом, которые легко проверяются численно, а некоторые даже визуалью. Описана методика автоматического учёта ограничений предшествования для практически важного случая наличия вложенных контуров, возникающих как за счёт отверстий в деталях, так и за счёт расположения мелких деталей в отверстиях крупных. При этом происходит также уменьшение размерности задачи, что положительно сказывается на времени оптимизации, особенно дискретной. Предложен эвристический алгоритм выбора порядка обхода контуров на основе метода переменных окрестностей (VNS). Описаны альтернативные подходы применения других методов дискретной оптимизации совместно с предложенным алгоритмом построения кратчайшей ломаной для решения полной задачи непрерывной резки и возникающие при этом сложности как теоретического, так и практического характера. Описано обобщение задачи непрерывной резки до более широкого класса задач сегментной резки и обобщённой сегментной резки, что позволяет продвинуться в решении общей задачи прерывистой резки. Описана схема применения предложенного алгоритма для решения задач сегментной и обобщённой сегментной резки. Приведены некоторые результаты численных экспериментов в сравнении с точным решением задачи для дискретной модели GTSP.

Задача резки; непрерывная резка; оптимизация; достаточные условия; эвристика; GTSP; метод переменных окрестностей/

A.A. Petunin, E.G. Polishchuk, S.S. Ukolov

A NEW ALGORITHM FOR CONSTRUCTING THE SHORTEST TOUR OF A FINITE SET OF DISJOINT CONTOURS ON A PLANE

The problem of tool path routing for the CNC thermal cutting machines is considered. Pierce points are located at the parts bounding contours, consisting of straight-line segments and circular arcs. Continuous cutting technique is used, each contour is cut out entirely, and no pre-sampling occurs, so cutting can start from any point on the contour. General problem of minimizing the route length is reduced to minimizing the air move length. It is shown to be equivalent to finding the shortest polyline with vertices on the contours. New algorithm for constructing such a broken line for fixed order of contour traversing is proposed. The resulting solution is shown to be a local minimum. Some sufficient conditions are described for the it to be also a global minimum, which can be easily verified numerically, and some even visually. A technique is described for automatically taking into account precedence constraints for the practically important case of nested contours. This also decreases the size of the problem, which has a positive effect on the optimization time. A heuristic routing algorithm based on the variable neighborhood search (VNS) is proposed. Alternative approaches to the use of other discrete optimization methods along with the proposed algorithm for constructing the shortest polyline for solving the complete problem of continuous cutting, and the resulting difficulties of both theoretical and practical nature are described. The generalization of the problem of continuous cutting to a wider class of problems of (generalized) segment cutting is described, which makes it possible to advance in solving the problem of intermittent cutting. The scheme of application of the proposed algorithm for solving problems of generalized segment cutting is described. The results of numerical experiments are considered in comparison with the exact solution of the GTSP problem.

Cutting problem; continuous cutting; optimization; sufficient conditions; heuristics; GTSP; variable neighborhood search.

Введение. В процессе разработки управляющих программ для машин листовой резки листового материала с ЧПУ возникает несколько оптимизационных задач. Одна из них – минимизация длины холостого хода инструмента. Она (в некоторых случаях) может быть сведена к задаче поиска кратчайшей ломаной, вершины кото-

рой расположены на заданных плоских контурах, являющихся границами деталей. Расположение этих контуров на плоскости в свою очередь получено решением другой оптимизационной задачи – «раскроя». Обе упомянутые задачи являются NP-полными.

Задача минимизации длины холостого хода инструмента сама по себе является частным случаем общей оптимизационной проблемы маршрутизации инструмента. Её полное решение в общем случае не может быть получено в разумное время для задач типичных для современного промышленного производства (сотни граничных контуров), поэтому на практике применяются разнообразные эвристики, дающие решения приемлемого качества.

Для полного решения задачи маршрутизации режущего инструмента для машин листовой резки с ЧПУ для минимизации времени или стоимости резки требуется решить целый ряд задач. Их описание и классификация приведены подробно в [1–3], и схематически изображены на рис. 1.

♦ **Задача непрерывной резки** (Continuous Cutting Problem, CCP): каждый контур (ограничивающий одну из деталей) вырезается за один раз, одним движением инструмента, но резка может начинаться в любой точке контура (и заканчивается в ней же).

♦ **Обобщённая задача коммивояжера** (Generalized Traveling Salesman Problem, GTSP): резка может начинаться в одной из заранее заданных точек на контуре (количество таких точек конечно), после этого контур вырезается целиком.

♦ **Задача резки с остановками** (Endpoint Cutting Problem, ECP): резка контура может начинаться только в заранее заданных точках на нём, но контур может вырезаться за несколько раз, частями.

♦ **Сегментная задача непрерывной резки** (Segment Continuous Cutting Problem, SCCP): вводится понятие сегмента как обобщение понятия контура; сегмент может быть частью контура или объединением нескольких контуров и / или их частей. Каждый сегмент вырезается целиком, от начала до конца, таким образом $CCP \subset SCCP$.

♦ **Обобщённая сегментная задача непрерывной резки** (Generalized Segment Continuous Cutting Problem, GSCCP): подобна сегментной задаче непрерывной резки (SCCP), но разбивка на сегменты не задана заранее, и сама подлежит оптимизации.

♦ **Задача прерывистой резки** (Intermittent Cutting Problem, ICP): наиболее общая формулировка задачи резки, встречающаяся в научной литературе, контуры могут вырезаться частями, в несколько подходов, начиная с произвольной точки.

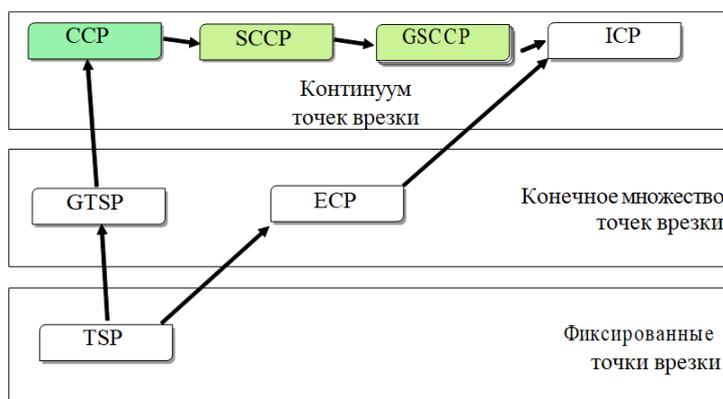


Рис. 1. Классификация задач резки

На практике задача оптимизации маршрута режущего инструмента зачастую сводится к дискретной оптимизации за счёт выбора конечного множества возможных точек врезки на контурах деталей с некоторым заранее заданным шагом ε , то есть сводится к задаче ЕСП [4–6] и её частному случаю – GTSP [7–10]. Задача непрерывной резки ССП тоже может сводиться к GTSP, в этом случае суммарная ошибка длины холостого хода оценивается как $N \cdot \varepsilon$, где N – количество контуров. Для достижения точности результата δ , таким образом необходимо выбирать малое $\varepsilon \approx \delta/N$, так что полное количество допустимых точек врезки растёт (как $O(N)$) и полный перебор требует экспоненциального времени. Тем не менее, этот класс задач может успешно решаться, например, средствами динамического программирования (DP) а для небольших $N \approx 30$ – даже точно (см, в частности [11]).

В данной работе рассматриваются вопросы поиска оптимального маршрута без применения дискретизации (то есть задача ССП), которые слабо освещены в открытых источниках, см. например [12; 13], где описаны некоторые эвристики.

Технологические ограничения. Тот факт, что полученный маршрут должен быть физически выполнен на конкретной машине листовой резки с ЧПУ, накладывает на последний определённые технологические ограничения.

Так называемое «ограничение предшествования» (наиболее подробно описанное в литературе), вызвано тем, что после вырезания замкнутого контура, его содержимое более ничем не удерживается и может свободно вращаться, сдвигаться и даже падать. Поэтому внутренние контура деталей должны вырезаться до того, как будет завершена резка содержащих их внешних контуров. Аналогично и детали, размещённые в отверстиях других деталей, также должны вырезаться до завершения резки содержащих их контуров.

Наконец, технология резки в большинстве случаев диктует, что резак не может двигаться прямо по контуру детали, но с некоторым сдвигом (несколько миллиметров). Этот сдвиг может вычисляться как в ходе решения задачи маршрутизации, так и после – при генерации управляющей программы на основе полученного маршрута или даже непосредственно на станке в процессе резки. Более того, точки врезки (в которых начинается резка) как правило должны находиться на ещё большем расстоянии от контуров деталей во избежание повреждения последних. В данной работе эти вопросы, тем не менее, не рассматриваются, то есть строится маршрут, проходящий в точности по контурам деталей, и точки врезки (а равно и точки окончания резки и выключения инструмента) также ищутся прямо на контурах деталей.

1. Задача непрерывной резки. Рассмотрим Эвклидову плоскость \mathbb{R}^2 и на ней фигуру B (в большинстве практических случаев – прямоугольник), ограниченную замкнутым контуром. Это – модель листового материала, подлежащего резке. Пусть N попарно непересекающихся плоских контуров $\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ расположены внутри B , ограничивая n деталей $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$. Деталь может быть ограничена одним или несколькими контурами (одним внешним и несколькими отверстиями), так что в общем случае $n \leq N$.

Контур C_i могут быть произвольной формы, но мы будем рассматривать только состоящие из (конечного числа) отрезков прямых линий и дуг окружностей, так как именно такие геометрические примитивы поддерживаются программным обеспечением современных машин листовой резки с ЧПУ. Частный случай, когда контура состоят только из отрезков прямых, сводится к одному из вариантов задачи обхода прямоугольников (Touring Polygon Problem, TPP), см. [14].

Далее, внутри B (как правило, на границе) выберем две точки и обозначим их M_0, M_{N+1} (почти всегда $M_0 = M_{N+1}$), которые будут использоваться как начало и конец маршрута резки.

Задача непрерывной резки (Continuous Cutting Problem, CCP) состоит в поиске:

1. N штук точек врезки $\overline{M}_i \in C_i, i \in \overline{1, N}$
2. Последовательности обхода контуров C_i , то есть перестановки N элементов $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$

Результатом решения задачи будет являться маршрут

$$\{M_0, M_{i_1}, M_{i_2}, \dots, M_{i_N}, M_{N+1}\}. \quad (1)$$

Целевая функция в данном случае сильно упрощается по сравнению с общей задачей маршрутизации резки и сводится фактически к минимизации длины холостого хода:

$$\mathcal{L} = \sum_{j=0}^N |M_j M_{j+1}| \quad (2)$$

$$\mathcal{L} \rightarrow \min,$$

где, для простоты записи мы полагаем $M_{i_0} = M_0, M_{i_{N+1}} = M_{N+1}$.

Кроме того, мы потребуем, чтобы искомое решение задачи удовлетворяло общепринятому выше ограничению предшествования.

Хотя контуры C_i по условию не пересекаются, они могут быть вложены друг в друга: $\tilde{C}_a \subset \tilde{C}_b$, где \tilde{C}_a обозначает 2-мерную фигуру, ограниченную контуром C_a (в более традиционных обозначениях $C_a = \partial \tilde{C}_a$).

В общей задаче маршрутизации режущего инструмента это соответствует двум разным случаям (наличие отверстий в деталях с одной стороны и размещение меньших деталей в отверстиях больших), но в нашем случае оба этих варианта обрабатываются одинаково.

Если один контур расположен внутри другого, то внутренний должен быть вырезан (посещён) ранее, чем внешний: $\tilde{C}_a \subset \tilde{C}_b \Rightarrow i_a < i_b$, в перестановке $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$. Таким образом, множество допустимых перестановок ограничено.

2. Алгоритм CCP-Relax решения задачи непрерывной резки. Предлагаемый алгоритм решения задачи непрерывной резки (см. [15]) состоит из нескольких шагов, что хорошо соответствует самой природе решаемой задачи.

2.1. Удаление «внешних» контуров. Для автоматического соблюдения ограничения предшествования мы начинаем с удаления всех контуров, внутри которых есть вложенные контура, так, чтобы остались только:

$$\{C_i | \forall j \neq i: C_j \cap \tilde{C}_i = \emptyset\}.$$

В общем случае это приводит к уменьшению (в некоторых случаях – существенно) сложности задачи (с N до некоторого N'), что в свою очередь сокращает время счёта на втором и в особенности третьем шагах алгоритма.

2.2. Непрерывная оптимизация. На этом этапе мы полагаем, что последовательность обхода контуров $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$ задана (фиксирована) и ищем координаты точек врезки $M_i \in C_i$ во все контуры, минимизируя полную длину холостого хода (2). Для этого начальные позиции точек врезки выбираются произвольным образом (например, случайно) и затем положение одной (каждой) из точек M_i изменяется, а все остальные остаются неподвижны: $\mathcal{L}(M_i) \rightarrow \min$. Большинство слагаемых в целевой функции (2) при этом постоянны, так что сама функция упрощается до

$$|M_{i-1} M_i| + |M_i M_{i+1}| \rightarrow \min_{M_i \in C_i}.$$

Несложный геометрический анализ показывает, что если точки M_{i-1} и M_{i+1} расположены по разные стороны сегмента контура C_i , то оптимальное положение точки врезки M_i оказывается на пересечении с этим сегментом: $M_i = M_{i-1}M_{i+1} \cap C_i$ (если, конечно, такое пересечение существует; в противном случае решением будет один из концов сегмента), рис. 2,а.

Если же точки располагаются с одной стороны сегмента, решение легко находится при помощи *принципа Ферма*, или другими словами правила «угол падения равен углу отражения» (или опять на одном из концов сегмента), рис. 2,б.

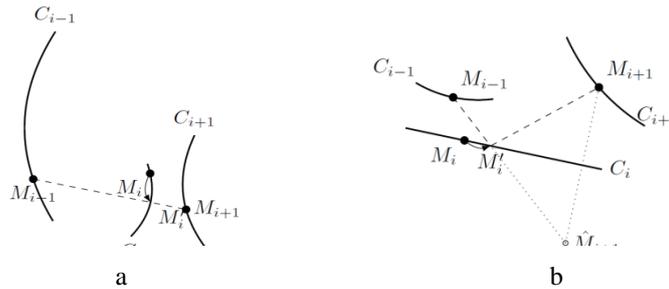


Рис. 2. Оптимальное положение точки врезки: а – на пересечении звена ломаной, б – с использованием принципа Ферма

Общая схема этого шага оптимизации может быть записана таким образом:

1. Выбираем произвольные начальные позиции точек врезки $M_i \in C_i, \forall i$.
2. $\forall i \in \overline{1, N}$ находим оптимальное положение M_i как описано выше за константное время.
3. Повторяем предыдущий шаг, до тех пор, пока длина холостого пути (2) не сойдётся (с некоторой наперёд заданной точностью δ).

На практике весь процесс хорошо сходится за время $O(N)$ и поэтому многократно применяется в качестве подпрограммы на следующем шаге.

2.3. Дискретная оптимизация. Наиболее вычислительно сложная задача заключается в поиске перестановки $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$, минимизирующей полную длину холостого хода $\mathcal{L} \rightarrow \min$. Фактически, это решение Задачи коммивояжёра (Traveling Salesman Problem, TSP), только длина пути вычисляется не аддитивно, а при помощи процесса непрерывной оптимизации, описанного на предыдущем шаге.

В данной работе для поиска такой перестановки применяется метод переменных окрестностей (Variable Neighborhood Search, VNS, см. [16]) по такой схеме:

1. Начальная перестановка $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$ выбирается произвольным образом (например, случайно)
 2. $k = 1$
3. while $k < k_{max}$:
 - 3.1. Выбираем перестановку $I' \in \mathcal{N}^k(I)$ из окрестности $\mathcal{N}^k(I)$, доставляющую минимум $\mathcal{L}(I')$
 - 3.2. if $\mathcal{L}(I') < \mathcal{L}(I)$:
 - 3.2.1. $I \leftarrow I'$
 - 3.2.2. $k \leftarrow k + 1$
 - 3.3. else
 - 3.3.1. $k \leftarrow k + 1$
4. Завершение работы.

На шаге 3.1 многократно применяется непрерывная оптимизация из предыдущего этапа:

$$\mathcal{L}(I') = \min_{M_1, M_2, \dots, M_N} \mathcal{L}(M_1, M_2, \dots, M_N | I').$$

Окрестности $\mathcal{N}^k(I)$ различного размера конструируются разнообразными способами, например:

- ◆ Все возможные парные перестановки (то есть, окрестности размера 1 в смысле транспозиционной метрики).
- ◆ Циклические перестановки 3 контуров. Поскольку всего таких перестановок получается $O(N^3)$, выбираются только те из них, в которых задействованные контуры расположены в исходной перестановке $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$ не далее, чем на предопределённом расстоянии друг от друга; это предопределённое расстояние является параметром алгоритма.
- ◆ Подобным же образом, выбираются циклические перестановки 4 контуров, лежащих не далее заданного расстояния друг от друга в исходной перестановке $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$.
- ◆ Выбирается последовательный блок контуров произвольной длины и к нему применяется циклический сдвиг.
- ◆ Все контуры в последовательном блоке контуров (произвольной длины) переставляются в обратном порядке.
- ◆ Перестановка двух последовательных (но не смежных) блоков контуров.
- ◆ Циклическая перестановка нескольких последовательно расположенных последовательных блоков контуров (произвольной, но одинаковой длины).
- ◆ И ещё порядка десяти других способов генерации «близких» к исходной перестановок.

Если размер некоторой окрестности $\mathcal{N}^k(I)$, получаемой одним из способов, оказывается слишком большим (что приводит к увеличению времени счёта), он легко может быть ограничен при помощи введения дополнительного параметра алгоритма, подобно тому, как это сделано для тройных и четверных циклических перестановок.

Кроме того, сам метод переменных окрестностей допускает несколько вариантов применения, например замена полного перебора (на шаге 3.1) на «первый подходящий» или метод Монте-Карло, но их влияние на скорость и качество получаемого решения задачи непрерывной резки требует дальнейшего исследования.

2.4. Восстановление удалённых контуров. На предыдущем шаге мы получили последовательность обхода контуров и точки врезки для каждого из них, но только для тех, которые не содержат других контуров внутри себя. Теперь необходимо дополнить эту последовательность оставшимися контурами (удалёнными на первом шаге) и точками врезки для них, причём таким образом, чтобы ограничение предшествования оказалось соблюденным.

Заметим, что маршрут, полученный к этому моменту

$$Route = \{M_0, M_1, M_2, \dots, M_{N'}, M_{N'+1}\} \quad (3)$$

обязательно пересекает все исходные контуры C_i , потому что для контуров, сохранённых на первом шаге, он их явно посещает по построению шагов 2 и 3, а для остальных контуров – ввиду того, что каждый из них включает в себя один из посещённых контуров, а начальная и конечная точка M_0 и M_{N+1} всегда выбираются снаружи всех контуров C_i .

Таким образом, для каждого «внешнего» контура C_i , который пока не включён в маршрут резки, мы находим все точки пересечения с полученным маршрутом (3), и если таких точек несколько (что, как правило, и бывает), выбираем из них са-

мую последнюю, то есть посещаемую маршрутом позже всех других, см. рис. 3. Сам контур C_i вставляется в перестановку в месте, соответствующем выбранной точке врезки.

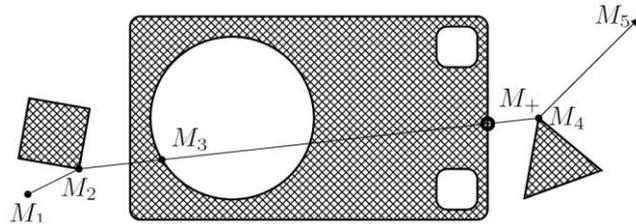


Рис. 3. Добавление точек врезки во «внешние» контура M_+

После добавления таким образом всех «внешних» контуров и соответствующих им точек врезки, мы получаем уже полный маршрут, который посещает все исходные контуры, причём внутренние контуры посещаются строго раньше содержащих их внешних. Полная длина маршрута при этой операции, очевидно, не меняется.

Легко понять, что получаемый таким образом полный маршрут является оптимальным решением исходной задачи непрерывной резки. Действительно, если бы существовал более короткий маршрут, посещающий все контура, из него можно было бы просто удалить точки врезки, лежащие на «внешних» контурах, получив тем самым маршрут, обходящий «внутренние» контура и имеющий ту же, то есть меньшую длину. Таким образом, существует лучшее решение для задачи обхода части контуров без учёта ограничений предшествования, но это по предположению невозможно.

Таким образом, мы строго выполняем ограничение предшествования, тратя на это линейное время $O(N)$.

На этом выполнение предложенного эвристического алгоритма решения задачи непрерывной резки завершается.

3. Условия оптимальности решения непрерывной задачи. С практической точки зрения, вышеописанный алгоритм оказывается вполне работоспособным и даёт хорошие результаты, как в смысле времени работы, так и качества получаемых решений. Однако, это чисто эмпирический результат, так что было бы интересно получить теоретические оценки качества работы данного алгоритма.

Наиболее важным и одновременно наиболее сложным является, конечно, третий этап – дискретная оптимизация (фактически решение задачи коммивояжёра), как с теоретической, так и с практической точки зрения. В данной же работе исследуется второй шаг алгоритма – непрерывная оптимизация. Оказывается возможным сформулировать некоторые утверждения относительно получаемых в её ходе решений.

На рис. 4 показан пример маршрута резки, который не являясь кратчайшим, тем не менее не может быть приведён к такому никакими индивидуальными сдвигами точек врезки. Таким образом, возникает вопрос, при каких условиях предлагаемый алгоритм гарантирует получение действительно оптимального маршрута, то есть, другими словами, глобального минимума оптимизационной задачи.

Итак, рассмотрим следующую задачу: пусть контуры C_i на плоскости состоят только из отрезков прямых линий, они не пересекаются и не вложены друг в друга. Порядок обхода контуров заранее задан. Требуется найти кратчайшую ломаную линию, чьи вершины лежат на заданных контурах (в указанном порядке).

Мы начинаем с (произвольной) ломаной линии L_1 . Далее для каждого контура C_i мы повторяем следующую операцию: сдвигаем вершину ломаной M_i C_i в такое положение, которое минимизирует полную длину ломаной, при этом ос-

тальные вершины M_j ($j \neq i$) неподвижны. Это сводится к несложной геометрической задаче нахождения точки, для которой сумма расстояний до двух других фиксированных точек минимальна.

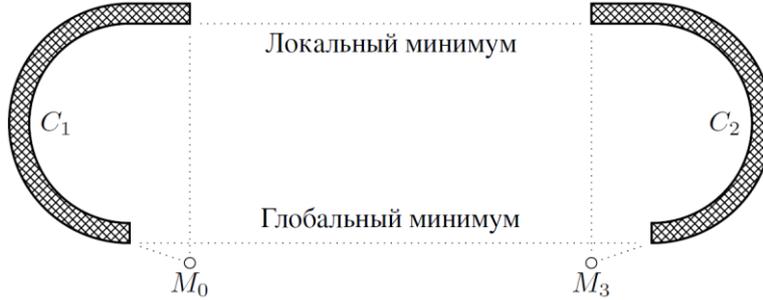


Рис. 4. Два маршрута резки, доставляющие локальный и глобальный минимум

В процессе таких пошаговых сдвигов мы получаем последовательность ломаных линий L_k , причём последовательность длин этих ломаных линий по построению монотонно убывает. Обозначим $m = \inf |L_k|$ (точная нижняя граница длин ломаных линий) и пусть L_* – ломаная линии длины m , то есть предельная точка последовательности ломаных линий L_k . В качестве метрики на пространстве ломаных линий можно использовать сумму расстояний между вершинами с одинаковыми номерами.

В реальных примерах стабилизация последовательности ломаных происходит буквально в течение нескольких итераций (не более 10) и ломаная L_* действительно получается во всех численных экспериментах. По построению, длина ломаной L_* не может быть уменьшена никаким сдвигом одной из её вершин (в рамках содержащего её контура), также как и сдвигом любого количества её вершин, не являющихся соседними.

3.1. Локальный минимум. Предложение 1. Сдвиг нескольких соседних вершин ломаной L таким образом, что сдвигаемые вершины остаются на тех же самых сегментах контуров, не приводит к уменьшению полной длины ломаной

Доказательство. Рассмотрим сдвиг двух соседних вершин. Обозначим четыре последовательных вершины ломаной L_* за $M_{i-1}, M_i, M_{i+1}, M_{i+2}$.

Пусть точки $M_i \in S_i, M_{i+1} \in S_{i+1}$ лежат на прямолинейных сегментах соответствующих контуров $S_i \subset C_i, S_{i+1} \subset C_{i+1}$.

Докажем, что:

$$\forall M'_i \in S_i, M'_{i+1} \in S_{i+1}: |M_{i-1}M'_iM'_{i+1}M_{i+2}| \geq |M_{i-1}M_iM_{i+1}M_{i+2}|.$$

Для произвольной вершины $M'_i \in S_i: |M_{i-1}M'_iM_{i+1}M_{i+2}|$ минимально, когда $M'_i = M_i$, и аналогично для произвольной вершины $M'_{i+1} \in S_{i+1}: |M_{i-1}M_iM'_{i+1}M_{i+2}|$ минимально, когда $M'_{i+1} = M_{i+1}$.

Предположим, что

$$\exists M'_i \in S_i, \exists M'_{i+1} \in S_{i+1}: |M_{i-1}M'_iM'_{i+1}M_{i+2}| < |M_{i-1}M_iM_{i+1}M_{i+2}|.$$

Очевидно, что $M'_i \neq M_i, M'_{i+1} \neq M_{i+1}$.

Введём обозначение $M_i(s) = M_i + s \cdot \vec{M_iM'_i}, M_{i+1}(t) = M_{i+1} + t \cdot \vec{M_{i+1}M'_{i+1}}$ ($s, t \in [0,1]$), $f(s, t) = |M_{i-1}M_i(s)M_{i+1}(t)M_{i+2}|$.

Но положения вершин M_i and M_{i+1} выбраны так, что:

$$\frac{\partial f(s,t)}{\partial s} \Big|_{(0,0)} \geq 0, \frac{\partial f(s,t)}{\partial t} \Big|_{(0,0)} \geq 0. \quad (4)$$

Если, например, $\partial f(s, t) / \partial s|_{(0,0)} = 0$, то это может быть только если точки M_{i-1}, M_i, M_{i+1} лежат на одной прямой (когда M_{i-1} и M_{i+1} по одну сторону от S_i ; в противном случае заменяем M_{i-1} на её отражение относительно S_i). Таким образом, если одновременно

$$\frac{\partial f(s, t)}{\partial s} \Big|_{(0,0)} = 0 = \frac{\partial f(s, t)}{\partial t} \Big|_{(0,0)},$$

то значит все четыре точки $M_{i-1}, M_i, M_{i+1}, M_{i+2}$ лежат на одной прямой, и проходящая через них ломаная фактически является отрезком прямой и заведомо кратчайшая, не может быть сделана короче.

Рассмотрим теперь случай, когда хотя бы одна из производных в (4) не равна нулю. Обозначим $\varphi(t) = f(t, t)$.

$$\frac{d\varphi}{dt} \Big|_0 = \frac{\partial f(s, t)}{\partial s} \Big|_{(0,0)} + \frac{\partial f(s, t)}{\partial t} \Big|_{(0,0)} > 0.$$

Это значит, что $\exists \tau^* \in [0, 1]: \varphi(\tau^*) > \varphi(0)$. Но по нашему предположению $\varphi(1) < \varphi(0)$, т.е. $\varphi(0) < \varphi(\tau^*) > \varphi(1)$.

Теперь заметим, что $\varphi(t)$ представляет собой сумму четырёх слагаемых вида $\sqrt{(a + b \cdot t)^2 + (c + d \cdot t)^2}$, и каждое из этих слагаемых имеет положительную вторую производную, так что и $d^2\varphi(t)/dt^2 \geq 0$, а значит функция $\varphi(t)$ является выпуклой на $[0, 1]$ и не может принимать во внутренней точке интервала значения большие, чем на его концах.

Значит, наше предположение невозможно.

Мы рассмотрели сдвиг двух соседних вершин ломаной. Для большего числа соседних вершин доказательство аналогично, только более громоздко.

Окончательно, мы доказали, что ломаная линия L представляет собой **локальный** минимум.

3.1. Глобальный минимум. Перейдём к *достаточному* условию того, что ломаная L_* является глобальным минимумом.

Пусть $M_i \in C_i$ – вершина ломаной L_* . Соседние вершины M_{i-1} и M_{i+1} находятся вне C_i , поскольку по условию задачи мы исключили вложенные контуры. По построению L_* : $\forall M'_i \in C_i: |M_{i-1}M_i| + |M_iM_{i+1}| \leq |M_{i-1}M'_i| + |M'_iM_{i+1}|$.

Условие 1. Пусть выполняется **одно** из следующих условий:

1. Сегмент $M_{i-1}M_{i+1}$ пересекает контур C_i , то есть $M_i \in M_{i-1}M_{i+1}$
2. Касательная в точке M_i к эллипсу с фокусами M_{i-1} и M_{i+1} и проходящему через M_i , разделяет эллипс и контур C_i .

Предложение 2. Если **Условие 1** выполняется для (всех контуров) L_* , то при сдвиге нескольких соседних вершин ломаной L_* в рамках содержащих их контуров, полная длина ломаной не уменьшается, то есть ломаная L_* представляет собой глобальный минимум.

Доказательство. Используя те же обозначения, рассмотрим четыре соседних вершины $M_{i-1}, M_i, M_{i+1}, M_{i+2} \in L_*$. $M_i \in C_i, M_{i+1} \in C_{i+1}$

Предположим, что

$$\exists M'_i \in C_i, \exists M'_{i+1} \in C_{i+1}: |M_{i-1}M'_iM'_{i+1}M_{i+2}| < |M_{i-1}M_iM_{i+1}M_{i+2}|$$

Снова, $M'_i \neq M_i, M'_{i+1} \neq M_{i+1}$.

Обозначим $M_i(s) = M_i + s \cdot M_iM'_i, M_{i+1}(t) = M_{i+1} + t \cdot M_{i+1}M'_{i+1}$ ($s, t \in [0, 1]$), $f(s, t) = |M_{i-1}M_i(s)M_{i+1}(t)M_{i+2}|$.

Но теперь **Условие 1** гарантирует, что $f(s, 0) \geq f(0, 0)$ для $s \in [0, 1]$, то есть снова

$$\frac{\partial f(s,t)}{\partial s} \Big|_{(0,0)} \geq 0, \frac{\partial f(s,t)}{\partial t} \Big|_{(0,0)} \geq 0. \quad (5)$$

Поэтому остальная часть предыдущего доказательства повторяется отсюда без изменений.

Предположим, что кроме L^* существует другая ломаная, также являющаяся глобальным минимумом. Тогда из доказательства следует, что они представляют собой одну и ту же линию (как множество точек) и отличаются только положением вершин, то есть тем, какие именно пересечения с контурами выбраны в качестве вершин ломаных линий.

Условие 1 легко проверяется программно, однако его можно ещё упростить с тем, чтобы в большинстве практических случаев его можно было проверить просто визуально, буквально «на глаз».

Условие 2. Выполняется **любое** из условий:

1. Сегмент $M_{i-1}M_{i+1}$ пересекает контур $C_i: M_i \in M_{i-1}M_{i+1}$
2. Если вершина M_i является внутренней точкой одного из отрезков контура C_i и при этом весь контур расположен по одну сторону линии, проходящей через этот отрезок (это и есть касательная, которую использует **Условие 1**; иначе существовала бы лучшая вершина $M'_i \in C_i$).
3. Если вершина M_i является также вершиной контура C_i (принадлежит сразу двум его отрезкам) и при этом весь контур находится внутри угла, образованного лучами, идущими из вершины M_i вдоль этих двух отрезков
4. Если контур C_i ограничивает собой выпуклый многоугольник \tilde{C}_i

4. Новый подход к задаче прерывистой резки (ICP). Задача прерывистой резки – самая общая и сложная из всех классов задач резки. Её изучение и решение представляется полезным как с теоретической точки зрения, так и для решения практических задач современного производства.

Кроме стандартной техники резки (которая фактически приводит к задаче непрерывной резки), используются и другие техники резки, например, «мульти-сегментная» и «мульти-контурная» резка. В первом случае один контур может вырезаться в несколько подходов, по частям. Во втором наоборот, несколько контуров вырезаются одним движением резака, рис. 5.

Для того, чтобы можно было описать эти техники резки в используемой математической модели, мы вводим новые понятия:

Сегмент резки $S = \overrightarrow{MM^*}$ – это траектория инструмента от точки врезки M до соответствующей точки выключения инструмента M^* .

В стандартной технике сегмент резки содержит ровно один контур детали, но в общем случае это уже не так. При мульт-сегментной резки сегмент содержит только часть контура, а при мульти-контурной – несколько контуров (или их частей). Рис. 5, таким образом, может представлять не только пример мульти-контурной резки, но также и единственный сегмент в составе некоторой большей задачи резки.

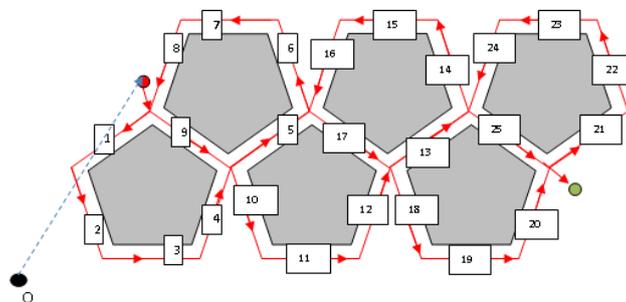


Рис. 5. Пример составного сегмента резки для шести деталей / контуров

Поскольку сегмент резки по определению содержит информацию о направлении резки, нам потребуется ещё одно понятие:

Базовый сегмент B^S – это часть сегмента резки $S = \vec{MM}^*$, без начальной и конечной части (вспомогательных движений резака, когда он движется от точки врезки к собственно контуру и отходит от вырезанного контура в конце). Базовый сегмент не содержит информации о направлении резки и является чисто геометрическим объектом.

При помощи понятия базового сегмента оказывается возможным сформулировать обобщение задачи непрерывной резки:

Сегментная задача непрерывной резки (Segment Continuous Cutting Problem, SCCP) – это задача резки фиксированного набора базовых сегментов резки $SCCP = \{B^{S_i}\}$.

Описанный в разделе 2 алгоритм CCP-Relax естественным образом обобщается на решение задачи SCCP.

Заметим теперь, что если задана раскройная карта, то есть расположение всех деталей и их граничных контуров, из неё может быть сгенерирован целый ансамбль наборов базовых сегментов путём разбиения контуров на сегменты и объединения нескольких сегментов в один. См., например, рис. 6, где мульти-контурные сегменты выделены чёрным цветом. Это позволяет ещё больше обобщить задачу и сформулировать новый класс:

Обобщённая задача сегментной резки (Generalized Segment Continuous Cutting Problem, GSCCP) – ансамбль нескольких задач сегментной резки (SCCP) для одного раскройного плана: $GSCCP = \{SCCP_i\}$.

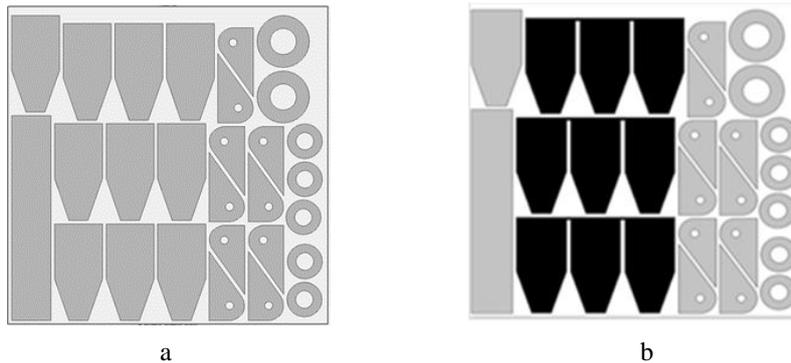


Рис. 6. Ансамбль задач сегментной резки: а – стандартная резка, 45 сегментов, б – мульти-контурная резка, 39 сегментов

Введение нового класса задач резки GSCCP существенно расширяет существующую классификацию задач маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ. Фактически, задачи SCCP и GSCCP являются частными случаями задачи ICP, содержащими конечное множество базовых сегментов резки: $CCP \subset SCCP \subset GSCCP \subset ICP$.

Общая схема решения задачи GSCCP. Предполагая ансамбль \underline{SCCP}_i наборов базовых сегментов $SCCP_i = \{B^{S_j}\}$, $i \in \overline{1, T}, j \in \overline{1, K_i}$ фиксированным, используем следующую общую схему решения задачи GSCCP:

♦ Каждая из задач $SCCP_i$ решается независимо любым существующим алгоритмом, например:

1. CCP-Relax, описанная в разделе 2 эвристика.
2. DP-GTSP, точный алгоритм динамического программирования для задач большого размера, см. [11].

3. *Greedy-GTSP*, итеративный жадный эвристический алгоритм, см. [17].

Для алгоритмов дискретной оптимизации контуры деталей предварительно преобразуются в конечные множества допустимых точек врезки, как показано на рис. 7.

♦ Лучшее решение выбирается на основе значения целевой функции (2).

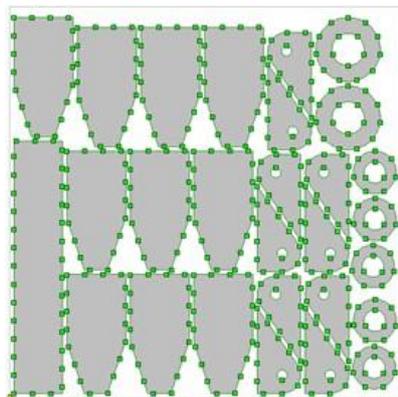


Рис. 7. Задача GTSP, полученная по задаче (S)CCP на рис. 6, 425 точек врезки

Рис. 8 показывает решения задач SCCP с рис. 6, полученные при помощи алгоритма *CCP-Relax*. Легко видеть, что маршруты действительно различаются. Более того, с практической точки зрения, различие может быть ещё более значительным, так как маршруты отличаются не только геометрически, но и количеством точек врезки, а эта операция сравнительно дорогая для современных машин резки с ЧПУ, как в смысле стоимости, так и времени работы.

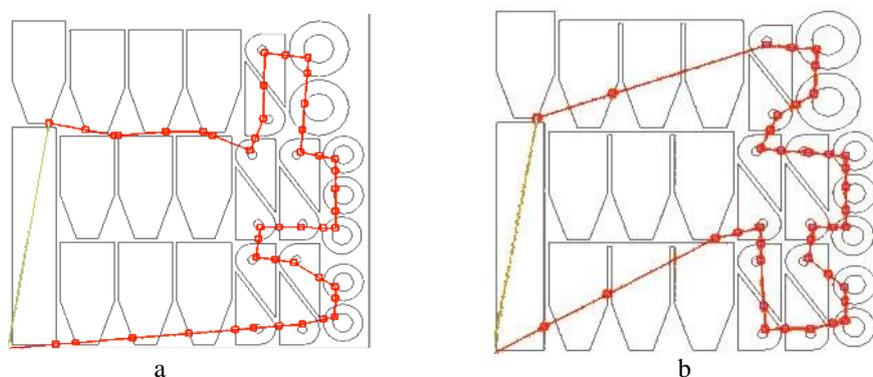


Рис. 8. Решение задачи GSCCP с рис. 6: *a* – Стандартная резка, *b* – Мульти-контурная резка

5. Численные эксперименты. Оценка качества решений, получаемых алгоритмом *CCP-Relax* проводилась на нескольких раскройных планах, содержащих реальные детали. В качестве базы сравнения был взят точный алгоритм решения задачи GTSP на основе динамического программирования (см. [11]), гарантирующий нахождение наилучшего решения для задач с небольшим количеством контуров, а также специализированная версия эвристики GNLS [18].

На рис. 9 представлено точное решение, при этом видны допустимые точки врезки, полученные дискретизацией исходных контуров деталей. На рис. 10 представлено решение задачи ССР, полученное алгоритмом ССР-Relax.

Можно отметить, что полученные маршруты практически идентичны. Небольшие отклонения вызваны процессом предварительной дискретизации (при переводе задачи ССР в GTSP). Вследствие этого алгоритм ССР-Relax формирует прямые сегменты холостого хода инструмента, а в случае задачи GTSP получаются слегка ломанные линии, что слегка увеличивает результирующую длину маршрута. Более точно это отражено в табл. 1 для нескольких раскройных планов.

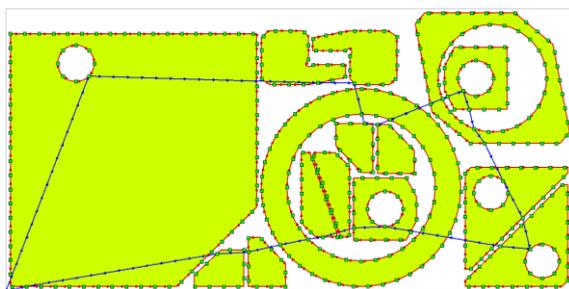


Рис. 9. Точное решение задачи GTSP, задание № 464

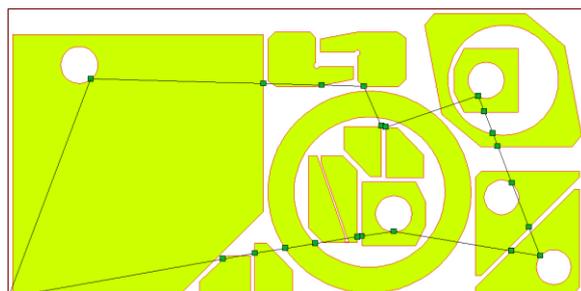


Рис. 10. Решение задачи ССР, задание № 464

Таблица 1

Сравнение решений задач ССР и GTSP

Задание	№ 229	№ 464	№ 3211	№ 20205
Деталей	11	14	17	115
Контуров	12	21	22	198
Точек GTSP	491	429	493	3917
L_{GTSP} , м	7.729	4.743	4.557	26.098
$L_{ССР}$, м	7.727	4.706	4.536	25.987

На рис. 11 показано решение задачи ССР (алгоритмом ССР-Relax) для раскройного плана на 198 контуров, когда точное решение не известно. Вообще, для задач такого и большего размера (а именно они представляют практический интерес), оценка оптимальности решения представляет собой довольно большие сложности. Тем не менее, сравнение с решениями хорошо исследованной задачи GTSP вполне применимо для оценки качества решения. Как известно, GTSP является NP-сложной даже на Эвклидовой плоскости [19].

Хотя из общих соображений понятно, что чем больше ограничений (имеются в виду ограничения предшествования) наложено на задачу GTSP, тем проще её решить, вопрос влияния уровня вложенности деталей на границы сложности решений ещё не достаточно исследовался и заслуживает внимания. По этому поводу хочется отметить работы [20, 21]. Для двух видов ограничений предшествования теоретически доказана полиномиальная временная сложность задачи GTSP. Один тип описан Е. Баласом в [22] для классической задачи TSP. Эффективный точный алгоритм для задачи GTSP с такими ограничениями предшествования предложен в работах [23, 24]. Маршруты, содержащие ограничения второго вида, называются квази- и псевдо-пирамидальными. Эффективные параметрические алгоритмы решения задачи GTSP с ограничениями такого вида предложены в [25, 26].

Ввиду вышеизложенного, можно заключить, что алгоритмический анализ даже задачи GTSP в приложении к маршрутизации резки всё ещё является малоисследованной областью. В частности, отсутствие эффективных моделей MILP (Mixed Integer Linear Program) для задачи GTSP делает невозможным использование современных решателей, таких как Gurobi [27] для построения верхних и нижних границ и оценки эвристических решений. Это также представляется перспективным направлением исследований.

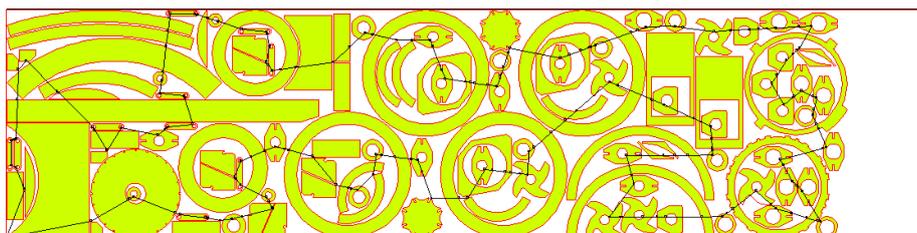


Рис. 11. Пример решения задачи ССР большого размера, задание № 20205

Заключение.

1. Задача минимизации длины холостого хода инструмента машин листовой резки с ЧПУ для задачи непрерывной резки сведена к аналогичной задаче, не содержащей ограничений предшествования, сокращая количество контуров и время работы алгоритма
2. Предложен эвристический алгоритм ССР-Relax поиска положений точек врезки в задаче непрерывной резки
3. Доказано, что алгоритм ССР-Relax при заданном порядке обхода контуров доставляет локальный минимум длины холостого хода
4. Сформулировано несколько легко проверяемых условий, при которых решение, полученное алгоритмом ССР-Relax, является глобальным минимумом.
5. Алгоритм ССР-Relax может применяться также для решения более широкого класса задач резки – SCCP (Сегментная резка) и GSCCP (Обобщённая сегментная резка), что в свою очередь является перспективным подходом к решению общей задачи ИСР.
6. Ближайшим направлением дальнейших исследований является обобщение алгоритма ССР-Relax на более практический случай, когда точки врезки лежат вне контуров деталей в соответствии с технологическими требованиями современного оборудования с ЧПУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hoefl J., Palekar U. S.* Heuristics for the plate-cutting traveling salesman problem, *IIE Transactions*, 1997, Vol. 29, No. 9, pp. 719-731. ISSN 1573-9724. Doi: 10.1023/A:1018582320737.
2. *Dewil R., Vansteenwegen P., Catrysse D.* A review of cutting path algorithms for laser cutters, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, Vol. 87, No. 5, pp. 1865-1884. ISSN 1433-3015. Doi: 10.1007/s00170-016-8609-1.
3. *Petunin A.A., Stylios C.* Optimization Models of Tool Path Problem for CNC Sheet Metal Cutting Machines, *IFAC-PapersOnLine*, 2016, Vol. 49, No. 12, pp. 23-28.
4. *Dewil R., Vansteenwegen P., Catrysse D.* Construction heuristics for generating tool paths for laser cutters, *International Journal of Production Research*, 2014, Vol. 52, No. 20, pp. 5965-5984.
5. *Sherif S.U., Jawahar N., Balamurali M.* Sequential optimization approach for nesting and cutting sequence in laser cutting, *Journal of Manufacturing Systems*, 2014, Vol. 33, No. 4, pp. 624-638.
6. *Imahori S. [et al.]*. Generation of cutter paths for hard material in wire EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, Vol. 206, No. 1, pp. 453-461. ISSN 0924-0136. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.039.
7. *Chentsov A. G., Chentsov A. A.* A Discrete-Continuous Routing Problem with Precedence Constraints, *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 2018, Vol. 300, No. 1, pp. 56-71. ISSN 1531- 8605. Doi: 10.1134/S0081543818020074.
8. *Petunin A.A. [et al.]*. Elements of dynamic programming in local improvement constructions for heuristic solutions of routing problems with constraints, *Automation and Remote Control*, 2017, Vol. 78, No. 4, pp. 666-681. ISSN 1608-3032. Doi: 10.1134 / S0005117917040087.
9. *Ye J., Chen Z.G.* An Optimized Algorithm of Numerical Cutting-Path Control in Garment Manufacturing, *Advanced Materials Research*, 2013, Vol. 796, pp. 454-457. ISSN 1662-8985. Doi: 10.4028/ www.scientific.net/AMR.796.454.
10. *Yu W., Lu L.* A route planning strategy for the automatic garment cutter based on genetic algorithm, *2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 2014, pp. 379-386. ISSN 1941-0026. Doi: 10.1109/CEC.2014.6900425.
11. *Chentsov A.G. [et al.]*. Model of megalopolises in the tool path optimisation for CNC plate cutting machines, *International Journal of Production Research*, 2018, Vol. 56, No. 14, pp. 4819-4830. ISSN 0020-7543. Doi: 10.1080/00207543.2017.1421784.
12. *Arkin E.M., Hassin R.* Approximation algorithms for the geometric covering salesman problem, *Discrete Applied Mathematics*, 1994, Vol. 55, No. 3, pp. 197-218. ISSN 0166-218X. Doi: 10.1016/0166-218X(94)90008-6.
13. *Vicencio K., Davis B., Gentilini I.* Multi-goal path planning based on the generalized Traveling Salesman Problem with neighborhoods, *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 2985-2990. ISSN 2153-0866. Doi: 10.1109/IROS.2014.6942974.
14. *Dror M. [et al.]*. Touring a sequence of polygons, *Proceedings of the thirty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing, ACM*, 2003, pp. 473-482.
15. *Petunin A.A., Polishchuk E.G., Ukolov S.S.* On the new Algorithm for Solving Continuous Cutting Problem, *IFAC-PapersOnLine*, 2019, Vol. 52, No. 13, pp. 2320-2325. ISSN 2405-8963. Doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.552.
16. *Hansen P., Mladenović N., Moreno Pérez J. A.* Variable neighbourhood search: methods and applications, *Annals of Operations Research*, 2010, Vol. 175, No. 1, pp. 367-407. ISSN 1572-9338. Doi: 10.1007/s10479-009-0657-6.
17. *Petunin A. A., Chentsov A. G., Chentsov P. A.* About routing in the sheet cutting, *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2017, Vol. 10, No. 3, pp. 25-39. ISSN 2071-0216. DOI: 10.14529/mmp170303.
18. *Smith S. L., Imeson F.* GLNS: An effective large neighborhood search heuristic for the Generalized Traveling Salesman Problem, *Computers & Operations Research*, 2017, Vol. 87, pp. 1-19. ISSN 0305-0548. Doi: 10.1016/j.cor.2017.05.010.
19. *Papadimitriou C H.* Euclidean TSP is NP-complete, *Theoretical Computer Science*, 1977, Vol. 4, pp. 237-244.
20. *Chentsov A.G., Grigoryev A.M.* A Scheme of Independent Calculations in a Precedence Constrained Routing Problem., *SpringerLink*, 2016, pp. 121-135. DOI: 10.1007/978-3-319-44914-2_10.
21. *Saliy Y. V.* Influence of predestination conditions on the computational complexity of solution of route problems by the dynamic programming method, *Bulletin of the Udmurt University. Maths.Mechanics.Computer Science*, 2014, No. 1, pp. 76-86. ISSN 1994-9197.

22. *Balas E.* New classes of efficiently solvable generalized Traveling Salesman Problems, *Annals of Operations Research*, 1999, Vol. 86, pp. 529-558. ISSN 1572-9338. Doi: 10.1023/A:1018939709890.
23. *Chentsov A.G., Khachai M.Y., Khachai D.M.* An exact algorithm with linear complexity for a problem of visiting megalopolises, *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 2016, Vol. 295, No. 1, pp. 38-46. ISSN 1531-8605. Doi: 10.1134/S0081543816090054.
24. *Chentsov A., Khachay M., Khachay D.* Linear time algorithm for Precedence Constrained Asymmetric Generalized Traveling Salesman Problem, *IFAC-PapersOnLine*, 2016, Vol. 49, No. 12, pp. 651- 655. ISSN 2405-8963. Doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.767.
25. *Khachai M.Y., Neznakhina E.D.* Approximation Schemes for the Generalized Traveling Salesman Problem, *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 2017, Vol. 299, No. 1, pp. 97-105. ISSN 1531-8605. Doi: 10.1134/S0081543817090127.
26. *Khachay M., Neznakhina K.* Complexity and approximability of the Euclidean generalized traveling salesman problem in grid clusters, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2020, Vol. 88, No. 1, pp. 53-69. ISSN 1573-7470. Doi: 10.1007/s10472-019- 09626-w.
27. *Gurobi Optimization.* Gurobi optimizer reference manual, 2020. Available at: <http://www.gurobi.com>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.Н. Сесекин.

Петунин Александр Александрович – Уральский Федеральный университет; e-mail: a.a.petunin@urfu.ru; г. Екатеринбург, Россия; д.т.н.; доцент; профессор.

Полищук Ефим Григорьевич – e-mail: e.g.polishchuk@urfu.ru; к.ф.-м.н.; доцент; с.н.с.

Уколов Станислав Сергеевич – e-mail: s.s.ukolov@urfu.ru; м.н.с.

Petunin Alexander Alexandrovich – Ural Federal University; e-mail: a.a.petunin@urfu.ru; Yekaterinburg, Russia; dr. of eng. sc.; associate professor; professor.

Polishchuk Efim Grigorievich – e-mail: e.g.polishchuk@urfu.ru; cand. of phys. and math. sc.; associate professor; senior researcher.

Ukolov Stanislav Sergeevich – e-mail: s.s.ukolov@urfu.ru; junior researcher.

УДК 62-93

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-165-174

А.В. Логунов, А.Л. Береснев

ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПОДВЕСКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Работа посвящена проблеме диагностирования подвески транспортных средств. Проблема контроля состояния подвески сейчас наиболее актуально из-за постоянного роста автопарка и ужесточения требований к безопасной эксплуатации. Своевременный и точный контроль состояния подвески способен предотвратить выход из строя целых узлов транспортного средства, а также избежать таких серьезных последствий как дорожно-транспортное происшествие. В работе подробно рассмотрены современные средства диагностики, выделены принципы работы, достоинства и недостатки, представлено обоснование выбора из существующих методов такого, который способен помочь наиболее точно и быстро обнаружить неисправность. С появлением современных технологий давно известный метод оценки состояния подвески по звуку может стать самым передовым, поскольку исключается человеческий фактор, для обработки сигнала применяется вычислительная техника анализ звукового спектра в которой осуществляется с помощью компьютерных технологий. В статье рассмотрены механизмы, которые способны генерировать звуковые сигналы. Предложенный способ диагностики позволяет выделить «полезные» звуки из общего числа шумов подвески, после сравнительного анализа указать на узел звук которого отличается от эталонного, исправного. Данное решение в диагностике позволяет существенно снизить общую трудоемкость за счет исключения частичной или полной разборки подвески, как результат несмотря на упрощение, точность обнаружения

неисправностей только возрастет. Целью работы является исследование виброакустических сигналов, излучаемых узлами подвески. С помощью датчиков сигналы считываются, далее происходит математическая обработка на ЭВМ. В результате исследований разработан способ диагностики, позволяющий обнаружить скрытые дефекты узлов подвески и определяющий степень износа. Научная новизна состоит в том, что процесс диагностики становится автоматизированным, все сигналы, снятые датчиками, обрабатывается в ЭВМ или специальном сканере, на дисплей выводятся информация о состоянии тех или иных узлов, в отличие от существующих методов, где диагностика осуществляется визуально или на слух, таким образом, становится возможным избежать ошибок.

Транспортное средство; диагностика; подвеска; стук; виброакустический анализа; вейвлет–преобразование.

A.V. Logunov, A.L. Beresnev

CAPABILITIES OF VIBROACOUSTIC EXAMINATION AND DIAGNOSTICS OF VEHICLE SUSPENSION

The work is devoted to the problem of diagnosing the suspension of vehicles. The problem of monitoring the condition of the suspension is now the most urgent due to the constant growth of the vehicle fleet and the tightening of requirements for their safe operation. Timely and accurate monitoring of the condition of the suspension can prevent the failure of entire vehicle components, as well as avoid such serious consequences as a road traffic accident. In the work, modern diagnostic tools are considered in detail, the principles of operation, advantages and disadvantages are highlighted, the rationale for choosing from the existing methods one that can help most accurately and quickly detect a malfunction is presented. With the advent of modern technologies, the well-known method for assessing the state of the suspension by sound can become the most advanced, since the human factor is excluded, computer technology is used to process the signal, the analysis of the sound spectrum in which is carried out using computer technology. The article discusses mechanisms that are capable of generating sound signals. The proposed diagnostic method makes it possible to single out "useful" sounds from the total number of suspension noises, after a comparative analysis, indicate the node whose sound differs from the standard, serviceable one. This solution in diagnostics can significantly reduce the overall labor intensity by eliminating partial or complete disassembly of the suspension, as a result, despite the simplification, the accuracy of fault detection will only increase. The aim of the work is to study the vibroacoustic signals emitted by the suspension units. With the help of sensors, the signals are read out, then mathematical processing takes place on a computer. As a result of the research, a diagnostic method has been developed that allows detecting hidden defects of suspension assemblies and determining the degree of wear. The scientific novelty lies in the fact that the diagnostic process becomes automated, all signals taken by the sensors are processed in a computer or a special scanner, information about the state of certain nodes is displayed on the display, in contrast to existing methods, where diagnostics is carried out visually or by ear. thus, it becomes possible to avoid mistakes.

Vehicle; diagnostics; pendant; knock; vibroacoustic analysis; wavelet–transformation.

Введение. Современное транспортное средство – это набор сложных взаимосвязанных устройств, и его работоспособность зависит от большого числа параметров. Для обеспечения долгосрочной и безаварийной эксплуатации необходима диагностика.

Подвеска транспортного средства является важной конструктивной частью наиболее подверженной износу. Именно подвеска постоянно испытывает переменные нагрузки, достигающие в ряде случаев значительных величин. От состояния ходовой зависит устойчивость транспорта на дороге, его маневренность и контроль, что соответственно обеспечивает безопасность движения. Неисправная подвеска негативно влияет не только на безопасность управления, но и на уровень комфорта. Эксплуатация транспортного средства с неисправной ходовой является опасной и для водителя, и для окружающих. Поэтому ходовая часть должна находиться в исправном состоянии [1, 2].

Диагностика подвески включает несколько способов оценки работоспособности. Они отличаются сложностью проведения и точностью результатов. Первый – визуальный. Он самый простой, не требующий значительных финансовых затрат и специального оборудования. Диагностика подвески этим методом не гарантирует точности. Второй способ тоже частично "визуальный", однако он включает еще и субъективную оценку степени износа деталей специалистом, который пробует транспортное средство в действии. Этим методом можно выявить основные проблемы, однако полной картины технического состояния машины вы не увидите. Диагностика подвески третьим способом дает самые точные результаты, она сочетает визуальную оценку с применением технических средств.

С каждым днем узлы транспортных средств становятся все сложнее и сложнее, подвеска так же не является исключением. Для обнаружения неисправности требуется затрачивать больше времени, в большинстве случаев при использовании вышеописанных способов диагностики приходится прибегать к частичной разборке ходовой части. Разработанный метод диагностики позволяет избежать этого. В связи с этим, данный метод актуален.

Научная новизна состоит в том, что процесс диагностики становится автоматизированным, все сигналы, снятые датчиками, обрабатывается в ЭВМ или специальном сканере, на дисплей выводятся информация о состоянии тех или иных узлов, в отличие от существующих методов, где диагностика осуществляется визуально или на слух, таким образом, становится возможным избежать ошибок.

Описание узлов подвески транспортных средств, излучающих вибросигналы. Стуки в подвеске возникают по различным причинам. Обычно стуки в подвеске проявляются в результате неисправности амортизаторов, в этом случае необходимо произвести замену амортизаторов, также при повреждении резинометаллических шарниров, деформации опор стоек амортизаторов, изношенности опор и рычагов передней и задней подвески [3].

Стуки в передней или задней подвеске могут возникнуть и при ослаблении гаек и болтов креплений узлов передней подвески, изношенности подушки и резинометаллических шарниров штанги, выработке подшипников ступиц передних колес, а также при большом дисбалансе колес или деформациях колесных дисков.

Стуки от «пробоя» подвески возникают из-за разрушения буферов сжатия, осадки или поломки пружины подвески, а частые «пробои» (стуки) задней подвески чаще всего происходят из-за перегрузки багажника транспортного средства.

Источником стука может оказаться не только неисправности подвески. Если они сопровождаются отдачей и вибрациями в рулевом колесе, то причина может скрываться в неисправности рулевого управления. Такие проблемы требуют особого внимания, так как не только ухудшают комфортность вождения транспортного средства, но могут создать чрезвычайно опасные аварийные ситуации на дорогах.

Если такие симптомы проявляются только на скоростях выше 70...80 км/ч, то наиболее вероятной их причиной является разбалансировка колес, особенно передних [4].

Стуки в рычагах подвески могут заключаться в дефектах самого рычага. На рисунке 1 представлен внешний вид рычага. Рычаги являются связующими элементами подвески транспортного средства и служат для прочного соединения колеса (ступицы) с несущей конструкцией (кузовом), и обеспечивают перемещение колес относительно кузова [5, 6]. Одной из главных причин стуков рычагов подвески является износ резинометаллических шарниров (сайлентблоков).

Сайлентблоки служат для соединения деталей подвески, и за счет упругой вставки между втулками гасят колебания, передаваемые от одного узла к другому. На сайлентблок приходятся самые тяжелые нагрузки, ведь он должен противостоять деформации, которую получает подвеска транспортного средства.

Еще одним источником шумов подвески могут являться рулевые наконечники. Стуки в наконечниках опасны и возникают, в основном, при повышенных люфтах пальца в гнезде [7].

Также в передней подвеске транспортного средства могут стучать шаровые опоры. Причиной стуков шаровых опор является износ этих самых опор.

Шаровые опоры предназначены для поворота управляемых колес и должны воспринимать нагрузку от неровного дорожного полотна. При очень сильном износе шаровых опор их может вырвать и тогда транспортное средство останется без управления, что может привести к плачевным последствиям [8].

Самым главной неисправностью и стуков в подвеске является амортизатор.

Амортизаторы чаще всего теряют работоспособность из-за недостаточного количества жидкости или газа в них, а также загрязнении каналов, поломки и чрезмерного износа клапанов, поршня, штоков и пружин сальников. Неисправность амортизаторов может проявиться на неровной дороге, когда транспортное средство по дороге бросает из стороны в сторону и после этого долго раскачивается после каждого толчка [9].

Описание системы. Диагностировать неисправности и степень износа узлов можно с помощью виброакустического анализа звуков, излучаемых подвеской транспортного средства. Для реализации данного способа необходимо закрепить специальные вибродатчики в определенных местах подвески. Далее снимая колебания с датчиков, вводя их с помощью устройства сопряжения или звуковых карт в память ПЭВМ обрабатываем полученные данные по определенным алгоритмам, после сравнения с эталонными значениями, можно делать заключение об исправности узлов. Для частотного спектра записанного звукового сигнала применяется вейвлет-преобразование.

Вейвлетное преобразование сигналов является обобщением спектрального анализа, типичный представитель которого – классическое преобразование Фурье. Термин "вейвлет" (wavelet) в переводе с английского означает "маленькая (короткая) волна". Вейвлеты – математические функции, которые разделяют данные на различные частотные составляющие, а затем изучают каждый компонент с разрешением, соответствующим его масштабу. Вейвлет-преобразования рассматривают анализируемые временные функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте.

Вейвлетный анализ представляет собой особый тип линейного преобразования сигналов и физических данных.

Все вейвлет-преобразования рассматривают функцию (взятую будучи функцией от времени) в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте. Вейвлет-преобразования обычно делят на дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) и непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) [10–26].

Вейвлет преобразования нашло применение в таких областях как:

- ◆ Обработка экспериментальных данных;
- ◆ Обработка изображений;
- ◆ Обработка и анализ спектров;
- ◆ Сжатие данных;
- ◆ Нейросети и другие механизмы анализа данных;
- ◆ Системы передачи данных и цифровой обработки сигналов [27].

Для нас больший интерес представляет обработка и анализ спектров. Так как мы рассматриваем сигнал как функцию от частоты и амплитуды по времени.

Описание принципов диагностирования. Эксперимент проводился над подвесками автомобилей ВАЗ 2106, 2104, 2107.

На детали подвески, закреплялись акустические датчики, провода от которых проводились в салон автомобиля и подключались к ПК. Транспортное средства приводится в движение, во время которого вся информация записывается на жесткий диск.

С помощью ПО Adobe Audition выделялась одна серия из повторяющихся всплесков, выделенная серия сохранялась. Далее начиналась обработка полученных сигналов. Обработка осуществлялась с помощью ПО Auto Signal. После обработки вся полученная информация сводилась в таблицы.

На рис. 1 представлены графики сигналов, излучаемых рулевыми трапециями. По частоте и интенсивности всплесков на графиках возможно определить степень износа механизма.

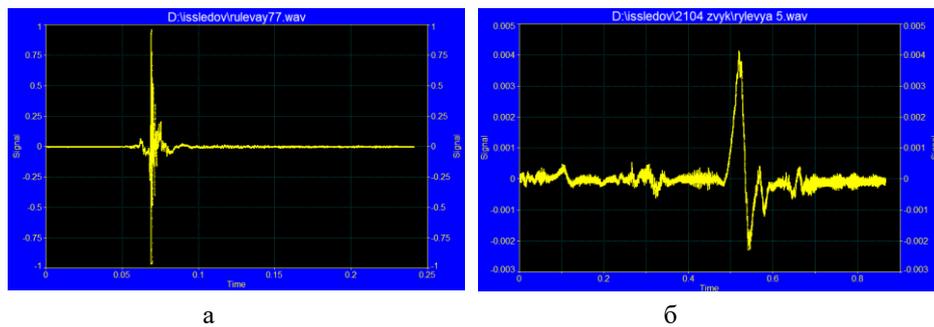


Рис. 1. Анализ сигнала, излучаемого рулевой трапецией

Применим вейвлет – преобразования. На рис. 2 выполнено вейвлет – преобразование сигналов, излучаемых рулевыми трапециями. Выделим всплески с максимальной амплитудой и узнаем частоту и интенсивность.

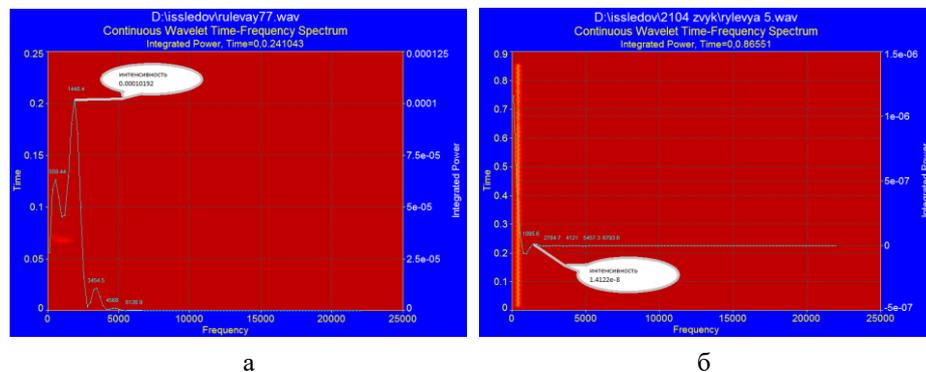


Рис. 2. Вейвлет-преобразование

В результате обработки можно наблюдать череду всплесков. Причиной этих всплесков являются удары шарового пальца о корпус шарнира. Гармоника с максимальной амплитудой на графике 2,а имеет частоту 1448Гц и интенсивность 0.0001, на графике 2,б гармоника с максимальной амплитудой имеет частоту 1895Гц и интенсивность 0.0005. Сведем полученные данные в табл. 1.

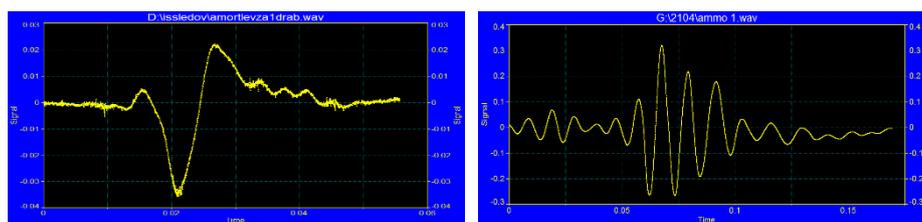
Таблица 1

Результаты эксперимента над рулевыми

Рулевая	Интенсивность	Частота, Гц
а	0.0001	1448
б	0.0005	1895

Исходя из этого видно, что гармоника на графике 2,б имеет большую интенсивность и частоту, следовательно, можно утверждать, что механизм изношен сильнее.

Таким же методом исследуем работу амортизаторов.

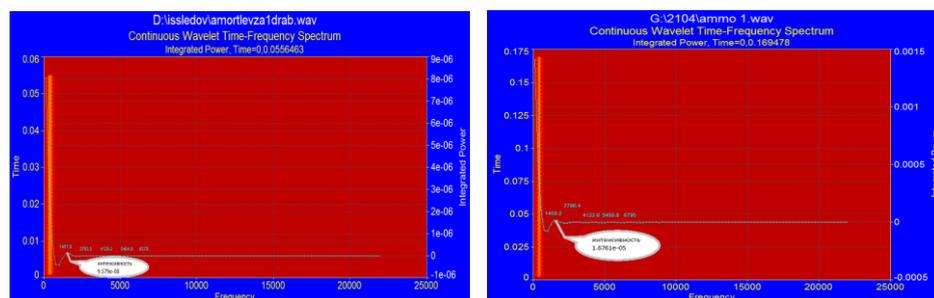


а

б

Рис. 3. Выделение участков сигнала, где наблюдается всплеск

Далее выполним вейвлет-преобразование, результаты можно наблюдать на рис. 4.



а

б

Рис. 4. Вейвлет-преобразование

Сигнал амортизатора на графике 4,а в пике имеет частоту 1457.8 и интенсивность 9.579×10^{-8} , амортизатор на графике 4,б имеет частоту 1450.2 интенсивность 1.676×10^{-5} . Сводим результаты в табл. 2.

Таблица 2

Эксперимент с амортизаторами

Амортизатор	Интенсивность	Частота
а	0.003	1457.8
б	0.01	1450.2

Разницу в интенсивности можно объяснить тем что, амортизаторы имеют разный состав наполнения. Амортизатор а – газо-масляный, амортизатор б – масляный, так же еще одной причиной этой разницы может быть то что мы сообщаем усилие по разному на амортизатор.

Источником излучения в амортизаторе является пара поршень-корпус. При утечке масла, амортизатор начинает “пробивать”.

Анализ работы амортизатора с разным уровнем масла. На рис. 5 представлен сигнал, излучаемый амортизатором с заводским уровнем масла.



Рис. 5. Амортизатор с заводским уровнем масла



Рис. 6. Вейвлет-преобразование полученного сигнала

Как видно из графика 6, при изучении сигнала, излучаемого амортизатором, наблюдается всплеск, имеющий частоту 2570 Гц и интенсивность 0,009.

Далее спускаем часть масла из амортизатора. Результат представлен на рис. 7 и 8.

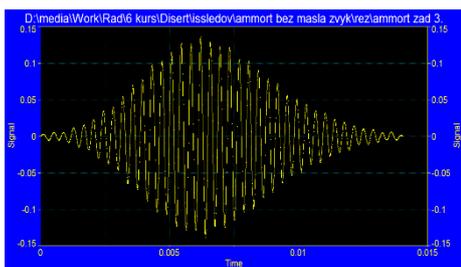


Рис. 7. Сигнал работы амортизатора с частично слитым маслом

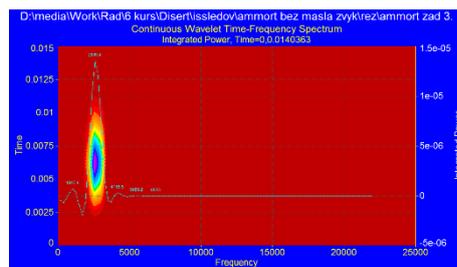


Рис. 8. Вейвлет-преобразование

Из графика 8 видно, что всплеск с максимальной амплитудой имеет частоту 2599,4 Гц, интенсивность 0,008.

Повторим опыт, только в этот раз полностью сольем масло с амортизатора, результат опыта представлен на рис. 9 и 10.



Рис. 9. Сигнал, работы амортизатора без масла

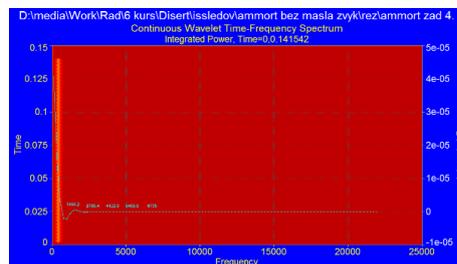


Рис. 10. Вейвлет-преобразование

Проанализировав график вейвлет-преобразования в 3м опыте, удалось выяснить, что всплеск с максимальной амплитудой имеет частоту 1450 Гц, интенсивность 0,004.

Сведем данные 3х опытов в табл. 3 и сравним полученный результат.

Таблица 3

Номер опыта	Частота, Гц	Интенсивность
1 заводской уровень (300 гр.)	2570	0,009
2 Частичный слив масла (150 гр.)	2599,4	0,008
3 Полностью без масла	1450	0,004

Как видно из табл. 3 интенсивность звука уменьшается, пропорционально уровню масла, это можно обосновать тем, что скорость распространения звука в воздухе меньше скорости распространения звука в масле. (Скорость звука в воздухе – 310 м/с, а скорость звука в масле — 1300 м/с.) Так же о малом уровне масла в амортизаторе свидетельствует низкая частота звуковой волны, результат 3го опыта это подтверждает.

Таким образом, удалось доказать, что благодаря разработанному методу, возможно диагностировать какая степень износа у амортизаторов транспортного средства.

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы, что предложенный в работе метод позволяет обнаружить неисправность рулевых тяг на транспортных средствах, так же выявлена зависимость количества масла в амортизаторе от интенсивности звука, излучаемого им, благодаря этому становится возможным определять степень износа.

Разработанный метод позволяет обнаружить:

- ◆ неисправность в шаровых опорах;
- ◆ неисправность рулевых тяг и рулевого редуктора;
- ◆ износ амортизаторов;
- ◆ износ сайлентблоков.

Представленный метод диагностики является актуальным на сегодняшний день, т.к. практически полностью сводит к минимуму риск ложного определения неисправности и дает возможность избежать серьезных последствий, которые могут возникнуть по причине этих неисправностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ротенберг Р.В.* Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода. – 3-е изд.
2. Автомобили и технологии. – <http://www.autotechnic.su/>.
3. *Волгин В.В.* Диагностика неисправностей легковых автомобилей. – М.: АСТ: Астрель, 2005. – 104 с.
4. *Карунина А.Л.* Конструкция автомобиля. Шасси: учебник для вузов / под ред. д.т.н. – М., 2000.
5. Справочник автомобилиста. – <http://www.avtoindent.ru/>.
6. Электронная книга по описанию и ремонту классических автомобилей. – <http://www.vaz2101inf.ru/>.
7. Ремонт, обслуживание эксплуатация автомобилей полные технические характеристики. Диагностика, электросхемы. – <http://www.autoprospect.ru>.
8. Хороший стук наружу вылезет. – <http://automoto-party.ru>.
9. *Сидоров А.В.* Подвеска, амортизаторы, детали // За рулем. – 2010. – № 12.
10. *Давыдов А.В.* Вейвлетные преобразования сигналов. Курс лекций. – Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, кафедра геоинформатики, 2005.
11. *Береснев А.Л. Береснев М.А.* Виброакстический метод диагностики двигателя внутреннего сгорания // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 6. – С. 27-32.

12. Guo L.-X., Zhang L.P. Vehicle vibration analysis in changeable speeds solved by pseudoexcitation method // Received 31 December 2009; Revised 20 February 2010; Accepted 28 August 2010.
13. Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G. Vibration diagnosis of car motor engines // Acta technica corviniensis – bulletin of engineering. – 2010.
14. Scheffer C., Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, Newnes, 2004.
15. Patel V.N., Tandon N., Pandey R.K. Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration // Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load. – 2014.
16. Burdzik R., Doleček R. Research of vibration distribution in vehicle constructive // Perner's contacts. – 2012. – P. 16-26.
17. Wang X. Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited, Cambridge, 2010.
18. Volkswagen of America, Inc.: Noise, vibration, and harshness, self study program, course No. 861503, U.S.A., 2005.
19. Deulgaonkar V.R. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles // International journal of modern engineering research (IJMER). – Vol.1, No. 2. – P. 242-246.
20. Gustafsson F. Vibration analysis for speed estimation of wheeled indoor vehicles // Master of Science thesis in electrical engineering. – 2017.
21. Gordon T.J., Bareket Z. Vibration transmission from road surface features – vehicle measurement and detection. – 2007.
22. Bala Raju A., Venkatachalam R. Analysis of vibrations of automobile suspension system using full-car model // International journal of scientific & engineering research. – September 2013. – Vol. 4, Issue 9. – P. 2105-2111.
23. Noise, Vibration, and Harshness NVH // Chrysler academy group, school of technical training. – 2011.
24. Sitnik L., Magdziak–Tokáowicz M., Wróbel R. Comparative analysis of the vibrations of a different kind of engine mounted in the same new motor vehicles // Journal of kones power-train and transport. – 2011. – Vol. 18, No. 4.
25. Dertimanis V.K., Koulocheris D.V. Identification of vehicle suspensions' faults from multi-channel excitation and vibration response measurements // 3'd International conference from scientific computing to computational engineering. – 2008.
26. Konieczny L., Burdzik R. Modern suspension systems for automotive vehicles and their test methods // Jve international ltd. vibroengineering procedia. – 2017. – P. 233-237.
27. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. – Новоибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

REFERENCES

1. Rotenberg R.V. Podveska avtomobilya. Kolebaniya i plavnost' khoda [Car suspension. Oscillation and smoothness]. 3rd ed.
2. Avtomobili i tekhnologii [Cars and technology]. Available at: <http://www.autotechnic.su/>.
3. Volgin V.V. Diagnostika neispravnostey legkovykh avtomobiley [Diagnostics of malfunctions of cars]. Moscow: AST: Astrel', 2005, 104 p.
4. Karunina A.L. Konstruktsiya avtomobilya. Shassi: uchebnik dlya vuzov [Vehicle design. Chassis. Textbook for universities], ed. by dr. of eng. sc. Moscow, 2000.
5. Spravochnik avtomobilista [Directory of the motorist]. Available at: <http://www.avtoindent.ru/>.
6. Elektronnaya kniga po opisaniyu i remontu klassicheskikh avtomobiley [E-book on the description and repair of classic cars]. Available at: <http://www.vaz2101inf.ru/>.
7. Remont, obsluzhivanie ekspluatatsiya avtomobiley polnye tekhnicheskie kharakteristiki. Diagnostika, elektroskhemy [Repair, maintenance, operation of cars, full technical specifications. Diagnostics, wiring diagrams]. Available at: <http://www.autoprospect.ru>.
8. Khoroshiy stuk naruzhu vylezet [A good knock will come out. Available at: <http://automoto-party.ru>.
9. Sidorov A.V. Podveska, amortizatory, detali [Suspension, shock absorbers, parts], *Za rulem* [Behind the wheel], 2010, No. 12.

10. Davydov A.V. Veyvletnye preobrazovaniya signalov. Kurs leksiy [Wavelet transformations of signals. Course of lectures]. Ekaterinburg: UGGU, IGiG, kafedra geoinformatiki, 2005.
11. Beresnev A.L. Beresnev M.A. Vibroaksticheskiy metod diagnostiki dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Vibroacoustic method for diagnostics of an internal combustion engine], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2010, No. 6, pp. 27-32.
12. Guo L.-X., Zhang L.P. Vehicle vibration analysis in changeable speeds solved by pseudoexcitation method, *Received 31 December 2009; Revised 20 February 2010; Accepted 28 August 2010*.
13. Czech P., Lazarz B., Madej H., Wojnar G. Vibration diagnosis of car motor engines // *Acta technica corviniensis – bulletin of engineering*, 2010.
14. Scheffer C., Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, Newnes, 2004.
15. Patel V.N., Tandon N., Pandey R.K. Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration, *Experimental study for vibration behaviors of locally defective deep groove ball bearings under dynamic radial load*, 2014.
16. Burdzik R., Doleček R. Research of vibration distribution in vehicle constructive, *Perner's contacts*, 2012, pp. 16-26.
17. Wang X. Vehicle noise and vibration refinement, woodhead publishing limited, Cambridge, 2010.
18. Volkswagen of America, Inc.: Noise, vibration, and harshness, self study program, course No. 861503, U.S.A., 2005.
19. Deulgaonkar V.R. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles, *International journal of modern engineering research (IJMER)*, Vol.1, No. 2, pp. 242-246.
20. Gustafsson F. Vibration analysis for speed estimation of wheeled indoor vehicles, *Master of Science thesis in electrical engineering*, 2017.
21. Gordon T.J., Bareket Z. Vibration transmission from road surface features – vehicle measurement and detection, 2007.
22. Bala Raju A., Venkatachalam R. Analysis of vibrations of automobile suspension system using full-car model, *International journal of scientific & engineering research*, September 2013, Vol. 4, Issue 9, pp. 2105-2111.
23. Noise, Vibration, and Harshness NVH, *Chrysler academy group, school of technical training*, 2011.
24. Sitnik L., Magdziak–Tokáowicz M., Wróbel R. Comparative analysis of the vibrations of a different kind of engine mounted in the same new motor vehicles, *Journal of kones powertrain and transport*, 2011, Vol. 18, No. 4.
25. Dertimanis V.K., Koulocheris D.V. Identification of vehicle suspensions' faults from multi-channel excitation and vibration response measurements, *3'd International conference from scientific computing to computational engineering*, 2008.
26. Koniczny L., Burdzik R. Modern suspension systems for automotive vehicles and their test methods, *Jve international ltd. vibroengineering procedia*, 2017, pp. 233-237.
27. Yakovlev A.N. Vvedenie v veyvlet-preobrazovaniya: ucheb. posobie [Introduction to Wavelet Transforms: textbook]. Novoibirsk: Izd-vo NGTU, 2003, 104 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Павленко.

Логунов Артём Владимирович – НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79054586468; аспирант, инженер.

Береснев Алексей Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: alex_tr6@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Logunov Artyom Vladimirovich – Supercomputers and Neurocomputers Research Center; e-mail: artem-logunov@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054586468; postgraduate student, engineer.

Beresnev Aleksey Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: alex_tr6@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Раздел III. Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-175-189

В.А. Костюков, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, Е.Ю. Косенко

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПОДЗАРЯДКИ ГРУППЫ БЛА*

В настоящее время началось активное использование групп роботов для решения целого ряда задач гражданского и военного назначений. В этой связи возникают проблемы, связанные с групповым управлением, организацией надежных каналов связи и обеспечением эффективного функционирования группы при ограниченных энергетических ресурсах. При решении задачи об оптимизации энергопотребления возникает проблема повышения эффективности взаимодействия элементов группы со стационарными станциями подзарядки. Эта проблема может быть решена только при рассмотрении объединенной системы, в которую входят роботы и станции подзарядки. Централизованное управление такой системой оправдано в случае небольшого числа ее элементов. Однако с ростом числа элементов группы повышается сложность управления, поэтому более приоритетным решением становится сочетание централизованного и децентрализованного методов управления. В комплекс проблем децентрализованного управления такой группой входит задача организации оптимального взаимодействия её элементов с целью достижения цели своего функционирования. При организации энергетического обмена между роботами и станциями подзарядки решение этой задачи играет ключевую роль в оптимизации энергопотребления. В данной статье работе разрабатывается концепция взаимодействия подвижных и стационарных объектов, подразумевающая возможность выбора каждым агентом взаимодействия соответствующего компаньона. Такой выбор производится с учетом текущего состояния системы и оценки истории результатов взаимодействия. Разработанная концепция детализируется для системы, включающей БЛА и станции их подзарядки. Предлагается алгоритм децентрализованного выбора пар взаимодействующих элементов «БЛА– станция подзарядки» на основе двух показателей – энергетической эффективности процесса заряда, и времени, затрачиваемого БЛА на достижение целевой точки. Оба показателя учитываются при выборе весовых коэффициентов, назначаемых каждой станции подзарядки в качестве степеней её эффективности. Также данные показатели входят в оптимизируемый критерий качества. Разработана процедура оптимизации, результатом которой является номер станции подзарядки, наиболее подходящей данному мобильному объекту для взаимодействия.

Децентрализованное управление; нейросетевые системы контроля; беспилотные летательные аппараты; энергопотребление; станции подзарядки; ветроэнергетические установки.

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 16-1900001 П, реализуемого в Южном федеральном университете.

V.A. Kostjukov, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov, E.Yu. Kosenko

THE METHOD OF ESTIMATION POSITIONS OF THE UAVS BY MEASURING THE DISTANCES BETWEEN ELEMENTS OF THE GROUP

Currently, the active use of groups of robots has begun to solve a number of tasks for civil and military purposes. In this regard, problems arise associated with group management, the organization of reliable communication channels and ensuring the effective functioning of the group with limited energy resources. When solving the problem of optimizing energy consumption, the problem of increasing the efficiency of interaction of the elements of the group with stationary charging stations arises. This problem can only be solved by considering an integrated system, which includes robots and charging stations. Centralized management of such a system is justified in the case of a small number of its elements. However, with an increase in the number of elements in a group, the complexity of management increases, so a combination of centralized and decentralized management methods becomes a higher priority solution. The complex of problems of decentralized management of such a group includes the task of organizing the optimal interaction of its elements in order to achieve the goal of its functioning. When organizing energy exchange between robots and charging stations, solving this problem plays a key role in optimizing energy consumption. In this article, the concept of the interaction of mobile and stationary objects is developed, which implies the possibility of each agent choosing an appropriate companion for interaction. This choice is made taking into account the current state of the system and the assessment of the history of interaction results. The developed concept is detailed for a system that includes UAVs and their recharging stations. An algorithm is proposed for the decentralized selection of pairs of interacting elements "UAV - charging station" based on two indicators - the energy efficiency of the charging process, and the time spent by the UAV to reach the target point. Both indicators are taken into account when choosing the weights assigned to each charging station as its degrees of efficiency. Also, these indicators are included in the optimized quality criterion. An optimization procedure has been developed, the result of which is the number of the charging station that is most suitable for a given mobile object for interaction.

Decentralized control; neural network control systems; unmanned aerial vehicles; power consumption; charging stations; wind power plants.

Введение. Известны работы, в которых рассматриваются вопросы взаимодействия БЛА со станциями, в том числе наделенными функцией подзарядки, с информационной или энергетической точкой зрения.

В статье [1] рассматриваются перспективные коммуникационные сети, позволяющие реализовать характерные режимы функционирования групп БЛА. Подчеркивается, что распространенные конфигурации информационных сетей, применимые для наземных подвижных объектов, не работают в общем случае для групп БЛА. В частности, особые требования к маршрутизации сетей БЛА выходят за рамки потребностей существующих систем MANETS и VANETS.

В работе [2] рассматривается диалоговая модель взаимодействия станции подзарядки с БЛА группы, позволяющая обеспечить безопасную и надежную покупку БЛА энергии у станции.

В работе [3], решается задача максимизации времени функционирования каждого БЛА группы на основе решения соответствующей задачи коммивояжера.

Рассматриваемые в статьях [1–3] модели взаимодействия БЛА группы со станциями подзарядки исходят из неограниченного запаса энергии на каждой станции. Это является существенным ограничением таких моделей, ограничивающих рассмотрение станций подзарядки на основе возобновляемых источников энергии.

Известны работы, в которых решаются оптимизационные проблемы энергопотребления группы БЛА, выполняющей совместную задачу с участием оператора, осуществляющего прием-отправку целевой информации [4].

Существует значительный практический задел в области организации и обслуживания движения группы БЛА при выполнении ими различных миссий [5–7]. Однако, этот задел основывается на централизованных методах координации действий БЛА в группе.

Так в патенте [7] рассмотрен централизованный метод управления группой подвижных автономных объектов разной природы для реализации задачи перевозки грузов, с возможностью подзарядки и ремонт на станциях обслуживания.

Как показал анализ, большая часть работ рассматривает взаимодействие мобильных объектов группы со станциями при одном или нескольких ограничениях: 1) станции подключены к централизованной энергосети, что позволяет не ограничивать количество энергии; 2) выбор компаньона для взаимодействия осуществляются только одной стороне, либо на станциях, либо на мобильном объекте; 3) алгоритмы такого выбора не учитывают предыдущий опыт взаимодействия данного объекта с другими объектами противоположного класса в прошлом.

В связи с этим в данной статье разрабатывается концепция взаимодействия стационарных и мобильных объектов обобщенной технической системы на базе децентрализованных адаптивных принципов управления с эффектом памяти. Данная концепция конкретизируется на примере энергетической системы, осуществляющей пополнение энергии мобильных объектов.

При наличии энергетического обмена между элементами робототехнической системы, необходимо выделять как минимум два состояния для каждого объекта системы. Первое состояние – взаимодействие объекта с другим объектом, а второе – функционирование без взаимодействия. Примером являются энергетические гетерогенные системы, в которых можно выделить подмножества источников и приемников энергии [8].

В случае динамической топологии связей в робототехнической системе закон её перестроения может быть централизованным или децентрализованным. Второй подход более перспективен для систем с большим числом элементов, централизованная координация которых возможна при пространственно-временных ограничениях [9, 10].

Возможность одновременного взаимодействия более двух разнородных объектов системы определяется её спецификой. Например, система электроснабжения предприятия может иметь один или несколько источников энергии [11].

Известны подходы, где для анализа обменных процессов в сложных системах используются различные методы декомпозиции, сводящиеся к некоторым разбиениям множеств исходной системы на подмножества с установлением связей между последними [12–14]. При этом частью первоначальных связей между элементами пренебрегают как слабыми с тем или иным порогом.

Широко рассматриваются методы декомпозиции, позволяющие выделить быстрые и медленные процессы в динамических системах [15–19]. Наиболее применимы методы декомпозиции, основанные на выделении медленных и отбрасывании быстрых процессов, определяющих динамику системы [15–17]. Упрощенная модель, получаемая при отбрасывании быстрых составляющих, описывает медленные процессы, в системе [17]. Применение данного подхода к декомпозиции обусловлено возможностью выделить движения разного темпа протекания. Разная частота выделенных процессов может порождаться внутренними особенностями системы или вводится искусственно путем включения в систему звеньев с большими коэффициентами усиления, разрывными характеристиками и т.д. [17].

В общем случае в системе децентрализованного управления для каждой потенциальной пары взаимодействующих элементов есть возможность осуществления взаимодействия по некоторому целевому критерию. Определение целесооб-

разности взаимодействия производится системами управления самих элементов, входящих в пару. При этом учитывается предысторию предыдущих выборов компаньонов для взаимодействия, которые были сделаны каждым из элементов пары. Ниже мы рассматриваем систему управления взаимодействием элементов, отвечающую этим свойствам.

Постановка задачи. Рассматривается процесс функционирования обобщенной двусвязной технической системы, представляющей собой распределенную сеть, которая включает статическую и динамическую подсети. Статическая подсеть включает в себя неподвижные станции, выполняющие функции сопровождения движения и/или обслуживания автономных мобильных объектов, входящих в динамическую подсеть.

Ключевым процессом функционирования распределенной сети является взаимодействие между её элементами для достижения поставленной цели. Целью функционирования могут быть перемещение пассажиров и грузов между пунктами, мониторинг местности, картографирование и прочее. Взаимодействие между элементами распределенной сети может включать: информационный обмен, погрузку-выгрузку комплектующих, энергетический обмен.

Важным частным случаем распределенной сети является энергетическая сеть, которая выполняет дополнительные функции обслуживания мобильных объектов.

Распределенная сеть может быть автономной или координироваться оператором. Режим подключения оператора к распределенной сети для её координации и управления может быть произвольным.

Для эффективной работы распределенной сети не зависимо от наличия оператора в контуре управления она должна осуществлять функции децентрализованного управления.

Каждый из элементов распределенной сети снабжен блоком управления, служащим для анализа текущей ситуации, принятия решения о дальнейших действиях, запоминания результатов своего функционирования, и приемо-передающим устройством для оперативного обмена информацией с другими агентами системы. В данный блок управления входит модуль оценивания и адаптивного принятия элемента распределенной системы. Этот модуль принимает решения о дальнейшем поведении соответствующего элемента, анализирует текущие состояния всех остальных элементов распределенной сети, а также использует доступную информацию об их предыдущих состояниях и результатах взаимодействия данного элемента с другими.

Таким образом, рассматривается децентрализованная техническая система управления, которая оперирует с элементами двух разных типов и использует память о предыдущих состояниях системы.

В процессе движения мобильный объект может воспользоваться услугами одной из станций, расположенных на означенной территории. При выборе станции каждым отдельным мобильным объектом учитывается приобретенный ранее опыт. Кроме того, отдельные мобильные объекты периодически обмениваются таким накопленным опытом.

Введем понятие относительной эффективности $Obj_{\bar{C}l,q}$ объекта класса $\bar{C}l$ для другого объекта $Obj_{Cl,p}$ класса Cl в текущей ситуации s . Эта эффективность учитывается в процессе принятия решения о взаимодействии с некоторым объектом противоположного класса при достижении поставленной цели.

Введем в рассмотрение функционал $\Phi_{Cl\bar{C}l}(p, q, s)$, количественно выражающий введенное понятие относительной эффективности q -го объекта класса $\bar{C}l$ для p -го объекта класса Cl при их взаимодействии в отношении заданной базовой задачи. Этот функционал должен учитывать текущую ситуацию, накладывающую

пространственно-временные и энергетические ограничения на возможность взаимодействия $Obj_{Cl,p}$ и $Obj_{\bar{Cl},q}$, и накопленный опыт взаимодействия $Obj_{Cl,p}$ с объектами класса \bar{Cl} . Также возможен обмен накопленным опытом.

Потенциально возможное взаимодействие объектов $Obj_{Cl,p}$ и $Obj_{\bar{Cl},q}$ обозначим как $R_{Cl\bar{Cl}}(p, q)$.

Рассмотрим показатели, влияющие на значение функционала $\Phi_{Cl\bar{Cl}}(p, q, s)$. К ним относятся разность между имеющейся на станции энергией и требуемой БЛА энергией, с учетом его движения до станции, дополнительное времени на достижение станции, зарядку и возврат на целевую траекторию, точность оценивания времени движения БЛА до станции, возможность технического обслуживания данной станцией данного БЛА, возможность принятия груза, перевозимого данным БЛА на данной станции.

Показатели должны зависеть от вектора $X_{pq}(s)$ всех измеримых объектом Cl величин, влияющих на эффективность взаимодействия $R_{Cl\bar{Cl}}(p, q)$ и от вектора $\bar{X}_{qp}(s)$ всех измеримых объектом \bar{Cl} величин, влияющих на эффективность взаимодействия $R_{Cl\bar{Cl}}(p, q)$. Представим данные частные показатели в виде

$$\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}[X_{pq}(s)\bar{X}_{qp}(s)], k = 1, 2, \dots, K, \quad (1)$$

где K – число учитываемых показателей.

Вычислить точные значения показателей (1) на этапе принятия решения сложно, поэтому вводятся в рассмотрение их оценки:

$$\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{*(k)}[X_{pq}^*(s)\bar{X}_{qp}^*(s)], k = 1, 2, \dots, K, \quad (2)$$

где $X_{pq}^*(s)$ – оценка p -м объектом класса Cl вектора $X_{pq}(s)$; $\bar{X}_{qp}^*(s)$ – оценка q -м объектом класса \bar{Cl} вектора $\bar{X}_{qp}(s)$.

Будем считать, что частичный функционал $\Phi^{(k)}$ и его оценка $\Phi^{*(k)}$ монотонно растут с увеличением эффективности влияния k -го фактора на результат решения базовой задачи при прочих равных условиях.

Вектора оценок $X_{pq}^*(s)$ и $\bar{X}_{qp}^*(s)$ формируются в вычислительных блоках соответствующих объектов двух классов в результате прогнозирования процесса и результата взаимодействия $R_{Cl\bar{Cl}}(p, q)$.

Концепция взаимодействия разнородных элементов группы. Рассмотрим алгоритм нахождения функционала $\Phi_{Cl\bar{Cl}}(p, q, s)$, представленный на рис. 1.

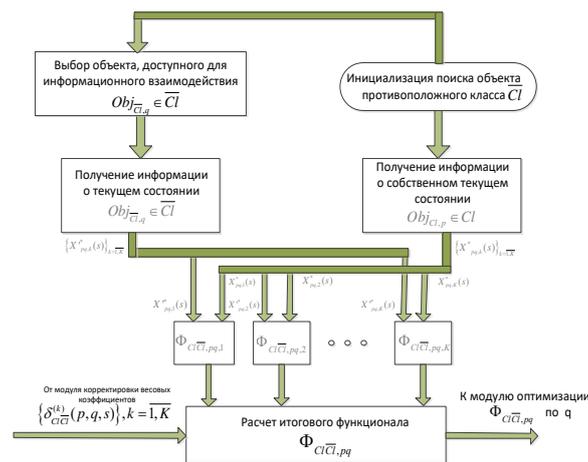


Рис. 1. Схема расчета целевого функционала для пары-кандидата на взаимодействие (p, q) в объекте класса Cl

Введем для каждой пары объектов $Obj_{Cl_1,p}$ и $Obj_{Cl_2,q}$ введено понятие области информационной видимости объекта $Obj_{Cl_2,q}$ объектом $Obj_{Cl_1,p}$ – такой окрестности вокруг $Obj_{Cl_1,p}$, в которой этот объект может принимать информационные сигналы от объекта $Obj_{Cl_2,q}$. При этом Cl_1 и Cl_2 могут принадлежать одному или разным классам. Будем считать такую область видимости шаром с некоторым радиусом $r_{Cl_1Cl_2}(p,q)$.

Вначале объект $Obj_{Cl_1,p}$ определяет необходимость запланировать взаимодействие с объектом противоположного класса, а далее – инициализировать соответствующий поиск. После этого устанавливается информационный обмен между данным объектом и всеми объектами класса \bar{Cl} , находящимися в области видимости объекта $Obj_{Cl_1,p}$. Затем от одного выбранного объекта $Obj_{\bar{Cl},q}$ из этой области принимается информация об оценках $\bar{X}_{qp}^*(s)$ вектора $\bar{X}_{qp}(s)$, влияющего на результат возможного взаимодействия $R_{Cl\bar{Cl}}(p,q)$. Аналогично, сам объект $Obj_{Cl_1,p}$ производит оценку $X_{pq}^*(s)$ вектора $X_{pq}(s)$, который также влияет на результат $R_{Cl\bar{Cl}}(p,q)$. В каждом из векторов $X_{pq}^*(s)$ и $\bar{X}_{qp}^*(s)$ могут быть выделены подмножества $X_{pq,k}^*(s)$, $\bar{X}_{qp,k}^*(s)$, $k=1,2,\dots,K$, влияющие на соответствующие оценки $\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)$ в выражении (2).

Для реализации указанного выше выбора необходимо, чтобы функционал Φ зависел не только от оценок $\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)$, но и от предыстории процессов взаимодействия $Obj_{Cl_1,p}$ с объектами класса \bar{Cl} :

$$\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}[X_{pqopt(p,s)}(u), \bar{X}_{qopt(p,s)p}(u)], u = 1, 2, \dots, s, \quad (3)$$

При этом для каждого объекта $Obj_{\bar{Cl},q}$ можно сформировать текущие весовые коэффициенты $\delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)$, $k=1,2,\dots,K$, интегрирующие в себе информацию об эффективности влияния каждого k -го показателя на результат взаимодействия $Obj_{Cl_1,p}$ с объектами класса \bar{Cl} на всех предыдущих этапах:

$$\delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s) = F \left\{ \Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}[X_{pqopt(p,u)}(u), \bar{X}_{qopt(p,u)p}(u)] \right\}, \quad (4)$$

где $qopt(p,u)$ номер объекта противоположного класса, с которым на s -шаге взаимодействовал объект с номером p класса Cl . Здесь рассматриваются нормированные коэффициенты:

$$\sum_{q=1}^{N_{\bar{Cl}}} \delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s) = \delta_{00}^{(k)}, \quad \sum_{k=1}^K \delta_{00}^{(k)} = 1, \quad (5)$$

где неотрицательные числа $\delta_{00}^{(k)}$ характеризуют степени относительного влияния частных показателей на общий функционал $\Phi_{Cl\bar{Cl}}(p,q,s)$. Таким образом, каждое число величина $\delta_{00}^{(k)}$ есть верхняя граница $\{\delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)\}$ веса k -го показателя для всевозможных значений номера q объекта класса \bar{Cl} . Очевидно, значения всех весов в общем случае обновляются на каждом u -шаге.

В итоге функционал $\Phi_{Cl\bar{Cl}}(p,q,s)$ есть некоторая функция от оценочных значений $\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}[X_{pq}^*(s), \bar{X}_{qp}^*(s)]$, $k = 1, 2, \dots, K$, а также от текущего набора весов $\delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)$, учитывающих предысторию процессов рассматриваемых взаимодействий.

Обозначим класс стационарных объектов как A , а класс динамических объектов обозначим через B .

Будем допускать также условия, когда выбор пары для взаимодействия определяется принудительно. Например, выбор может делать оператор, или ситуация, например, когда пара (p, q) принадлежит некоторой достаточно малой пространственной области, а остальные объекты находятся вне возможной зоны взаимодействия.

Если условия принудительного выбора не выполнены, то возможны следующие три случая взаимодействия между объектами статической и динамической подсистем.

В первом случае объекты обоих классов могут принимать решение о выборе наиболее подходящего для взаимодействия объекта противоположного класса для достижения поставленной задачи. Во втором случае выбирать объект противоположного класса для взаимодействия могут только объекты класса A . В третьем случае выбор объекта противоположного класса для взаимодействия могут осуществлять только объекты класса B .

Алгоритм принятия решения о взаимодействии в первом случае предьявляет больше ограничений на реализацию взаимодействия $R_{civ}(p, q)$ для произвольных p, q , по сравнению со второй и третьей стратегиями.

Алгоритм второго случая характеризуется отсутствием выбора объектами класса B наиболее подходящих для взаимодействия объектов класса A , при этом функционалы $\Phi_{BA}(q, p, s, q)$, а также соответствующие весовые коэффициенты и частные показатели не рассчитываются. Аналогично, алгоритм третьего случая характеризуется отсутствием выбора объектами класса A наиболее подходящих для взаимодействия объектов класса B , следовательно, здесь не рассчитываются функционалы $\Phi_{BA}(q, p, s, q)$ и соответствующие им величины.

Алгоритмы взаимодействий на примере системы подзарядки БЛА. Рассмотрим пример реализации рассмотренной выше распределенной обобщенной сети, включающей статическую и динамическую подсети. Пусть каждая станция снабжена модулем автоматической подзарядки БЛА. Группа БЛА образует динамическую распределенную подсеть, с которой должна взаимодействовать статическая система. В качестве базовой задачи, которую должна реализовать распределенная система, является организация оптимального по быстродействию транспортного потока между пунктами назначения, которыми являются станции подзарядки. Будем считать, что группа БЛА однородна, а часть станций снабжена модулями подзарядки БЛА.

Каждый БЛА, как только его энергетический запас снижается менее порогового значения, может приземлиться на одной из станций, снабженных модулем подзарядки. На другие станции БЛА может приземляться, чтобы доставить либо забрать для перевозки груз. Возможен случай, когда станция назначения используется БЛА и как станция подзарядки.

Особенную актуальность рассмотренное выше децентрализованное управление приобретает для энергетических зарядных станций на базе возобновляемых источников энергии. Такие станции целесообразно устанавливать в труднодоступных местах, где затруднена или экономически неэффективна централизованная подача электроэнергии, а также в местах, где пребывание человека-оператора обслуживания станций/ мобильных объектов по тем или иным причинам должно быть исключено.

Каждый модуль автономной подзарядки содержит: 1) платформу-носитель; 2) комплексную силовую энергетическую установку, состоящую, в общем случае, из ветроэнергетической установки и фотопреобразующих элементов, совместная работа которых регулируется единым блоком управления; 3) модуль заряда/ смены аккумуляторных батарей либо модуль беспроводной подзарядки; 4) модуль анализа энергетического состояния и прогнозирования работы; 5) модуль приема-передачи для обмена информационными сигналами с отдельными БЛА группы.

Заметим, что в данном случае целесообразно использовать ветроэнергетическую вертикально осевую установку, в частности, роторного типа, в силу её компактности и достаточной энергетической эффективности в сравнении с аналогами [21, 22].

На рис. 3 представлена приближенная конструкция автономной станции подзарядки при реализации контактного принципа восполнения энергии с помощью замены разряженных на борту БЛА батарей. На рис. 4: 1 – БЛА типа мультикоптер, 2 – ветроэнергетическая установка, 3 – фотопреобразующее устройство (солнечные панели), 4 – платформа для приземления БЛА с фиксаторами, 5 – зарядный отсек БЛА, где располагается и крепится батарея, 6 – манипуляционный агрегат, 7 – агрегат снятия-подачи батарей, 8 – устройство зарядки, 9 – каналы подачи электрической энергии от комплексной силовой энергетической установки.

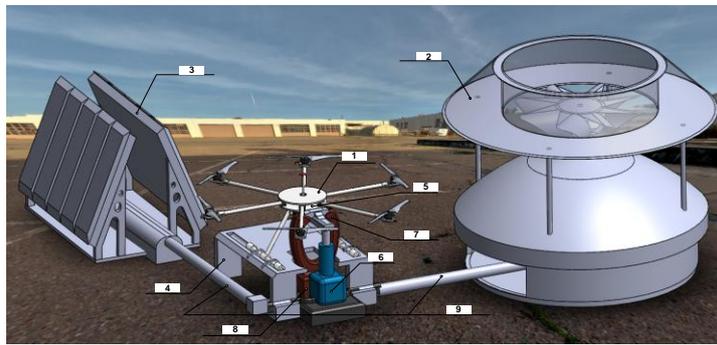


Рис 3. Внешний вид станции контактной подзарядки

Информация о текущих характеристиках БЛА, станции подзарядки, а также результатах стыковки и последующей подзарядки для каждой ситуации накапливается в модуле оценивания и адаптивного выбора. На каждом шаге происходит обобщение этой информации с корректировкой настроечных коэффициентов указанного выше критерия.

Модуль оценивания и адаптивного выбора i -го БЛА при возникновении необходимости подзарядки производит анализ всех возможных вариантов использования различных станций подзарядки согласно критерию максимизации функционала:

$$G_i(s, j) = \delta_{Eij}(s) \left\{ \pi - \arccos \frac{E_{ij}^*(s) - E_{n,ij}(s)}{E_{\max}} \right\} + \delta_{Tij}(s) \left\{ \pi - \arccos \frac{\Delta_T}{T_{ij}^*(k) + \Delta_T} \right\} \rightarrow \max, \quad (6)$$

где s – порядковый номер приземления, совершенного данным i -м БЛА; $E_{ij}^*(s)$ – заявленная j -й станцией оставшаяся энергия, доступная для данного БЛА с учетом обращений к этой станции других БЛА; $T_{ij}^*(k)$ – оцениваемое i -м БЛА время достижения целевой точки с учетом достижения j -й станции, подзарядки на ней, взлета и последующего движения до целевой точки; Δ_T – оценка верхней границы $T_{ij}^*(k)$; $E_{n,ij}(s)$ – оцениваемая потребность i -го БЛА в энергии заряда с учетом достижения j -й станции. Здесь

$$E_{n,ij}(s) = E_{n0,ij}(s) + E_{nT,ij}(s), \quad (7)$$

где $E_{n0,ij}(s)$ – потребность энергии i -го БЛА на момент связи с j -й станцией, $E_{nT,ij}(s)$ – оцениваемая им потеря энергии на достижение j -й станции и последующего возврата на исходную траекторию. Величина E_{\max} есть максимально возможная энергия, которая может быть выделена одному БЛА. Удельные коэффици-

енты $\delta_{Eij}(s)$ характеризуют среднюю степень востребованности накопленной на j -й станции свободной энергии для i -го БЛА с учетом всех предыдущих опытов получения/неполучения энергии этим БЛА на j -й станции.

Коэффициенты $\delta_{Eij}(s)$, $\delta_{Tij}(s)$ удовлетворяют условиям нормировки:

$$\sum_{i=1}^M \delta_{Eij}(s) = \delta_{E0}, \quad \sum_{i=1}^M \delta_{Tij}(s) = \delta_{T0}, \quad \delta_{T0} + \delta_{E0} = 1. \quad (8)$$

В результате оптимизации функционала (7) получаем станцию с номером $j=j_{opt}(s)$, обеспечивающую условие:

$$G_i(s, j_{opt}) = \max_{j \in [1, M]} [G_i(s, j)] \equiv G_{max, i}(s). \quad (9)$$

После каждого шага s параметры $\delta_{Eij}(s)$ пересчитываются по правилу:

$$\delta_{Eij}(s+1) = \eta_{ij}(s+1) / \sum_{i=1}^M \eta_{ij}(s+1), \quad \eta_{ij}(s+1) = \eta_{ij}(s) + e_{ij}(s), \quad (10)$$

$$e_{ij}(s) = \begin{cases} \pi - \arccos \frac{E_{ij}^*(s) - E_{n,ij}(s)}{E'_{max}}, & j = j_{opt}(s), \\ 0, & j \neq j_{opt}(s), \end{cases} \quad (11)$$

$E_{ij}^*(s)$ – действительное значение энергии, полученное i -м БЛА от j -й станции в s -й ситуации.

Аналогичным образом, параметры $\delta_{Tij}(s)$ пересчитываются по правилу:

$$\delta_{T,ij}(s+1) = \frac{\xi_{ij}(s+1)}{\sum_{i=1}^M \xi_{ij}(s+1)}, \quad \xi_{ij}(s+1) = \xi_{ij}(s) + q_{ij}(s), \quad (12)$$

$$q_{ij}(s) = \begin{cases} \frac{\Delta T}{T_{ij}^*(k) + \Delta T}, & j = j_{opt}(s) \\ 0, & j \neq j_{opt}(s), \end{cases} \quad (13)$$

В начальный момент времени, когда еще не произведено ни одной подзарядки, значения $\delta_{Eij}(1)$ инициализируются следующим образом:

$$\delta_{E,ij}(s=1) = \frac{\delta_{E0}}{M}, \quad \delta_{T,ij}(s=1) = \delta_{T0}/M. \quad (14)$$

Каждая станция получает сигналы запроса о подзарядке, приходящие от БЛА, и анализирует возможность реализации каждой такой подзарядки, исходя из своего текущего энергетического запаса и прогноза вырабатываемой ею мощности в ближайшем будущем. В ответ станция направляет каждому БЛА, пославшему ей запрос, ответный сигнал, в котором передается информация об энергии, которая может быть доступной для этого БЛА на этой станции в текущий момент времени. Далее модуль оценки и адаптивного заряда данного БЛА выбирает наиболее подходящую станцию с номером $j=j_{opt}(s)$ и посылает этой станции сигнал о намерении на ней приземлиться. Станция с номером $j_{opt}(s)$ после получения этого сигнала производит резервирование соответствующей части своей энергии под зарядку данного БЛА.

Эффективность адаптивного выбора подходящей станции каждый раз повышается за счет анализа накопленной к текущему моменту времени информации об опытах подзарядки данного БЛА. Станции, которые дают большее суммарное превышение заявленных над реально переданными данному БЛА энергиями, характеризуются меньшими удельными коэффициентами δ_{Ej} .

Указанные дисбалансы могут быть вызваны следующими факторами: 1) неточностью расчета значений энергии, которую станция может предоставить данному БЛА; 2) помехой в канале связи передачи информации об этой энергии;

3) спонтанными изменениями в условиях функционирования, приводящими к значительному снижению реальной энергии по отношению к соответствующей заявленной $E_{ij}^i(s)$; 4) непредвиденными изменениями на пути следования БЛА до станции. Например, если на этом пути следования возникает импульсная ветровая нагрузка, то время движения БЛА может быть значительно увеличено по сравнению с $T_{ij}^*(k)$, в результате чего реальная потребность БЛА в энергии заряда возрастет по сравнению с оценочным значением.

Рассмотренный здесь децентрализованный адаптивный выбор пар взаимодействующих объектов эффективен для энергетических распределенных систем, включающих станции подзарядки автономных мобильных объектов, в том числе БЛА, на базе возобновляемых источников ветровой и солнечной энергий.

Результаты моделирования. При моделировании будем полагать, что неподвижная часть системы представлена 18 станциями, расположенными в точках $\{A_m\}$, $m=1,2,\dots,M$, $M=18$. При этом часть неподвижных станций является станциями подзарядки: $U_{A,СП}=\{A_1,A_3,A_{10},A_{11},A_{12},A_{15},A_{16},A_{17},A_{18}\}$.

Пусть имеется три БЛА, которые получили от оператора путевые маршруты в следующем виде:

БЛА 1 – $A_1 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_5 \rightarrow A_{11} \rightarrow A_{10} \rightarrow A_1 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_8 \rightarrow A_6 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_9 \rightarrow A_1 \rightarrow A_7 \rightarrow A_8 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_9 \rightarrow A_2 \rightarrow A_1 \rightarrow A_{10}$;

БЛА 2 – $A_3 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_9 \rightarrow A_8 \rightarrow A_6 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_{11} \rightarrow A_{10} \rightarrow A_3 \rightarrow A_7 \rightarrow A_6 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_9 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_{11} \rightarrow A_9 \rightarrow A_6 \rightarrow A_9$;

БЛА 3 – $A_4 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_9 \rightarrow A_7 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8 \rightarrow A_{11} \rightarrow A_{10} \rightarrow A_4 \rightarrow A_3 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_9 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8 \rightarrow A_{11} \rightarrow A_4 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_9 \rightarrow A_7 \rightarrow A_6$.

Также задан временной интервал наблюдения за перемещениями БЛА T_{observ} .

В процессе выполнения маршрутных заданий БЛА имеют возможность подзарядиться на указанных станциях назначения, входящих в множество $U_{A,СП}$. Кроме того, они могут подзарядиться также и на станциях из множества $U_{A,СП}$, не входящих в маршрут. В этом случае будем говорить о вынужденной подзарядке. Заметим, что БЛА может оценивать все станции подзарядки, в том числе и те, которые не входят в число станций назначений его маршрута.

Проведем моделирование движения БЛА между пунктами назначения с возможными приземлениями на дополнительных станциях подзарядки.

В течение времени наблюдения T_{observ} разные БЛА выполняют в общем случае различные числа подзарядок s_1, s_2, s_3 . Интерес представляет динамика изменения весовых коэффициентов энергетического и временного факторов для каждой станции с точки зрения каждого из трех БЛА при изменениях номера этапа подзарядки.

Для первого БЛА реальный маршрут включает кроме исходных узловых точек также и дополнительные станции подзарядки.

Последовательность посещения $A_{СП}^{(1)}$ всех станций подзарядки для БЛА1, включая как принудительно определенные, заранее являющиеся узлами маршрута, так и выбранные свободно, следующая:

$$A_{СП}^{(1)} = [A_{16}A_{11}A_{10}A_1A_{17}A_{15}A_{17}A_7A_{17}A_{15}A_{10}A_1].$$

Аналогичным образом получим соответствующие последовательности для второго и третьего БЛА:

$$A_{СП}^{(2)} = [A_{10}A_{16}A_{15}A_{15}A_{11}A_{10}A_{11}A_{16}A_{15}A_{11}A_{10}A_{10}];$$

$$A_{СП}^{(3)} = [A_{14}A_{16}A_{17}A_{11}A_{10}A_{14}A_{18}A_{18}A_{10}A_{11}A_{15}A_{18}A_{18}A_{17}A_{17}].$$

Для каждого БЛА в крейсерском режиме: плотность воздуха $\rho=1.1225 \text{ кг/м}^3$; миделево сечение аппарата $S_{char}=0.06 \text{ м}^2$; коэффициент лобового сопротивления $c_x=0.1$; крейсерская скорость $V_k=20 \text{ м/с}$; максимальное значение энергии заряда одного БЛА $E_m=50 \text{ Вт*ч}$; пороговое значение энергии батареи БЛА, при достижении которого необходимо осуществлять подзарядку, $E_{pr}=20 \text{ Вт*ч}$; дальность связи одинаков для всех БЛА и станций $R_{inf}=500 \text{ м}$; масса аппарата $m=2.8 \text{ кг}$.

Согласно расчетам: средние значения сила тяги и её горизонтальной проекции для первого БЛА: $F_{u,x,k}=1.5 \text{ Н}$; $F_{T,x}=27.3 \text{ Н}$; средняя расходуемая им мощность на протяжении выполнения всей миссии $P_0=21.68 \text{ Вт}$; полная энергия, израсходованная всеми БЛА за период $T_{observ}=1.3 \text{ ч}$; 820 кДж; потребная мощность одной станции для подзарядки БЛА $P_{СП0}=34 \text{ Вт}$.

Расчет указанных летных, аэродинамических и энергетических величин базировался на упрощенных математических моделях: а) расходования энергии БЛА в процессе полета при отработке целевой траектории в условиях ветровых установившихся возмущений; б) выработки энергии станцией подзарядки на базе комплексной силовой энергетической установки, включающей ветроэнергетическую установку и фотопреобразующие элементы.

Расчет по разработанному методу децентрализованного управления применительно к рассматриваемой энергетической системе «группа БЛА + станции подзарядки» показал сокращение полного времени выполнения миссии группой БЛА на 6,2 % по сравнению с планированием без эффекта памяти, т.е. без учета оцененных результатов предыдущих подзарядок.

На рис. 4 представлены целевые (выделены красным) и реальные в рассматриваемом приближении траектории (выделены синим) всех БЛА (а, б, в – для 1, 2, 3 БЛА, соответственно) при отработке указанных выше маршрутных заданий.

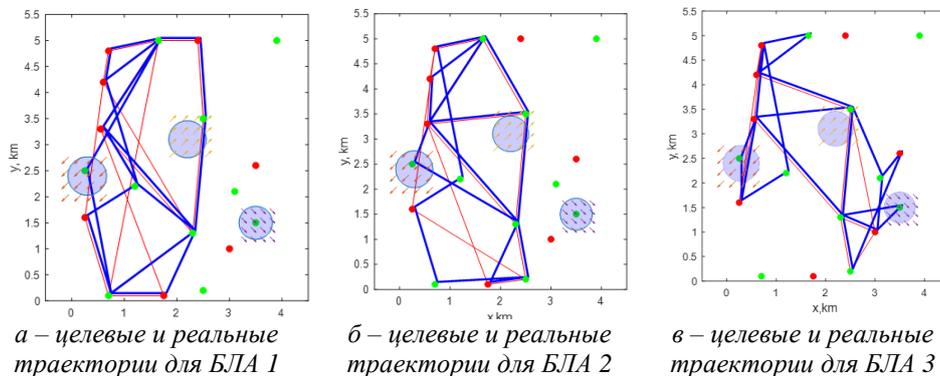
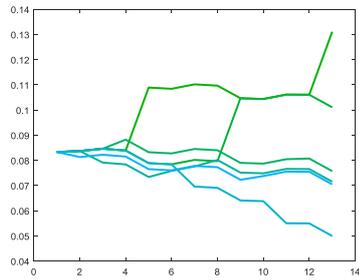


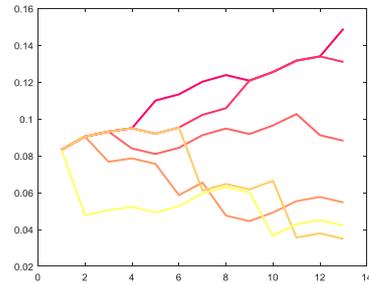
Рис. 4. Целевые и реальные траектории БЛА группы

Видно, что БЛА периодически вынуждены приземляться на станциях подзарядки, которых не было в исходных списках назначений. Это приводит к дополнительным ответвлениям от целевых траекторий в соответствующих реальных траекториях. Здесь также красными кружками выделены станции, не имеющие модулей подзарядки, а зелеными малыми кружками – станции подзарядки; зелеными большими кругами выделены области с дополнительными установившимися ветровыми возмущениями относительно средней скорости ветра $V_{w0}=20 \text{ м/с}$.

На рис. 5,а представлены зависимости весовых коэффициентов, определенных первым БЛА, для различных номеров этапов вынужденной подзарядки вплоть до последнего отсчетного $s_1=12$, $\delta_{E,1,q}(u)$, $u=1,2,\dots,12$, соответствующего выбранному интервалу наблюдения $T_{observ}=1.3 \text{ ч}$. На рис. 6,б показаны аналогичные зависимости, но для весов временного фактора $\delta_{T,1,q}(u)$.



а – зависимости весовых коэффициентов $\delta_{E,1,q}(u)$, нижняя ветвь – для A16, верхняя – для A17



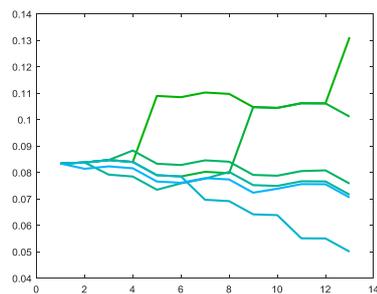
б – зависимости весовых коэффициентов $\delta_{T,1,q}(u)$, нижняя ветвь – для A16, верхняя – для A17

Рис. 5. Зависимости весовых коэффициентов $\delta_{E,1,q}(u)$ и $\delta_{T,1,q}(u)$, определенных первым БЛА на основании опыта подзарядок, приобретенного к каждому текущему этапу

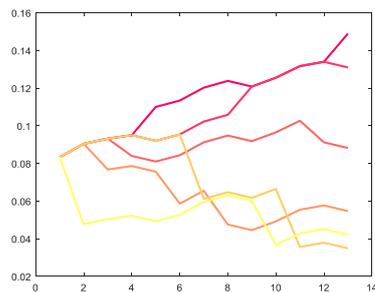
Из графиков, приведенных на рис. 5,а видно, что в энергетическом плане все станции для первого БЛА неодинаковы. Несмотря на то, что в рассматриваемом нами частном случае все станции энергетически эквивалентны, на доступную для данного БЛА энергию заряда играет роль также и тенденции к накоплению очередей для подзарядки на различных станциях. Последнее определяется, очевидно, расположением станций и характером маршрутных целевых траекторий движения БЛА. Кроме того, для незадействованных БЛА станций подзарядки их весовые коэффициенты автоматически будут в целом снижаться по сравнению с задействованными.

Из графиков, приведенных на рис.5 б, можно сделать вывод, что вес $\delta_{T,1,q}(u)$ станции A16 в итоге значительно снижается по сравнению со станциями A10 и A11, что можно объяснить наличием локального участка ветровой нагрузки β , усложняющей и замедляющей перемещения между станциями A7, A9, A10 и A11. Вес станции A14 также снижается, но в меньшей степени, чем это имеет место в отношении станции A16. При этом вес станции A17 значительно повышается, поскольку БЛА переориентируется именно на эту станцию после первой же неэффективной, по временным затратам, подзарядки на станции A16.

На рис. 6,а,б представлены аналогичные зависимости $\delta_{E,3,q}(u)$, $\delta_{T,3,q}(u)$, получаемые на борту третьего БЛА, при $s_3=15$.



а – зависимости весовых коэффициентов $\delta_{E,3,q}(u)$, нижняя ветвь – для A14, верхняя – для A18



б – зависимости весовых коэффициентов $\delta_{T,3,q}(u)$, нижняя ветвь – для A14, верхняя – для A18

Рис. 6. Зависимости весовых коэффициентов $\delta_{E,3,q}(u)$ и $\delta_{T,3,q}(u)$, определенных первым БЛА на основании опыта подзарядок, приобретенного к каждому текущему этапу

Из графиков, приведенных на рис. 6, можно сделать вывод, что веса $\delta_{T,3,16}(u)$, $\delta_{E,3,16}(u)$ станции A14, находящейся в зоне действия дополнительного ветрового потока со скоростью, в итоге значительно снижаются, а значения аналогичных весов для станции A18, на которую происходит частичная переориентация при планировании подзарядок третьим БЛА после первой же неэффективной подзарядки на станции A14, значительно растут по сравнению с соответствующими средними значениями весов на последней итерации.

Заключение. В настоящей работе разработана концепция взаимодействия подвижных и стационарных объектов системы, подразумевающая возможность выбора каждым агентом потенциального взаимодействия соответствующего компаньона. Базисом такого выбора является учет предыстории процесса, когда для принятия решения о выборе объекта для взаимодействия, используется как текущая информация о этих объектах на данный момент времени, так и оцененные результаты ранее сделанных выборов, показавших свою соответствующую эффективность с точки зрения некоторого целевого критерия.

Разработанная концепция конкретизирована для системы, объединяющей БЛА с неподвижными станциями их подзарядки. Рассмотрен алгоритм децентрализованного выбора пар взаимодействующих элементов типа «БЛА – станция подзарядки» на основе двух частных показателей – энергетической эффективности непосредственно самого процесса заряда, и полного времени, затрачиваемого мобильным объектом на достижение его целевой точки при выборе данной станции. Последний показатель важен при требовании оптимизации по быстродействию, например, грузооборота между станциями назначения. Оба этих фактора учитываются при выработке весовых коэффициентов, назначаемых каждой станции подзарядки.

Эффективность разработанного метода реализации выбора пар взаимодействующих элементов подтверждена моделированием энергетического обмена в распределенной системе «группа БЛА + станции подзарядки».

Полученные результаты могут быть применены для разработки робототехнических систем, обслуживающих БЛА в части их энергетической поддержки. Непосредственная сфера практического применения разработанного метода децентрализованного управления - для автономной подзарядки БЛА и их групп с зоной функционирования, которая может включать гористую местность, поверхность воды, труднопроходимый район лесных массивов и т.п., а также БЛА, функционирование которых должно происходить в местах радиационного заражения, очагов пожаров, северных районах и т.п.

Также представленная система может применяться в городских или сельских условиях, где ручной тип подзарядки хотя и может применяться, но значительно менее эффективен, чем автоматическая система подзарядки. Причем разрыв в эффективности двух этих типов подзарядки будет расти с увеличением числа БЛА, подлежащих обслуживанию, увеличением площади территории, которая должна быть покрыта данной группой БЛА в процессе своего функционирования, а также с увеличением времени функционирования группы БЛА на данной территории вследствие эффекта самообучения при принятии решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gupta L., Jain R. and Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, Vol. 18, No. 2, pp. 1123-1152. Doi: 10.1109/COMST.2015.2495297.
2. Hassija V., Chamola V., Krishna D.N.G. and Guizani M. A Distributed Framework for Energy Trading Between UAVs and Charging Stations for Critical Applications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, Vol. 69, No. 5, pp. 5391-5402. Doi: 10.1109/TVT.2020.2977036.

3. Li L., Wu J., Xu Y., Che J. and Liang J. Energy-controlled optimization algorithm for rechargeable unmanned aerial vehicle network, *2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Siem Reap, 2017, pp. 1337-1342. Doi: 10.1109/ICIEA.2017.8283046.
4. Hanyu A., Kawamoto Y. and Kato N. "On Improving Flight Energy Efficiency in Simultaneous Transmission and Reception of Relay Using UAVs," *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Tangier, Morocco, 2019, pp. 967-972. Doi: 10.1109/IWCMC.2019.8766559.
5. AI electrically charging system for drones, by M. Ippolito. (2016, January, 07). Patent ID WO 2016/113766.
6. Systems and methods for UAV battery exchange, by M. Wang. (2015, September, 22). Patent ID US 9139310B1.
7. Multi-use uav docking station systemis and methods, by N.K. Gentry, R. Hsieh, and L.K. Nguyen. (2016, July, 12). Patent ID US9387928B1.
8. Shevchenko V.A., and Medvedev M.Yu. Decomposition of a complex dynamic system with a network architecture, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 635, No 1, pp. 12-24, Doi: 10.1088/1757-899X/635/1/012024.
9. Elliott D., Keen, W. and Miao L. Recent advances in connected and automated vehicles, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, April 2019, Vol. 6, Issue 2, pp. 109-131. Doi: 10.1016/j.jtte.2018.09.005.
10. Di Silvestre M.L., Gallo P., Guerrero J.M., Musca R., Riva Sanseverino E., Sciumè G., Vásquez J.C., Zizzo G. Blockchain for power systems: Current trends and future applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, March, 2020, Vol. 119. Doi: 10.1016/j.rser.2019.109585.
11. Imdadullah S.M., Amrr M.S., Asghar Jamil, Ashraf I. and Meraj M. A Comprehensive Review of Power Flow Controllers in Interconnected Power System Networks, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 18036-18063. Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968461.
12. Hangos K.M. and Pózna A.I., Structural Decomposition and its Use in Qualitative Model-based Diagnosis of Complex Systems: Plenary Talk, *2019 IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Subotica, Serbia, 2019, pp. 13-14. Doi: 10.1109/SISY47553.2019.9111630.
13. Ghadami R. and Shafai B. Decomposition-Based Distributed Control for Continuous-Time Multi-Agent Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 58, No. 1, pp. 258-264.
14. Borrelli F., Keviczky T. Distributed LQR Design for Identical Dynamically Decoupled Systems // *IEEE Transactions on Automatic Control*, Sept. 2008, Vol. 53, Issue 8, pp. 1901-1912.
15. Yang J.P., Cheng G.H. and Xu Z. Dynamic Reduction of Large Power System in PSS/E, *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Dalian, 2005, pp. 1-4. Doi: 10.1109/TDC.2005.1546815.
16. Zhang M., Li Q., Liu C. and Zhang J. An Aggregation Modeling Method of Large-scale Wind Farms in Power System Transient Stability Analysis, *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Guangzhou, 2018, pp. 1351-1356. Doi: 10.1109/POWERCON.2018.8601652.
17. Blekhnman I.I., Indeitsev D.A., and Fradkov A.L. Slow motions in systems with inertial excitation of vibrations, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, February 2008, Vol. 37, Issue 1, pp. 21-27. Doi: 10.1007/s12001-008-1006-z.
18. Kamachkin A.M., Sogonov S.A., Shamberov V.N. The Decomposition Method in Issues of Researching Electric-Power Systems with Dry Friction, *Russian Electrical Engineering*, 2017, Vol. 88 (12), pp. 827-831. Doi: 10.3103/S1068371217120082.
19. Abgaryan K.A. Asymptotic decoupling of the equations for a linear automatic control system, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1966, Vol. 166, No 2, pp. 301-304.
20. Clancy L.J. Aerodynamics, 1st Edition, *Sterling Book House*, 2006, 610 p.
21. Kostjukov V.A., Medvedev M.Yu., Pavlenko D.D., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K. Investigation of a Rotor Speed Controlling of a Promising Wind-Driven Power Plant Using Several Variable Elements of its Geometry, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, Vol. 21, No 10, pp 599-608. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.21.599-608>.
22. Kostjukov V.A., Medvedev M.Y., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Bulanovich D.I., Pavlenko D.D. Control law synthesis of the wind-driven power-plant with variable geometry, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 2019, Vol. 19, No 23. Doi: 10.4108/eai.13-7-2018.157036.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

Костюков Владимир Александрович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: vakostukov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

Косенко Евгений Юрьевич – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Kostjukov Vladimir Aleksandrovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: vakostukov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; associated professor; senior researcher.

Medvedev Mikhail Yurjevich – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.

Kosenko Evgeny Yurevich – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; cand. of eng. sc.; associated professor; senior researcher.

УДК 629.5.061

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-189-203

Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич

**ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО
ПОДВОДНОГО АППАРАТА***

Целью исследования является организации электросети гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата, способного двигаться в широком диапазоне скоростей. Необходимость движения автономного подводного аппарата в широком диапазоне скоростей требует применения разнородных источников электроэнергии, работающих на различных физических принципах – аккумуляторных батарей и электрохимических генераторов, использующих реагенты из хранилища реагентов. Кроме того, для обеспечения потребителей электроэнергией с требуемыми параметрами (токами, напряжениями, объемами электроэнергии) необходимо применения дополнительных распределительных щитов, преобразователей напряжения, защитно-коммутационной аппаратуры, ключей. Использование дополнительного оборудования в электросети позволяет гибко конфигурировать электросеть с целью формирования энергии в объеме, согласованном с объемом потребляемой электроэнергии. С другой стороны, дополнительное оборудование вызывает потери электроэнергии в сети, и, соответственно, дополнительной электроэнергии. В связи с этим задача определения варианта организации электросети, при котором потери электроэнергии были бы минимальными, является актуальной. Для решения указанной задачи проанализированы особенности использования дополнительного оборудования в электросети, проанализировано потребление электроэнергии автономным необитаемым подводным аппаратом на различных этапах выполнения аппаратом маршрутного задания, определены минимальные и максимальные объемы потребления при движении автономного необитаемого подводного аппарата в различных скоростных режимах. Это позволило определить степень задействования разнородных источников электроэнергии в процессе выполнения маршрутного задания. По результатам анализа были сформированы альтернативные варианты электросети. Для выбора варианта организации, обеспечивающего минимальные потери электроэнергии, был сформирован целевой граф влияния потерь на отдельных устройствах электросети – на потери всей электросети, и с использованием метода распространения меток получены количественные оценки каждого из альтернативных вариантов. Получение количественных оценок по-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-08-00130.

зволити определить вариант организации электросети, обеспечивающей минимизацию потерь. Это позволяет, в свою очередь, сформулировать требования к функционированию элементов гибридной системы энергообеспечения, разработать алгоритмы управления. В целом полученный результат позволяет минимизировать расход энергоресурса в процессе движения автономного необитаемого подводного аппарата на всем протяжении выполнения маршрутного задания.

Автономный необитаемый подводный аппарат; гибридная система энергообеспечения; организация электрической сети; движение в широком диапазоне скоростей.

N.K. Kiselev, L.A. Martynova, I.V. Pashkevich

ORGANIZATION OF THE ELECTRIC NETWORK OF THE HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

The aim of the study is to organize the power grid of a hybrid power supply system for an autonomous underwater vehicle capable of moving in a wide range of speeds. The need to move the autonomous underwater vehicle in a wide range of speeds requires the use of heterogeneous sources of electricity operating on different physical principles - storage batteries and electrochemical generators using reagents from the reagent storage. In addition, in order to provide consumers with electricity with the required parameters (currents, voltages, volumes of electricity), it is necessary to use additional switchboards, voltage converters, protective switching equipment, keys. The use of additional equipment in the power grid allows you to flexibly configure the power grid in order to generate energy in an amount consistent with the amount of electricity consumed. On the other hand, additional equipment causes losses of electricity in the network, and, accordingly, additional electricity. In this regard, the task of determining the option for organizing the power grid, at which the loss of electricity would be minimal, is relevant. To solve this problem, the features of the use of additional equipment in the power grid were analyzed, the consumption of electricity by an autonomous underwater vehicle at different stages of a route assignment was analyzed, the minimum and maximum volumes of consumption were determined when an autonomous underwater vehicle moved in different speed modes. This made it possible to determine the degree of involvement of heterogeneous sources of electricity in the process of performing a route assignment. Based on the results of the analysis, alternative options for the power grid were formed. To select the option of the organization that ensures the minimum losses of electricity, a target graph of the effect of losses on individual devices of the power grid was formed - on the losses of the entire power grid, and using the method of distributing tags, quantitative estimates of each of the alternative options were obtained. Teaching quantitative assessments made it possible to determine the option of organizing an electrical network that minimizes losses. This allows, in turn, to formulate the requirements for the functioning of the elements of the hybrid power supply system, to develop control algorithms. In general, the result obtained makes it possible to minimize the consumption of energy resources during the movement of an autonomous underwater vehicle throughout the entire duration of the route assignment.

Autonomous underwater vehicle; a hybrid power supply system; the organization of an electrical network; movement in a wide range of speeds.

Введение. Совершенствование технологий создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) привело к возможности разработки многоскоростного АНПА для преодоления значительных расстояний в несколько тысяч километров [1]. В целях безопасности АНПА он должен иметь возможность двигаться наряду с традиционным экономичным режимом на низкой скорости также и в высокоскоростном режиме. При этом для движения АНПА в широком диапазоне скоростей используют различные источники электроэнергии, каждый из которых наиболее эффективен в одном из скоростных режимов. Вследствие этого, в отличие от традиционно используемой аккумуляторной батареи в качестве источника электроэнергии, обеспечивающей движение АНПА только в режиме экономичного хода, возникла необходимость реализации гибридной системы энергообеспечения (СЭО), допускающей движение АНПА как в режиме экономичного хода, так и в высокоскоростном режиме.

Гибридная СЭО включает в свой состав разнородные источники электроэнергии, работающие на различных физических принципах – аккумуляторные батареи (АБ) и электрохимические генераторы (ЭХГ), использующие реагенты из хранилища реагентов (ХР). Кроме того, при движении и маневрировании АНПА на различных скоростях используются различные исполнительные устройства, отличающиеся не только принципом действия, но и потребляемым значением тока, меняющимся с течением времени. Вследствие этого для обеспечения потребителей электроэнергией с требуемыми параметрами (значения напряжения и тока) необходимо применение дополнительного оборудования: распределительных щитов (РЩ), многоканальных преобразователей напряжения (МПН), защитно-коммутиционной аппаратуры, ключей. Использование дополнительного оборудования позволяет гибко реконфигурировать электросеть с целью формирования электроэнергии в объеме, согласованном с объемом потребляемой электроэнергии и, тем самым, минимизировать потери электроэнергии в электросети. С другой стороны, использование дополнительного оборудования само по себе вызывает потери электроэнергии в сети. В связи с этим необходимо выбрать такой состав дополнительного оборудования, вариант его размещения в электросети и параметры оборудования, чтобы потери электроэнергии в сети были бы минимальными. От того, насколько удачно удастся осуществить выбор оборудования и организовать электросеть, зависят алгоритмы управления переключениями и подключениями дополнительного оборудования [2]. В результате возникает задача организации электросети так, чтобы при обеспечении всех потребителей электроэнергией дополнительное оборудование электросети позволяло ее оперативно реконфигурировать, с одной стороны, и при этом возникающие потери электроэнергии в электросети были бы минимальными.

Ввиду новизны разработки многоскоростного АНПА и использования гибридной СЭО ранее такая задача не рассматривалась. Применение гибридной СЭО на обитаемом подводном объекте допускает потери на преобразование уровней напряжения и доставку электропитания потребителям, равную половине от полезной мощности. При управлении движением автономного необитаемого подводного аппарата выработка параметров исполнительных механизмов происходила без учета их энергопотребления, полагая, что энергоресурса на борту аппарата достаточно. Ранее практически все разрабатываемые АНПА предусматривали движение в режиме экономичного хода – до 7 уз. Высокоскоростные автономные подводные аппараты одноразового применения также, несмотря на движение в двух режимах – поисковом и маршевом – использовали одни и те же исполнительные механизмы и источник электроэнергии – аккумуляторную батарею, поскольку время жизни таких аппаратов исчислялось минутами. В отечественной и зарубежной литературе публикации по разработке многоскоростного АНПА практически отсутствуют из-за новизны задачи и новизны технического решения, связанного с применением гибридной СЭО на борту АНПА. В зарубежных источниках уделено достаточно внимания особенностям использования гибридных СЭО на борту АНПА, однако в них не раскрываются детали принятых технических и алгоритмических решений. Этим определяется новизна решаемой задачи и предлагаемого решения.

Цель работы – организация электросети АНПА, обеспечивающая при движении АНПА в широком диапазоне скоростей минимальные потери электроэнергии.

Постановка задачи. Пусть имеется гибридная СЭО, представляющая собой совокупность источников электроэнергии (АБ и ЭХГ с КХ) и систему распределения и передачи электрической энергии потребителям. Одним из важнейших элементов гибридной СЭО является электросеть. Под электрической сетью будем по-

нимать участок гибридной СЭО, включающий в себя совокупность РЩ, МПН, защитно-коммутационной аппаратуры, ключей и соединяющих их электрических линий (далее по тексту – шин), а также – потребителей [3, 4].

Под шиной будем понимать электротехническое устройство для передачи электроэнергии между источниками электроэнергии, оборудованием электросети и потребителями. Под многоканальными преобразователями напряжения будем понимать оборудование, предназначенное для понижения или повышения напряжения до значений напряжения, на котором работают потребители. Под распределительными щитами будем понимать электрические щиты, в которых происходит распределение электроэнергии по элементам сети и потребителям, содержат элементы системы защиты при аварийных ситуациях, связанных с перегрузками и короткими замыканиями. Под ключами (коммутационная аппаратура) будем понимать оборудование, предназначенное для подключения/отключения элементов электросети или их частей, а также потребителей к шинам. Под потребителями будем понимать приборы, устройства, механизмы или системы АНПА, для работы которых необходима электроэнергия.

На рис. 1 приведена структурная схема электросети гибридной СЭО АНПА.

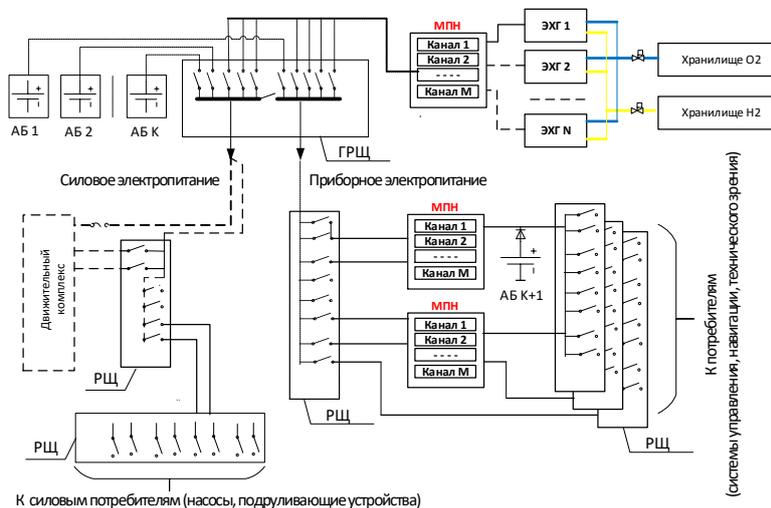


Рис. 1. Структурная электрическая схема гибридной СЭО АНПА

В верхней левой части рис. 1 изображены источники тока – аккумуляторные батареи (АБ 1...АБ К) и электрохимические генераторы (ЭХГ 1...ЭХГ N), использующие в качестве топлива реагенты из системы хранения реагентов (топлива). Между ними условно показан РЩ и две линии шин для приборного и силового электропитания, отличающиеся уровнем потребляемого тока. В нижней части рис.1 по центру схематично показаны МПН, слева – наиболее энергоемкий и основной потребитель энергии – двигательный комплекс, обеспечивающий движение АНПА в морской среде, справа – ключи и шины, к которым происходит подключение потребителей.

Необходимо так организовать электрическую сеть, чтобы она гибко реагировала на смену скоростных режимов движения АНПА, с одной стороны, и обеспечивала всех потребителей электроэнергией, с другой стороны. Под организацией электрической сети будем понимать пространственно-распределенное размещение источников электроэнергии, РЩ, МПН и ключей, параметры коммутационной аппаратуры (количество каналов и номинальные токи каждого канала).

Для того, чтобы определить вариант организации электросети, обеспечивающий минимизацию потерь электроэнергии, необходимо, прежде всего, обоснованно сформировать возможные варианты организации электросети, и затем на множестве альтернативных вариантов выбрать тот, который бы обеспечивал минимизацию потерь электроэнергии.

Формирование альтернативных вариантов организации электросети. В гибридной СЭО предлагается сформировать отдельные модули, которые при пониженном токопотреблении могут быть отключены с помощью ключей, а при повышенном – частично или полностью – подключены. При этом, однако, при прохождении тока через шины, соединенные ключами, возникают потери электроэнергии, приводящие к повышению температуры окружающей среды и перерасходу электроэнергии. В результате складывается ситуация, при которой, с одной стороны, поддержание постоянно высокого уровня тока при частичном его использовании приводит к потерям электроэнергии, а, с другой стороны, использование ключей для подключения/отключения необходимого дополнительного оборудования к электросети – также приводит к потерям.

Минимизация потерь в электросети может быть рассмотрена как так называемое нефункциональное требование [5] – в отличие от функционального требования, выраженного доставкой электроэнергии от источников к потребителям в заданном объеме и с заданными параметрами.

Минимизация потерь может быть получена путем:

- ♦ минимизации потребления за счет перекоммутации потребителей между шинами и исключения избыточного генерирования электроэнергии;

- ♦ минимизации потерь на преобразователях энергии;

- ♦ минимизации потерь на коммутационно-защитной аппаратуре (ключах).

Электрическая энергия, затрачиваемая на потребителей, определяется их нуждами.

Минимизация потерь возможна при соблюдении следующих положений:

- ♦ целесообразно использовать ровно такое количество каналов многоканального преобразователя, которое обеспечивало бы максимально близкие токи к токам потребления;

- ♦ целесообразно переключать потребителей так, чтобы номинальные токи шины были максимально приближены к токам потребления;

- ♦ целесообразно использовать каналы в РЩ и в преобразователях для дифференцированного подхода к передаче энергии потребителям и исключения перерасхода энергии;

- ♦ минимизировать, по возможности, дополнительное оборудование, поскольку используемое промежуточное дополнительное оборудование в электросети (дополнительные ключи, РЩ и МПН) приводит к потерям электроэнергии.

Ниже на рис. 2 приведены примеры возможных вариантов соединения дополнительного оборудования в электросети.

Самый экономичный вариант с точки зрения потерь на оборудовании – это его исключение и подключение потребителей к источникам напрямую, как это представлено на рис. 2 слева. Тогда энергия в сети соответствовала бы токам и напряжению потребления, и потери были бы близки к нулю.

Однако такой вариант невозможен для многоскоростных АНПА из-за несоответствия напряжения источников напряжению потребителей, в связи с чем необходимо использовать многоканальные преобразователи постоянного напряжения, обеспечивающие формирование напряжения, соответствующего напряжению потребителей, и вместе с тем – приводящего к потерям в электросети. Поэтому в данном случае минимизация потерь в сети определяется минимизацией потерь на преобразователях.

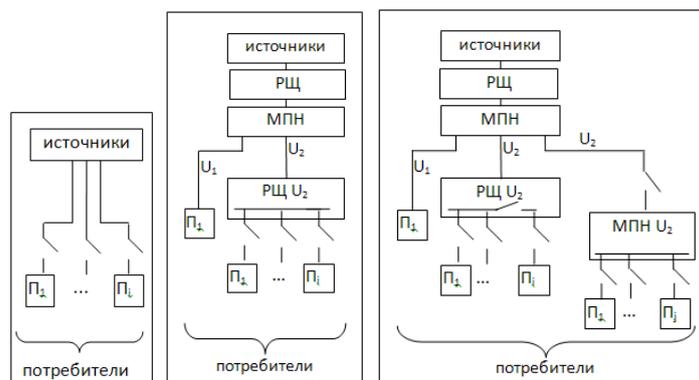


Рис. 2. Варианты соединения дополнительного оборудования электросети

Минимизировать потери на преобразователях можно путем использования перед ними РЩ, в котором оставить постоянно запитываемыми каналы только для постоянно работающих систем АНПА, а каналы под разово используемые приборы и системы замыкать в РЩ ключами.

Далее в результате проведенного анализа потребления выявлено, что приборы и устройства характеризуются двумя вариантами напряжения: U_1 и U_2 , в связи с чем потери надо снижать в электросети для напряжения U_2 (рис. 2, по центру). Для дифференцированного использования шин и снижения потерь целесообразно в сеть дополнительно добавить ключи, замыкающие токопроводы в случае периодического использования потребителей для указанных напряжений (рис. 2, справа). РЩ организован таким образом, что к каждому каналу подключена с использованием ключа шина, номинальный ток которой совпадает с током канала РЩ. Как преобразователи, так и РЩ, могут иметь произвольное количество каналов, характеризуемых напряжением и номинальным током. В результате такую сложную электросеть, включающую дополнительное оборудование, можно организовать по-разному. Количество подключаемых/отключаемых каналов РЩ и МПН, характеризуемых напряжением и номинальным током, зависит от характеристик потребителей: напряжения, потребляемого тока или его диапазона, продолжительности включения, интервалами между включениями.

В связи с этим дальнейший выбор вариантов организации электросети опирается на результаты анализа потребления электроэнергии АНПА на различных этапах выполнения маршрутного задания.

Анализ потребления электроэнергии. Все системы, приборы, устройства и механизмы, являющиеся потребителями электроэнергии, разделим условно на постоянно используемые и периодически используемые. И постоянно используемые потребители, и периодически используемые в процессе движения АНПА меняют ток потребления в зависимости от сложившейся ситуации.

В связи с этим при увеличении токопотребления целесообразно с помощью ключей подключать дополнительных потребителей к шинам с учетом тока потребления; соответственно, при уменьшении тока потребления – целесообразно отключать дополнительных потребителей от шины.

Проанализируем возникновение максимального и минимального токов потребления на различных участках маршрутного задания, а также ситуации, в которых они возникают, периодичность и продолжительность пиковых и минимальных значений токов в этих ситуациях. Минимальный ток потребления определяется нуждами постоянно используемого оборудования АНПА на участках установив-

шегося движения АНПА. При изменении параметров движения возникает некоторое повышение расхода энергоресурса, связанное с переходными процессами и затрачиваемое на использование исполнительных механизмов маршевого движительно-рулевого комплекса. Максимальный ток потребления возникает при переходе АНПА в высокоскоростной режим движения. Для оценки максимального токопотребления были проанализированы результаты моделирования, полученные с использованием ранее разработанной математической модели [6]. В [7] описаны результаты численного эксперимента, направленные на оценку энергопотребления на наиболее энергоемких этапах выполнения АНПА маршрутного задания, связанных с набором скорости. Рассматривались различные значения целевой скорости, до которых АНПА должен был разогнаться: от $0,5 V_{ЭК}$ до $V_{ВС}$ (здесь $V_{ЭК}$ и $V_{ВС}$ – некоторые номинальные значения скоростей АНПА в режиме экономичного хода и в высокоскоростном режиме соответственно). Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 3 слева, по горизонтальной оси отложено время в тактах имитации, представляющих собой некоторый постоянный промежуток времени при моделировании, через который происходит оценка изменения состояния рассматриваемых объектов, по вертикальной оси – электроэнергия, кВт·ч.

Полученные результаты позволили получить зависимости времени потребления электроэнергии от уровня потребления на наиболее энергоемком разгонном участке движения АНПА. На рис. 3 справа представлена зависимость длительности потребления от потребляемой электроэнергии. По горизонтальной оси отложена длительность потребления T , измеряемая в тактах имитации, по вертикальной оси – уровень потребления Q , измеряемый в кВт·ч.

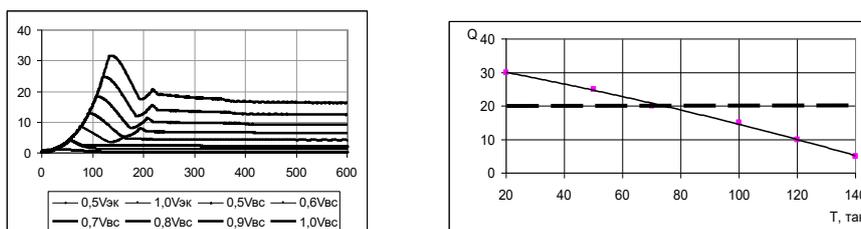


Рис. 3. Изменение потребления энергии с течением времени (слева) и зависимость длительности повышенного потребления от уровня потребления (справа)

Затраты в электросети определяются соотношением потерь на содержание каналов и при прохождении тока через ключи. Выбор между содержанием каналов и ключами определяется по некоторому уровню потребляемой электроэнергии, представленной на рис.4 горизонтальной линией, например, на уровне 20 кВт·ч.

Положение линии определяется следующим: если при использовании ключей затраты энергии – выше, чем на содержание, то линия будет расположена выше, то есть будут происходить с использованием ключей разовые редкие подключения. Если же на содержание каналов энергии требуется больше, чем потери на ключах в случае их подключения, то горизонтальная линия будет расположена ниже. Данные по номинальным потерям потребителей и потреблением заимствуются из технических условий на приборы, системы, устройства и механизмы.

Положение линии означает следующее: для потребителей с потреблением ниже линии целесообразно поддерживать каналы в резервном состоянии, так как они большую часть времени задействованы. Для потребителей с потреблением выше линии надо использовать ключи, так как потребители редко используются, и потери на ключах – меньше затрат на «холостое» содержание редко используемых каналов.

Периодичность и продолжительность использования режимов с повышенным энергопотреблением определяется периодичностью тактических эпизодов, которые, в свою очередь, определяются маршрутным заданием и текущей ситуацией.

На следующем этапе исследований осуществлялся выбор вариантов организации электросети, обеспечивающей минимизацию потерь электроэнергии.

Полученные результаты минимального и максимального потребления электроэнергии позволяют определить конфигурацию электросети: при минимальном потреблении целесообразно использовать по одному преобразователю напряжения в носовом и кормовом модулях, а РЩ организовать так, чтобы часть каналов и дополнительные РЩ – были отключаемыми с помощью ключей.

Однако при этом возникает вопрос выбора не только конфигурации электросети, но и параметров ее оборудования – количества каналов и их параметров (токи и напряжения) РЩ и МПН, пространственно-распределенное размещение ключей и их подключение.

Для решения указанной задачи выбора параметров были использованы наряду с качественными результатами анализа размещения оборудования электросети – количественные оценки вариантов организации, обеспечивающих минимизацию потерь. Последнее необходимо для того, выявить преимущества одного варианта организации электросети перед другим. Поэтому на следующем этапе исследований были получены количественные оценки каждого из вариантов.

Количественные оценки вариантов организации электросети. Получение количественных оценок потерь каждого из вариантов организации электросети возможно путем проведения натурного эксперимента или путем численного эксперимента с использованием математических моделей функционирования электросети и ее элементов. И в том, и в другом случае необходимо воспроизведение функционирования гибридной СЭО и АНПА в ходе выполнения маршрутного задания. Однако, как отмечалось во введении, организация электросети накладывает определенные требования на реализуемый функционал, связанный с передачей электроэнергии от источников тока к потребителям. И вопрос организации электросети необходимо решать до того, как будут формироваться функциональные требования к работе электросети.

В данной работе предлагается принципиально новое решение рассматриваемой задачи, основанное на оценке различных альтернативных вариантов организации системы по степени удовлетворения так называемых нефункциональных требований.

Основным требованием при организации электросети является минимизация потерь электроэнергии, представляющее собой, по сути, так называемое нефункциональное требование, не связанное с обеспечением непосредственной передачи электроэнергии от источников к потребителям.

Размер фактических потерь электрической энергии в электрических сетях определяется разностью между выработанной энергией источниками энергии и потребленной на работу приборов. Таким образом, потери в электросети определяются энергией, затрачиваемой на содержание каналов и на использование дополнительного оборудования.

Проанализируем факторы, оказывающие влияние на минимизацию потерь электроэнергии при использовании дополнительного оборудования: РЩ, МПН, ключах для подключения каналов.

Потери на РЩ определяются затратами энергии на содержание РЩ и его каналов. Аналогичным образом потери определяются на МПН.

Потери на каналах определяются количеством каналов, предназначенных для периодически используемых потребителей, временем использования каждого канала, периодом времени между использованием каждого канала, номинальным током каждого канала.

При использовании ключей для периодического использования каналов также возникают потери.

Пусть в электросети, представленной на рис. 2 по центру и справа, потребитель тока электроэнергии с напряжением U_1 – постоянный. Тогда потери в электросети, представленной в центральной части рис. 2 (назовем его «Вариантом 1»), определяются: потерями на РЩ; потерями на МПН; потерями на РЩ U_2 ; потерями на каналах, замыкаемых периодически ключами $\Pi_1 \dots \Pi_i$.

При рассмотрении электросети, представленной в правой части рис. 2 (назовем его «Вариантом 2»), потери в электросети определяются: потерями на РЩ; потерями на МПН; потерями на РЩ U_2 ; потерями на МПН U_2 ; на каналах, замыкаемых периодически ключами $\Pi_1 \dots \Pi_i$; потерями на каналах, замыкаемых периодически ключами $\Pi_1 \dots \Pi_j$.

Вариант организации электросети, расположенный справа на рис. 2 отличается от электросети, расположенной в центральной части рис. 2, наличием ключа в РЩ U_2 и наличием ключа в МПН U_2 .

При отсутствии ключа прямое подключение модуля электросети, работающего периодически, вызывает потери электроэнергии на поддержание рассматриваемого модуля под напряжением даже в период неиспользования данного модуля. Поэтому потери определяются затратами энергии на поддержание модуля в нерабочем состоянии.

В «Варианте 1» прямое подключение канала при использовании канала – не вызывает возникновения потерь, так как отсутствует ключ; в то же время поддержание канала под напряжением в промежутках между его использованием не способствует минимизации потерь. В «Варианте 2» использование ключа положительно скажется на минимизации потерь, так как при этом происходит отсутствие затрат на поддержание в рабочем состоянии подключаемого канала; в то же время при подключении канала через ключ возникают потери. И в «Варианте 1», и в «Варианте 2» степень влияния на минимизацию потерь определяется: промежутком времени между использованием канала; временем использования канала; электроэнергией, затрачиваемой на содержание канала; номинальным значением тока канала.

По многоканальному дополнительному оборудованию – РЩ и МПН – на минимизацию потерь влияние оказывает количество каналов и их номинальные значения токов.

Таким образом, анализ рассматриваемых вариантов 1 и 2 показал, что есть факторы, позитивно влияющие на минимизацию потерь, а есть факторы, негативно влияющие на минимизацию потерь. Поэтому для того, чтобы осуществить выбор между «Вариантом 1» и «Вариантом 2», необходимо получение количественных оценок каждого из вариантов. Для этого был сформирован целевой граф. Целью в графе является минимизация потерь, а подцелями, оказывающими влияние на степень выполнения цели, является минимизация потерь на отдельных элементах электросети – МПН, РЩ и ключах. Вид целевого графа представлен на рис. 4.

У построенного целевого графа (рис. 4) в нижней части расположены альтернативные варианты организаций электросети: «Вариант 1» и «Вариант 2». Ребра между факторами (показателями) на среднем уровне и нефункциональными требованиями (верхний уровень) характеризуют влияние показателей на выполнение нефункциональных требований, а ребра между нижним и средним уровнями графа характеризуют влияние вариантов организации на показатели. Все ребра характеризуются весовыми коэффициентами w_i переходов от одного узла к другому.

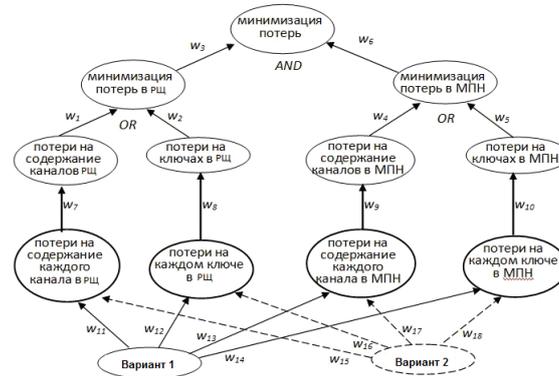


Рис. 4. Вид целевого графа для минимизации потерь электроэнергии в электрической сети гибридной СЭО АНПА

В данном случае потери в каждом канале объединены в один узел графа, который выделен, соответственно, жирной линией, имея в виду, что в одном узле – несколько каналов, а от них идет несколько токопроводов к потребителям, и потери возможны в каждом из каналов. При этом потери в каждом канале известны, токопотребление каждым дополнительным оборудованием электросети – системой, прибором, устройством и исполнительными механизмами – известны, поэтому можно заранее спрогнозировать возможный расход энергии на отдельных участках маршрутной траектории, и потери при использовании преобразователей, РЩ, ключей.

Для получения количественных оценок «Варианта 1» и «Варианта 2» организации сети целесообразно использовать метод, базирующийся на зарубежных источниках [8–15] и используемый ранее авторами для выбора архитектуры мультиагентной системы управления АНПА [16–20]. При использовании метода, в отличие от натурального эксперимента или моделирования, не требуется воспроизведение движения АНПА и оценки потерь на отдельных этапах выполнения маршрутного задания.

Каждый узел графа охарактеризуем парой чисел (Sat ; Den), где Sat (Satisfied – удовлетворение) указывает на повышение степени достижения цели, а Den (Denied – отрицание) – на снижение степени достижения цели.

В рассматриваемой задаче варианты организации электросети отличаются степенью снижения потерь. В «Варианте 1» при использовании рассматриваемого канала Sat и Den не меняется. В промежутках между использованием канала Sat не меняется, а вот Den (негативное влияние на снижение помех) – усугубляется, так как в это время происходит расход электроэнергии на поддержание напряжения в канале. При этом возникает вопрос степени влияния на изменение Den. В «Варианте 2» подключение канала не меняет Sat, так как позитивного в плане снижения помех ничего не происходит, а вот на Den оказывается влияние, так как использование ключа вызывает возникновение помех. В промежутках между подключением канала Sat и Den не меняются. И в «Варианте 2» – также возникает вопрос степень влияния на изменение Den.

Степень влияния помех на изменение Den в обоих рассматриваемых вариантах характеризуются теми самыми весовыми коэффициентами w_i , о которых говорилось выше.

Значения весовых коэффициентов w_i определяются: значением потребления энергии периодически включаемыми потребителями; периодичностью использования периодически включаемых потребителей; оценками потерь электроэнергии при прохождении через ключи; оценками потерь электроэнергии в каналах РЩ и МПН при отсутствии подключения к ним потребителей.

Определение значений весовых коэффициентов связано с «вкладом» потерь на содержание резервных каналов или использования ключей – в общие потери электросети.

Вклад в потери электросети определяется: затратами на дополнительное оборудование электросети; периодичностью и продолжительностью использования режимов с повышенным потреблением.

Если имеются априорные данные прогноза возникновения таких ситуаций, то они могут быть учтены при определении значений весовых коэффициентов w_i ; $w_i \in [\text{inf}; \text{sup}]$, где $\text{inf} = 0$, $\text{sup} = 1$.

После того как сформирован целевой граф и определены значения весовых коэффициентов, определялись количественные оценки каждого из рассматриваемых альтернативных вариантов организации электросети.

Для этого использовался алгоритм распространения меток [21], в результате чего формировалась итоговая оценка каждого j -го варианта организации электросети в виде пары вещественных чисел $(\text{Sat}_j; \text{Den}_j)$.

Выбор варианта организации электросети. Для проведения сравнительного анализа на множестве альтернативных вариантов организации электросети и выбора варианта организации, обеспечивающего минимальные потери, использован критерий, описанный и обоснованный в [14], в соответствии с которым сначала отбираются варианты организации, у которых $\text{Sat}_j > \text{Den}_j$, а затем из отобранных вариантов выбирается тот вариант организации, у которого $\text{Sat}^* = \max\{\text{Sat}_j\}$. При равных Sat_j выбирается $\text{Den}^* = \min\{\text{Den}_j\}$. Именно этот вариант и обеспечивает минимизацию потерь электросети гибридной СЭО АНПА.

Пусть при выборе «Варианта 1» и «Варианта 2» используются следующие исходные данные: канал, который в варианте 1 постоянно запитан, а в варианте 2 подключается ключом, рассчитан на 10 А; на содержание канала затрачивается ток 0,2 А; потери при протекании тока через ключ составляют 3 Вт, или 0,012 А; канал используется 30 мин в сутки; каналы в РЩ и каналы в МПН, которыми отличаются альтернативные варианты организации, характеризуются одинаковыми параметрами по времени работы и току.

Для «Варианта 1» весовой коэффициент w_{11} на потери в промежуток времени между использованием канала определяется произведением доли времени использования за сутки – на долю теряемой энергии по отношению к потребляемой в данном канале в случае его использования (составляет 0,98, поскольку канал используется лишь 30 мин в сутки) – на долю энергии по отношению к потребляемой, то есть $0,2/10 = 0,02$. В результате произведения $0,98 * 0,02$ получаем $w_{11} = 0,02$ – влияние на Den. Весовой коэффициент потерь при использовании ключа составляет $w_{12} = 0,0$. Весовой коэффициент потерь на содержание канала в МПН составляет аналогично $w_{13} = 0,02$. Весовой коэффициент потерь на использование ключа в МПН составляет $w_{14} = 0,0$.

Для «Варианта 2» весовой коэффициент на потери в промежуток времени между использованием канала равен 0, то есть $w_{15} = 0,0$ и $w_{17} = 0,0$. Весовой коэффициент w_{16} на потери при подключении канала ключом определяется произведением доли времени подключения (составляет 0,02, поскольку канал используется лишь 30 мин в сутки) – на долю теряемой энергии по отношению к потребляемой в данном подключенном ключом канале, то есть $0,012/10 = 0,0012$. В результате произведения $0,02 * 0,0012$ получаем $w_{16} = 0,000024$ влияния на Den. Этому же значению равен и весовой коэффициент w_{18} .

Поднимаясь выше по графу, получаем следующие значения весовых коэффициентов потерь в РЩ и МПН.

Для «Варианта 1»: весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в РЩ на содержание каналов $w_7 = w_{11} = 0,02$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в РЩ на использование ключа $w_8 = w_{16} = 0,0$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в МПН на содержание каналов $w_9 = w_{13} = 0,02$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в МПН на использование ключа $w_{10} = w_{18} = 0,0$.

Для «Варианта 2»: весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в РЩ на содержание каналов $w_7 = w_{11} = 0,0$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в РЩ на использование ключа $w_8 = w_{16} = 0,000024$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в МПН на содержание каналов $w_9 = w_{13} = 0,0$; весовой коэффициент влияния на минимизацию потерь в МПН на использование ключа $w_{10} = w_{18} = 0,000024$.

Потери в РЩ и МПН определяются коэффициентами, зависящими от количества РЩ и МПН соответственно. В рассматриваемом примере альтернативные варианты организации содержат по одному РЩ и МПН, в котором альтернативные подключения, поэтому весовые коэффициенты принимают следующие значения.

Для «Варианта 1»: $w_1 = w_7 = 0,02$; $w_2 = w_8 = 0,0$; $w_4 = w_9 = 0,02$; $w_5 = w_{10} = 0,0$.

Для «Варианта 2»: $w_1 = w_7 = 0,0$; $w_2 = w_8 = 0,000024$; $w_4 = w_9 = 0,0$; $w_5 = w_{10} = 0,000024$.

Степень влияния потерь в РЩ и МПН на общие потери определяется коэффициентами w_3 и w_6 , которые равны соответственно w_1 для «Варианта 1» и w_5 , то есть $0,02$ и $0,000024$ соответственно.

Таким образом, задавая начальные значения потерь на содержание каждого i -го канала МПН и РЩ $Sat_i = 1,0$, $Den_i = 1,0$, и на использование каждого j -го ключа МПН и РЩ $Sat_j = 1,0$, $Den_j = 1,0$, проводим расчет потерь, которым соответствует переменная Den . В результате получаем: для «Варианта 1» $(Sat_1, Den_1) = (1,0; 0,98)$; для «Варианта 2»: $(Sat_2, Den_2) = (1,0; 0,999976)$.

Правило выбора варианта организации электросети, приведенное выше по тексту, имеет вид: $Sat_k > Den_k$, $k=1,2$; $Sat^* = \max \{Sat_1, Sat_2\}$. В случае равенства Sat_1 и Sat_2 принимается, что $Den^* = \min \{Den_1, Den_2\}$. Поскольку в рассматриваемом примере оказалось, что $Sat_1 = Sat_2$, то выбор между «Вариантом 1» и «Вариантом 2» осуществляется из условия: $Den = \min \{Den_1, Den_2\}$, и вариантом, обеспечивающим минимальные потери, является вариант организации электросети «Вариант 2» с использованием ключа для подключения каналов в РЩ и в МПН.

Заключение. Для выбора варианта организации электросети гибридной системы энергообеспечения АНПА проанализированы объемы потребления электроэнергии АНПА на различных этапах выполнения маршрутного задания, потери от использования дополнительного оборудования – многоканальных преобразователей, распределительных щитов, ключей, что позволило сформировать альтернативные варианты организации электросети гибридной системы энергообеспечения АНПА. Для выбора варианта организации электросети, обеспечивающего минимальные потери, использован принципиально новый подход, основанный на оценке степени достижения так называемых нефункциональных требований. Для этого в работе разработан целевой граф и сформированы подцели, оказывающие влияние на потери электроэнергии АНПА. По специальному алгоритму распространения меток были получены итоговые оценки каждого из вариантов организации электросети, по которым была выбрана организация электросети, обеспечивающая минимальные потери по сравнению с другими вариантами организации электросети. Такой выбор позволяет экономно расходовать энергоресурс АНПА в процессе преодоления заданного маршрута.

Полученные результаты позволяют, в свою очередь, сформулировать требования к функционированию элементов гибридной системы энергообеспечения и разработать алгоритмы управления. В целом полученный результат позволяет минимизировать расход энергоресурса в процессе движения АНПА на всем протяжении выполнения маршрутного задания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аполонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О.* О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сб. материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2018. – С. 34-42.
2. *Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Безрук Г.Г.* Эффективное управление гибридной системой генерации и распределения электроэнергии при движении автономного необитаемого подводного аппарата // Проблемы управления. – 2020. – № 4. – С. 70-80.
3. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети: учебник для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 952 с.
4. *Мартынюк М.В.* Модели и алгоритмы интеллектуального управления параметрами регулирующих устройств в цифровых электросетях: дисс. ... канд. тех. наук. – Нижний Новгород, 2019. – 190 с.
5. *Chung L., Nixon B.A., Yu E., Mylopoulos J.* Non-Functional Requirements in Software Engineering. – URL: <https://www.springer.com/gp/book/9780792386667> (дата обращения: 25.01.2021).
6. *Мартынова Л.А.* Математическая модель гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата большой дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 223-238.
7. *Киселев Н.К., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В.* Математическая модель функционирования гибридной системы энергообеспечения в составе стенда отладки и сопровождения АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 170-187.
8. *Innocenti Badano B.M.* A multi-agent architecture with distribution for an autonomous robot. – URL: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7749/Tb1de1.pdf;sequence=1> (дата обращения 25.01.2021).
9. *Buzun N., Korshunov A.* Innovative methods and measures in overlapping community detection. – URL: http://ceur-ws.org/Vol-870/paper_3.pdf (дата обращения 25.01.2021).
10. *Malewicz G., Austern M.H., C Bik A. J., Dehnert J. C., Horn I., Leiser N., Czajkowski G.* Pregel: a system for large-scale graph processing // In Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data (SIGMOD '10). ACM: New York, NY, USA, 2010. – P. 135-146.
11. *Giorgini P., Mylopoulos J., Nicchiarelli E., Sebastiani R.* Reasoning with goal models // In Proceedings of the 21st International Conference on Conceptual Modeling (ER 2002). Tampere, Finland, 2002. – P. 1-15. – <http://disi.unitn.it/~pgiorgio/papers/er02.pdf>.
12. *Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J.* Multi-agent Architectures as Organizational Structures. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6> (дата обращения 25.01.2021).
13. *Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J.* A Goal-Based Organizational Perspective on Multi-Agents Architectures // In Proceedings of the 8th international workshop on intelligent agents: Agent theories architectures and languages, ATAL'01, Seattle, USA, 2001. – <http://www.troposproject.eu/files/atalfinal.pdf>.
14. *Chung L., Cesar J. do Prado Leite.* On Non-Functional Requirements in Software Engineering. In book: Conceptual Modeling: Foundations and Applications. – Publisher: Springer Berlin. Heidelberg. – P. 363-379. – Doi: 10.1007/978-3-642-02463-4_19. – <http://www-di.inf.puc-rio.br/~julio/nfr-chung-leite.pdf>.
15. *Giorgini P., Kolp M., Mylopoulos J.* Multi-agent architectures as organizational structures // Autonomous Agent and Multi-Agent Systems. – 2006. – 13:1-2. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6>.
16. *Мартынова Л.А.* Мультиагентные технологии в морской робототехнике // International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia. – P. 278-291.

17. Мартынова Л.А. Выбор мультиагентной архитектуры при разработке системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Матер. XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019), Дивноморское Геленджик, 23-28 сентября 2019 г. В 4 т. Т. 2. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 86-88.
18. Мартынова Л.А. Выбор мультиагентной архитектуры при разработке системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 7 (209). – С. 18-35.
19. Киселев Н.К., Мартынова Л.А. Разработка эффективной гибридной системы генерации и распределения электроэнергии автономного необитаемого подводного аппарата // Матер. конференции «Управление в морских системах» (УМС-2020). – С. 53-56.
20. Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. – 2020. – № 4 (107). – С. 31-41.
21. Zhu X., Ghahramani Z. Learning from labeled and unlabeled data with label propagation. Technical report, Technical Report CMU-CALD-02-107, Carnegie Mellon University, 2002. –<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.3864&rep=rep1&type=pdf>.

REFERENCES

1. Appolonov E.M., Bachurin A.A., Gorokhov A.I., Ponomarev L.O. O vozmozhnosti i neobkhodimosti sozdaniya sverkhbol'shogo neobitaemogo podvodnogo apparata [On the possibility and necessity of creating an extra-large unmanned underwater vehicle], *Sb. materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Sb. materials of the XIII All-Russian scientific-practical conference "Perspective systems and management tasks"]. Rostov-on-Don – Taganrog: YuFU, 2018, pp. 34-42.
2. Martynova L.A., Kiselev N.K., Bezruk G.G. Effektivnoe upravlenie gibridnoy sistemoy generatsii i raspredeleniya elektroenergii pri dvizhenii avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Effective control of a hybrid system of generation and distribution of electricity during the movement of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Problemy upravleniya* [Control problems], 2020, No. 4, pp. 70-80.
3. Idel'chik V.I. Elektricheskie sistemy i seti: uchebnik dlya VUZov [Electrical systems and networks. Uch. for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 952 p.
4. Martynyuk M.V. Modeli i algoritmy intellektual'nogo upravleniya parametrami reguliruyushchikh ustroystv v tsifrovyykh elektrosetyakh: diss. ... kand. tekhn. nauk [Models and algorithms for intelligent control of the parameters of regulating devices in digital power grids: cand. of eng. sc. diss.]. Nizhniy Novgorod, 2019, 190 p.
5. Chung L., Nixon B.A., Yu E., Mylopoulos J. Non-Functional Requirements in Software Engineering. Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9780792386667> (accessed 25 January 2021).
6. Martynova L.A. Matematicheskaya model' gibridnoy sistemoy energoobespecheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata bol'shoy dal'nosti [Mathematical model of a hybrid power supply system for a long-range autonomous unmanned underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 223-238.
7. Kiselev N.K., Martynova L.A., Pashkevich I.V. Matematicheskaya model' funktsionirovaniya gibridnoy sistemoy energoobespecheniya v sostave stenda otladki i soprovozhdeniya ANPA // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1 (211), pp. 170-187.
8. Innocenti Badano B.M. A multi-agent architecture with distribution for an autonomous robot. Available at: URL: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7749/Tbi1de1.pdf;sequence=1> (accessed 25 January 2021).
9. Buzun N., Korshunov A. Innovative methods and measures in overlapping community detection. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-870/paper_3.pdf (accessed 25 January 2021).
10. Malewicz G., Austern M. H., C Bik A. J., Dehnert J. C., Horn I., Leiser N., Czajkowski G. Pregel: a system for large-scale graph processing, *In Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data (SIGMOD '10)*. ACM: New York, NY, USA, 2010, pp. 135-146.
11. Giorgini P., Mylopoulos J., Nicchiarelli E., Sebastiani R. Reasoning with goal models, *In Proceedings of the 21st International Conference on Conceptual Modeling (ER 2002)*. Tampere, Finland. 2002, pp. 1-15. Available at: <http://disi.unitn.it/~pgiorgio/papers/er02.pdf>.

12. Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J. Multi-agent Architectures as Organizational Structures. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6> (accessed 25 January 2021).
13. Kolp M., Giorgini P., Mylopoulos J. A Goal-Based Organizational Perspective on Multi-Agents Architectures, *In Proceedings of the 8th international workshop on intelligent agents: Agent theories architectures and languages, ATAL'01, Seattle, USA. 2001*. Available at: <http://www.troposproject.eu/files/atalfinal.pdf>.
14. Chung L., Cesar J. do Prado Leite. On Non-Functional Requirements in Software Engineering. In book: *Conceptual Modeling: Foundations and Applications*. Publisher: Springer Berlin Heidelberg, pp. 363-379. Doi: 10.1007/978-3-642-02463-4_19. Available at: <http://www-di.inf.puc-rio.br/~julio/nfr-chung-leite.pdf>.
15. Giorgini P., Kolp M., Mylopoulos J. Multi-agent architectures as organizational structures, *Autonomous Agent and Multi-Agent Systems*, 2006, 13:1-2. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10458-006-5717-6>.
16. Martynova L.A. Mul'tiagentnye tekhnologii v morskoy robototekhnike [Multiagent technologies in marine robotics], *International Conference on Marine Robotics in Ocean Exploration, MarineRobotics2019, September 17-19, Saint-Petersburg, Russia*, pp. 278-291.
17. Martynova L.A. Vybora mul'tiagentnoy arkhitektury pri razrabotke sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [The choice of multi-agent architecture in the development of a control system for an autonomous unmanned underwater vehicle], *Mater. XII mul'tikonferentsii po problemam upravleniya (MKPU-2019), Divnomorskoe Gelendzhik, 23-28 sentyabrya 2019 g.* [Materials of the XII multiconference on control problems (MKPU-2019), Divnomorskoe Gelendzhik, September 23-28, 2019]]. In 4 vol. Vol. 2. Rostov-on-Don, Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 86-88.
18. Martynova L.A. Vybora mul'tiagentnoy arkhitektury pri razrabotke sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [The choice of multi-agent architecture in the development of a control system for an autonomous unmanned underwater vehicle] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 7 (209), pp. 18-35.
19. Kiselev N.K., Martynova L.A. Razrabotka effektivnoy gibridnoy sistemy generatsii i raspredeleniya elektroenergii avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Development of an effective hybrid system for the generation and distribution of electricity for an autonomous, uninhabited underwater vehicle], *Mater. konferentsii «Upravlenie v morskikh sistemakh» (UMS-2020)* [Materials of the conference "Management in marine systems" (UMS-2020)], pp. 53-56.
20. Martynova L.A., Kiselev N.K., Myslivyy A.A. Metod vybora arkhitektury mul'tiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [A method for choosing the architecture of a multi-agent control system for an autonomous unmanned underwater vehicle], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2020, No. 4 (107), pp. 31-41.
21. Zhu X., Ghahramani Z. Learning from labeled and unlabeled data with label propagation. Technical report, Technical Report CMU-CALD-02-107, Carnegie Mellon University, 2002. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.3864&rep=rep1&type=pdf>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.И. Машошин.

Киселев Николай Константинович – АО «ЦКБ «Лазурит»; e-mail: kiselevu@gmail.com; г. Нижний Новгород, Россия; тел.: 89200218810; зам. главного конструктора.

Мартынова Любовь Александровна – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Пашкевич Иван Владимирович – e-mail: iv@bk.ru; тел.: 89119330006; главный специалист.

Kiselev Nikolay Konstantinovith – JSC Central Design Bureau Lazurit; e-mail: kiselevu@gmail.com; Nizhniy Novgorod, Russia; phone: +779200218810; post-graduate student; deputy chief designer.

Martynova Liubov Alexandrovna – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; Sankt-Peterburg, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

Pashkevich Ivan Vladimirovich – e-mail: iv@bk.ru; phone: +79119330006; chief specialist.

Раздел IV. Связь, навигация и наведение

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-204-218

**В.А. Костюков, Е.Ю. Косенко, М.В. Мамченко, М.Ю. Медведев,
В.Х. Пшихопов**

МЕТОД ОЦЕНКИ КООРДИНАТ БЛА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЛОКАЛЬНЫМ РАССТОЯНИЯМ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ГРУППЫ*

В связи с развитием средств мобильной робототехники проблема корректного решения навигационных задач является одной из первостепенных, наряду с проблемами автоматического управления и обеспечения информационного канала связи заданных надежности, быстродействия и пропускной способности. Для осуществления навигации беспилотный летательный аппарат (БЛА) может использовать собственную инерциальную навигационную систему (ИНС), а также систему спутниковой навигации (СНС). Целью данной статьи является разработка метода уменьшения погрешностей работы инерциальной навигационной системы БЛА, вызванных наличием случайной и систематической погрешностей. При этом рассматривается случай монотонного возрастания систематической погрешности со временем. Навигационные данные, полученные со спутника, как правило, не содержат значительной систематической погрешности определения координат. Однако спутниковый сигнал может пропадать на время, значительно большее периода трансляции со спутника навигационных данных в обычном режиме. Вследствие этого возникает проблема увеличения точности данных, получаемых от инерциальной навигационной системы. Данная проблема особенно актуальна при групповом использовании БЛА. При решении задач группового управления возникает необходимость предотвращать столкновения аппаратов и возможные коллизии уже на стадии планирования движения. Кроме того, для решения целого ряда групповых задач, таких как мониторинг местности, проведение спасательных операций, поиск объектов на заданной территории, совместное транспортирование груза, отдельные объекты группы должны слаженно перемещаться в пространстве с большой точностью. Это накладывает еще более жесткие ограничения по точности обработки ИНС и частоте информационного обмена по СНС. В настоящей статье предлагается метод, позволяющий по данным, полученным от локальных систем, осуществляющих измерение взаимных расстояний между объектами группы, скорректировать оценки собственных координат таким образом, чтобы в результате уменьшить среднеквадратическое отклонение скорректированного набора точек от истинных положений объектов в данный момент времени. Также метод позволяет уменьшить максимальное значение соответствующего отклонения по сравнению с исходным набором оценок, полученных из навигационных данных ИНС. Метод демонстрируется на примере повышения точности определения глобальных координат в группе БЛА.

Группа БЛА; групповая навигация; автономная навигация; оценка положения.

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 16-1900001 П, реализуемого в Южном федеральном университете.

V.A. Kostjukov, E.Yu. Kosenko, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov,

**THE METHOD OF ESTIMATION POSITIONS OF THE UAVS
BY MEASURING THE DISTANCES BETWEEN ELEMENTS OF THE GROUP**

Important problems in the development of mobile robotics are the task of autonomous navigation, automatic movement control and providing a reliable communication channel. For navigation, an unmanned aerial vehicle can use its own inertial navigation system and a satellite navigation system. The purpose of this article is to develop a method for reducing errors in the operation of the inertial navigation system of UAVs caused by the presence of random and systematic errors. In this case, we consider the situation of a monotonous increase in the systematic error over time. Usually, navigation data obtained from the satellite does not contain a significant systematic error in determining the coordinates. However, the satellite signal may be lost for a time significantly longer than the period of transmission of navigation data from the satellite in normal mode. As a result, there is a problem of increasing the accuracy of the data received from the inertial navigation system. This problem is particularly relevant for group application of UAVs. When solving group control tasks, it becomes necessary to prevent vehicle collisions and possible collisions already at the stage of traffic planning. In addition, to solve a number of group tasks, such as monitoring the terrain, conducting rescue operations, searching for objects in a given area, and joint cargo transportation, individual objects of the group must move smoothly in space with great accuracy. This imposes more stringent restrictions on the accuracy of the inertial navigation systems processing and the frequency of information exchange. In this paper, we propose a method that allows, based on data obtained from local systems that measure the mutual distances between objects in a group. This information allows correct the estimates of their own coordinates in such a way as to reduce the standard deviation of the corrected set of points from the true positions of objects at a given time. The method also reduces the maximum value of the corresponding deviation in comparison with the original set of estimates obtained from the navigation data of the INS. The method is demonstrated by the example of increasing the accuracy of determining global coordinates in a group of UAVs.

UAVs group; group navigation; autonomous navigation; estimation of position.

Введение. Для осуществления навигации беспилотный летательный аппарат (БЛА) может использовать собственную инерциальную навигационную систему (ИНС), являющуюся автономной, т.е. не требующей поступления внешних информационных сигналов [1]. Проблемой современных ИНС является наличие кроме случайной погрешности также и систематической, увеличивающейся с течением времени, что может привести к неприемлемым по точности оценкам положения и ориентации аппарата [2, 3]. Это вызвано, в свою очередь, неточностями применяемых моделей навигации и несовершенством используемых в ИНС аппаратных средств.

Например, среднеквадратическое отклонение оценки угла курса от его истинного значения для бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) ГЛ-80 [4], разрабатываемой ООО «Гиrolаб» (г. Пермь), составляет порядка $\sigma_{\psi, \text{err}} = 0,5^\circ$. Систематическая погрешность ухода с течением времени оценки курса от истинного значения является в первом приближении линейной по времени с коэффициентом пропорциональности $k_{\psi, \text{err}, \text{syst}} = 0,2/3600$ (°/с).

Также БЛА может использовать систему спутниковой навигации (СНС). Навигационные данные по этому глобальному каналу транслируются с определенной частотой, причем период следования соответствующих сигналов определяется типов используемой спутниковой системы. Во-первых, эта частота может быть недостаточной для целевой точности работы БЛА. Во-вторых, спутниковый сигнал может пропадать на время, значительно большее периода трансляции со спутника навигационных данных в нормальном режиме [5, 6], что приводит к необходимости использовать на этом интервале времени данные с ИНС, обладающие монотонно возрастающей со временем погрешностью.

При решении задач группового управления, когда несколько БЛА выполняют единую миссию, требования к точности оценивания собственных координат каждым элементом такой группы возрастают по сравнению с одиночным БЛА. Это обусловлено тем, что, во-первых, появляется требование по препятствованию столкновения аппаратов, и, во-вторых, потому, что для решения ряда групповых задач, таких как мониторинг местности, проведение спасательных операций, поиск объектов, совместное транспортирование груза и проч., отдельные объекты группы должны слаженно перемещаться в пространстве, с большой точностью обрабатывая заданные траектории [7–10].

В этой связи проблема осуществления корректной навигации внутри группы взаимодействующих и выполняющих единую миссию БЛА является насущной для современной беспилотной техники.

Альтернативной или дополнительной возможностью добиться увеличения точности получаемых навигационных данных в условиях отсутствия глобальной навигации является задействование системы технического зрения (СТЗ) [11–14]. Так, например, данные, получаемые от видеокамер и/или лидаров СТЗ (видеосигналы, карты глубин, рельефа, проходимости) могут быть определенным образом комплексированы с данными ИНС таким образом, чтобы ощутимо снизить погрешность оценивания положения и ориентации аппарата.

В данной статье мы предлагаем методику комплексирования данных о взаимных расстояниях между объектами группы БЛА, полученных от их СТЗ, с навигационными данными ИНС каждого объекта, с целью значительного уточнения получаемых итоговых навигационных данных. При этом, как будет показано, удастся значительно уменьшить среднеквадратическое отклонение скорректированного набора точек от истинных положений объектов в данный момент времени, а также уменьшить максимальное значение соответствующего отклонения по сравнению с исходным набором оценок, полученных из навигационных данных ИНС.

Формальная постановка задачи. Пусть заданы истинные положения четырех БЛА в пространстве глобальной системы координат OXYZ в некоторый момент времени: $M_i(x_i, y_i, z_i)$, $i=1,2,3,4$. Каждый БЛА осуществляет оценки своего положения и положений трех других БЛА группы в системе координат OXYZ: $\tilde{M}_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i)$ (рис. 1). Пусть максимальное отклонение каждой из оценок Δd_i , $i=1,2,3,4$, от соответствующего истинного значения есть Δd_{\max} : $\Delta d_i \leq \Delta d_{\max}$.

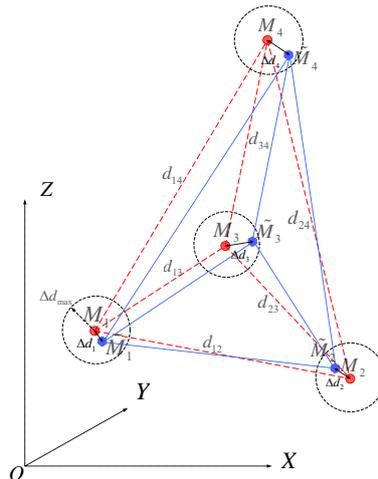


Рис. 1. Истинные и оценочные положения четырех БЛА в пространстве глобальной системы координат OXYZ

Предположим также, что каждый БЛА измеряет расстояния между каждой парой объектов в группе. Далее будем считать, что погрешность такого измерения гораздо меньше Δd_{\max} , поэтому будем использовать вместо оценок этих расстояний сами их истинные значения: $d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{23}, d_{34}$. Отметим, что данное предположение является общепринятым при решении указанного класса задач [15].

Требуется, зная расстояния $d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{23}, d_{34}$, разработать алгоритм коррекции оценок $\tilde{M}_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i)$, $i=1,2,3,4$, приближающий их к соответствующим значениям $M_i(x_i, y_i, z_i)$.

Процедура решения поставленной задачи. Рассмотрим тетраэдр, образованный БЛА группы и представленный на рис. 2. Для формирования такого тетраэдра в группе из произвольного числа БЛА можно использовать процедуру трехмерной триангуляции, например, триангуляцию Делоне [16, 17].

Можно показать, что произвольный тетраэдр в любой локальной системе координат, связанной с его ребрами, определяется полностью с точностью до одного зеркального отражения. Действительно, пусть дан тетраэдр $P_1P_2P_3P_4$, для которого известны расстояния между соответствующими вершинами $d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{23}, d_{34}$. Введем локальную систему координат $O'X'Y'Z'$ (рис. 2) так, что точка O' совпадает с P_1 , ось $O'X'$ (с ортом 1_x) направлена вдоль ребра P_1P_2 , ось $O'Z'$ перпендикулярна плоскости $P_1P_2P_3$, причем её орт определяется как $1_{z'} = ([P_1P_2 \times P_1P_3])_n$, где операция $(\)_n$ здесь и далее означает нормировку по модулю. Для орта $1_{y'}$ справедливо выражение: $1_{y'} = [1_{z'} \times 1_{x'}$]. Точки P_1, P_2, P_3, P_4 в системе $O'X'Y'Z'$ будем описывать соответствующими радиус-векторами: r'_1, r'_2, r'_3, r'_4 . Координаты первых трех радиус-векторов легко получить:

$$r'_1 = [0,0,0], r'_2 = [d_{21}, 0,0], r'_3 = [d_{13} \cos \varphi_{23}, d_{13} \sin \varphi_{23}, 0]. \quad (1)$$

Координаты последнего радиус-вектора r'_4 получаются как решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 = d_{14}^2, \\ (x_4 - x_2')^2 + y_4^2 + z_4^2 = d_{24}^2, \\ (x_4 - x_3')^2 + (y_4 - y_3')^2 + z_4^2 = d_{34}^2. \end{cases} \quad (2)$$

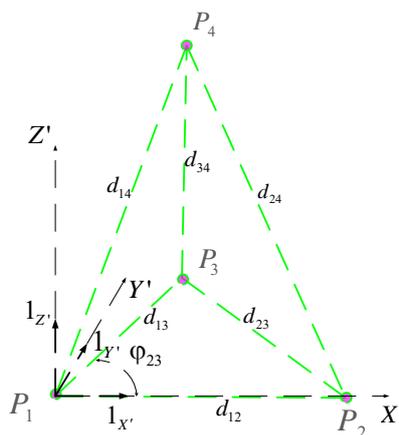


Рис. 2. Локальная система координат подвижного тетраэдра

Система (2) имеет два решения $P_4^{(1)}, P_4^{(2)}$, соответствующие двум разным тетраэдрам, каждый из которых может быть получен из другого зеркальным отражением относительно плоскости $O'X'Y'$:

$$\begin{cases} x'_4 = \frac{d_{14}^2 + d_{12}^2 - d_{24}^2}{2d_{12}}, \\ y'_4 = \frac{d_{14}^2 - d_{34}^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2x_3x'_4}{2y_3}, \\ z'_4 = \pm \sqrt{d_{14}^2 - x_4'^2 - y_4'^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Предположим, что расстояния между вершинами тетраэдра не меняются при различных преобразованиях последнего локальной системе координат, то есть тетраэдр ведет себя как абсолютно твердое тело. В этом случае для описания перемещений тетраэдра может быть применена матрица однородных преобразований следующего вида:

$$A = \begin{bmatrix} R & r_1 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $r_1 = r_1(x, y, z)$ – радиус-вектор начала $P_1=O'$ локальной системы $O'X'Y'Z'$ относительно $OXYZ$;

$$R(\psi, \vartheta, \gamma) = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\vartheta) & s(\psi)s(\gamma) - c(\psi)s\vartheta c(\gamma) & s(\psi)c(\gamma) + c(\psi)s(\vartheta)s(\gamma) \\ s(\vartheta) & c(\vartheta)c(\gamma) & -c(\vartheta)s(\gamma) \\ -s(\psi)c(\vartheta) & c(\psi)s(\gamma) + s(\psi)s(\vartheta)c(\gamma) & c(\psi)c(\gamma) - s(\psi)s(\vartheta)s(\gamma) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

матрица вращения, характеризующая взаимосвязь ортов систем координат $O'X'Y'Z'$ и $OXYZ$ [18, 19], ψ, ϑ, γ – углы Эйлера [20]. Для сокращения введены обозначения: $\cos(*) = c(*)$, $\sin(*) = s(*)$.

Таким образом, тетраэдр $P_1P_2P_3P_4$ имеет шесть степеней свободы, а его перемещения описываются набором независимых координат:

$$X = [x, y, z, \psi, \vartheta, \gamma]. \quad (6)$$

Поставим задачу приблизить подвижный тетраэдр $P_1P_2P_3P_4$ к набору точек-оценок $\tilde{M}_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i)$, $i=1,2,3,4$, в смысле некоторой меры. Наиболее естественно здесь может быть применен критерий минимизации суммы квадратов отклонений точек тетраэдра от соответствующих точек-оценок:

$$G(X) = \sum_{i=1}^4 |P_i \tilde{M}_i|^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Поскольку оценки \tilde{M} даны в глобальной системе координат $OXYZ$, то выразим координаты радиус-векторов точек P_i тетраэдра в этой системе:

$$r_i = \begin{cases} r(x, y, z), & \text{при } i = 1; \\ T_h [R(\psi, \vartheta, \lambda), r(x, y, z); r'_i], & \text{при } i = 2, 3, 4, \end{cases} \quad (8)$$

$$T_h [R, r; r'_i] = \text{extr} \left\{ \begin{bmatrix} R & r \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r'_i \\ 1 \end{bmatrix}, 3 \right\} = \text{extr} \left[A \begin{bmatrix} r'_i \\ 1 \end{bmatrix}, 3 \right]. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает функционал, преобразующий координаты радиус-вектора одной и той же точки из локальной в глобальную систему координат. Здесь использована операция выделения первых s координат вектора:

$$\text{extr} [p(p_1, p_2, \dots, p_s, \dots, p_n)^T, s] \equiv p_s(p_1, p_2, \dots, p_s)^T. \quad (10)$$

Раскрывая функционал $G(X)$ в (7), получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} G(X) = & \sum_{i=2}^4 |r'_i|^2 + \sum_{i=1}^4 [(x - \tilde{x}_i)^2 + (y - \tilde{y}_i)^2 + (z - \tilde{z}_i)^2] + 2d_{12} [a_{11}(x - \tilde{x}_2) + a_{21}(y - \tilde{y}_2) + a_{31}(z - \tilde{z}_2)] + \\ & + 2[(a_{11}x'_3 + a_{12}y'_3)(x - \tilde{x}_3) + (a_{21}x'_3 + a_{22}y'_3)(y - \tilde{y}_3) + (a_{31}x'_3 + a_{32}y'_3)(z - \tilde{z}_3)] + \\ & + 2 \sum_{j=4}^n [(a_{11}x'_j + a_{12}y'_j + a_{13}z'_j)(x - \tilde{x}_j) + (a_{21}x'_j + a_{22}y'_j + a_{23}z'_j)(y - \tilde{y}_j) + (a_{31}x'_j + a_{32}y'_j + a_{33}z'_j)(z - \tilde{z}_j)], \end{aligned} \quad (11)$$

где введены обозначения:

$$a_{ij} = R_{ij}(\psi, \vartheta, \gamma), \quad i, j = 1, 2, 3, 4.$$

Дифференцируя функционал (11) последовательно по всем независимым переменным набора X , получим:

$$\partial_x G(X) = 2 \sum_{i=1}^{n=4} (x - \tilde{x}_i) + 2(a_{11}x'_3 + a_{12}y'_3) + 2 \sum_{j=4}^{n=4} (a_{11}x'_j + a_{12}y'_j + a_{13}z'_j) + 2d_{12}a_{11}, \quad (12)$$

$$\partial_y G(X) = 2 \sum_{i=1}^{n=4} (y - \tilde{y}_i) + 2(a_{21}x'_3 + a_{22}y'_3) + 2 \sum_{j=4}^{n=4} (a_{21}x'_j + a_{22}y'_j + a_{23}z'_j) + 2d_{12}a_{21}, \quad (13)$$

$$\partial_z G(X) = 2 \sum_{i=1}^{n=4} (z - \tilde{z}_i) + 2(a_{31}x'_3 + a_{32}y'_3) + 2 \sum_{j=4}^{n=4} (a_{31}x'_j + a_{32}y'_j + a_{33}z'_j) + 2d_{12}a_{31}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \partial_\psi G(X) &= 2d_{12} [\partial_\psi a_{11} (x - \tilde{x}_2) + \partial_\psi a_{21} (y - \tilde{y}_2) + \partial_\psi a_{31} (z - \tilde{z}_2)] + \\ &+ 2 [A_{1\psi}(r_3')(x - \tilde{x}_3) + A_{2\psi}(r_3')(y - \tilde{y}_3) + A_{3\psi}(r_3')(z - \tilde{z}_3)] + \\ &+ 2 \sum_{j=4}^{n=4} [B_{1\psi}(r_j')(x - \tilde{x}_j) + B_{2\psi}(r_j')(y - \tilde{y}_j) + B_{3\psi}(r_j')(z - \tilde{z}_j)], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \partial_\vartheta G(X) &= 2d_{12} [\partial_\vartheta a_{11} (x - \tilde{x}_2) + \partial_\vartheta a_{21} (y - \tilde{y}_2) + \partial_\vartheta a_{31} (z - \tilde{z}_2)] + \\ &+ 2 [A_{1\vartheta}(r_3')(x - \tilde{x}_3) + A_{2\vartheta}(r_3')(y - \tilde{y}_3) + A_{3\vartheta}(r_3')(z - \tilde{z}_3)] + \\ &+ 2 \sum_{j=4}^{n=4} [B_{1\vartheta}(r_j')(x - \tilde{x}_j) + B_{2\vartheta}(r_j')(y - \tilde{y}_j) + B_{3\vartheta}(r_j')(z - \tilde{z}_j)], \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \partial_\gamma G(X) &= 2d_{12} [\partial_\gamma a_{11} (x - \tilde{x}_2) + \partial_\gamma a_{21} (y - \tilde{y}_2) + \partial_\gamma a_{31} (z - \tilde{z}_2)] + \\ &+ 2 [A_{1\gamma}(r_3')(x - \tilde{x}_3) + A_{2\gamma}(r_3')(y - \tilde{y}_3) + A_{3\gamma}(r_3')(z - \tilde{z}_3)] + \\ &+ 2 \sum_{j=4}^{n=4} [B_{1\gamma}(r_j')(x - \tilde{x}_j) + B_{2\gamma}(r_j')(y - \tilde{y}_j) + B_{3\gamma}(r_j')(z - \tilde{z}_j)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь введены обозначения:

$$A_{1\sigma}(r_3') = \partial_\sigma a_{11} x'_3 + \partial_\sigma a_{12} y'_3, \quad A_{2\sigma}(r_3') = \partial_\sigma a_{21} x'_3 + \partial_\sigma a_{22} y'_3, \quad A_{3\sigma}(r_3') = \partial_\sigma a_{31} x'_3 + \partial_\sigma a_{32} y'_3;$$

$$B_{1\sigma}(r_j') = \partial_\sigma a_{11} x'_j + \partial_\sigma a_{12} y'_j + \partial_\sigma a_{13} z'_j, \quad B_{2\sigma}(r_j') = \partial_\sigma a_{21} x'_j + \partial_\sigma a_{22} y'_j + \partial_\sigma a_{23} z'_j,$$

$$B_{3\sigma}(r_j') = \partial_\sigma a_{31} x'_j + \partial_\sigma a_{32} y'_j + \partial_\sigma a_{33} z'_j, \quad r_j' = r_j'(x'_j, y'_j, z'_j), \quad j = 4, 5, \dots, n; \quad \sigma = \{\psi, \vartheta, \gamma\}.$$

Производные $\partial_\psi a_{ij}$, $\partial_\vartheta a_{ij}$, $\partial_\gamma a_{ij}$, $i, j = 1, 2, 3$ находятся с использованием выражения (5).

Уравнения (12)-(17) образуют систему относительно стационарной точки $X = X_{st}$ функционала (7).

После решения системы (12)-(17) по формуле (8) рассчитываются координаты всех точек подвижного тетраэдра, положение которого в данный момент времени в глобальной системе координат определяется условием $X = X_{st}$. Эти точки являются искомыми скорректированными оценками положений рассматриваемых четырех БЛА.

Рассмотрим теперь условия существования экстремума и фильтрация подходящих взаимных ориентаций БЛА в группе. Найдем матрицу Гессе для рассматриваемой задачи (7):

$$G_{ess}(X) = \left\{ \partial_{x_i x_j}^2 G(X) \right\}, \quad i, j = \overline{1, 6}. \quad (18)$$

Достаточное условие существования минимума функционала (7) в стационарной точке $X=X_{st}$ имеет вид:

$$\Delta_{G_{ess,i}}(X_{st}) > 0, \quad i, = \overline{1, 6}, \quad (19)$$

где $\Delta_{G_{ess,i}}(X)$ есть i -й главный минор матрицы Гессе, взятый в точке X .

Численный анализ показал, что условие (19) может не выполняться для некоторых взаимных расположений БЛА в группе, т.е. для некоторых наборов исходных точек $M_i(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n$, где n может быть более четырех.

Поэтому в реальной ситуации движения группы БЛА уточнение координат по вышеприведенной методике возможно только в те моменты времени, в которых текущая пространственная конфигурация заданной подгруппы БЛА удовлетворяет условию (19).

Для численного решения системы уравнений (12)–(17) относительно компонент стационарной точки $X_{st} = [x_{st}, y_{st}, z_{st}, \psi_{st}, \vartheta_{st}, \gamma_{st}]$ необходимо корректно задать начальное приближение. С этой целью рассмотрим случай, когда вершина P_1 подвижного тетраэдра $P_1P_2P_3P_4$ совмещена с точкой \tilde{M}_1 , ребро P_1P_2 (и, соответственно, орт $1_{x'}$), направлено вдоль отрезка $\tilde{M}_1\tilde{M}_2$, а орт $1_{z'}$ находится из условия $1_{z'} = \left([\tilde{M}_1\tilde{M}_2 \times \tilde{M}_1\tilde{M}_3] \right)_n$ (рис. 3). Тогда матрица вращения, описывающая такую ориентацию осей системы $O'X'Y'Z'$ относительно $OXYZ$, дается выражением:

$$R_0 = \begin{bmatrix} 1_{x'} & 1_{y'} & 1_{z'} \end{bmatrix} \quad (20)$$

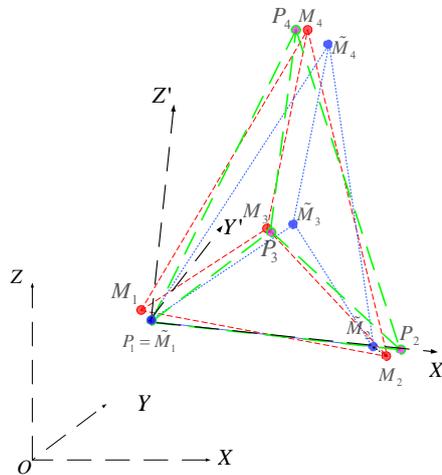


Рис. 3. Определение начального положения тетраэдра, соответствующего начальному приближению для решения оптимизационной задачи (7), по исходному набору точек-оценок

До сих пор тетраэдр оставался определенным с точностью до зеркального отражения относительно плоскости $O'X'Y'$. Для устранения этой неопределенности выберем такое значение координаты $z'_4 = \pm \sqrt{d_{14}^2 - x_4'^2 - y_4'^2}$ в (3), которое соответствует меньшему удалению от точки-оценки \tilde{M}_4 :

$$z'_{4'} = \begin{cases} \sqrt{d_{14}^2 - x_4'^2 - y_4'^2}, & \text{если } |P_4^{(1)} M'_{4'}| < |P_4^{(2)} M'_{4'}|; \\ -\sqrt{d_{14}^2 - x_4'^2 - y_4'^2}, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (21)$$

Матрица однородного преобразования, соответствующая такому расположению тетраэдра, есть:

$$A_0 = \begin{bmatrix} R_0 & \tilde{r}_1 \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

а векторный набор параметров, характеризующих A_0 и, соответственно, рассматриваемое положение тетраэдра, суть:

$$X_0 = [\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{z}_1, \psi_0, \vartheta_0, \gamma_0], \quad (23)$$

где значения углов Эйлера $\psi_0, \vartheta_0, \gamma_0$ подлежат нахождению из системы уравнений:

$$\begin{cases} c(\psi_0) c(\vartheta_0) = R_{0,11}, \\ s(\vartheta_0) = R_{0,21}, \\ -s(\psi_0) c(\vartheta_0) = R_{0,31}, \\ s(\psi_0) s(\gamma_0) - c(\psi_0) s(\vartheta_0) c(\gamma_0) = R_{0,12}, \\ c(\vartheta_0) c(\gamma_0) = R_{0,22}, \\ c(\psi_0) s(\gamma_0) + s(\psi_0) s(\vartheta_0) c(\gamma_0) = R_{0,32}, \\ s(\psi_0) c(\gamma_0) + c(\psi_0) s(\vartheta_0) s(\gamma_0) = R_{0,13}, \\ -c(\vartheta_0) s(\gamma_0) = R_{0,23}, \\ c(\psi_0) c(\gamma_0) - s(\psi_0) s(\vartheta_0) s(\gamma_0) = R_{0,33}. \end{cases} \quad (24)$$

Превышение числа уравнений над числом неизвестных здесь должно быть использовано для выбора того решения, которое соответствует данной матрице вращения. Вначале могут быть найдены восемь кандидатов на решения системы (24) из решения, например, подсистемы:

$$\begin{cases} c(\psi_0) c(\vartheta_0) = R_{0,11}, \\ s(\vartheta_0) = R_{0,21}, \\ -s(\psi_0) c(\vartheta_0) = R_{0,31}, \\ c(\vartheta_0) c(\gamma_0) = R_{0,22}, \\ -c(\vartheta_0) s(\gamma_0) = R_{0,23}. \end{cases} \quad (25)$$

Указанные кандидаты на решения (24) находятся как комбинации между следующими возможными значениями углов Эйлера, согласно (25):

$$\begin{aligned} \vartheta_{01} &= \arcsin(R_{0,21}), \quad \vartheta_{02} = \begin{cases} -\vartheta_{01} + \pi, & \text{при } \vartheta_{01} \geq 0; \\ -\vartheta_{01} - \pi, & \text{при } \vartheta_{01} < 0; \end{cases} \\ \psi_{01} &= -\arctg(R_{0,31} / R_{0,11}), \quad \psi_{02} = \begin{cases} \psi_{01} - \pi, & \text{при } \psi_{01} \geq 0; \\ \psi_{01} + \pi, & \text{при } \psi_{01} < 0; \end{cases} \\ \gamma_{01} &= -\arctg(R_{0,23} / R_{0,22}), \quad \gamma_{02} = \begin{cases} \gamma_{01} - \pi, & \text{при } \gamma_{01} \geq 0; \\ \gamma_{01} + \pi, & \text{при } \gamma_{01} < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

Далее для каждого набора проверяются оставшиеся уравнения системы (24):

$$\begin{cases} s(\psi_0)s(\gamma_0) - c(\psi_0)s(\mathcal{G}_0)c(\gamma_0) = R_{0,12}, \\ c(\psi_0)s(\gamma_0) + s(\psi_0)s(\mathcal{G}_0)c(\gamma_0) = R_{0,32}, \\ s(\psi_0)c(\gamma_0) + c(\psi_0)s(\mathcal{G}_0)s(\gamma_0) = R_{0,13}, \\ c(\psi_0)c(\gamma_0) - s(\psi_0)s(\mathcal{G}_0)s(\gamma_0) = R_{0,33}. \end{cases} \quad (27)$$

В итоге остается один набор, удовлетворяющий всем уравнениям (24).

Важно отметить, что рассмотренную методику можно применить и для числа БЛА, более четырех. В этом случае в выражениях (12)–(17) необходимо суммировать до соответствующего значения $n > 4$, а координаты точек подвижного многогранника с вершинами P_1, P_2, \dots, P_n в его собственной локальной системе находятся: для точек P_1, P_2, P_3 по формулам (1), а координаты точек P_4, P_5, \dots, P_n находятся по формуле, аналогичной (3), которая получается заменой индекса «4» во всех величинах, содержащих этот индекс, на «j». Правило отбора корректного решения для выбора начального приближения определяется формулой (21), если в последней произвести ту же замену индекса.

Результаты численных экспериментов. Рассмотрим несколько примеров нахождения скорректированного набора оценок по указанному методу оптимизации.

На рис. 4–6 представлены результаты расчетов для случая четырех, пяти и восьми подвижных объектов при условии соблюдения достаточного условия существования решения задачи оптимизации на данный момент времени. На рисунках слева приводятся пространственные истинные положения этих объектов (красные точки), оценочные положения объектов по навигационным данным группы (синие точки), скорректированные по разработанной методике оценочные положения объектов (зеленые точки). На рисунках справа даны зависимости абсолютных погрешностей оценивания координат для оценочного набора точек, полученного по навигационным данным (синие кривые), и скорректированного по разработанной методике (зеленые кривые), от номера объекта группы. Также приведены соответствующие значения среднеквадратического отклонения исходных оценочных значений и скорректированных по предлагаемой методике значений от истинных положений объектов (σ_1 и σ_2).

Из графиков, приведенных на рис. 4–6 справа, видно, что для всех трех рассмотренных случаев исходных наборов истинных положений БЛА и их оценок, полученных на основе ИНС, выполнено условие $\sigma_2 < \sigma_1$, причем максимальное уменьшение СКО имеет место для первого случая и составляет 41 %, а минимальное – для третьего случае и равно 17 %. Как показала проверка, во всех этих случаях выполнены достаточные условия существования экстремума (19) функционала (7). Также видно, что максимальное отклонение точки-оценки от своего истинного положения существенно снижается в степени, совпадающей по порядку с соответствующей степенью снижения СКО, что является общим свойством развиваемой методики.

На рис. 7 и 8 приведены результаты расчетов для случая четырех и пяти БЛА при условии несоблюдения достаточного условия существования решения задачи оптимизации на данный момент времени. Из графиков, приведенных на рис. 7 справа, видно, что погрешность оценивания истинных положений объектов возрастает, если применить разработанную методику уточнения координат при несоблюдении достаточного условия существования оптимума функционала (7). Также указаны соответствующие значения среднеквадратических отклонений σ_1 и σ_2 .

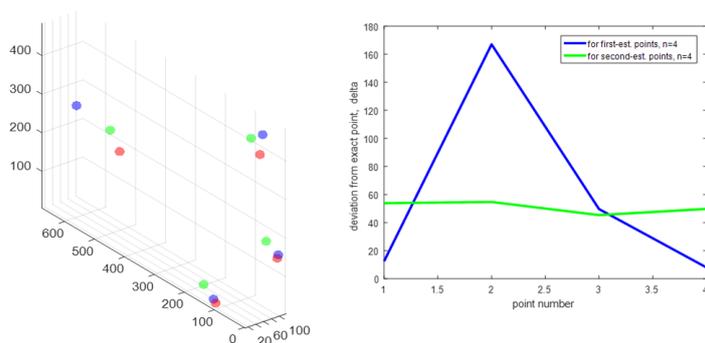


Рис. 4. Результаты уточнения координат для 4 БЛА $\sigma_I=87,4$ м, $\sigma_I=51,0$ м

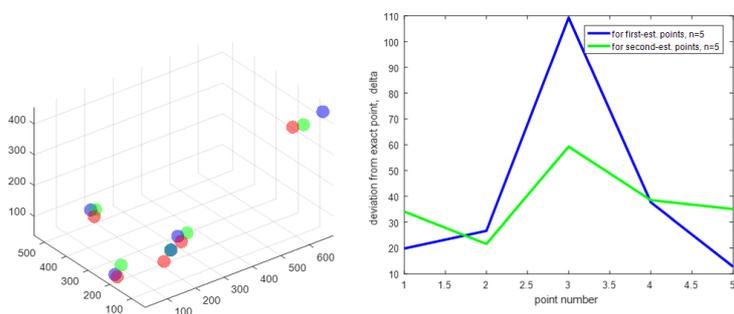


Рис. 5. Результаты уточнения координат для 5 БЛА $\sigma_I=63,4$ м, $\sigma_I=49,7$ м

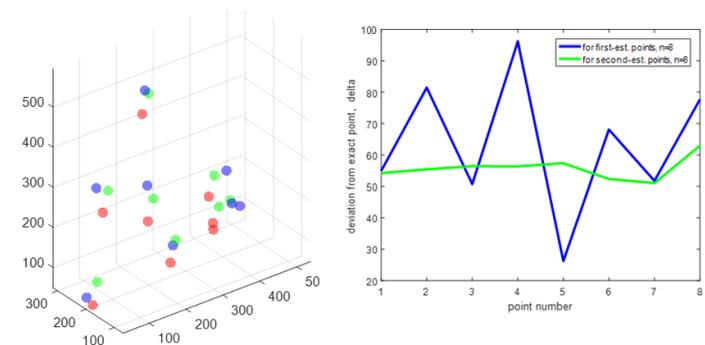


Рис. 6. Результаты уточнения координат для 8 БЛА $\sigma_I=66,6$ м, $\sigma_I=55,8$ м

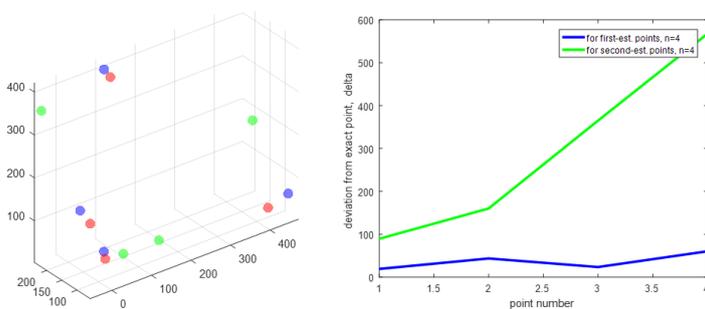


Рис. 7. Результаты уточнения координат для 4 БЛА при невыполнении достаточных условий (19) $\sigma_I=51,0$ м, $\sigma_I=87,3$ м

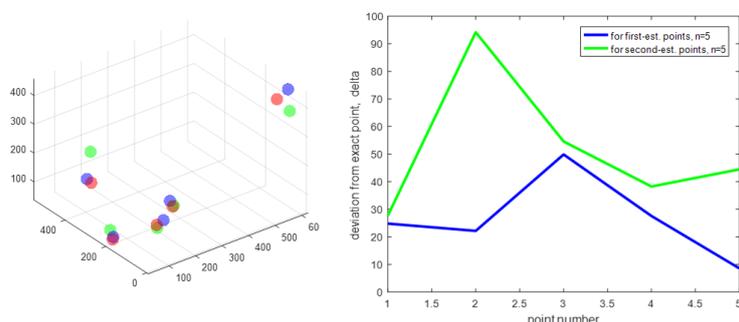


Рис. 8. Результаты уточнения координат для 5 БЛА при невыполнении достаточных условий (19) $\sigma_1=29,8$ м, $\sigma_1=56,7$ м

Могут быть случаи, когда при несоблюдении указанных достаточных условий стационарная точка (23) функционала (7) все же дает оптимум. Однако при проведении расчетов в режиме реального времени нецелесообразно рассматривать такие случаи, так как проверить тот факт, сработала или не сработала методика при несоблюдении достаточных условий (19) не представляется возможным, т.к. нет данных об истинных положениях объектов.

Заключение. Таким образом, в статье решена задача определения скорректированных положений четырех и более БЛА по критерию минимума суммы квадратов отклонений новых положений точек от их исходных положений при ограничении на расстояния между каждой парой объектов в подгруппе БЛА, СТЗ которых используются в данный момент времени для точной оценки этих расстояний.

На каждом временном шаге вначале проверяются достаточные условия существования минимума (19) соответствующего функционала (7). Если они выполнены, находится стационарная точка (23) из решения системы уравнений (12)–(17). При этом при числе БЛА, большем четырех, необходимо в суммах, фигурирующих в этих уравнениях, брать в качестве верхнего предела суммирования соответствующее значение $n>4$, а вместо формул (3) и (21) рассматривать измененные формулы с заменой индекса «4» на «j». Затем по формуле (8) находятся координаты скорректированных положений БЛА в данный момент времени.

Применение данной методики позволяет получить следующие эффекты.

1. Корректировка исходного набора точек-оценок позволяет уменьшить СКО, рассчитанное по девиации относительно истинных положений объектов, на 15–40 %.

2. Максимальное отклонение точки-оценки от своего истинного положения существенно снижается в степени, совпадающей по порядку с соответствующей степенью снижения СКО.

3. Уменьшение девиации для изначально плохо оцененных точек происходит ценой небольшого снижения точности оценивания тех точек, которые изначально были оценены наиболее точно.

Разработанная методика позволяет уменьшить среднеквадратическое отклонение скорректированного набора точек от истинного, а также уменьшить максимальное значение девиации по сравнению с исходным набором оценок, полученных из навигационных данных, и может быть эффективно применена для уточнения данных ИНС, в том числе в условиях значительного перебора со связью спутниковой навигационной системы.

В целом, представленная методика лежит в рамках методов корреляционно-экстремальной навигации. В ее рамках возможно использование других способов получения дополнительной информации, включая визуальную и радиотехническую навигацию [21–23].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Веремеенко К.К., Желтов С.Ю.* и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с. – ISBN 978-59221-1168-3.
2. *Layh T., Gebre-Egziabher D.* Design for graceful degradation and recovery from GNSS interruptions // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. – 2017. – Vol. 32 (9). – P. 4-17.
3. *Савельев В.М., Антонов Д.А.* Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на подвижном основании // *Тр. МАИ*. – 2011. – Вып. 45.
4. ГЛ-80 – малогабаритная облегчённая бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) – гироскоп на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) с замкнутым контуром. – URL: <http://gyrolab.ru/product/gl-80-volokonno-opticheskiy-gyroscope-inertsialnaya-navigatsionnaya-sistema-ins/> (дата обращения: 02.03.2021).
5. *Михайлов Н.В., Чистяков В.В.* Опыт использования метода «SoftFlex» в аппаратуре потребительской спутниковой навигации // *Гироскопия и навигация*. – 2012. – № 4. – С. 105-114.
6. *Ferreira R., Gaspar J., Sebastião P. et al.* Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms // *Wireless Perspective Communication*. – 2020. – Vol. 115. – P. 2705-2727. – <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07212-6>.
7. *Bingöl Ö., Güzey H.M.* Neuro sliding mode control of quadrotor UAVs carrying suspended payload // *Advanced Robotics*. – 2021. – Vol. 35 (3-4). – P. 255-266.
8. *Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х., Соловьев В.В., Титов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О.* Групповое управление подвижными объектами в неопределённых средах / под ред. В.Х. Пишихова. – М.: Физматлит, 2015. – 304 с. – ISBN 978-5-9221-1674-9.
9. *Kendoul F.* Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems // *Journal of Field Robotics*. – 2012. – Vol. 29 (2). – P. 315-378. – Doi: 10.1002/rob.20414.
10. *Pshikhov V., and Medvedev M.* Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes // *SPIRAS Proceedings*. – 2018. – Vol. 60 (5). – P. 39-63.
11. *Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Vasilyev A.I., Trifonov O.V.* Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring // *Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer)*. – 2013. – Vol. 208. – P. 463-476.
12. *Завалишин О.И.* Улучшение точности навигации и посадки с использованием GBASII/III категории // *Информатизация и связь*. – 2017. – № 2. – С. 18-21.
13. *Волощенко Е.В., Волощенко В.Ю.* Технологии комплексной навигации беспилотных гидросамолетов на акватории гидроаэродрома // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2020. – № 6 (216). – С. 52-65.
14. *Поливанов А.Ю., Иванов Ю.В., Холин Д.В.* Методика преобразования координат системы технического зрения промышленного робота для операции лазерной сварки // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. – Vol. 21 (3). – P. 166-173. – <https://doi.org/10.17587/tau.21.166-173>.
15. *Соколов С.М., Беклемишев Н.Д., Богуславский А.А.* Организация целенаправленных перемещений подвижных средств с использованием зрительных ориентиров // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2021. – № 1.
16. *Mulzer W., Rote G.* Minimum-weight triangulation is NP-hard // *Proc. of 22nd Annual Symposium on Computational Geometry*. – 2006. – P. 1-10.
17. *Karkishchenko A.N., Pshikhov V.Kh.* On finding the complexity of an environment for the operation of a mobile object on a plane // *Automation and Remote Control*. – 2019. – Vol. 80 (5). – P. 897-912.
18. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
19. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Динамика самолета. Пространственное движение. – М.: Машиностроение, 1983.
20. *Pshikhov V., Medvedev M.* Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks // *Automation and Remote Control*. – 2020. – Vol. 81, No. 11. – P. 2078-2093.

21. Сизов А.В. и др. Методика формирования требований к системе коррекции инерциальной навигационной системы на основе решения многопараметрической оптимизационной задачи // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 381-392.
22. Емельянец Г.И., Степанов А.П., Блажнов Б.А. О решении навигационной задачи для летательных аппаратов с использованием инерциального модуля на микромеханических датчиках и наземных радиоориентиров // Гироскопия и навигация. – 2017. – Т. 2. – С. 3-17.
23. Daftry Sh., Dey D., Sandhawalia H., Zeng S., Bagnell J.A., Hebert M. Semi-Dense Visual Odometry for Monocular Navigation in Cluttered Environment // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2015.

REFERENCES

1. Veremeenko K.K., Zheltov S.Yu. i dr. Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov [Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft], ed. by M.N. Krasil'shchikova, G.G. Sebyakova. Moscow: Fizmatlit, 2009, 556 p. ISBN 978-59221-1168-3.
2. Layh T., Gebre-Egziabher D. Design for graceful degradation and recovery from GNSS interruptions, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2017, Vol. 32 (9), pp. 4-17.
3. Savel'ev V.M., Antonov D.A. Vystavka besplatformennoy inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy bespilotnogo letatel'nogo apparata na podvizhnom osnovanii [Tuning of a free-form Inertial navigation System of an Unmanned aerial Vehicle on a Movable base], *Trudy MAI* [Transactions of MAI], 2011, Issue 45.
4. GL-80 – malogabaritnaya oblegchennaya besplatformennaya inertsiyal'naya navigatsionnaya sistema (BINS) – girokompas na baze volokonno-opticheskikh giroskopov (VOG) s zamknutym konturom [GL-80-small-sized lightweight strapdown inertial navigation system (BINS) - gyrocompass based on fiber-optic gyroscopes (VOG) with a closed loop]. Available at: <http://gyrolab.ru/product/gl-80-volonno-opticheskiy-gyroscope-inertsiyalnaya-navigatsionnaya-sistema-ins/> (accessed 02 March 2021).
5. Mikhaylov N.V., Chistyakov V.V. Opyt ispol'zovaniya metoda «SoftFlex» v apparature potrebiteley sputnikovoy navigatsii [Experience of using the "SoftFlex" method in the equipment of satellite navigation consumers], *Гироскопия и навигация* [Gyroscopy and navigation], 2012, No. 4, pp. 105-114.
6. Ferreira R., Gaspar J., Sebastião P. et al. Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms, *Wireless Perspective Communication*, 2020, Vol. 115, pp. 2705-2727. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07212-6>.
7. Bingöl Ö., Güzey H.M. Neuro sliding mode control of quadrotor UAVs carrying suspended payload, *Advanced Robotics*, 2021, Vol. 35 (3-4), pp. 255-266.
8. Beloglazov D.A., Gayduk A.R., Kosenko E.Yu., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Solov'ev V.V., Titov A.E., Finaev V.I., Shapovalov I.O. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami v neopredelennykh sredakh [Group control of mobile objects in undefined environments], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2015, 304 p. ISBN 978-5-9221-1674-9.
9. Kendoul F. Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems, *Journal of Field Robotics*, 2012, Vol. 29 (2), pp. 315-378. Doi: 10.1002/rob.20414.
10. Pshikhopov V., and Medvedev M. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes, *SPIIRAS Proceedings*, 2018, Vol. 60 (5), pp. 39-63.
11. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Vasilyev A.I., Trifonov O.V. Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring, *Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer)*, 2013, Vol. 208, pp. 463-476.
12. Zavalishin O.I. Uluchshenie tochnosti navigatsii i posadki s ispol'zovaniem GBASII/III kategorii [Improved navigation and landing accuracy using GBAS Category II/III], *Informatsiatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 2, pp. 18-21.
13. Voloshchenko E.V., Voloshchenko V.Yu. Tekhnologii kompleksnoy navigatsii bespilotnykh gidrosamoletov na akvatorii gidroaerodroma [Technology integrated navigation of unmanned seaplane on the water with hydro-port], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6 (216), pp. 52-65.

14. Polivanov A.Yu., Ivanov Yu.V., Kholin D.V. Metodika preobrazovaniya koordinat sistemy tekhnicheskogo zreniya promyshlennogo robota dlya operatsii lazernoy svarki [Method of transformation of coordinates of the industrial robot's vision system for laser welding operation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, Vol. 21 (3), pp. 166-173. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.21.166-173>.
15. Sokolov S.M., Beklemishev N.D., Boguslavskiy A.A. Organizatsiya tselenapravlennykh peremeshcheniy podvizhnykh sredstv s ispol'zovaniem zritel'nykh orientirov [The organization of purposeful movements of mobile means with the use of visual orientations], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1.
16. Mulzer W., Rote G. Minimum-weight triangulation is NP-hard, *Proc. of 22nd Annual Symposium on Computational Geometry*, 2006, pp. 1-10.
17. Karkishchenko A.N., Pshikhopov V.Kh. On finding the complexity of an environment for the operation of a mobile object on a plane, *Automation and Remote Control*, 2019, Vol. 80 (5), pp. 897-912.
18. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmal' V.A. Sistema pozitsionno-traektornogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model' [The system of positional-trajectory control of a robotic aeronautical platform: a mathematical model], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation and Control], 2013, No. 6, pp. 14-21.
19. Byushgens G.S., Studnev R.V. Dinamika samoleta. Prostranstvennoe dvizhenie [Dynamics of the aircraft. Spatial movement]. Moscow: Mashinostroenie, 1983.
20. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks, *Automation and Remote Control*, 2020, Vol. 81, No. 11, pp. 2078-2093.
21. Sizov A.V. i dr. Metodika formirovaniya trebovaniy k sisteme korrektsii inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy na osnove resheniya mnogoparametricheskoy optimizatsionnoy zadachi [Methodology of forming requirements for the correction system of an inertial navigation system based on the solution of a multiparametric optimization problem], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and Information Technologies], 2018, Vol. 6, No. 4, pp. 381-392.
22. Emel'yantsev G.I., Stepanov A.P., Blazhnov B.A. O reshenii navigatsionnoy zadachi dlya letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem inertsiyal'nogo modulya na mikromekhanicheskikh datchikakh i nazemnykh radioorientirov [On the solution of the navigation problem for aircraft using an inertial module on micromechanical sensors and ground-based radio orientators], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2017, Vol. 2, pp. 3-17.
23. Daftry Sh., Dey D., Sandhawalia H., Zeng S., Bagnell J.A., Hebert M. Semi-Dense Visual Odometry for Monocular Navigation in Cluttered Environment, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

Костюков Владимир Александрович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: vakostukov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Косенко Евгений Юрьевич – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

Мамченко Марк Владиславович – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: markmamcha@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 84953348910; научный сотрудник.

Kostjukov Vladimir Aleksandrovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: vakostukov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Kosenko Evgeny Yurevich – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Medvedev Mikhail Yurjevich – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.

Mamchenko Mark Vladislavovich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: markmamcha@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +74953348910; researcher.

УДК 004

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-218-235

Ю.Н. Кочеров, Д.В. Самойленко**РАЗРАБОТКА НАДЕЖНОГО МЕТОДА СВЯЗИ РТК НА БАЗЕ
ГРУППОВОГО МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ, ОСНОВАННОГО
НА СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ**

В работе рассматривается надежный метод передачи данных в системах связи и управления роботехническими комплексами. В связи с тем, что изменение части закодированной информации передаваемой по каналам связи может привести к частичной или полной потере данных и, как следствие, привести к потере контроля над роботехническим комплексом. Следовательно, необходимо применять методы защиты данных, передаваемых по радиоканалам. Предлагаемый метод предназначен для обеспечения защиты информации в каналах связи роботехнических комплексов от доступа несанкционированных пользователей и подтверждения достоверности полученной информации. В статье исследуются методы защиты данных, предназначенных для защиты информации, циркулирующей в системах образованных несколькими взаимодействующими агентами. Рассматриваемый подход базируется на методах защиты информации и помехоустойчивого кодирования основанных на системе остаточных классов. Применяемые методы помехоустойчивого кодирования, основанные на системе остаточных классов, базируются на идее порогового разделения данных, в которых исходную информацию можно восстановить имея k из n частей исходной информации. Это связано с тем, что избыточная модулярная арифметика, или избыточная система остаточных классов, обладает уникальными свойствами относительно обнаружения и коррекции ошибок. Кроме того, система остаточных классов обладает таким преимуществом как низкая вычислительной сложность алгоритмов разделения данных. Для увеличения надежности связи роботехнических комплексов в мультисканальных системах связи в работе предложен метод защиты информации и помехоустойчивого кодирования, основанный на многоступенчатом пороговом разделении данных. В результате работы получена система помехоустойчивой передачи информации, обеспечивающая комплексную защиту роботехнических комплексов.

Система остаточных классов; надежность передачи данных; пороговое разделение данных; обеспечение надежной связи роботехнических комплексов.

Y.N. Kocherov, D.V. Samoilenko**DEVELOPMENT OF A RELIABLE RTC COMMUNICATION METHOD
BASED ON A GROUP DATA SEPARATION METHOD BASED
ON A RESIDUAL CLASS SYSTEM**

The paper considers a reliable method of data transmission in communication systems and control of robotic complexes. Due to the fact that a change in part of the encoded information transmitted through communication channels can lead to partial or complete loss of data and, as a consequence, lead to loss of control over the robotic complex. Therefore, it is necessary to ap-

ply methods of protecting data transmitted over radio channels. The proposed method is intended to ensure the protection of information in the communication channels of robotic complexes from the access of unauthorized users and to confirm the reliability of the information received. The article examines data protection methods designed to protect information circulating in systems formed by several interacting agents. The approach under consideration is based on the methods of information protection and error-correcting coding based on the system of residual classes. The applied methods of error-correcting coding, based on the system of residual classes, are based on the idea of threshold data separation, in which the original information can be restored from parts of the original information. This is due to the fact that redundant modular arithmetic, or redundant system of residual classes, has unique properties with respect to error detection and correction. In addition, the system of residual classes has such an advantage as low computational complexity of data separation algorithms. To increase the reliability of communication between robotic complexes in multichannel communication systems, the paper proposes a method for information protection and noise-resistant coding, based on a multistage threshold data separation. As a result of the work, a system of noise-resistant information transmission was obtained, which provides comprehensive protection for robotic systems.

System of residual classes; reliability of data transmission; threshold data separation; ensuring reliable communication of robotic complexes.

1. Введение. Мобильные робототехнические комплексы (МРК) решают такие задачи как: разведка и наблюдение; уничтожение важных объектов; нейтрализация взрывоопасных объектов, минных заграждений; поисковые и аварийно-спасательные работы и др. Так как рассмотренные выше задачи сложно подаются формализации то во главу угла ставится задача дистанционного управления робототехническими комплексами (РТК). Каналы связи РТК на основе радиопередач подвергаются различным электромагнитным воздействиям как техногенного характера, так и третьей стороны (несанкционированных пользователей), которая может воздействовать на РТК и как результат оператор может потерять управление им.

В связи с вышесказанным возникают задачи надежного мультиканального управления робототехническими комплексами.

Для решения такой задачи применяются методы многоканальной маршрутизации. Такая маршрутизация должна обеспечивать высокую пропускную способность и малое время задержки. В основу построения многоканальных систем связи положен принцип уплотнения линий связи. Самым распространенным методом уплотнения является частотное уплотнение при котором по каждому каналу отводится определенная часть области частот, занимаемая трактом групповой передачи сообщения. При этом необходимо обеспечивать безопасность и надежность информации по каждому каналу.

Для разделения информации по каналам связи принято применять пороговые схемы разделения данных. При этом по каждому каналу передается только часть информации [1].

Такие схемы применяются в том случае, когда существует большая вероятность компрометации одного или нескольких участников, но вероятность предварительного сговора участников считается пренебрежимо малой.

Концепция порогового разделения секрета предложена в 1979 израильским криптоаналитиком Ади Шамиром.

В современных алгоритмах для разделения информации на части применяют методы, основанные на системе остаточных классов (СОК). СОК – это непозиционная система счисления, основанная на модулярной арифметике [2, 3]. Представление чисел в СОК основано на понятии вычета и Китайской теореме об остатках [4].

Методы, основанные на СОК, обладают следующими преимуществами:

- ◆ СОК обладает корректирующими свойствами [5];
- ◆ низкая вычислительная сложность.

Для разработки интеллектуальных РТК необходимо решить следующие вопросы:

1. Низкая робастность существующих адаптивных систем управления роботов для их применения в динамических средах:

- ◆ модернизация методов адаптивного управления движением роботов и их коллективов (мультиагентные робототехнические системы) в условиях неопределенности и существенных внешних возмущений;

- ◆ разработка баз данных реального времени для представления знаний в робототехнических комплексах;

- ◆ создание методов интеллектуального анализа, управления и прогнозирования функционирования робототехнических систем;

- ◆ разработка методов, схем и процедур обнаружения неисправностей и отказов систем управления робототехническими системами, а также статистического анализа этих отказов.

2. Развитие интерфейсов «человек-робот» в задаче коллаборации при совместном выполнении сложных задач:

- ◆ развитие новых неинвазивных сенсорных систем, включая силомоментное очувствление, электромиографию и электроэнцефалографию;

- ◆ разработка алгоритмов распознавания и синтеза естественной речи;

- ◆ синтез алгоритмов распознавания специфических сценариев поведения человека по визуальной информации с целью мониторинга состояния рабочих, хронических больных и престарелых людей, а также предотвращения агрессии в общественных местах;

- ◆ развитие методов скоростного обучения роботов (тренажеров).

3. Организация обратной связи, предоставляющей полную и значимую информацию о состоянии окружения и самой робототехнической системы:

- ◆ разработка высокоэффективных, малогабаритных и дешевых систем технического зрения для робототехнических систем;

- ◆ разработка малогабаритных высокоточных датчиков силомоментной информации для робототехнических систем;

- ◆ развитие методов обработки сенсорной информации для задач одновременной локализации и картирования;

4. Отсутствие эффективных способов передвижения и способов воздействия на внешние объекты. Развитие бионических технологий в робототехнике:

- ◆ разработка новых принципов перемещения в пространстве (использование ветра, волн, течений, планирование в воде или восходящих потоках воздуха и т.п.);

- ◆ разработка новых принципов воздействия на объекты (использование для манипуляций и воздействий электромагнитного поля, потоков газа или жидкости, электрических разрядов и т.п.).

- ◆ создание и развитие новых типов движителей и систем анализа данных, основанных на бионических принципах (рыбы плавники, глаза стрекозы, крылья бабочки и т.п.).

5. Координированное управление коллективами роботов (мультиагентные РТК), обеспечение надежной и бесперебойной связи в робототехнических системах, самообучение и самопрограммирование:

- ◆ прецизионное манипулирование крупногабаритными и массивными объектами;

- ◆ разработка алгоритмов распределения задач между агентами системы с учетом их текущего состояния;

- ◆ фундаментальные проблемы связи при когерентной работе группы роботов, в том числе с децентрализованным управлением.

2. Обзор методов порогового разделения данных. В криптографии под термином разделение секрета понимается любой из способов распределения секрета среди группы участников каждому из которых достается только своя доля.

Простейшим методом реализации подобной схемы является следующий пример:

♦ пусть существует группа из n участников схемы разделения секрета и сообщение S длиной l состоящее из набора двоичных символов. Подобранным образом набор двоичных сообщений $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_n$ таких, что в сумме будут давать S и распространив среди всех участников схемы разделения секрета, то восстановить секрет будет возможно только в том случае, когда n участников соберутся вместе.

Пороговое разделение секрета отличается от процедуры разбиения тем, что для восстановления исходной информации потребуется только k из n исходных частей, на которые секрет был разделен.

Идею таких схем независимо друг от друга предложили в 1979 г. Адди Шамир и Джордж Блэкли.

В таких схемах под понятием разрешенная коалицией понимают такое количество участников, которые имеют достаточное количество долей для восстановления секрета

Пороговая схема Шамира построена вокруг концепции полиномиальной интерполяции. Главная идея этой концепции состоит в том, что интерполяция невозможна если известно меньшее количество точек. Другими словами, через две точки на плоскости можно построить неограниченное количество кривых степени 2, и чтобы построить через из них единственно верную кривую нужна третья точка (рис. 1).

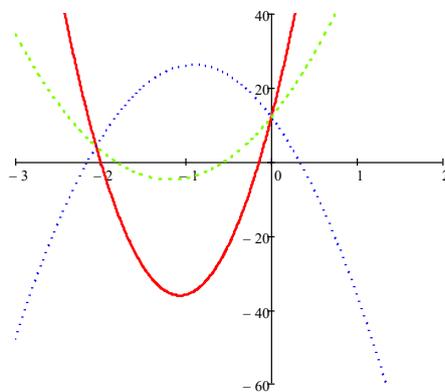


Рис. 1. Графическая иллюстрация схемы Шамира

Для разделения секрета между n пользователями таким образом, чтобы восстановить информацию с помощью k частей, секрет подставляют в качестве свободного члена полинома $k - 1$ степени.

Восстановить этот полином, а следовательно, и сам секрет можно только по k точкам.

Для оценки временных затрат рассмотрим вычислительную сложность алгоритма разделения данных на основе схемы Шамира. Асимптотическая поразрядная оценка сложности этого алгоритма выражается как:

$$O_B(\log_2^3(n) + \log_2^2(n^2) + \sum_{i=0}^{\lfloor \log_2(N+1) \rfloor + 1} \log_2(2 \cdot n^2 + i)), \quad (1)$$

где n – максимальное значение числа в десятичном представлении; N – порядок полинома.

На рис. 2 приведен принцип вычисления с применением двоичного каскадного сумматора и вычислительной сложностью на каждом уровне для полинома второй степени.

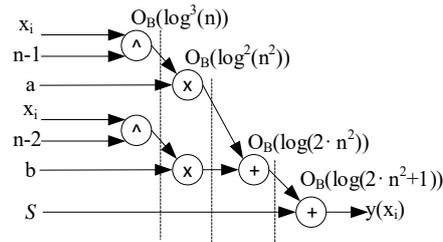


Рис. 2. Вычисление части информации схемой Шамира

Джордж Блэкли предложил свою схему, основанную на принципе векторного разделения секрета.

В такой схеме секретом является одна из координат k -мерной плоскости в k -мерном пространстве. Частью разделяемого секрета является уравнения $k-1$ мерных гиперплоскостей.

Основная концепция схемы разделения секрета Блэкли заключается в следующем: пересечением $k-1$ линейно независимых уравнений плоскостей $k-1$ порядка является прямая; пересечением k линейно независимых плоскостей $k-1$ порядка является точка. Одна из координат пересечения $k-1$ мерных плоскостей в k -мерном пространстве и будет разделяемым секретом.

Схема Блэкли для $k = 3$ представлена на рис. 3.

Для оценки временных затрат рассмотрим вычислительную сложность алгоритма разделения данных на основе схемы Блэкли. Асимптотическая поразрядная оценка сложности этого алгоритма выражается как:

$$O_B(\log_2^2(n) + \sum_{i=0}^{\lfloor \log_2(N+1) \rfloor + 1} \log_2(2 \cdot n^2 + i)), \quad (2)$$

где n – максимальное значение числа в десятичном представлении; N – порядок уравнения плоскости.

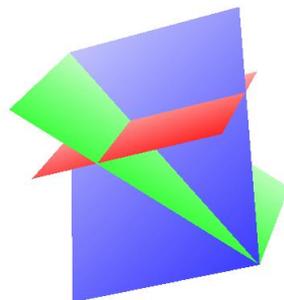


Рис. 3. Схема разделения секрета Блэкли

На рис. 4 приведен принцип вычисления с применением двоичного каскадного сумматора и вычислительной сложностью на каждом уровне для уравнения плоскости третьей степени.

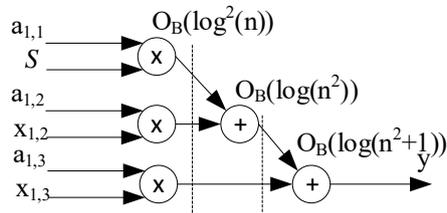


Рис. 4. Вычисление части информации схемой Блэкли

На рис. 5 показаны графики асимптотической поразрядной оценка сложности схем Блэкли и Шамира от порядка уравнений.

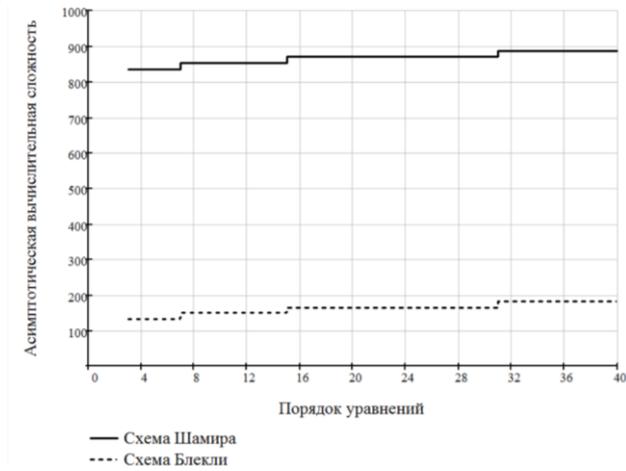


Рис. 5. Оценка вычислительной сложности схем Блэкли и Шамира

Отличие от схемы Шамира и Блэкли принцип которых основывается на расчетах уравнений полинома или плоскости существуют другие методы разделения данных, которые основаны на вычисления остатков целочисленного деления информации на ряд оснований.

СОК определяется рядом попарно взаимно простых модулей $(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$, таких, что $gnd(p_i, p_j) = 1 (\forall i, j = 0, 1, 2, \dots, n; i \neq j)$ называемых базисом при $P = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n$ таким образом любому целому S из множества $[0; P-1]$ ставится соответствие набор остатков $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ где:

$$\begin{cases} \alpha_1 = S \bmod p_1 \\ \alpha_2 = S \bmod p_2 \\ \dots \\ \alpha_n = S \bmod p_n \end{cases}$$

При этом Китайская теорема об остатках гарантирует однозначность представления целых положительных чисел из диапазона $[0; P-1]$.

Принципы Китайкой теоремы об остатках были также применены для разделения секрета и предложены в работах: M. Mignotte. How to Share a Secret // Lecture Notes in Computer Science. – 1983. – Vol. 149. – P. 371-375. – Doi:10.1007/3-540-39466-4_27. и С.А. Asmuth and J. Bloom. A modular approach to key safeguarding // IEEE Transactions on Information Theory. – 1986. – Vol. 2. – P. 208-210.

Схема разделения Миньотта [6] позволяет пользователю, имеющему некоторое разрешенное количество частей информации, восстановить ее, причем единственным образом.

Принцип работы схемы, следующий: пусть необходимо разделить информацию S среди n пользователей таким образом чтобы при условии наличия k частей, было возможно восстановить исходную информацию, а имея в наличие $k-1$ не имели такой возможности.

Для этого необходима последовательность натуральных чисел (называемую (k, n) -последовательностью Миньотта) такая, что: $p_1 < p_2 < \dots < p_n$ и

$\prod_{i=0}^{k-2} p_{n-i} < \prod_{i=1}^k p_i$. Причем должны соблюдаться следующие условия:

♦ любые два числа последовательности должны быть взаимно простыми т.е. $gnd(p_i, p_j) = (\forall i, j = 0, 1, 2, \dots, n; i \neq j)$;

♦ информация должна находиться в диапазоне $\alpha < S < \beta$ где $\alpha = \prod_{i=1}^k p_i$, а

$\beta = \prod_{i=1}^{k-2} p_{n-i}$ то есть $p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k < S < p_{n-k+2} \cdot p_{n-k+3} \cdot \dots \cdot p_n$.

Части вычисляются по формуле $\alpha_i = S \bmod p_i$ для всех $i \in [1; n]$ и распределяются по каналам связи.

Для оценки временных затрат рассмотрим вычислительную сложность алгоритма разделения данных на основе схемы Блэкли. Асимптотическая поразрядная оценка сложности этого алгоритма выражается как:

$$O_B(\log_2^2(n)), \quad (3)$$

Схема Асмута-Блума [7], как и схема Миньотта это пороговая схема разделения секрета, построенная с использованием ряда простых чисел которая позволяет разделить секрет среди n сторон так что его восстановят любые k участников.

Для разделения секрета схемой Асмута-Блума необходимо выбрать простое число q больше $[8, 9] S$.

Следующим этапом проводится выбор n взаимно простых друг с другом чисел p_1, p_2, \dots, p_n удовлетворяющих следующим условиям:

- ♦ $\forall i : q < p_i$;
- ♦ $\forall i : p_i < p_{i+1}$;
- ♦ $p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k < q \cdot p_{n-k+2} \cdot p_{n-k+3} \cdot \dots \cdot p_n$ [10].

Далее необходимо выбрать случайное число r и вычислить $S' = S + r \cdot q$.

Части секрета вычисляются по формуле $\alpha_i = S' \bmod p_i$. Участникам раздается следующая информация $\{q, p_i, \alpha_i\}$.

Для оценки временных затрат рассмотрим вычислительную сложность алгоритма разделения данных на основе схемы Асмута-Блума. Асимптотическая поразрядная оценка сложности этого алгоритма выражается как:

$$O_B(\log_2^2(n) + \log_2(n^2)), \quad (4)$$

Как видно из формул (3) и (4) вычислительная сложность алгоритмов, основанных на СОК, зависит только от максимального значения числа. Из формул (1) и (2) видно, что вычислительная сложность зависит от размера числа и порядка полинома или порядка уравнения плоскости. На рис. 6 показана зависимость асимптотической вычислительной сложности рассмотренных алгоритмов от размера числа при разделении на 3 части. При увеличении количества частей в схемах основанных на системе остаточных классов вычислительная сложность изменяться не будет, а в схемах Блэкли и Шамира будет увеличиваться в соответствии с рис. 5.

Из графика рис. 6 можно сделать вывод что для разделения данных по показателю вычислительная сложность следует применять пороговые алгоритмы, основанные на СОК.

Для схем разделения данных существуют также такие показатели как совершенность и идеальность:

- ◆ схемы разделения секрета, в которых разрешенные коалиции участников могут однозначно восстановить секрет, а неразрешенные не получают никакой апостериорной информации о возможном значении секрета, называются совершенными;

- ◆ схема разделения секрета называется идеальной, если размер доли секрета равен размеру самого секрета.

Так как в схеме Миньотта части вычисляются $\alpha_i = S \bmod p_i$ то можно сделать вывод что эта схем не совершенная и не идеальная. Поэтому в этой работе будет применяться схема Асмута-Блума.

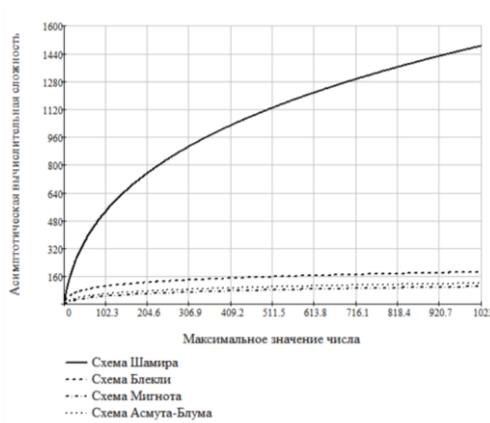


Рис. 6. Оценка вычислительной сложности схем рассмотренных алгоритмов

3. Оценка методов восстановления данных из системы остаточных классов в позиционную систему счисления. При восстановлении чисел из СОК в позиционную систему счисления (ПСС) могут применяться различные методы такие как: методы основанные на КТО; метод Гарнера [11] (метод, основанный на обобщенной полиадической системе счисления (ОПСС)) или метод совместного использования КТО и ОПСС [12, 13].

Восстановление исходной информации с применением КТО основывается на вычислении значения по формуле:

$$S = \left| \sum_{i=1}^n \alpha_i B_i \right|_p$$

где $\alpha_i = S \bmod p_i$; B_i – ортогональные базисы, рассчитываемые по формуле $B_i = \frac{m_i P}{p_i}$, m_i – положительные, целые числа называемые весами базиса, их, определяют из приближения $P_i m_i = 1 \bmod p_i$.

Рассмотрим пример (k, n) при $k = 3$ и $n = 5$ порогового разделения данных и их восстановления с применением метода основанного на КТО.

Пусть дано число $S = 200$ из условий: $\forall i: q < p_i$; $\forall i: p_i < p_{i+1}$; $p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k < q < p_{n-k+2} \cdot p_{n-k+3} \cdot \dots \cdot p_n$ примем следующие значения $q = 257$, $p_1 = 271$, $p_2 = 277$, $p_3 = 281$, $p_4 = 283$, $p_5 = 293$. Выбирается случайное число $r = 25$. Тогда:

$$S' = S + r \cdot q = 200 + 25 \cdot 257 = 6625.$$

Следующим этапом $S' = 6625$ разделяется на $n = 5$ частей:

$$\alpha_1 = S' \bmod p_1 = 6625 \bmod 271 = 121;$$

$$\alpha_2 = S' \bmod p_2 = 6625 \bmod 277 = 254;$$

$$\alpha_3 = S' \bmod p_3 = 6625 \bmod 281 = 162;$$

$$\alpha_4 = S' \bmod p_4 = 6625 \bmod 283 = 116;$$

$$\alpha_5 = S' \bmod p_5 = 6625 \bmod 293 = 171.$$

Части $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ передаются по разным каналам передачи информации [14, 15].

Далее рассмотрен пример восстановления информации по $k = 3$ частям. Для восстановления будут использоваться следующие части: $\alpha_1 = 121$; $\alpha_3 = 162$; $\alpha_5 = 171$.

Тогда диапазон СОК $P = p_1 \cdot p_3 \cdot p_5 = 271 \cdot 281 \cdot 293 = 22312243$. Следующим этапом вычисляются коэффициенты:

$$P_1 = \frac{P}{p_1} = \frac{22312243}{271} = 82333;$$

$$P_3 = \frac{P}{p_3} = \frac{22312243}{281} = 79403;$$

$$P_5 = \frac{P}{p_5} = \frac{22312243}{293} = 761511.$$

Из приближения $P_i m_i \bmod p_i \equiv 1$ рассчитываются веса базиса:

$$82333 m_1 \bmod 271 \equiv 1 \text{ тогда } m_1 = 85;$$

$$79403 m_3 \bmod 281 \equiv 1 \text{ тогда } m_3 = 96;$$

$$761511 m_5 \bmod 293 \equiv 1 \text{ тогда } m_5 = 101.$$

Тогда веса базисов равны:

$$B_1 = P_1 \cdot m_1 = 82333 \cdot 85 = 6998305;$$

$$B_3 = P_3 \cdot m_3 = 79403 \cdot 96 = 7622688;$$

$$B_5 = P_5 \cdot m_5 = 76151 \cdot 101 = 7691251.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} S' &= (B_1 \cdot \alpha_1 + B_3 \cdot \alpha_3 + B_5 \cdot \alpha_5) \bmod P = \\ &= (121 \cdot 6998305 + 162 \cdot 7622688 + 171 \cdot 7691251) \bmod 22312243 = 6625, \end{aligned}$$

$$\text{а } S = S' - r \cdot q = 6625 - 25 \cdot 257 = 200 \text{ [16].}$$

Недостаток этого метода, заключается в том, что для преобразования из системы СОК в позиционную систему счисления требуется операции умножение и сложение больших чисел и нахождение остатка по модулю P .

Для снижения вычислительной сложности стоит применять метод Гарнера в котором операция нахождение остатка вычисляется не от полного диапазона, а по множеству p_i .

В методе Гарнера используется полиадическая система счисления, где любое число представляется в системе взаимно простых чисел p_1, p_2, \dots, p_n следующим образом:

$$S = a_1 + a_2 \cdot p_1 + a_3 \cdot p_1 \cdot p_2 + \dots + a_n \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n \text{ [15].}$$

Коэффициенты $a_i, i = [0; n]$ вычисляются следующим образом:

$$a_i = \alpha_i \bmod p_i;$$

$$a_2 = (\alpha_2 - a_1) \tau_{12} \bmod p_2;$$

$$a_3 = ((\alpha_3 - a_1) \tau_{13} - a_2) \tau_{23} \bmod p_3;$$

...

$$a_n = (((\dots(\alpha_n - a_1) \tau_{1n} - a_2) \tau_{2n} - \dots - a_{n-1}) \tau_{n-1n} \bmod p_n.$$

Константы τ_{kj} рассчитываются из условий:

$$\tau_{kj} = \left| \frac{1}{p_k} \right|_{p_j} \text{ где } 1 \leq k < j \leq n.$$

Подставив константы τ_{kj} , получим:

$$a_i = \alpha_i \bmod p_i;$$

$$a_2 = ((p_1^{-1}) \bmod p_2 (\alpha_2 - a_1)) \bmod p_2;$$

$$a_3 = ((p_2^{-1}) \bmod p_3 ((p_1^{-1}) \bmod p_3 (\alpha_3 - a_1) - a_2)) \bmod p_3;$$

...

Далее рассмотрен пример восстановления информации по $k = 3$ частям. Для восстановления будут использоваться те же, как и в предыдущем примере: $\alpha_1 = 121$; $\alpha_3 = 162$; $\alpha_5 = 171$.

$$\text{Для того рассчитаны константы } \tau_{kj} = \left| \frac{1}{p_k} \right|_{p_j} \text{ где } 1 \leq k < j \leq n:$$

$$\begin{aligned}\tau_{12} &= \left| \frac{1}{p_1} \right|_{p_2} = \left| \frac{1}{271} \right|_{281} = 28 ; \\ \tau_{13} &= \left| \frac{1}{p_1} \right|_{p_3} = \left| \frac{1}{271} \right|_{293} = 253 ; \\ \tau_{23} &= \left| \frac{1}{p_2} \right|_{p_3} = \left| \frac{1}{281} \right|_{293} = 122 .\end{aligned}$$

Рассчитываем коэффициенты ОПСС:

$$\begin{aligned}a_1 &= \alpha_1 \bmod p_1 = 121 \bmod 271 = 121; \\ a_2 &= (\alpha_2 - a_1) \cdot \tau_{12} \bmod p_2 = (162 - 121) \cdot 28 \bmod 281 = 24; \\ a_3 &= ((\alpha_3 - a_1) \cdot \tau_{13} - a_2) \cdot \tau_{23} \bmod p_2 = \\ &= ((179 - 24) \cdot 253 - 24) \cdot 122 \bmod 293 = 0.\end{aligned}$$

Тогда:

$$A = a_1 + a_2 \cdot p_1 + a_3 \cdot p_1 \cdot p_2 = 121 + 24 \cdot 271 + 0 \cdot 271 \cdot 281 = 6625 .$$

Недостатком метода Гарнера является то, что в каждой итерации применяются операции вычитания и умножения по модулю p_i .

Метод, основанный на совместном применении, КТО и ОПСС исключает операцию вычитания.

Для решения этим методом ортогональные базисы необходимо представить в ОПСС:

$$b_i = b_{i1} + b_{i2} \cdot p_1 + b_{i3} \cdot p_1 \cdot p_2 + \dots + b_{in} \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n .$$

где b_{ij} – это коэффициенты ОПСС; $i, j = 1, 2, \dots, n$.

В связи с тем, что $b_i \bmod p_i = 0$, $\forall j > i$, то перед первым значащим значением будет $i-1$ нулей.

Для удобства базисы можно представить в виде матрицы размерностью $[n, n]$.

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ 0 & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} .$$

Тогда

$$S = \begin{bmatrix} \left| \alpha_1 \cdot b_{11} \right|_{p_1}^+ & \left| \alpha_1 \cdot b_{12} \right|_{p_2}^+ & \dots & \left| \alpha_1 \cdot b_{1n} \right|_{p_n}^+ \\ 0 & \left| \alpha_2 \cdot b_{22} \right|_{p_2}^+ & \dots & \left| \alpha_2 \cdot b_{2n} \right|_{p_n}^+ \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \left| \alpha_n \cdot b_{nn} \right|_{p_n}^+ \end{bmatrix} .$$

$$\text{При этом } \alpha_i = \left| \sum_{j=1}^n \alpha_j b_{ij} \right|_{p_i} .$$

Далее рассмотрен пример восстановления информации по $k = 3$ частям [17, 18]. Для восстановления будут использоваться те же, как и в предыдущем примере: $\alpha_1 = 121$; $\alpha_3 = 162$; $\alpha_5 = 171$ [19].

Представим базисы B_i в ОПСС, тогда b_{ij} :

$$\begin{aligned} b_{11} &= 1; b_{12} = 253; b_{13} = 91; \\ b_{21} &= 0; b_{22} = 28; b_{23} = 100; \\ b_{31} &= 0; b_{32} = 0; b_{33} = 101; \end{aligned}$$

Отсюда:

$$S' = \begin{bmatrix} 121 \\ 162 \\ 171 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |1|_{271}^+ & |253|_{281}^+ & |91|_{293}^+ \\ |0|_{271}^+ & |28|_{281}^+ & |100|_{293}^+ \\ |0|_{271}^+ & |0|_{281}^+ & |101|_{293}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 121 & 265 & 278 \\ 0 & 40 & 101 \\ 0 & 0 & 206 \end{bmatrix}$$

$$a_1 = 121, a_2 = 24, a_3 = 0.$$

$$A = a_1 + a_2 \cdot p_1 + a_3 \cdot p_1 \cdot p_2 = 121 + 24 \cdot 271 + 0 \cdot 271 \cdot 281 = 6625$$

Из вышесказанного можно сделать вывод о привлекательности для практической реализации метода совместного использования КТО и ОПСС.

4. Метод разделения данных на множество подгрупп. Для повышения надежности схем разделения данных внедряется алгоритм разделения на множество подгрупп (рис. 7).



Рис. 7. Структурная схема разделения данных на множество подгрупп

Ниже представлена работа алгоритма с разделением на множество подгрупп. Она состоит из двух этапов [20]:

1) Информация S разделяется на множество, состоящее из n частей «лидеров групп» F_1, F_2, \dots, F_n .

2) Каждый «лидер группы» F_1, F_2, \dots, F_n разделяется на свое новое множество, состоящее из m частей $(F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1m})(F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2m}) \dots (F_{n1}, F_{n2}, \dots, F_{nm})$.

Полученные $n \times m$ частей информации $(F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1m})(F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2m}) \dots (F_{n1}, F_{n2}, \dots, F_{nm})$ передаются по линиям связи на удаленные сервера.

При хранении и передаче информации возможно использовать СОК. Для этого исходная информация будет разделена на части согласно количеству оснований СОК.

Для надежного хранения и передачи рассчитанных данных вводятся избыточные основания, тем самым увеличивается избыточность информации. В результате этого получаем классическую пороговую схему разделения данных, где для восстановления информации достаточно получить от k групп K частей. Из-

быточность введенной информации позволяет локализовать скомпрометировавшие себя хранилища информации и заблокировать их для дальнейшего использования и восстановления исходной информации.

5. Оценка надежности групповой схемы разделения данных и линейной.

Из алгоритма построения кода в системе остаточных классов (СОК) следуют свойства остатков a_i , представляющих операнд A_k : независимость, равноправность и малоразрядность. Рассмотрим, как влияют эти свойства на структуру ЭВМ и математическую модель ее надежности [12].

независимость остатков. Это дает возможность построения ЭВМ в виде набора (по числу оснований СОК) информационно независимых трактов, работающих параллельно во времени. При построении ЭВМ вычислительная система в СОК обладает модульностью конструкции, что позволяет осуществлять ремонт и техническое обслуживание, не прерывая решения задач. Для осуществления профилактических мероприятий не требуется высококвалифицированного обслуживающего персонала. Кроме этого ошибки, возникшие в тракте по основанию p_i не «размножаются» в остальные тракты ЭВМ; при этом безразлично имела ли место по этому основанию p_i однократная или многократная ошибка, или даже пачка ошибок длиной не более p_{i-1} двоичных разрядов. Таким образом, ошибка, возникшая в произвольном p_i тракте ЭВМ в СОК либо сохранится в этом тракте до конца вычислений, либо в процессе дальнейших вычислений самоустраниется (например, если после возникшего сбоя в остатке a_i промежуточный результат умножится на число имеющее нулевую цифру по основанию p_i). В этом случае посредством СОК можно построить систему исправления ошибок при введении минимальной избыточности, использующую динамику вычислительного процесса, введя понятия альтернативной совокупности. Совокупность основания СОК $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}$, по которым числа A_1, A_2, \dots, A_k , отличаются от неправильного операнда A , называется альтернативной совокупностью числа A и обозначается $W(A)$. Основная идея определения ошибочного остатка $\alpha_i = \alpha_i + \Delta\alpha_i$ состоит в том, что для получаемой в результате операции последовательности неправильных операндов $A_i (i = \overline{1, \rho})$ в динамике вычислительного процесса, не прерывая решения задачи, последовательно во времени определяются условные альтернативные совокупности $W(A) = W_{i-1}(A) \wedge W_i(A)$. За определенное время условные альтернативные совокупности стягиваются к ошибочному основанию (либо к двум основаниям p_i и p_n). После этого известными методами проводится коррекция искаженного остатка α_i . Отличительной особенностью данного метода коррекции ошибок является возможность исправления ошибки без останова вычислений, что важно для ЭВМ, функционирующие в реальном масштабе времени.

Детальное исследование рассматриваемой особенности СОК позволяет сделать вывод о том, что устройства, функционирующие в классе вычетов, относятся к легко контролируемым и легко диагностируемым объектам. Отмеченная особенность ЭВМ, функционирующей в СОК, способствует разработке эффективных методов контроля и диагностики.

♦ равноправность остатков. Любой остаток a_i числа A_k в СОК несет информацию обо всем исходном числе, что дает возможность чисто программными методами заменить искаженный тракт по модулю p_j на исправный (контрольный)

тракт по модулю m_i не прерывая решения задачи. СОК с двумя контрольными основаниями позволяет полностью сохранить работоспособность ЭВМ при отказах любых двух рабочих трактов. При возникновении третьего или даже четвертого отказов ЭВМ все еще может выполнять программу при некотором уменьшении точности или скорости вычислений, т.е. ЭВМ в СОК является исключительно «живучей», приближаясь в этом плане к живым организмам. Отметим, что данная особенность обуславливает одно из самых замечательных свойств СОК: одна и та же ЭВМ может иметь различную надежность при решении различных задач в зависимости от требований, предъявляемых к точности, объему памяти и быстродействию машины при их решении, т.е. в процессе решения различных задач на ЭВМ в СОК возможно осуществление «обменных» операций между точностью, быстродействием и надежностью.

♦ малоразрядность остатков. Эта особенность СОК позволяет эффективно применять табличные методы реализации арифметических операций. В этом случае большинство арифметических операций производится в один такт, что резко повышает быстродействие выполнения рациональных операций. Одновременно, табличные методы выполнения арифметических операций позволяют создать на базе матричных схем, высоконадежные вычислительные устройства.

В работе были сравнены надежность групповой и линейной схемы разделения данных. Расчёт надёжности представляет собой процедуру определения значений показателей надежности объекта с использованием методов, основанных на их вычислении по справочным данным о надежности элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчета.

Вероятность того, что в системе, состоящей из n одинаковых и равно надёжных элементов, безотказно работают не менее k элементов, может быть вычислена по формуле:

$$P(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p(t)^i q(t)^{n-i}, \quad (5)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы одного элемента системы;

$q(t) = 1 - p(t)$; $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ – биномиальный коэффициент из n по i .

Рассмотрим пример для вычисления надежности функции при $n = 5$, а $k = 3$. В качестве времени распределения безотказной работы одного элемента системы применим экспоненциальный закон распределения $p(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ при $\lambda = 1$. Тогда подставим значение в формулу (5) получим:

$$P(t) = \sum_{i=3}^5 \frac{5!}{i!(5-i)!} (\lambda e^{-\lambda t})^i (1 - \lambda e^{-\lambda t})^{5-i}.$$

Так же рассмотрим вероятность безотказной работы системы при пропорциональном увеличении информационных и контрольных модулей, $n_x = 25$ а $k_x = 25$ тогда:

$$P_x(t) = \sum_{i=15}^{25} \frac{25!}{i!(25-i)!} (\lambda e^{-\lambda t})^i (1 - \lambda e^{-\lambda t})^{25-i}.$$

На рис. 8 показаны графики зависимости времени безотказной работы системы $P(t)$ и $P_x(x)$.

Из графика видно, что время работы системы $P_x(x)$ намного меньше, чем $P(t)$.

Проинтегрировав $P(t)$ и $P_x(x)$ получим среднее время безотказной работы системы: $\int_0^{\infty} P(t)dt = 0.783$, $\int_0^{\infty} P_x(t)dt = 0.564$. Следовательно, при пропорциональном увеличении информационных и контрольных модулей надежность системы падает. Для рассмотренного нами примера снижение среднего времени работы системы составляет 72 %.



Рис. 8. Графики безотказной работы систем $P(t)$ и $P_x(x)$

Далее рассмотрим пример для определения среднего времени работы схемы с групповым разделением данных. Для этого разобьем схему из 25 элементов на 5 групп по 5 частей. В каждой группе 2 элемента будут избыточны и 2 группы будут избыточны. Тогда вероятность безотказной работы любой группы может быть оценена как

$$P_g(t) = \sum_{i=3}^5 \frac{5!}{i!(5-i)!} (\lambda e^{-\lambda t})^i (1 - \lambda e^{-\lambda t})^{5-i},$$

а системы в целом

$$P_{ob}(t) = \sum_{i=3}^5 \frac{5!}{i!(5-i)!} (P_g(t))^i (1 - P_g(t))^{5-i}.$$

На рис. 9 показаны графики зависимости времени безотказной работы системы $P_{ob}(t)$ и $P_x(t)$.

Из графика видно, что время работы системы групповой схемы разделения данных $P_{ob}(t)$ выше, чем линейной $P_x(t)$.

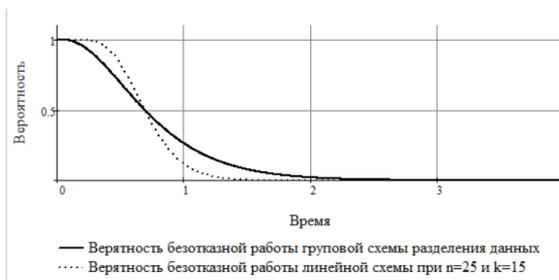


Рис. 9. графики безотказной работы систем $P_{ob}(t)$ и $P_x(t)$

Проинтегрировав $P_{ob}(t)$ и $P_x(t)$ получим среднее время безотказной работы системы: $\int_0^{\infty} P_{ob}(t)dt = 0.719$, $\int_0^{\infty} P_x(t)dt = 0.564$. Следовательно, при одинаковом числе участников схемы обмена сообщениями целесообразно использование групповой схемы разделение данных. Для рассмотренного нами примера преимущество групповой схемы составляет 78%.

Заключение. Рассмотренный метод разделения информации на группы подмножеств основанный на СОК показал, что его обнаруживающая способность когда составляет $\left(\frac{P_{n1} - P_{k1}}{P_{n1}} + \frac{P_{n2} - P_{k2}}{P_{n2}} + \dots + \frac{P_{nm} - P_{km}}{P_{nm}} \right) + \frac{P_n - P_k}{P_n}$ в отличие от классического $\frac{P_n - P_k}{P_n} = \frac{P_n - 1}{P_n}$. Также уменьшение разрядности частей информации приведет к снижению нагрузки на сети передачи данных, либо сервера.

Рассмотрены способы восстановления информации из СОК в ПСС. Оценка надежности показала, что среднее время работы групповой схемы разделения информации выше, на рассмотренных нами примерах она увеличивается на 78%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kaya K., Selçuk A.A.* Robust Threshold Schemes Based on the Chinese Remainder Theorem // Progress in Cryptology – AFRICACRYPT 2008. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – P. 94-108.
2. *Iftene S.* General Secret Sharing Based on the Chinese Remainder Theorem with Applications in E-Voting // Electron. Notes Theor. Comput. Sci. – 2007. – Vol. 186. – P. 67-84.
3. *Krasnobaev V. et al.* The Formulation and Solution of the Task of the Optimum Reservation in the System of Residual Classes // 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). – 2019. – P. 1-4.
4. *Акушский И.Я., Юдицкий Д.И.* Машинная арифметика в остаточных классах. – М.: Советское радио, 1968. – 440 p.
5. *Goldreich O., Ron D., Sudan M.* Chinese remaindering with errors // IEEE Transactions on Information Theory. – 2000. – Vol. 46, No. 4. – P. 1330-1338.
6. *Mignotte M.* How to Share a Secret // Cryptography. – Springer, Berlin, Heidelberg, 1982. – P. 371-375.
7. *Asmuth C., Bloom J.* A modular approach to key safeguarding // IEEE Transactions on Information Theory. – 1983. – Vol. 29, No. 2. – P. 208-210.
8. *Чмора А.Л.* Современная прикладная криптография: учеб. пособие. – М.: Гелиос АРВ, 2001. – 256 p.
9. *Червяков Н.И., Кочеров Ю.Н., Евдокимов А.А.* Управление ресурсами распределенной вычислительной системы на базе группового протокола разделения секрета. – Уфа: УГНТУ, 2013. – P. 163-168.
10. *Кочеров Юрий Николаевич, Червяков Николай Иванович.* Модификация схемы разделения данных Асмута-Блума с применением Метода Фрактальной Геометрии // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 1. – С. 7-14.
11. *Garner H.L.* The Residue Number System // Papers Presented at the the March 3-5, 1959, Western Joint Computer Conference. – New York, NY, USA: ACM, 1959. – P. 146-153.
12. *Kuzmenko I. et al.* Modification of the Scheme of Division of Asmuth-Bloom Data with the Application of the Method of Fractal Geometry // 2017 IVth International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). – 2017. – P. 28-32.
13. *Sorin Iftene, Ioana Boureanu.* Weighted Threshold Secret Sharing Based on the Chinese Remainder Theorem // Sci. Ann. Cuza Univ. – 2015. – P. 161-172.
14. *Сахнюк П. и др.* Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем. – М.: Физматлит, 2003. – 288 p.

15. Червяков, Н.И. et al. Нейрокомпьютеры в остаточных классах. – М.: Радиотехника, 2003. – 272 p.
16. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Tikhonov E.E. Modeling of Parallel Data Encryption Algorithms // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2019. – P. 1-5.
17. Червяков Николай Иванович и др. Нейронная сеть с пороговой (k, t) структурой для преобразования остаточного кода в двоичный позиционный код: pat. 2380751 USA. – 2008.
18. Червяков Н. и др. Применение искусственных нейронных сетей и системы остаточных классов в криптографии. – М.: Физматлит, 2012. – 280 p.
19. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Tikhonov E.E. Safe Storage of Biometric Data // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2020. – P. 1-5.
20. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Koldaev A.I. Development of an Antinoise Method of Data Sharing Based on the Application of a Two-Step-Up System of Residual Classes // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – P. 1-5.

REFERENCES

1. Kaya K., Selçuk A.A. Robust Threshold Schemes Based on the Chinese Remainder Theorem, *Progress in Cryptology – AFRICACRYPT 2008*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 94-108.
2. İftene S. General Secret Sharing Based on the Chinese Remainder Theorem with Applications in E-Voting, *Electron. Notes Theor. Comput. Sci.*, 2007, Vol. 186, pp. 67-84.
3. Krasnobaev V. et al. The Formulation and Solution of the Task of the Optimum Reservation in the System of Residual Classes, *2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 2019, pp. 1-4.
4. Akushskiy I.Ya., Yuditskiy D.I. Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh [Machine arithmetic in residual classes]. Moscow: Sovetskoe radio, 1968, 440 p.
5. Goldreich O., Ron D., Sudan M. Chinese remaindering with errors, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, Vol. 46, No. 4, pp. 1330-1338.
6. Mignotte M. How to Share a Secret, *Cryptography*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1982, pp. 371-375.
7. Asmuth C., Bloom J. A modular approach to key safeguarding, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1983, Vol. 29, No. 2, pp. 208-210.
8. Chmora A.L. Sovremennaya prikladnaya kriptografiya: ucheb. posobie [Modern applied cryptography: textbook]. Moscow: Gelios ARV, 2001, 256 p.
9. Chervyakov N.I., Kocherov Yu.N., Evdokimov A.A. Upravlenie resursami raspredelennoy vychislitel'noy sistemy na baze gruppovogo protokola razdeleniya sekreta [Resource management of a distributed computing system based on a group secret sharing protocol]. Ufa: UGNTU, 2013, pp. 163-168.
10. Kocherov Yuriy Nikolaevich, Chervyakov Nikolay Ivanovich. Modifikatsiya skhemy razdeleniya dannykh Asmuta-Bluma s primeneniem Metoda Fraktal'noy Geometrii [Modification of the Asmut-Bloom data separation scheme using the Fractal Geometry Method], *Infokommunikatsionnye tekhnologii* [Infocommunication technologies], 2017, Vol. 15, No. 1, pp. 7-14.
11. Garner H.L. The Residue Number System, *Papers Presented at the the March 3-5, 1959, Western Joint Computer Conference*. New York, NY, USA: ACM, 1959, pp. 146-153.
12. Kuzmenko I. et al. Modification of the Scheme of Division of Asmuth-Bloom Data with the Application of the Method of Fractal Geometry, *2017 IVth International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, 2017, pp. 28-32.
13. Sorin İftene, Ioana Boureanu. Weighted Threshold Secret Sharing Based on the Chinese Remainder Theorem, *Sci. Ann. Cuza Univ.*, 2015, pp. 161-172.
14. Sakhnyuk P. i dr. Modul'yarnye parallel'nye vychislitel'nye struktury neyroprotsessornykh system [Modular parallel computing structures of neuroprocessor systems]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 288 p.
15. Chervyakov, N.I. et al. Neyrokomp'yutery v ostatochnykh klassakh [Neurocomputers in residual classes]. Moscow: Radiotekhnika, 2003, 272 p.

16. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Tikhonov E.E. Modeling of Parallel Data Encryption Algorithms, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2019, pp. 1-5.
17. Chervyakov Nikolay Ivanovich i dr. Neyronnaya set' s porogovoy (k, t) strukturoy dlya preobrazovaniya ostatochnogo koda v dvoichnyy pozitsionnyy kod [Neural network with threshold (k, t) structure for converting residual code into binary positional code]: pat. 2380751 USA, 2008.
18. Chervyakov N. i dr. Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setey i sistemy ostatochnykh klassov v kriptografii [Application of artificial neural networks and systems of residual classes in cryptography]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 280 p.
19. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Tikhonov E.E. Safe Storage of Biometric Data, 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1-5.
20. Kocherov Y.N., Samoilenko D.V., Koldaev A.I. Development of an Antinoise Method of Data Sharing Based on the Application of a Two-Step-Up System of Residual Classes, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018, pp. 1-5.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.А. Евдокимов.

Кочеров Юрий Николаевич – Невинномысский технологический институт; e-mail: kocherov_yra@mail.ru; г. Невинномысск, Россия; тел.: 88655471776; к.т.н.; доцент базовой кафедры регионального индустриального парка.

Самойленко Дмитрий Владимирович – e-mail: 151082@mail.ru; ст. преподаватель кафедры информационных систем, электропривода и автоматики.

Kocherov Yuri Nikolaevich – Nevinnomyssk Technological Institute; e-mail: kocherov_yra@mail.ru; Nevinnomyssk, Russia; phone: +78655471776; cand. of eng. sc.; associate professor of the base department of the Regional Industrial Park.

Samoilenko Dmitry Vladimirovich – e-mail: 151082@mail.ru; art. lecturer at the department of information systems, electric drive and automation.

УДК 681.3 004.2 629.05

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-235-247

С.М. Соколов, Н.Д. Беклемишев, А.А. Богуславский

ОРГАНИЗАЦИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОРИЕНТИРОВ

Рассматривается решение навигационной задачи с помощью системы технического зрения, определяющей положение подвижного средства относительно ориентиров, указанных в окружающем пространстве. Навигация по ориентирам является наиболее объективным критерием расположения подвижного средства в окружающем пространстве. Способ измерения параметров соотношений, характеризующих расположение подвижного средства относительно ориентиров, является почти независимым от других навигационных измерений. Ввод данных для корректировки координат и других параметров движения может производиться не непрерывно, а в некоторые дискретные, и, в общем случае, довольно редкие моменты времени. Рассматривается общая схема решения: от постановки, до получения навигационной информации. Кратко описывается комплексирование полученных данных с данными от других навигационных средств, анализируются ключевые проблемы и параметры СТЗ, влияющие на точность получаемых результатов. Ключевым моментом в рассматриваемом способе является решение системы уравнений, описывающих положение робототехнических комплексов относительно указанных ориентиров. Эта система решается модифицированным методом Гаусса-Ньютона для нелинейной переоп-

ределенной системы уравнений. Заменой левой части каждого уравнения ее дифференциалом в точке начального приближения осуществляется линеаризация. Значения неизвестных в переопределенной системе линейных уравнений, при которых сумма квадратов невязок в уравнениях является минимальной, могут быть получены либо методом SVD (сингулярного разложения), либо с помощью симметризации системы. При этом SVD более устойчив к накоплению вычислительной погрешности, но несколько более требователен к ресурсам компьютера и сложнее в реализации. Мы использовали решение методом симметризации как более простое. Полученная система решается методом квадратного корня (Холецкого). Для обнаружения ориентиров в составе СТЗ используются два вида модулей СТЗ – панорамный, на основе камеры с объективом типа «рыбий глаз» и стерео. Предложенный способ позволяет решать задачу уточнения параметров движения по отдельным, разреженным измерениям собственного положения и скорости относительно ориентиров в окружающем пространстве. Независимо и в комплексе с другими средствами навигации описанный подход обеспечивает высокоточное определение навигационных параметров в различных условиях движения. Описываются результаты натурных экспериментов с макетом предложенной системы при движении в различных условиях. Обсуждаются пути совершенствования и развития рассмотренного подхода.

Системы технического зрения; беспилотные подвижные средства; навигация; ориентиры; каркас программного обеспечения; метод Гаусса-Ньютона.

S.M. Sokolov, N.D. Beklemishev, A.A. Boguslavsky

ORGANIZATION OF GOAL-DIRECTED MOVEMENTS OF VEHICLES USING VISUAL LANDMARKS

The report considers the solution of the navigation problem with the help of a technical vision system that determines the position of the mobile vehicle relative to the landmarks indicated in the surrounding space. Navigation by landmarks is the most objective criterion for the location of a mobile vehicle in the surrounding space. The method of measuring the parameters of the ratios that characterize the location of the mobile vehicle relative to the landmarks is almost independent of other navigation measurements. Data input for correcting coordinates and other motion parameters can be performed not continuously, but at some discrete, and, in general, quite rare moments of time. The general scheme of the solution is considered: from setting up, to receiving navigation information. The integration of the obtained data with data from other navigation tools is briefly described, and the key problems and parameters of the VS that affect the accuracy of the obtained results are analyzed. The key point in this method is the solution of a system of equations describing the position of robotic complexes relative to the specified landmarks. This system is solved by a modified Gauss-Newton method for a nonlinear redefined system of equations. By replacing the left side of each equation with its differential at the point of initial approximation, linearization is performed. The values of the unknowns in the redefined system of linear equations for which the sum of the squared residuals in the equations is minimal can be obtained either by the SVD (singular value decomposition) method or by using the system's symmetrization. At the same time, SVD is more resistant to the accumulation of computational error, but it is somewhat more demanding on computer resources and more difficult to implement. We used the symmetrization solution as a simpler one. The resulting system is solved by the square root (Cholesky) method. To detect landmarks in the VS, two types of VS modules are used – panoramic, based on a camera with a fish-eye lens, and stereo. The proposed method allows us to solve the problem of clarifying the parameters of motion by separate, sparse measurements of the proper position and speed relative to landmarks in the surrounding space. Independently and in combination with other navigation tools, the described approach provides high-precision determination of navigation parameters in various driving conditions. The results of field experiments with the model of the proposed system in motion under various conditions are described. The ways of improvement and development of the considered approach are discussed.

Vision systems; unmanned mobile means; navigation; landmarks; software framework; Gauss-Newton method.

Введение. Одной из тенденций в развитии современной подвижной робототехники является переход от телеуправления к автономным беспилотным средствам. На этом пути обеспечение супервизорного режима управления целенаправленными перемещениями с минимальным участием человека является текущей задачей. Эту задачу призваны решать подвижные робототехнические комплексы (РТК) с повышенной степенью автономности (ПСА). За человеком остаётся целеполагание – указание конечной цели перемещений, помощь бортовой системе управления (БСУ) в сложных ситуациях и общий контроль за выполнением миссии подвижного средства. Известны примеры такого режима работы в специальных средах (движение самосвалов в карьерах, поездов в тоннелях и т.п.) [1–5]. Ещё одной тенденцией подвижной робототехники является всё более активное выдвигание на основную роль среди средств информационного обеспечения робототехнических комплексов систем технического зрения (СТЗ). Видеокамеры различных диапазонов, радиолокационные системы в совокупности с высокопроизводительными вычислителями создают благоприятную основу для создания бортовых систем технического зрения. СТЗ представляют наиболее полную и достоверную информацию для идентификации и определения относительного расположения объектов окружающего пространства и подвижного средства. Широким фронтом ведутся работы по разработке эффективного алгоритмического обеспечения и его реализации на бортовых программно-аппаратных платформах [6–9].

Для наземных и воздушных средств наиболее полную систему информационного обеспечения решения навигационной задачи образует так называемый «навигационный крест», включающий: глобальную спутниковую навигационную систему; традиционную навигационную систему, состоящую из инерциальной навигационной системы, системы счисления пути и корректировки по ориентирам; интерпретирующую (или качественную) навигацию и оператора. Комплексное использование всех составляющих этого креста обеспечивает решение навигационной задачи в большинстве практических случаев, но требует разнообразной инфраструктурной и сенсорной поддержки. В тех случаях, когда инфраструктура области перемещений заранее известна и неизменна в процессе движения и доступны данные глобальной спутниковой навигационной системы, организация целенаправленных перемещений РТК с ПСА может быть сведена к подаче звуковых команд на естественном языке или указанию GPS координат места назначения. Существенно сложнее ставить задачи целенаправленных перемещений в изменчивой, новой обстановке, без доступа к данным ГСНС или в обстановке с большим количеством препятствий и необходимостью высокоточного маневрирования. Примерами таких условий являются движение в естественных условиях вне урбанистической среды, движение в аварийных условиях, развалов и т.п.

Мы сосредотачиваем свои усилия на формировании эффективной (по соотношению цена/качество) унифицированной модульной программно-аппаратной архитектуре СТЗ для решения задач целенаправленных перемещений подвижных средств с повышенной степенью автономности и полностью автономных в сложных условиях функционирования, когда нет возможности использовать все многообразие навигационных средств одновременно. В статье описываются исследования, в которых делается акцент на использовании СТЗ в части определения положения подвижного средства относительно ориентиров в окружающем пространстве. Использование СТЗ для других целей (оптическая одометрия, контроль геометрической проходимости, определение положения подвижного средства в полосе/колее движения и ряд других) выходит за рамки данной статьи. На текущем этапе исследований выбор ориентиров оставляем за оператором, осуществляющим супервизорное управление. СТЗ обеспечивает слежение за указанными ориенти-

рами и решение навигационной задачи. Построение карты местности и определение своего положения на ней (так называемый метод SLAM [10]) выполняется на основе концепции интерпретирующей навигации (ИН) [11].

В описании организации целенаправленных перемещений подвижных средств с использованием зрительных ориентиров выделяем такие составляющие. Навигация по зрительным ориентирам: формулировка, постановка задачи. Решение навигационной задачи. Объединение/комплексирование с другими способами навигации. Экспериментальные исследования.

Навигация по зрительным данным: формулировка, постановка задачи.

Одним из преимуществ СТЗ является возможность на основе зрительных данных параллельно решать различные задачи информационного обеспечения систем управления подвижными РТК, оперативно изменять обработку данных в зависимости от текущей обстановки. При решении навигационной задачи для наземных и воздушных средств СТЗ используются в двух основных направлениях: числение пути по оптическому потоку и определение параметров относительного движения и ориентации по отношению к внешним объектам – ориентирам. В данной работе описываются решения по второму направлению в основном для наземных подвижных РТК. Для сбора зрительных данных мы используем три вида регистрирующих блоков СТЗ: монокулярный, стерео и всенаправленный/панорамный. Решающих навигационные задачи в различной постановке на основе метода интерпретирующей навигации. Все поля зрения во внутреннем представлении РТК сведены в одно информационное поле – качественную модель окружающего пространства в виде районов и графа информационной эквивалентности. Такое представление на несколько порядков менее требовательно к объёмам хранимой информации при сохранении необходимой точности для целенаправленных перемещений [11].

На данном этапе исследований выбор ориентиров, как и постановка задачи на перемещение, остаётся за оператором. Оператор указывает в полях зрения СТЗ на те объекты, которые могут быть использованы в качестве ориентиров. СТЗ анализирует собранные зрительные данные на предмет возможности надёжного выделения этих объектов и слежения за их перемещением в поле зрения. Концепция ИН позволяет организовать экономное с точки зрения вычислительных ресурсов представление и обеспечение РТК информацией об области функционирования. Графы и районы информационной эквивалентности могут формироваться/использоваться как независимо, так и совместно с традиционными картами области функционирования. Все ориентиры подразделяются на долговременные (на всё время выполнения задания или значительную его часть) и кратковременные, необходимые для обеспечения текущих перемещений. Кроме того, в ряде условий функционирования возможно использовать относительную привязку положения подвижного РТК к ориентирам, когда по тем или иным обстоятельствам недоступны данные об абсолютных координатах этих ориентиров в заданной системе координат (например, ГИС). В любом случае абсолютной и относительной привязки выполняется идентификация каждого ориентира и их (ориентиров) взаимное расположение на основе чего возможно автоматическое построение обратного маршрута (решение задачи информационного обеспечения возврата) [12].

Постановка задачи навигации по зрительным ориентирам может быть реализована двумя способами: с использованием изображений с регистрирующих блоков, входящих в состав СТЗ и по карте. И в том, и в другом случае предполагается использование формализованного описания требуемых действий на тезаурусе предметной области в виде прецедентов и сценариев [13]. Примеры таких описаний: «Перемещение из исходной точки в заданную (по ориентирам)», «Перемеще-

ние по замкнутому маршруту из исходной точки (заданной на карте или с указанием расположения относительно известного ориентира) в исходную с посещением заданной». Сценарии уточняют условия и детализируют действия по реализации прецедента. Пример: «Выдвинуться к ориентиру 1 (труба котельной) и расположиться в 30–50 метрах от него в ориентации 90°. Условия: осень средней полосы, облачно, светлое время суток, движение по загородным дорогам».

Зрительные данные каждого из полей зрения в некотором, техническом смысле воспроизводят возможности человеческого зрительного осмотра, восприятия окружающей местности. Моноблок с переменным фокусным расстоянием позволяет в режиме фовеа (повышенного разрешения) рассмотреть детали объекта интереса. Всенаправленный или панорамный регистрирующий блок позволяет оперативно, без механических перемещений осмотреть большую область пространства. Стереосистема позволяет в пассивном режиме (без энергетического воздействия) оценивать дальность до объектов интереса. На описываемом этапе исследований на основе авторского алгоритма выделения особенностей в зрительных данных СТЗ фиксирует указанный оператором объект интереса, оценивает надёжность его выделения и возможность прослеживания. Эта операция осуществляется во всех полях зрения, формируется единое иерархическое (по приоритету надёжности и возможной длительности наблюдения) описание множества ориентиров.

Возможности использования в качестве регистрирующих блоков видеокамер разных диапазонов чувствительности, включая гиперспектрометры и РЛС существенно расширяют богатство информационных признаков объектов и условий наблюдения по отношению к естественным системам.

Решение навигационной задачи. Исходными данными для решения задачи на описываемом этапе являются координаты некоторого числа ориентиров, расположенных в пространстве движения и направления луча от подвижного РТК на ориентиры в моменты их обнаружения.

Координаты N ориентиров заданы в фиксированной «стартовой» прямоугольной системе координат (СК). Далее для каждого из ориентиров задано: время его обнаружения t , приближенные (текущие, или определяемые) значения координат подвижного РТК в стартовой СК в момент t , приближенные значения координат вектора скорости подвижного РТК в стартовой СК в момент t , приближенные значения угловых параметров движения подвижного РТК в момент t (три угла). Угловые параметры определяют матрицу вращения R_0 , задающую переход от системы координат, связанной с подвижным РТК (связанной СК) в стартовую СК.

Направление луча от подвижного РТК на ориентир в момент t может быть задано двумя углами α (азимут) и τ (углом места), так что $(\cos \tau \cos \alpha, \cos \tau \sin \alpha, \sin \tau)$ – единичный вектор с направлением на ориентир в связанной СК. Мы предполагаем, что координаты ориентиров, время их обнаружения, направление луча от подвижного РТК на ориентир известны точно, погрешностями здесь мы пренебрегаем, а координаты самого подвижного РТК, вектор скорости и угловые параметры имеют погрешности. Например, они были получены с помощью традиционных навигационных средств (БИНС), или оптической одометрией.

Требуется, используя данные об ориентирах, рассчитать поправки к координатам и (по опции) к вектору скорости и к угловым параметрам движения подвижного РТК и получить для каждого из ориентиров исправленные значения координат подвижного РТК, его вектора скорости и угловых параметров в соответствующий момент времени t .

Метод решения задачи. Данные о направлении луча на ориентир вычисляются по данным внутреннего ориентирования камер регистрирующих блоков, расположения этих блоков в связанной СК и пиксельным координатам образов ори-

ентиров на текущем изображении (результат выделения и слежения). Метод решения задачи состоит в том, что, исходя из данных об ориентирах, составляется, вообще говоря, переопределенная и нелинейная система алгебраических уравнений относительно неизвестных поправок к параметрам движения подвижного РТК. Затем эта система решается методом Гаусса-Ньютона. Метод Гаусса-Ньютона [14] решения нелинейной переопределенной системы уравнений состоит в проведении повторяющихся итераций следующего вида. Пусть дана система уравнений

$$f_i(x_1, \dots, x_n) = 0, 1 \leq i \leq m. \quad (1)$$

В нашем случае $m = 2N$ (или $m = 3N$, если в системе 3 зависимых уравнения для каждого ориентира). Пусть (x_1^0, \dots, x_n^0) – начальное приближение к решению.

Заменяем левую часть каждого уравнения ее дифференциалом в точке начального приближения, и рассмотрим получившуюся линейную систему относительно приращений неизвестных:

$$f_i(x_1^0, \dots, x_n^0) + \sum_j \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j = 0. \quad (2)$$

Запишем (2) в виде $A \cdot \Delta x = u$, A – матрица из частных производных $m \times n$. Отсюда Δx находится методом наименьших квадратов. Далее получаем следующее приближение к решению $(x_1^1, \dots, x_n^1) = (x_1^0 + \Delta x_1, \dots, x_n^0 + \Delta x_n)$ и повторяем такие итерации до тех пор, пока приращения неизвестных не станут достаточно малыми.

Значения неизвестных в переопределенной системе линейных уравнений $A \cdot \Delta x = u$, при которых сумма квадратов невязок в уравнениях является минимальной, могут быть получены либо методом SVD (сингулярного разложения [15]), либо с помощью симметризации системы. При этом SVD более устойчив к накоплению вычислительной погрешности, но несколько более требователен к ресурсам компьютера и сложнее в реализации. Мы использовали решение методом симметризации как более простое.

Это решение состоит в переходе к системе $A^T A \cdot \Delta x = A^T u$ с симметрической неотрицательно определенной матрицей $A^T A$ размера $n \times n$. Здесь и далее верхнее T означает транспонирование. Полученная система решается, например, методом квадратного корня (Холецкого) [14, 15].

В нашем случае матрица A и правая часть u имеют вид:

$$A = (A_1, \dots, A_N)^T, u = (u_1, \dots, u_N)^T.$$

где $A_i \cdot \Delta x = u_i$ – те уравнения в системе, которые соответствуют i -му ориентиру, N – число ориентиров. В симметризованной системе уравнений $A^T A \cdot \Delta x = A^T u$ имеем: $A^T A = \sum_i A_i^T A_i$, $A^T u = \sum_i A_i^T u_i$.

В матрице $A_i^T A_i$ элемент в k -й строке и l -м столбце равен скалярному произведению k -го и l -го столбцов матрицы A_i , в правой части $A_i^T u_i$ k -й элемент равен скалярному произведению k -го столбца матрицы A_i на столбец u_i .

У нас столбцы матрицы A_i – это вектор-столбцы, составленные из частных производных в левой части (2), соответствующих i -му ориентиру, u_i – вектор-столбцы, составленные из значений левых частей (1) в точке начального приближения с противоположными знаками.

Число неизвестных поправок n в этом случае может быть от 3 до 12. А именно: поправки к координатам подвижного РТК; поправки к вектору скорости; поправки к угловым параметрам; скорости изменения поправок к угловым параметрам.

Предлагаемый метод решения данной задачи состоит в следующем. Для каждого ориентира рассматриваются два вектора в стартовой СК. Первый вектор от подвижного РТК к ориентиру, при этом координаты подвижного РТК являются функциями от неизвестных поправок. Второй вектор получен из данного направ-

ления луча на ориентир в связанной СК с помощью пересчета в стартовую СК, матрица вращения при пересчете также зависит от неизвестных поправок к угловым параметрам. Записывается условие параллельности этих двух векторов, что дает два независимых уравнения на неизвестные поправки для каждого из N ориентиров. Полученная (вообще говоря, переопределенная) система из $2N$ уравнений с n неизвестными решается методом Гаусса-Ньютона.

Таким образом, необходимое число ориентиров для расчета поправок определяется из условия $2N \geq n$.

Пусть O – положение некоторого ориентира в стартовой СК, P_0 – приближенное положение подвижного РТК, V_0 – приближенное значение вектора скорости подвижного РТК на момент обнаружения данного ориентира. Пусть

$$P = P_0 + \Delta P + (t - t_0)\Delta V, \quad (3)$$

уточненное положение подвижного РТК и уточненное значение вектора скорости. Здесь ΔP – поправки к координатам, ΔV – поправка к вектору скорости, t – время обнаружения данного ориентира, t_0 – начальный момент времени (время обнаружения первого ориентира). Тогда $P - O$ – вектор от ориентира к объекту в стартовой СК.

Будем считать, что направление от подвижного РТК к ориентиру в связанной СК на момент обнаружения ориентира задается двумя углами α (азимут) и τ (углом места), так что $r_0 = (\cos \tau \cos \alpha, \cos \tau \sin \alpha, \sin \tau)^T$ – единичный вектор-столбец с направлением на ориентир в связанной СК. Пусть матрица вращения R_0 приближенно задает переход от связанной СК в стартовую СК. Пусть уточненная матрица перехода

$$R = \Delta R_x \cdot \Delta R_y \cdot \Delta R_z \cdot R_0. \quad (4)$$

Здесь $\Delta R_x, \Delta R_y, \Delta R_z$ – матрицы вращения вокруг координатных осей на поправки к угловым параметрам:

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta\alpha_x & \sin \delta\alpha_x \\ 0 & -\sin \delta\alpha_x & \cos \delta\alpha_x \end{bmatrix}, \\ \Delta R_y &= \begin{bmatrix} \cos \delta\alpha_y & 0 & -\sin \delta\alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \delta\alpha_y & 0 & \cos \delta\alpha_y \end{bmatrix}, \\ \Delta R_z &= \begin{bmatrix} \cos \delta\alpha_z & \sin \delta\alpha_z & 0 \\ -\sin \delta\alpha_z & \cos \delta\alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

где $\delta\alpha_x = \Delta\alpha_x + (t - t_0)\Delta\dot{\alpha}_x$ и аналогично $\delta\alpha_y$ и $\delta\alpha_z$.

Тогда $R \cdot r_0$ – единичный вектор направления от подвижного РТК на ориентир в стартовой СК. Должно выполняться условие параллельности:

$$(P - O) \parallel R \cdot r_0. \quad (6)$$

Нам будет удобно использовать условие параллельности двух векторов в следующем виде. Пусть $u = (u_x, u_y, u_z)$ и $v = (v_x, v_y, v_z)$ – два вектора. Рассмотрим кососимметрическую матрицу

$$K(u) = \begin{bmatrix} 0 & u_z & -u_y \\ -u_z & 0 & u_x \\ u_y & -u_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда условие $u \parallel v$ эквивалентно векторному равенству $K(u) \cdot v = 0$ и (6) записывается в виде

$$K(P - O) \cdot R \cdot r_0 = 0. \quad (7)$$

Мы используем следующие три матрицы:

$$D_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, D_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Это производные от матриц $\Delta R_x, \Delta R_y, \Delta R_z$ по соответствующим параметрам в точке 0. Кроме того, частные производные от матрицы $K(u)$ по координатам вектора u равны данным матрицам, например $\partial K(u)/\partial(u_x) = D_x$.

Перепишем (7) в виде

$$K(P - O) \cdot \Delta R_x \cdot \Delta R_y \cdot \Delta R_z \cdot r = 0. \quad (8)$$

где $r = R_0 \cdot r_0$, левую часть (8) обозначим через f и найдем частные производные вектора f по поправкам $\Delta P_x, \dots, \Delta \dot{\alpha}_z$. При этом можно сразу записывать значения частных производных вектора f по поправкам в точке 0 (считая начальное приближение к поправкам нулевым). Это упрощает формулы.

Имеем

$$\begin{aligned} \partial f / \partial(\Delta P_x) &= D_x \cdot r, \quad \partial f / \partial(\Delta P_y) = D_y \cdot r, \quad \partial f / \partial(\Delta P_z) = D_z \cdot r, \\ \partial f / \partial(\Delta V_x) &= (t - t_0) D_x \cdot r, \quad \partial f / \partial(\Delta V_y) = (t - t_0) D_y \cdot r, \\ \partial f / \partial(\Delta V_z) &= (t - t_0) D_z \cdot r, \quad \partial f / \partial(\Delta \alpha_x) = K(P - O) \cdot D_x \cdot r, \\ \partial f / \partial(\Delta \alpha_y) &= K(P - O) \cdot D_y \cdot r, \quad \partial f / \partial(\Delta \alpha_z) = K(P - O) \cdot D_z \cdot r, \\ \partial f / \partial(\Delta \dot{\alpha}_x) &= (t - t_0) K(P - O) \cdot D_x \cdot r, \\ \partial f / \partial(\Delta \dot{\alpha}_y) &= (t - t_0) K(P - O) \cdot D_y \cdot r, \\ \partial f / \partial(\Delta \dot{\alpha}_z) &= (t - t_0) K(P - O) \cdot D_z \cdot r. \end{aligned}$$

От векторного уравнения (7) перейдем к линеаризованному уравнению, то есть заменим вектор-функцию f ее дифференциалом в точке начального приближения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \Delta P_x} \Delta P_x + \frac{\partial f}{\partial \Delta P_y} \Delta P_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta P_z} \Delta P_z + \frac{\partial f}{\partial \Delta V_x} \Delta V_x + \frac{\partial f}{\partial \Delta V_y} \Delta V_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta V_z} \Delta V_z + \\ + \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_x} \Delta \alpha_x + \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_y} \Delta \alpha_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_z} \Delta \alpha_z + \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_x} \Delta \dot{\alpha}_x + \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_y} \Delta \dot{\alpha}_y + \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_z} \Delta \dot{\alpha}_z = \\ = -K(P_0 - O) \cdot r. \end{aligned} \quad (9)$$

Фактически (9) представляет собой систему из трех линейных уравнений с n неизвестными. Объединим теперь уравнения (9) для всех ориентиров в одну переопределенную систему уравнений и симметризуем ее, как было показано выше. Матрицу системы (9) для i -го ориентира представим как массив 3-мерных вектор-столбцов длины n :

$$DER_i = \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta P_x}, \frac{\partial f}{\partial \Delta P_y}, \frac{\partial f}{\partial \Delta P_z}, \frac{\partial f}{\partial \Delta V_x}, \frac{\partial f}{\partial \Delta V_y}, \frac{\partial f}{\partial \Delta V_z}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_x}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_y}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \alpha_z}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_x}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_y}, \frac{\partial f}{\partial \Delta \dot{\alpha}_z} \right).$$

При этом k -й столбец в массиве DER_i обозначим $DER_i[k]$. Правую часть (9) для i -го ориентира обозначим $RIGHT_i = -K(P_0 - O) \cdot r$.

Далее строится матрица симметризованной системы M размера $n \times n$ и столбец b длины n правых частей уравнений этой системы по формулам

$$\begin{aligned} M_{kl} &= \sum_i (DER_i[k], DER_i[l]), \\ b_k &= \sum_i (DER_i[k], RIGHT_i), \end{aligned}$$

где круглыми скобками обозначено скалярное произведение векторов, и решается система из n линейных уравнений с n неизвестными

$$M \cdot \Delta x = b.$$

Решением является вектор поправок

$$\Delta x = (\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z, \Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z, \Delta \alpha_x, \Delta \alpha_y, \Delta \alpha_z, \Delta \dot{\alpha}_x, \Delta \dot{\alpha}_y, \Delta \dot{\alpha}_z).$$

Далее найденные поправки учитываются для нахождения исправленных значений координат P , вектора скорости V и матрицы вращения R и описанные выше действия повторяются итеративно. Значения P_0 , V_0 и матрица R_0 заменяются на рассчитанные значения P , V и R и снова рассчитываются поправки. Обычно бывает достаточно провести 3–4 итерации, после этого поправки становятся пренебрежимо малыми.

Объединение/комплексирование с другими способами навигации. Каждый из способов навигации имеет свои ограничения по условиям применения. Описанный способ навигации по зрительным ориентирам также имеет свои особенности, ограничения. В частности, отсутствие или ограниченное количество в окружающей среде особенностей - объектов, которые могут быть использованы в качестве ориентиров. Одним из путей преодоления этого ограничения является использование регистрирующих блоков, позволяющих расширить пространство признаков объектов внешней среды (гиперспектрометры, РЛС и другие). Другим, признанным путём обеспечения надёжного результата в разнообразных условиях движения является комплексирование различных способов [17, 18]. Мы используем комплексирование навигации по ориентирам с такими способами навигации как оптическая одометрия [19], инерциальная навигационная система. В качестве объединяющего начала берём траекторию движения подвижного РТК. При построении этой траектории учитываем такие факторы, как механические характеристики подвижного РТК, вероятную необходимость построения обратного пути (решение задачи возврата в точку старта в автономном режиме). Алгоритм описания траектории мобильного робота, основывается на аппроксимации данных комплексированных навигационных систем в виде кусочно-полиномиальной функции (сплайна) 3-го порядка методом наименьших квадратов и проверки на отсутствие петель полученного сплайна [20].

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования описанного метода проводились на реальных зрительных данных, собранных в процессе движения подвижной робототехнической платформы по загородным дорогам. Движение происходило со скоростями от 0 до 45 км/час. Количество задаваемых ориентиров на кольцевом маршруте длиной около километра составило 60. В каждый момент времени в ходе движения в поле зрения СТЗ находилось от 3 до 5 ориентиров. Соответствующие алгоритмы были реализованы в рамках каркаса программного обеспечения СТЗ реального времени [21, 22]. В составе СТЗ в экспериментах использовалась всенаправленная камера с цветной матрицей 5 МПикс, объективом типа «рыбий глаз» с углом обзора 360° вокруг вертикальной оси и 90° относительно горизонта, стереосистема из двух синхронизованных 5 МПикс цветных камер с 60° объективами, установленных на базе 125 см. В качестве дополнительного средства, арбитражно фиксирующего перемещения и ориентацию подвижной платформы, использовался высокоточный интегрированный GPS приёмник, объединяющий спутниковую и инерциальную навигационные системы [23]. Дополнительно, в ряде позиций вручную были промерены положение и ориентация РТК. На рис 1. Приведены примеры изображений панорамного и стереомодулей СТЗ.



Рис. 1. Примеры изображений регистрирующих блоков макета СТЗ: а – всенаправленная/панорамная камеры; б – стереосистема (показан кадр с одной из камер). Красными квадратами отмечены объекты, которые могут использоваться в качестве ориентиров

Были получены такие количественные характеристики навигационных данных с помощью демонстрационного макета СТЗ. Точность определения положения подвижного средства, на котором установлены модули СТЗ: среднеквадратическое отклонение определения прямоугольных координат наземного РТК ВН в проекции UTM относительно координат бортовой карты – не хуже $0,0025 d$, где d – максимум расстояния до ориентиров (0,5 м при $d=200$ м); точность определения азимута наземного РТК ВН относительно бортовой карты – не хуже ± 20 угловых минут; частота получения данных – 10 Гц (ограничена частотой выдачи кадров видеокамерами высокого разрешения).

В результате исследований были проанализированы основные факторы, влияющие на качество решения навигационной задачи с помощью выделения и слежения за ориентирами:

- ◆ качество ректификации стереосистемы, включая точность синхронизации левого и правого изображений;
- ◆ количество и качество (с точки зрения выделения) ориентиров, указываемых в окружающем пространстве;
- ◆ погрешность указания координат ориентиров и определения положения их образов на изображении в зависимости от расстояния до них;
- ◆ обусловленность решаемой системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Кроме того, были проанализированы возможности вариантов использования системы в зависимости от условий движения. Если движение происходит в горизонтальной плоскости (перепады высот в пределах 1 м, а уклоны $\pm 5^\circ$), то для определения положения РТК достаточно трех ориентиров; при пространственном движении при трех ориентирах есть неоднозначность в решении системы уравнений, и практически нужно 4 ориентира или больше. И в одном, и в другом случае, для надежности решения навигационной задачи – чтобы избежать грубых ошибок, требуется 1 или 2 дополнительных ориентира.

Заключение. Рассмотренная организация целенаправленных перемещений подвижных средств с использованием зрительных ориентиров в модельных оценках и экспериментах показала высокую эффективность. Предложенный алгоритм расчёта поправок к параметрам движения на основе метода Гаусса-Ньютона позволяет решать задачу уточнения параметров движения по отдельным, разрежен-

ным измерениям собственного положения и скорости относительно ориентиров в окружающем пространстве. В комплексе с другими средствами навигации описанный подход обеспечивает высокоточное определение навигационных параметров в различных условиях движения.

Все составляющие описанного процесса организации целенаправленных перемещений на основе использования ориентиров продолжают совершенствоваться. В частности, формируются онтологии предметной области целенаправленных перемещений в различных средах. На их основе строится унифицированный интерфейс постановки заданий на перемещения. Расширяется база объектов, которые можно выбирать в качестве ориентиров, разрабатываются алгоритмы автоматического выбора таких объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. RSS новости. Новости искусственного интеллекта. – https://ai-news.ru/2021/01/bespilotnye_karemye_samosvaly.html.
2. ООО «МосТрансАренда». Тренд на беспилотные самосвалы набирает обороты. – [tps://mtarenda.ru/articles/trend-na-bespilotnye-samosvaly-nabiraet-oboroty/#](https://mtarenda.ru/articles/trend-na-bespilotnye-samosvaly-nabiraet-oboroty/#).
3. КОМЕК МАШИНЕРИ. Дойдут ли беспилотные самосвалы Komatsu до России? Исчезнет ли профессия водителя? – <https://www.komek.ru/staty/doydut-li-bespilotnye-samosvaly-komatsu-do-rossii-ischeznet-li-professiya-voditelya/>.
4. Tadviser. Продукт: БелАЗ-7513R (беспилотный самосвал). – [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:БелАЗ-7513R_\(беспилотный_самосвал\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:БелАЗ-7513R_(беспилотный_самосвал)).
5. Кожемякин А. Самосвал на миллион. – <https://dev.by/news/samosval-na-million>.
6. Петричкович Я., Солохина Т. и др. RoboDeus – 50-ядерная гетерогенная СпК для встраиваемых систем и робототехники // Электроника. – 2020. – № 7. – С. 52-63.
7. NVidia Corp. NVidia Jetson AGX Xavier. – <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/>.
8. Intel Corp. Accelerate Automotive with Intel. – <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/automotive/products/programmable/overview.html>
9. Shnkland S. Tesla self-driving car computer. – <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains>.
10. Mur-Artal R., Tardós J. ORB-SLAM: Tracking and mapping recognizable features // MVIRO Workshop at Robotics Science and Systems (RSS), Berkeley, USA, 2014.
11. Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2008. – № 19.
12. Богуславский А.А. и др. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2019. – 228 с.
13. Ларман К. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования. – Вильямс, 2019. – 736 с.
14. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 510 с.
15. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления. – М.: Мир, 1999. – 548 с.
16. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 600 с.
17. Infineon Technologies AG. Sensor fusion for autonomous driving. – <https://www.infineon.com/cms/en/applications/automotive/chassis-safety-and-adas/sensor-fusion/>.
18. Kocic J., Jovičić N., Drndarevic V. Sensors and Sensor Fusion in Autonomous Vehicles // Proc. 26th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 20-21 November 2018. – P. 420-425.
19. Sokolov S.M., Beklemishev N.D., Boguslavsky A.A. Coordinated use of visual odometry and landmarks for navigation of mobile ground vehicles // ISPRS International Workshop Photogrammetric and computer vision techniques for video Surveillance, Biometrics and Biomedicine Moscow, April 26-28, 2021. (в печати).

20. Sprunk C. Planning Motion Trajectories for Mobile Robots Using Splines // Faculty of Applied Sciences Department of Computer Science Autonomous Intelligent Systems. – 2008. – <http://www2.informatik.uni-freiburg.de/~lau/students/Sprunk2008.pdf>.
21. Соколов С.М., Богуславский А.А., Трифонов О.В. Интеллектуальные модули системы технического зрения для оперативного определения состояния и контроля объектов инфраструктуры железной дороги // Тр. 2-й международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте» (IntellectTrans-2012) 28-31 марта 2012 г. – СПб., 2012. – С. 346-355.
22. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Vasilyev A.I., Trifonov O.V. Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring // *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Springer). – 2013. – Vol. 208 AISC. – P. 463-476.
23. SBG Systems. Ellipse Series, 2021. – <https://www.sbg-systems.com/products/ellipse-series/>.

REFERENCES

1. RSS novosti. Novosti iskusstvennogo intellekta [RSS news. Artificial Intelligence News]. Available at: https://ai-news.ru/2021/01/bespilotnye_karernye_samosvaly.html.
2. ООО «MosTransArenda». Trend na bespilotnye samosvaly nabiraet oboroty [LLC «MosTransArenda». The trend for unmanned dump trucks is gaining momentum]. Available at: <https://mtarenda.ru/articles/trend-na-bespilotnye-samosvaly-nabiraet-oboroty/#>.
3. KOMEK MASHINERY. Doydut li bespilotnye samosvaly Komatsu do Rossii? Ischeznet li professiya voditelya? [KOMEK MACHINERY. Will Komatsu unmanned dump trucks reach Russia? Will the driver profession disappear?]. Available at: <https://www.komek.ru/staty/doydut-li-bespilotnye-samosvaly-komatsu-do-rossii-ischeznet-li-professiya-voditelya/>.
4. Tadviser. Produkt: BelAZ-7513R_(bespilotnyy_samosval) [Tadviser. Product: BelAZ-7513R (unmanned dump truck)]. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:BelAZ-7513R_\(bespilotnyy_samosval\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:BelAZ-7513R_(bespilotnyy_samosval)).
5. Kozhemyakin A. Samosval na million [Dump truck for a million]. Available at: <https://dev.by/news/samosval-na-million>.
6. Petrichkovich YA., Solokhina T. i dr. RoboDeus – 50-yadernaya geterogennaya SnK dlya vstraivaemykh sistem i robototekhniki [RoboDeus – a 50-core heterogeneous SoC for embedded systems and robotics], *Elektronika* [Electronics], 2020, No. 7, pp. 52-63.
7. NVidia Corp. NVidia Jetson AGX Xavier. Available at: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/>.
8. Intel Corp. Accelerate Automotive with Intel. Available at: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/automotive/products/programmable/overview.html>.
9. Shnkland S. Tesla self-driving car computer. Available at: <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains>.
10. Mur-Artal R., Tardós J. ORB-SLAM: Tracking and mapping recognizable features, *MVIGRO Workshop at Robotics Science and Systems (RSS)*, Berkeley, USA, 2014.
11. Kiril'chenko A.A., Platonov A.K., Sokolov S.M. Teoreticheskie aspekty organizatsii interpretiruyushchey navigatsii mobil'nogo robota [Theoretical aspects of the organization of interpretive navigation of a mobile robot], *Preprint IPM im. M.V. Keldysha RAN* [Preprint of the Institute of Applied Mathematics M.V. Keldysh RAS], 2008, No. 19.
12. Boguslavskiy A.A. i dr. Modeli i algoritmy dlya intellektual'nykh sistem upravleniya [Models and algorithms for intelligent control systems]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2019, 228 p.
13. Larman K. Primenenie UML 2.0 i shablonov proektirovaniya [Applying UML 2.0 and design patterns]. Vil'yams, 2019, 736 p.
14. Gill F., Myurrey U., Rayt M. Prakticheskaya optimizatsiya [Practical optimization]. Moscow: Mir, 1985, 510 p.
15. Golub Dzh., Van Loun Ch. Matrichnye vychisleniya [Matrix calculations]. Moscow: Mir, 1999, 548 p.
16. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1987, 600 p.
17. Infineon Technologies AG. Sensor fusion for autonomous driving. Available at: <https://www.infineon.com/cms/en/applications/automotive/chassis-safety-and-adas/sensor-fusion/>.
18. Kocic J., Jovičić N., Drndarevic V. Sensors and Sensor Fusion in Autonomous Vehicles, *Proc. 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, 20-21 November 2018, pp. 420-425.

19. Sokolov S.M., Beklemishev N.D., Boguslavsky A.A. Coordinated use of visual odometry and landmarks for navigation of mobile ground vehicles, *ISPRS International Workshop Photogrammetric and computer vision techniques for video Surveillance, Biometrics and Biomedicine Moscow, April 26-28, 2021*. (в печати).
20. Sprunk C. Planning Motion Trajectories for Mobile Robots Using Splines, *Faculty of Applied Sciences Department of Computer Science Autonomous Intelligent Systems*, 2008. Available at: <http://www2.informatik.uni-freiburg.de/~lau/students/Sprunk2008.pdf>.
21. Sokolov S.M., Boguslavskiy A.A., Trifonov O.V. Intellektual'nye moduli sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya operativnogo opredeleniya sostoyaniya i kontrolya ob'ektov infrastruktury zheleznoy dorogi [Intelligent modules of the technical vision system for rapid determination of the state and control of railway infrastructure facilities], *Tr. 2-y mezhduнародной nauchno-prakticheskoy konferentsii «Intellektual'nye sistemy na transporte» (IntellectTrans-2012) 28-31 marta 2012 g.* [Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference "Intelligent Systems in Transport" (IntellectTrans-2012) 28-31 March 2012-St. Petersburg, 2012]. Saint Petersburg, 2012, pp. 346-355.
22. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Vasilyev A.I., Trifonov O.V. Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring, *Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer)*, 2013, Vol. 208 AISC, pp. 463-476.
23. SBG Systems. Ellipse Series, 2021. Available at: <https://www.sbg-systems.com/products/ellipse-series/>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

Соколов Сергей Михайлович – Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН); e-mail: sokolsm@keldysh.ru; Москва, Россия; тел.: 89161220113; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с..

Беклемишев Николай Дмитриевич – e-mail: nbekl@mail.ru; тел.: +74992207994; к.ф.-м.н.; с.н.с.

Богуславский Андрей Александрович – e-mail: anbg74@mail.ru; тел.: 89167379448; д.ф.-м.н.; в.н.с.

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: sokolsm@keldysh.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of phys. and math. sc.; professor; chief researcher.

Beklemishev Nikolay Dmitrievich – e-mail: kap56@mail.ru; phone: +74992207994; cand. of phys. and math. sc.; senior researcher.

Boguslavsky Andrey Alexandrovich – e-mail: anbg74@mail.ru; phone: +79167379448; dr. of phys. and math. sc.; leading researcher.

УДК 004.93'12

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-247-258

В.А. Бондаренко, П.А. Гессен, В.А. Павлова, М.В. Созинова, В.А. Тупиков

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ОБУЧЕНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

В целях создания нового алгоритма автоматического обнаружения объектов с обучением в реальном времени произведено исследование мирового научного задела в области автоматического сопровождения общего назначения с возможностью распознавания объекта слежения с потенциалом применения во встраиваемых вычислительных системах оптико-электронных систем перспективных робототехнических комплексов. На основе проведенных исследований отобраны и протестированы методы и подходы, которые позволяют с наибольшей точно-

стью, при сохранении высокой вычислительной эффективности, обеспечивать обучение классификаторов на лету (online learning) без априорного знания о типе объекта слежения и обеспечивать последующее обнаружение исходного объекта в случае его кратковременной потери. В число таких способов входит гистограмма направленных градиентов – дескриптор ключевых признаков, основывающийся на анализе распределения градиентов яркости изображения объекта. Его использование позволяет сократить количество используемой информации без потери ключевых данных об объекте и увеличить скорость обработки изображений. В статье обоснован выбор одного из алгоритмов классификации в режиме реального времени, позволяющего решить задачу бинарной классификации – метода опорных векторов. В виду высокой скорости обработки данных и необходимости небольшого количества исходных обучающих данных для построения разделяющей гиперплоскости, на основе которой и происходит классификация объектов, данный метод выбран как наиболее подходящий для решения поставленной задачи. Для осуществления online-обучения была выбрана модификация метода опорных векторов, реализующая стохастический градиентный спуск на каждом шаге работы алгоритма – Pegasos. Авторами исследования проведена разработка и полунатурное моделирование выбранного алгоритма, проведена оценка эффективности его работы в задачах обнаружения объекта интереса в режиме реального времени с предварительным online-обучением в процессе слежения за объектом. Разработанный алгоритм показал высокую эффективность при решении поставленной задачи и планируется к внедрению в составе специального программного обеспечения опико-электронных систем перспективных робототехнических комплексов. В заключении представлены предложения по дальнейшему повышению точности и вероятности обнаружения объекта интереса разработанным алгоритмом, а также по повышению его производительности путем оптимизации вычислений.

Автоматическое обнаружение; обучение на лету; метод опорных векторов; гистограмма направленных градиентов; автоматическое сопровождение.

V.A. Bondarenko, P.A. Gessen, V.A. Pavlova, M.V. Sozinova, V.A. Tupikov

OBJECT DETECTION ALGORITHM FOR OPTOELECTRONIC SYSTEMS WITH ONLINE LEARNING

In order to create a new algorithm for automatic detection of objects with real-time training, a study of the world scientific groundwork in the field of general-purpose automatic tracking with the ability to recognize a tracked object with the potential for application in embedded computing systems of optoelectronic systems of promising robotic complexes was carried out. Based on the conducted research, methods and approaches were selected and tested that allow, with the greatest accuracy, while maintaining high computational efficiency, to provide training of classifiers on the fly (online learning) without a priori knowledge of the type of tracking object and to ensure the subsequent detection of the original object in the event of its short-term loss. Such methods include a histogram of oriented gradients – a descriptor of key features based on the analysis of the distribution of the brightness gradients of the object image. Its use allows you to reduce the amount of information used without losing key data about the object and to increase the speed of image processing. The article substantiates the choice of one of the real-time classification algorithms that allows solving the problem of binary classification – the support vector machine. Due to the high speed of data processing and the need for a small amount of initial training data to construct a separating hyperplane, on the basis of which the classification of objects is done, this method is chosen as the most suitable for solving the problem. For online training, a modification of the support vector machine method was chosen, which implements stochastic gradient descent at each step of the algorithm – Pegasos. The authors of the study carried out the development and semi-natural modeling of the selected algorithm, evaluated the effectiveness of its work in the tasks of detecting an object of interest in real time with preliminary online training in the process of tracking the object. The developed algorithm has shown high efficiency in solving the problem and is planned to be implemented as part of a special software for optoelectronic systems of advanced robotic systems. In the conclusion, proposals are presented to further improve the accuracy and probability of the object detection by the developed algorithm, as well as for improving its performance by optimizing calculations.

Automatic detection; online learning; support vector machine; histogram of oriented gradients; automatic tracking.

Введение. При разработке современных робототехнических комплексов часто возникает задача обнаружения недетерминированных объектов в реальном времени, например, в процессе автоматического сопровождения. В общедоступной научной литературе представлено много вариантов решения поставленной задачи, однако данные решения не могут считаться удовлетворительными по совокупности критериев, таких как вычислительная эффективность, высокая точность, наличие возможности обучения на лету (online learning), которые предъявляются в качестве ключевых требований для представленной работы. Данные критерии были продиктованы анализом тенденций в разработке новых алгоритмов, которые сводятся к использованию машинного обучения для задач обнаружения, а также спецификой предполагаемых областей применения алгоритма.

Постановка задачи. Пусть имеется некоторый алгоритм автоматического сопровождения объектов по их изображениям, реализованный в рамках встраиваемого вычислителя оптико-электронной системы наблюдения. Первоначальный захват объекта на сопровождение осуществляется оператором, либо иным алгоритмом обработки изображений. В процессе сопровождения алгоритм формирует описывающий объект прямоугольник $R_{\text{сопр}}$, при этом наблюдаемый объект может выходить из зоны наблюдения оптической системы, или перекрываться помехой, а изображение сопровождаемого объекта может подвергаться различным ракурсным и масштабным искажениям.

Требуется разработать такой алгоритм обработки изображений, который мог бы в процессе слежения накапливать информацию о сопровождаемом объекте имея на входе $R_{\text{сопр}}$ (например, текстурные и/или контурные признаки, однозначно характеризующие объект интереса), а в случае потери объекта наблюдения, или при появлении помехи – осуществлять обнаружение объекта интереса основываясь на накопленной ранее информации и формируя на выходе алгоритма предсказанный описывающий прямоугольник $R_{\text{предск}}$. Тем самым должна повышаться вероятность корректного дальнейшего сопровождения. Таким образом, требуется разработать алгоритм автоматического обнаружения объектов с обучением в реальном времени, при этом вычислительные затраты на алгоритм должны быть приемлемыми для осуществления его работы в реальном масштабе времени на базе бортовых вычислителей оптико-электронных систем перспективных робототехнических комплексов.

Обзор существующих методов. Значительное развитие при решении подобных задач в последнее время получили подходы с применением искусственных нейронных сетей, однако их применение в реальном времени затруднено, так как они, как правило, требуют априорного знания об объекте (обучающей выборки) и/или имеют высокую вычислительную сложность при использовании, например, требуют использования графического ускорителя уровня GeForce GTX Titan X для работы в реальном времени, что невозможно при разработке перспективных отечественных оптико-электронных систем [1–3].

При анализе существующих работ было принято решение ориентироваться на одни из наиболее эффективных по предъявляемым требованиям алгоритмов: TLD [4] и KCF [5].

Алгоритм TLD (Tracking-Learning-Detection) базируется на методе Сопровождение-Обучение-Обнаружение. Данный алгоритм не только производит слежение за объектом на каждом кадре, но и осуществляет обнаружение всех локальных проявлений выбранной цели, в процессе чего строит модель объекта, который отслеживается. Добавление модуля обучения обусловлено необходимостью увеличить точность работы алгоритма путем изменения представления об актуальной модели в процессе ее отслеживания. Недостатком данного алгоритма является то,

что обнаружение производится по всему изображению путем использования смещений окон разных масштабов. Хотя для обучения и используются достаточно быстрые вейвлеты Хаара, вычислительная сложность все равно слишком велика, что не позволяет использовать данный алгоритм в системах реального времени.

Алгоритм KCF (Kernelized Correlation Filter) является представителем группы корреляционных методов. Он использует гистограмму направленных градиентов для обучения детектора и свойства циркулянтной матрицы (circulant matrix) [6] вместе с дискретным преобразованием Фурье для повышения скорости обработки изображения. Данный метод достигает высоких скоростей обработки изображения, что положительно выделяет его на фоне остальных конкурентов, однако обладает достаточно низкой вероятностью нахождения объекта после его потери, может перестать отслеживать нужный объект при его плавном перекрытии помехой (слабое разделение объект/не объект) и имеет недостатки, свойственные многим алгоритмам с корреляционным подходом: достаточно резкое изменение масштаба или положения отслеживаемого объекта (или исчезновение из кадра и последующее появление) ведет к его потере.

На основе анализа данных алгоритмов, принимая во внимание их сильные и слабые стороны, авторами был разработан новый алгоритм обнаружения объектов, основанный на online-обучении SVM-классификатора, позволяющий осуществлять повторное обнаружение в случае потери отслеживаемого объекта. Алгоритм разработан таким образом, чтобы иметь возможность применяться во встраиваемых системах в режиме реального времени, без предварительного анализа данных, и совмещать скорость работы, присущую KCF, с точностью, свойственной TLD.

Прежде чем приступить к детальному разбору логики разработанного алгоритма, рассмотрим и обоснуем необходимость методов и алгоритмов, используемых в предлагаемом решении.

Гистограмма направленных градиентов (HOG). Перед выполнением любой задачи, связанной с обработкой изображений, часто необходимо предварительно обработать изображения, чтобы сделать их более подходящими для применения в качестве входных данных для других алгоритмов. Использовать значения яркостей пикселей зачастую неэффективно, и большинство алгоритмов обработки изображений, как правило, извлекают из входных данных наиболее значимую для дальнейшего применения информацию – ключевые признаки изображения или его дескриптор, позволяющие определить объект интереса минимальным количеством данных, сокращая тем самым размерность входных данных и облегчая дальнейшую их обработку.

В дескрипторе ключевых признаков HOG [7] в качестве ключевых признаков используются распределения (гистограммы) направлений и магнитуд градиентов (ориентированные градиенты). Градиенты изображения полезны, так как их значение велико на краях и углах какой-либо фигуры (областях резкого изменения интенсивности), а именно эти области несут в себе ключевую информацию о форме объекта, в отличие от плоских (монотонных) регионов.

Опишем алгоритм преобразования изображения в HOG-дескриптор:

1. Масштабирование выбранной части кадра к единому, заранее определенному размеру.

2. Вычисление градиента изображения по осям x и y (рис. 1).

3. Составление гистограммы градиентов в ячейках 8×8 (рис. 1).

4. Нормализация гистограмм в блоках по 4 гистограммы (ячейки).

5. Финальное вычисление вектора ключевых признаков.

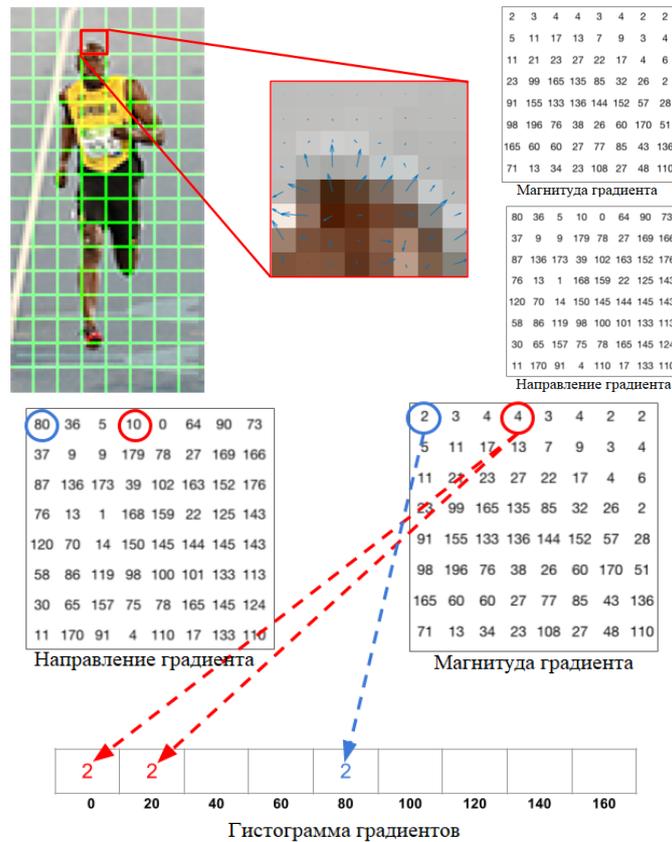


Рис. 1. Формирование гистограммы ориентированных градиентов

Таким образом на выходе, после преобразования из исходных значений яркости получается вектор численных значений, описывающий изображение.

НОГ-дескриптор является отличным методом описания изображения ввиду своей высокой дискриминативности, скорости работы, малого количества хранимой информации, нашедшим признание среди исследователей в различных областях применения [8–10], а также имеет широкие возможности для оптимизации и ускорения своей работы за счет применения векторных команд [11] и других методов [12]. К недостаткам данного метода можно отнести отсутствие поворотной инвариантности в финальном виде (на стадии составления гистограмм возможен ограниченный поворот на фиксированный угол) и необходимость этапа предварительной обработки изображения, который оказывает сильное влияние на качество работы алгоритма, если исходные изображения имеют сильные различия в масштабе. В нашей реализации этап предварительной обработки сводится к масштабированию изображения к фиксированной величине, определяемой в зависимости от исходного размера выделенной части изображения, и происходит вычислительно быстро.

Классификаторы режима реального времени. Режим реального времени означает такой режим обработки данных, при котором скорость взаимодействия системы со внешними процессами соизмерима со скоростью протекания этих процессов. Для решения задачи классификации (построение алгоритма способного по известным соотношениям объект – его принадлежность распределить ранее неизвестные объекты по известным группам принадлежностей) в таких условиях, ис-

пользуют алгоритмы машинного обучения, подразделом которых являются и нейронные сети. Применение искусственных нейронных сетей является более точным и прогрессивным подходом, однако он страдает от двух главных недостатков: необходимость обработки заранее предоставленных (априорных) данных и достаточно низкая скорость работы ввиду высокой вычислительной сложности обучения. И если первый недостаток еще можно обойти, то второй на данный момент не позволяет использовать нейронные сети для обучения и обнаружения в реальном времени во встраиваемых системах. Поэтому для поставленной задачи выбран подход машинного обучения без использования нейронных сетей.

Для решения задачи бинарной классификации (распределения объектов на два множества: объект – не объект) [13] был выбран один из наиболее успешных классических методов машинного обучения – метод опорных векторов (англ. SVM – Support Vector Machine) [14–16].

SVM. Основная идея метода состоит в разделении векторов признаков обучающей выборки некоторой гиперплоскостью оптимальным образом. Мерой оптимальности в данном случае выступает расстояние между разделяющей гиперплоскостью и объектами разделяемых классов: чем оно больше, тем меньше будет средняя ошибка классификатора.

Главным достоинством такого метода, по сравнению с другими известными решениями, является необходимость достаточно малого объема исходных данных для получения высокой точности предсказания результата, а также высокая скорость работы – это один из быстрых методов нахождения решающей функции, что имеет ключевое значение для задач обработки в режиме реального времени. Еще одним достоинством является возможность регулировки параметра, позволяющего избежать переобучения – ситуации, при которой классификатор чересчур точно определяет модель объекта и становится восприимчивым даже к самым небольшим ее изменениям. К недостаткам данного метода можно отнести чувствительность к выбросам в исходных данных (шумам) и необходимости стандартизации входных данных. Решение первого недостатка возлагается на алгоритм слежения за объектом. Проблема стандартизации решается при помощи применения HOG-дескриптора, описанного выше.

Методы машинного обучения, в которых данные поступают последовательно и используются для улучшения предсказываемого результата на каждом шаге, называются online-методами обучения (online learning) [17]. Основным их отличием от обычных является возможность обработки исходных данных (обучения), поступающих последовательно и поэтапно, то есть без необходимости наличия базы исходных данных об объекте обучения. Один из таких методов, реализующий метод опорных векторов в режиме online – Pegasos (Primal Estimated sub-Gradient Solver for SVM) [18]. Основная идея метода заключается в выполнении стохастического градиентного спуска на каждом шаге. Выбор именно этого метода обусловлен скоростью работы и достаточно ограниченным количеством тренировочных примеров, необходимых для обучения классификатора.

Применяемый подход. Реализация разработанного алгоритма используется в совокупности с многоагентным алгоритмом автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов [19].

На вход системы подаются видеопоток и описывающий прямоугольник, определяющий первоначальное положение объекта слежения. На стадии инициализации, основываясь на соотношении сторон исходной рамки, выбирается фиксированный размер изображения, к которому будут приводиться изображения объекта даже при изменении их масштаба (фиксация размерности входных данных для классификатора).

В дальнейшем на каждом k -ом кадре видеопотока изображение объекта, ограниченное прямоугольником, масштабируется к размеру, определенному на стадии инициализации, после чего для этого участка изображения вычисляется дескриптор HOG. В данной работе k принималось равным 5, так как на соседних кадрах объект изменяется мало, а избыток одинаковых данных снижает характеристики точности обучаемого классификатора, однако данный параметр может быть скорректирован в зависимости от кадровой частоты оптической системы и динамики наблюдаемых объектов.

За точность предоставляемых входных данных на этапе предварительного обучения отвечает алгоритм сопровождения. Таким образом формируется эталонное описание объекта интереса в виде набора HOG-дескрипторов. Аналогичным образом выбираются и подготавливаются несколько произвольных окон на изображении, которые будут использоваться в качестве примеров “не-объекта” для обучения классификатора. Выбранные окна объекта интереса и “не-объекта” подвергаются предварительной фильтрации посредством нормализованной кросс-корреляции (Normalized Cross Correlation) – если разница меньше определенного порога (изображения не похожи), то оба дескриптора подаются на вход алгоритму Pegasos с соответствующими метками (“объект”, “не-объект”). Данная предварительная отбраковка негативных примеров по результатам анализа позволяет повысить скорость сходимости обучения классификатора и, в дальнейшем, повысить стабильность его предсказаний. В соответствии с полученными данными происходит корректировка гиперплоскости. После этого для каждой из рамок берутся несколько масштабов, и с каждым из них производятся вышеописанные действия, после чего происходит переход к следующему кадру видеопотока. Дополнительно на первых кадрах происходит хранение положительных и отрицательных HOG-дескрипторов. После набора нескольких результатов происходит обучение линейной SVM в оффлайн-режиме. Это сделано для подстраховки основного классификатора на первых кадрах, когда количество данных еще недостаточно для уверенной классификации.

На данный момент самым точным способом локализации объекта является метод скользящего окна, в котором применяется вычисление откликов обученного классификатора для большого количества накладываемых на изображение окон. Однако насколько этот способ точен, настолько он вычислительно неэффективен, что недопустимо для поставленной задачи. Поэтому для экономии времени при потере объекта интереса осуществляется предварительное обнаружение потенциального местоположения объекта с помощью алгоритма [19], тем самым осуществляется значительное сокращение области поиска. При наличии положительного отклика в окрестности предполагаемого нахождения объекта запускается алгоритм скользящего окна, для чего берутся несколько описывающих прямоугольников различного масштаба (рис. 2, красная рамка – оригинальный размер, возвращаемый алгоритмом слежения, синяя и зеленая – уменьшенная и увеличенная рамки соответственно). Каждая из рамок последовательно сдвигается относительно своего изначального положения, для каждого смещения осуществляется проверка области изображения при помощи обученного классификатора. Координаты каждого окна, внутри которого обнаружен положительный отклик от классификатора запоминаются, после чего самые крайние координаты из ранее запомненных формируют результирующий описывающий прямоугольник, который считается искомым объектом и подается алгоритму слежения для его повторного захвата и последующего сопровождения (рис. 3, синяя рамка – подозрительная зона от алгоритма предварительного обнаружения, остальные рамки – вариации сдвига описывающих прямоугольников с рис. 2, красный цвет означает отрицательный отклик классификатора, зеленый – положительный, для наглядности, отрисована только часть откликов).



Рис. 2. Рамки трех разных масштабов для масштабного поиска

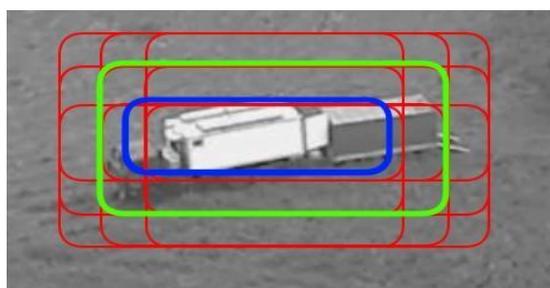


Рис. 3. Результат работы алгоритма обнаружения в зоне поиска

Результаты. Тестирование выполнялось при помощи полунатурного моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения, разработанного АО «НПП «АМЭ», и реальных видеозаписей, полученных в различных условиях наблюдения. Для тестирования были размечены 15 видеопоследовательностей, содержащих объекты интереса типа «Кунг», «Здание», «Мост» и др. размером от $\sim 64 \times 64$ до $\sim 256 \times 256$ пикселей.

Для наиболее полной оценки точности предлагаемого алгоритма обнаружения с обучением в реальном времени, в сравнении с подходом к предварительному обнаружению объекта после его потери из многоагентного алгоритма обнаружения и сопровождения, использовалась метрика IoU (Intersection over Union) [20]. Данная метрика подразумевает оценку отношения площадей пересечения описывающих прямоугольников к площади их объединения. Один из прямоугольников (S_1), определяющий истинное положение объекта в кадре, задается оператором при тестировании, второй (S_2) является результатом работы того или иного алгоритма обнаружения:

$$IoU = \frac{S_1 \cap S_2}{S_1 \cup S_2} \in [0; 1].$$

Чем ближе получаемое значение IoU к единице, тем более точное предсказание истинного положения объекта и его размеров даёт оцениваемый алгоритм.

Тестирование проводилось по следующей методике:

1. На интересующей видеозаписи в определенный момент выполнялся захват объекта на сопровождение.
2. На протяжении 100-400 кадров выполнялось обучение SVM классификатора предложенного алгоритма обнаружения по данным об объекте интереса, формируемым алгоритмом сопровождения.
3. Имитировался срыв сопровождения посредством перехода на другой кадр видеопоследовательности.

4. Зоны предполагаемого местонахождения объекта (формируемые алгоритмом сопровождения) подвергались обработке алгоритмом обнаружения по методике, описанной выше. Таким образом, выполнялось подтверждение наличия объекта в зоне интереса и уточнение его положения в случае его наличия.

5. Результирующие значения IoU_{track} для алгоритма сопровождения (без уточнения положения) и для алгоритма обнаружения IoU_{svm} записывались в таблицу.

Результаты систематизации экспериментов, проведенных по данной методике, представлены на рисунке 4. Среднее значение IoU_{track} (то есть без использования уточнения положения объекта интереса при попытке повторного захвата) по результатам 19 экспериментов с имитацией срыва сопровождения составило $IoU_{track} = 0.359$, тогда как среднее значение IoU_{svm} с применением алгоритма с обучением в реальном времени в качестве средства подтверждения наличия цели и уточнения её положения составило $IoU_{svm} = 0.431$, что даёт прирост $\Delta IoU = +0.072$. Данное значение ΔIoU является средним по всем типам объектов интереса, при этом для малоразмерных целей оно меньше, а для крупноразмерных объектов значение ΔIoU значительно больше.



Рис. 4. Графики области пересечения IoU_{track} (оранжевый) и IoU_{svm} (синий)

Заключение. По результатам полунатурного моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения использование предложенного алгоритма обнаружения с обучением в реальном времени позволило повысить метрику точности охвата цели при её повторном обнаружении после потери на $\Delta IoU = +0.072$, то есть более чем на 20% для рассмотренного алгоритма сопровождения, при этом временные затраты на обучение классификатора составили 16 миллисекунд на кадр для процессора Core-i5-4440@3.1GHz, что может служить объективным доказательством эффективности предложенного подхода.

Таким образом, резюмируя результаты проведенных исследований можно сделать вывод, что разработанный алгоритм обнаружения недетерминированных объектов и уточнения их положения с обучением в реальном времени позволяет осуществлять подтверждение наличия объекта в заданной области и уточнять его координаты с точностью, достаточной для обоснованного использования во встраиваемых вычислительных системах перспективных робототехнических комплексов.

На дальнейших этапах развития алгоритма предполагается заменить фиксированный сдвиг окон при обнаружении на использование циркулянтных матриц, что должно повысить точность локализации объекта интереса. Поскольку дескриптор НОГ является дескриптором формы объекта, планируется также при обучении классификатора использовать дополнительно дескрипторы текстуры, на-

пример, локальные бинарные паттерны (local binary patterns, LBP) [21, 22], что должно положительно сказаться на точности классификации [23]. Также перспективной является замена одного сильного классификатора на каскад слабых классификаторов – это позволит более простым способом избегать переобучения и дополнительно повысит точность нахождения объекта, ввиду корректировки параметров по ходу слежения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H.S. Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking. In: Hua G., Jégou H. (eds) Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 9914. – Springer, Cham, 2016.
2. Zhang Y., Wang L., Qi J., Wang D., Feng M., Lu H. Structured Siamese Network for Real-Time Visual Tracking. In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds) Computer Vision – ECCV 2018. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 11213. – Springer, Cham, 2018.
3. Li D., Yu Y. & Chen X. Object tracking framework with Siamese network and re-detection mechanism // J Wireless Com Network. – 2019, 261.
4. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-Learning-Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 34, No. 7. – P. 1409-1422.
5. Henriques J.F., et al. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 37, No. 3. – P. 583-596.
6. Davis P.J. Circulant Matrices. Wiley-Interscience, NY, 1979.
7. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), San Diego, CA, USA, 2005. – Vol. 1. – P. 886-893. – Doi: 10.1109/CVPR.2005.177.
8. Rybski P.E., Huber D., Morris D. D., Hoffman R. Visual classification of coarse vehicle orientation using Histogram of Oriented Gradients features // 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, La Jolla, CA, USA, 2010. – P. 921-928. – Doi: 10.1109/IVS.2010.5547996.
9. Dollár P., Appel R., Belongie S. and Perona P. Fast Feature Pyramids for Object Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Aug. 2014. – Vol. 36, No. 8. – P. 1532-1545.
10. Самсонов Н.А., Гнеушев А.Н. Дескриптор в аккумуляторном пространстве Хафа градиентного поля изображения для детектирования пешеходов // Машинное обучение и анализ данных. – 2017 – № 3. – Т. 3. – С. 203-215. – eISSN: 2223-3792.
11. Misra I., Shrivastava A., Hebert M. HOG and Spatial Convolution on SIMD Architecture // Technical report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2013.
12. Huang C., Huang J. A Fast HOG Descriptor Using Lookup Table and Integral Image. ArXiv, abs/1703.06256, 2017.
13. Roshan K., Saurabh S. Machine Learning: A Review on Binary Classification // International Journal of Computer Applications. – 2017.
14. Cortes C., Vapnik V. Support Vector Networks // Mach. Learn. – 1995. – Vol. 20. – P. 273-297.
15. Burges J.C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition // Data Min. Knowl. Disc. – 1998. – P. 121-167.
16. Cristianini N., Shawe-Taylor J. An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods. – Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
17. Zhou X., Zhang X., Wang B. Online Support Vector Machine: A Survey. In: Kim J., Geem Z. (eds) Harmony Search Algorithm. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 382. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2016. – https://doi.org/10.1007/978-3-662-47926-1_26.
18. Shalev-Shwartz S., Singer Y., Srebro N. et al. Pegasos: primal estimated sub-gradient solver for SVM // Math. Program. – 2020. – Vol. 127. – P. 3-30.
19. Бондаренко В.А., Ельцова Д.К., Лизин А.И., Павлова В.А., Созинова М.В., Тутиков В.А. Многоагентный алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1 (211). – С. 218-232.

20. *Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., Sadeghian A., Reid I., Savarese S.* Generalized Intersection Over Union: A Metric and a Loss for Bounding Box Regression // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019. – P. 658-666.
21. *Heikkilä M., Pietikäinen M.* A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – Vol. 28 (4). – P. 657-662.
22. *Kertész C.* Texture-Based Foreground Detection, International Journal of Signal Processing // Image Processing and Pattern Recognition (IJSIP). – 2011. – Vol. 4, No. 4.
23. *Khalifa T., Şengül G.* The Integrated Usage of LBP and HOG Transformations and Machine Learning Algorithms for Age Range Prediction from Facial Images // Tehnicki Vjesnik. – 2018. – Vol. 25. – P. 1356-1362. – Doi. 10.17559/TV-20170308030459.

REFERENCES

1. *Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H.S.* Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking. In: Hua G., Jégou H. (eds) Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9914. Springer, Cham, 2016.
2. *Zhang Y., Wang L., Qi J., Wang D., Feng M., Lu H.* Structured Siamese Network for Real-Time Visual Tracking. In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds) Computer Vision – ECCV 2018. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11213. Springer, Cham, 2018.
3. *Li D., Yu Y. & Chen X.* Object tracking framework with Siamese network and re-detection mechanism, *J Wireless Com Network*, 2019, 261.
4. *Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J.* Tracking-Learning-Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, Vol. 34, No. 7, pp. 1409-1422.
5. *Henriques J.F., et al.* High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, Vol. 37, No. 3, pp. 583-596.
6. *Davis P.J.* Circulant Matrices. Wiley-Interscience, NY, 1979.
7. *Dalal N., Triggs B.* Histograms of oriented gradients for human detection, *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), San Diego, CA, USA, 2005*, Vol. 1, pp. 886-893. Doi: 10.1109/CVPR.2005.177.
8. *Rybski P.E., Huber D., Morris D.D., Hoffman R.* Visual classification of coarse vehicle orientation using Histogram of Oriented Gradients features, *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, La Jolla, CA, USA, 2010*, pp. 921-928. Doi: 10.1109/IVS.2010.5547996.
9. *Dollár P., Appel R., Belongie S. and Perona P.* Fast Feature Pyramids for Object Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Aug. 2014, Vol. 36, No. 8, pp. 1532-1545.
10. *Samsonov N.A., Gneushev A.N.* Deskriptor v akkumulyatornom prostranstve khafa gradientnogo polya izobrazheniya dlya detektirovaniya peshekhodov [Textural descriptor in the Hough accumulator space of the gradient field for detecting pedestrians], *Mashinnoe obuchenie i analiz dannykh [Machine learning and data analysis]*, 2017, No. 3, Vol. 3, pp. 203-215. eISSN: 2223-3792.
11. *Misra I., Shrivastava A., Hebert M.* HOG and Spatial Convolution on SIMD Architecture, *Technical report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2013*.
12. *Huang C., Huang J.* A Fast HOG Descriptor Using Lookup Table and Integral Image. ArXiv, abs/1703.06256, 2017.
13. *Roshan K., Saurabh S.* Machine Learning: A Review on Binary Classification, *International Journal of Computer Applications*, 2017.
14. *Cortes C., Vapnik V.* Support Vector Networks, *Mach. Learn.*, 1995, Vol. 20, pp. 273-297
15. *Burges J.C.* A tutorial on support vector machines for pattern recognition, *Data Min. Knowl. Disc.*, 1998, pp. 121-167.
16. *Cristianini N., Shawe-Taylor J.* An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
17. *Zhou X., Zhang X., Wang B.* Online Support Vector Machine: A Survey. In: Kim J., Geem Z. (eds) Harmony Search Algorithm. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 382. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-662-47926-1_26.

18. Shalev-Shwartz S., Singer Y., Srebro N. et al. Pegasos: primal estimated sub-gradient solver for SVM, *Math. Program.*, 2020, Vol. 127, pp. 3-30.
19. Bondarenko V.A., El'tsova D.K., Lizin A.I., Pavlova V.A., Sozinova M.V., Tupikov V.A. Mnogoagentnyy algoritm avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya nedeterminirovannykh ob"ektov [Multi-agent algorithm for automatic detection and tracking of non-deterministic objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1 (211), pp. 218-232.
20. Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., Sadeghian A., Reid I. Savarese S. Generalized Intersection Over Union: A Metric and a Loss for Bounding Box Regression, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019*, pp. 658-666.
21. Heikkilä M., Pietikäinen M. A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, Vol. 28 (4), pp. 657-662.
22. Kertész C. Texture-Based Foreground Detection, *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition (IJSIP)*, 2011, Vol. 4, No. 4.
23. Khalifa T. Şengül G. The Integrated Usage of LBP and HOG Transformations and Machine Learning Algorithms for Age Range Prediction from Facial Images, *Tehnicki Vjesnik*, 2018, Vol. 25, pp. 1356-1362. Doi. 10.17559/TV-20170308030459.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. С.Н. Крюков.

Тупиков Владимир Алексеевич – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: tupikov@nppame.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; д.т.н.; профессор; зам. ген. Директора; директор научно-производственного комплекса робототехнических систем специального назначения (НПК РТС СН).

Павлова Валерия Анатольевна – e-mail: pavlova@nppame.ru; к.т.н.; зам. директора НПК РТС СН по НИОКР.

Бондаренко Владимир Александрович – e-mail: bondarenko@nppame.ru; начальник центра средств интеллектуальной обработки изображений (ЦСИОИ) НПК РТС СН.

Созинова Мария Владимировна – e-mail: sozinova@nppame.ru; начальник отдела перспективных методов обработки изображений ЦСИОИ НПК РТС СН.

Гессен Павел Алексеевич – e-mail: pasha.gessen@outlook.com; научный сотрудник отдела прикладного программирования ЦСИОИ НПК РТС СН.

Tupikov Vladimir Alekseevich – SPE "Research and Production Enterprise "Air and Marine Electronics"; e-mail: tupikov@nppame.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78123274667; dr. of eng. sc.; professor; Deputy Director General; Director of Research and production complex of special purpose robotic systems (RPCSPRS).

Pavlova Valeria Anatolyevna – e-mail: pavlova@nppame.ru; cand. of eng. sc.; Deputy Director of research at RPCSPRS.

Bondarenko Vladimir Alexandrovich – e-mail: bondarenko@nppame.ru; Chief of intellectual image processing center (IIPC) RPCSPRS.

Sozinova Maria Vladimirovna – e-mail: sozinova@nppame.ru; Chief of the Department of Advanced Image Processing Techniques IIPC RPCSPRS.

Gessen Pavel Alekseevich – e-mail: pasha.gessen@outlook.com; Researcher at Department of Applied Programming IIPC RPCSPRS.

Раздел V. Техническое зрение

УДК 004.318:004.93:004.383

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-259-271

Н.А. Бочаров, А.Г. Зуев, О.А. Славин

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МИКРОПРОЦЕССОРА ЭЛЬБРУС-8СВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Исследования в области создания специализированных вычислительных комплексов для роботов ведутся во многих мировых научных центрах и в том числе в нашей стране. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Важной, но нерешенной проблемой остается оснащение таких вычислительных комплексов микропроцессорами отечественного производства. Появление отечественных вычислительных и программных средств нового поколения, таких как микропроцессор «Эльбрус-8СВ» и ОС «Эльбрус» открывает новые возможности для разработчиков робототехнических комплексов. Пиковая производительность микропроцессора «Эльбрус-8СВ» составляет более 0,25 ТФлопс двойной точности, что позволяет решать вычислительно сложные задачи, например задачи технического зрения, на микропроцессоре. Другим важным требованием бортовой вычислительной техники, помимо вычислительной мощности, является низкое энергопотребление. Как правило, на микропроцессорах общего назначения высокая вычислительная мощность невозможна при низком энергопотреблении, и для решения вычислительно сложных задач технического зрения используются специализированные процессоры, например, векторные или нейропроцессоры. Для снижения энергопотребления микропроцессоров общего назначения существуют специальные методы, среди которых авторами были рассмотрены: отключение физических ядер, снижение тактовой частоты, отключение конвейера, отключение синхросигналов в состоянии простоя. Авторами рассмотрены типовые задачи технического зрения, решаемые бортовыми вычислительными комплексами. Проведены экспериментальные исследования по оценке энергопотребления и времени выполнения алгоритмов технического зрения при снижении тактовой частоты и отключения ядер микропроцессора. Эксперименты показали возможность снижения энергопотребления ядер микропроцессора Эльбрус-8СВ на 36-46% с увеличением времени выполнения программ. По результатам эксперимента сделаны выводы о применимости микропроцессора Эльбрус-8СВ для создания перспективных бортовых вычислительных комплексов, имеющих возможность работы как в режиме высокой производительности, так и пониженного энергопотребления. Полученные авторами результаты говорят о перспективах импортозамещения в области робототехники.

Бортовые вычислительные комплексы; робототехника; энергопотребление; Эльбрус; техническое зрение.

N.A. Bocharov, A.G. Zuev, O.A. Slavin

PERFORMANCE OF THE ELBRUS-8SV MICROPROCESSOR FOR TECHNICAL VISION TASKS UNDER POWER CONSTRAINTS

Research in the field of creating specialized computing systems for robots is conducted in many world scientific centers, including our country. The development of capabilities of sensor systems, global navigation systems, growth of computing power and improvement of algorithms allow creating onboard computing systems with broad intellectual capabilities. An important, but

unsolved problem remains the equipping of such computing systems with domestically produced microprocessors. The emergence of domestic computing systems and software of the new generation, such as microprocessor "Elbrus-8SV" and OS "Elbrus" opens up new opportunities for developers of robotic complexes. The peak performance of "Elbrus-8SV" microprocessor is more than 0.25 TFLOPS of double precision, which allows solving computationally complex tasks, such as technical vision tasks, on the microprocessor. Another important requirement of onboard computing technology, in addition to computational power, is low power consumption. As a rule, on general-purpose microprocessors, high performance is impossible with low power consumption, and specialized processors, such as vector or neuroprocessors, are used to solve computationally complex technical vision tasks. To reduce the power consumption of general-purpose microprocessors, there are special methods, among which the authors considered: switching off the physical cores, reducing the clock frequency, switching off the pipeline, switching off synchronous pulses in the idle state. The authors reviewed typical technical vision tasks solved by onboard computing systems. An experiment was conducted to estimate power consumption and execution time of vision algorithms when the clock frequency is reduced and the microprocessor cores are switched off. The experiments showed the possibility to decrease the power consumption of the Elbrus-8SV microprocessor cores by 36-46% with an increase in the program execution time. Based on the results of the experiment, conclusions were made about the applicability of the Elbrus-8SV microprocessor for creating advanced onboard computing systems with the ability to operate both in high performance mode and with reduced power consumption. The results obtained by the authors indicate the prospects of import substitution in the field of robotics.

Onboard computing systems; robotics; power consumption; Elbrus; technical vision.

Введение. Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных вычислительных комплексов. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать вычислительные комплексы РТК, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Появление отечественных вычислительных и программных средств нового поколения, таких как микропроцессор «Эльбрус-8СВ» [1] с ОС «Эльбрус» [2] открыло новые возможности для вычислительных комплексов РТК, разрабатываемых на основе отечественных вычислительных средств. Одной из важных задач бортовой вычислительной техники является задача снижения энергопотребления при сохранении вычислительной мощности.

В данной статье рассмотрены пути снижения энергопотребления вычислительных комплексов на базе микропроцессора Эльбрус-8СВ. На программных моделях задач технического зрения проведено экспериментальное исследование по оценке влияния отключения ядер и снижения тактовой частоты на энергопотребление микропроцессора и время выполнения программ.

Микропроцессор Эльбрус-8СВ

Архитектура «Эльбрус» (E2k) – оригинальная лицензионно-чистая отечественная разработка, в которой реализованы передовые технологии [3]:

- ◆ архитектура основана на принципе широкого командного слова (Very Large Instruction Word, VLIW [4]), предполагающего одновременное исполнение множества операций обработки информации (до 23 операций для скалярных данных и до 33 операций для векторных форматов) за один такт;
- ◆ использование принципов явного параллельного исполнения команд (Explicitly Parallel Instruction Computing, EPIC), предполагающих передачу функций распараллеливания вычислений оптимизирующему компилятору, позволяющему обеспечить максимальную производительность используемого микропроцессора;
- ◆ обеспечение в микропроцессоре многоуровневой системы параллелизма, включающей параллелизм операций, векторный параллелизм, параллелизм потоков управления на общей памяти, параллелизм задач;

- ♦ обеспечение эффективной двоичной совместимости с архитектурой микропроцессора Intel x86 на базе скрытой динамической трансляции кодов, обеспечиваемой аппаратной поддержкой;

- ♦ развитая аппаратная поддержка защищенных вычислений (модульного программирования), существенно облегчающая работу программистов при создании больших программных комплексов с ограниченными сроками исполнения.

Ключевая черта архитектуры «Эльбрус» – так называемое явное управление параллелизмом, когда компилятор, зная внутреннее устройство процессора, сам определяет распределение операций по ядрам микропроцессора и возможность их одновременного исполнения. В традиционных архитектурах типа RISC или CISC на вход процессора поступает поток инструкций, которые рассчитаны на последовательное исполнение. Процессор может в определенной мере детектировать независимые операции и запускать их параллельно и даже менять их порядок.

Микропроцессор Эльбрус-8СВ предназначен для использования в многопроцессорных системах с когерентной распределенной общей оперативной памятью, в которых каждый микропроцессор Эльбрус-8СВ имеет локальную секцию оперативной памяти, а доступ к секциям оперативной памяти других микропроцессоров выполняется через межпроцессорные каналы. До 4 микропроцессоров могут быть объединены в многопроцессорную систему простым соединением межпроцессорных каналов. Основные характеристики микропроцессора Эльбрус-8СВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики микропроцессора Эльбрус-8СВ

Количество процессорных ядер	8
Рабочая частота процессорного ядра, МГц	1500
Пиковая производительность для одинарной точности, Gflops, не менее	570
Динамическая потребляемая мощность, Вт, не более	90

Особенности реализации программ на Эльбрусе. Фундаментом программной платформы Эльбрус является оптимизирующий компилятор. Производительность достигается не только за счёт аппаратуры, но и за счёт компилятора, который строит эффективный код.

Основная функция оптимизирующего компилятора – преобразования исходного алгоритма программы для построения наиболее эффективного исполнимого кода. Данные преобразования называются оптимизациями. Компилятор применяет оптимизации не произвольным образом, а в составе пакетных наборов, согласованных между собой. Данные наборы также называются уровнями оптимизации.

Самые низкие уровни включают минимум оптимизаций и выдают код, который проще всего анализировать. Более высокие уровни генерируют более быстрый код. Чем выше уровень, тем больше времени тратится на сам процесс компиляции.

Основными отличительными особенностями оптимизации кода для платформы Эльбрус являются [5]: повышенные требования к объему оптимизируемого кода (простор для обнаружения параллелизма); потребность в информации о вероятностях ветвлений и траекторий исполнения кода; повышенная чувствительность к блокировкам по неготовности данных, читаемых из памяти; большее количество вычислительных устройств и регистров; требование точности планирования [6]. По этим причинам среди хорошо известных универсальных техник компиляторной оптимизации кода можно выделить несколько, потребовавших особых решений при реализации из-за специфики архитектуры:

- ◆ инлайн-подстановка функций [7];
- ◆ раскрутка циклов;
- ◆ заблаговременная подкачка данных и кода из памяти [8].

Оптимизирующим компилятором производится точное планирование операций по исполняемым устройствам. Для блоков кода строится ориентированный граф зависимостей операций, в котором узлам соответствуют операции, дугам зависимости, причем каждой дуге приписывается длительность задержки от операции-источника до операции-приемника. Далее операции распределяются по широким командам так, чтобы все длительности задержек между ними были строго выдержаны.

Заметим, что порядок планирования операций, характерный для процессоров Out-of-Order Superscalar, соответствует «жадному алгоритму» планирования фронта готовых операций при обработке линейных участков кода проходом сверху вниз. Преимущество компиляторного подхода в том, что можно использовать различные алгоритмы планирования.

Кроме планирования операций необходимо произвести распределение регистров, т. е. заменить виртуальные регистры, используемые в промежуточном представлении, аппаратными регистрами. Это очень важная функция оптимизации, существенно влияющая на производительность компилируемой программы. На практике распределение регистров возможно как перед планированием, так и после него, причем каждый из подходов имеет свои дефекты. В компиляторе Icc после исследований и экспериментов был реализован комбинированный алгоритм планирования и распределения регистров, показавший преимущество перед отдельными алгоритмами [9].

Наряду с параллелизмом отдельных операций архитектура «Эльбрус» поддерживает параллелизм упакованных данных (векторные операции) и параллелизм потоков управления, которые также требуют поддержки в компиляторах.

Моделируемые задачи технического зрения. На сегодняшнем уровне развития теории и практики технического зрения стереоскопическое восприятие является стандартным решением как при разработке систем робототехнической навигации в целом, так и при составлении цифровой модели рельефа, в частности [10–13]. Оно реализуется преимущественно с использованием двух отстоящих друг от друга камер, стереопары, позволяющих создать два плоских изображения одной и той же сцены. Анализ стереопар позволяет выявить трехмерные объекты, расположенные на пути следования РТК, вычислить расстояния до препятствий, а также провести их идентификацию.

Основной процедурой в системе стереоскопического зрения является стереотождество (correspondence problem) – нахождение на изображениях, полученных различными камерами, соответствующих областей. К сожалению, следует отметить, что в целом задача стереотождества далека от возможности создания универсального алгоритма решения. Даже для простейших модельных задач эта процедура не является тривиальной и однозначной. Однако при некоторых ограничениях на параметры задачи решение может быть найдено.

На практике чаще всего приходится решать задачу распознавания в условиях недостаточности информации и распознавание объектов сложной геометрической конфигурации. Процедура обнаружения трехмерных препятствий в этом случае дополняется анализом проекций облака общих точек стереопар. Таким образом трехмерная задача переводится в более удобную для анализа 2D - плоскость (рис. 1).



Рис. 1. Фронтальная проекция облака точек (слева), изображение сцены (справа)

Реализация программных средств системы стереозрения основывается на использовании библиотеки OpenCV (Open Source Computer Vision Library), включающей множество алгоритмов компьютерного зрения с открытым исходным кодом, которая написана на языке высокого уровня (C/C++). При ее портировании на архитектуру Эльбрус с использованием функций библиотеки EML была проведена оптимизация для выполнения следующих операций обработки графических данных:

- ◆ непосредственный вызов соответствующей функции из библиотеки EML;
- ◆ написание фрагментов текста, использующих функции EML.

Основным методом стереорекострукции является использование алгоритма сопоставления блоков. OpenCV поддерживает две реализации этого алгоритма: StereoBM и полуглобальное блочное сопоставление (SGBM). Оба алгоритма похожи, но у них есть различия.

StereoBM предпочтителен на изображениях с четкой текстурой (например, изображение дерева), а StereoSGBM на изображениях с более гладкими текстурами (например, изображение коридора) за счет сопоставления на субпиксельном уровне. Эти два алгоритма были промоделированы с использованием портированной на архитектуру Эльбрус библиотеки OpenCV 3.2.0.

Для моделирования задачи распознавания образов была использована система распознавания документов Smart IDReader [14–15], которая позволяет распознавать документы, удостоверяющие личность, на различных платформах. Доступные режимы распознавания позволяют извлекать данные держателя документа из последовательности кадров видеоролика, цифровых фото или отсканированных изображений документов [16].

Система запускается в серверном режиме, предполагающим что система работает на многоядерном устройстве достаточно большой вычислительной мощностью, на котором можно параллельно запустить несколько независимых процессов распознавания документов. В таком режиме система полностью загружает устройство и демонстрирует максимальную производительность.

Распараллеливание вычислений выполнялось на максимально доступное число потоков при помощи библиотеки tbb. Для этого использовались стандартные методы из библиотеки tbb, такие как `parallel_for`, позволяющий распараллелить цикл `for`, и `task_group`, позволяющий создать набор из нескольких независимых задач, которые затем могут выполняться параллельно.

Были распараллелены этапы поиска документа на изображении (на основе алгоритма Виолы и Джонса), определения конкретного типа документа на изображении (при помощи сравнения документа с шаблоном с помощью расширенного алгоритма RANSAC), поиска текстовых полей (выполняется независимо в каждой из частей документа), а также сегментации и распознавания текстовых полей на основе нейронных сетей. В случае алгоритма Виолы и Джонса и метода определе-

ния типа документа удалось выполнить распараллеливание циклов, поскольку действия на каждой итерации цикла независимы. Поиск текстовых полей также выполняется независимо в каждой из частей документа, и может быть легко распараллелен. Сегментация и распознавание символов работают для каждого найденного поля независимо и также были распараллелены стандартными методами библиотеки `tbb`.

С помощью функций EML и интринсиков был реализован ряд операций, применяемых при низкоуровневой обработке изображений и распознавании образов:

- ◆ арифметические операции под отдельными пикселями изображения;
- ◆ масштабирование изображения;
- ◆ транспонирование изображения;
- ◆ поворот изображения;
- ◆ фильтрация изображения;
- ◆ умножение и сложение матриц вещественных чисел.

Рассмотренная система распознавания документов была скомпилирована из исходного кода с помощью `lcc` [17] версии 1.21.19 и работала в режиме совместимости с Эльбрус-8СВ. Распараллеливание выполнялось на максимально доступное число потоков при помощи библиотеки `tbb` [18]. Библиотека `tbb` является кросс-платформенной и была собрана `lcc` из исходного кода для процессоров семейства Эльбрус.

Таким образом, в работе рассматривается три алгоритма решения типовых задач технического зрения. С целью проведения разносторонней оценки, разработанные программные модели были скомпилированы в разных режимах, соответствующие наиболее распространенным конфигурациям в существующем ПО.

- ◆ Компиляция с распараллеливанием на максимальное число доступных ядер.
- ◆ Компиляция в однопоточном режиме.
- ◆ Компиляция в режиме совместимости.

Энергопотребление бортовых вычислительных комплексов. Характеристики энергопотребления микропроцессоров семейства «Эльбрус» являются одним из важнейших факторов при создании вычислительных комплексов (ВК) на их основе и имеют решающее значение при проектировании бортовой аппаратуры. Для бортовых ВК на основе микропроцессоров семейства «Эльбрус» выполнение таких требований возможно только при управлении энергопотреблением из операционной системы (ОС) с использованием специальной аппаратной поддержки [19].

Понизить энергопотребление микропроцессоров Эльбрус можно следующими способами:

- ◆ Снижение тактовой частоты.
- ◆ Отключение ядер микропроцессора.
- ◆ Отключение конвейера и синхроимпульсов процессорного ядра [20].
- ◆ Перевод микропроцессора в состояние сна [21, 22].

В работе [23], было показано, что отключение конвейера и синхроимпульсов процессорного ядра могут снизить потребление им энергии на 5,7 и 28 % соответственно по сравнению с работой в пустом цикле. В работе [20] показано, что использование специализированных программных средств в системе на четырехъядерном микропроцессоре позволяет снизить потребление мощности системой на 15 %. Перевод микропроцессора в состояние сна для понижения энергопотребления может осуществляться с помощью стандартных архитектурно-зависимых модулей Linux [24–25]. В данной работе рассматривается снижение энергопотребления на вычислительных ядрах микропроцессора за счет снижения тактовой частоты и отключения ядер.

В тестируемых вычислительных модулях на базе микропроцессора Эльбрус-8СВ номиналы питания памяти и ядер процессора контролируются по протоколу SMBus (System Management Bus). SMBus – последовательный протокол обмена данными для устройств питания. Односторонняя двухпроводная шина, обеспечивает коммуникацию. Основан на шине I2C, включающий два сигнала (тактовая частота и данные), и третий сигнал – прерывание. DC-DC источники TPS53819A, TPS53667 осуществляют контроль потребления питания.

Устройство TPS53667 [26] поддерживает требования к синхронизации шины PMBus как 100 кГц, так и 400 кГц. Связь через интерфейс PMBus устройства TPS53667 может поддерживать схему проверки ошибок пакетов (PEC), если это необходимо. Если мастер подает импульсы CLK для байта PEC, используется PEC. Если импульсы CLK отсутствуют перед STOP, PEC не используется. Устройство TPS53667 поддерживает множество команд из спецификации PMBus 1.1. Большинство параметров контроллера можно запрограммировать с помощью PMBus и сохранить как значения по умолчанию для дальнейшего использования.

Устройство TPS53667 [27] также поддерживает протокол SMBALERT. Протокол SMBALERT – это механизм, с помощью которого ведомое устройство (устройство TPS53667) может послать запрос к ведущему устройству шины. Ведущее устройство обрабатывает это событие и одновременно обращается ко всем ведомым устройствам на шине (которые поддерживают протокол). Только ведомое устройство, вызвавшее событие, подтверждает этот запрос. Хост выполняет модифицированную операцию приема байта, чтобы получить адрес подчиненного устройства. На этом этапе ведущее устройство может использовать команды состояния PMBus для запроса ведомого устройства, вызвавшего предупреждение. Устройство TPS53667 содержит энергонезависимую память, которая используется для хранения настроек конфигурации и коэффициентов масштабирования.

PMBus TPS53819A имеет семь внутренних настраиваемых 8-битных регистров, доступных пользователю. Хотя в логике TPS53819A PMBus нет возможности автоматического увеличения или уменьшения, можно разработать жесткий программный цикл для произвольного доступа к следующему регистру, независимо от того, к какому регистру обращались первым. Команды START и STOP формируют пакет данных, и при необходимости разрешается условие REPEAT START. Устройство может работать как в стандартном режиме (100 кб / с), так и в быстром (400 кб/с).

Номинальное напряжение микропроцессора составляет 0.9 В. В данной работе на тестируемом устройстве напряжение было повышено до 1.02 В, с целью более стабильной работы при изменении параметров.

Экспериментальные исследования по ограничению энергопотребления. Авторами были проведены экспериментальные исследования по оценке производительности с ограничением энергопотребления. На вычислительном комплексе, оснащенный микропроцессором Эльбрус-8СВ, были запущены программные модели технического зрения с одинаковыми входными данными.

Ограничение энергопотребления производилось путем ограничения тактовой частоты процессора и отключением физических ядер. Были рассмотрены конфигурации тактовой частоты 1500,1333,1200 и 1000 МГц и конфигурации с числом ядер 8, 4 и 2. Все проверки велись при напряжении 1.02 В.

Результатом работы программных моделей, решающих задачу стереорекострукции, является время построения карты смещений для пары изображений размером 640x480 пикселей. В программной модели распознавания образов рассчитывалось общее время обработки 500 изображений документов размером 1920x1080 пикселей. Результаты проведенного экспериментального исследования представлены в табл. 2, 3 и 4 соответственно.

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования на модели StereoBM

Количество ядер	Тактовая частота, МГц	Время выполнения, мс	Среднее значение тока, А
8	1500	37	27,68
	1333	42	23,85
	1200	47	21,4
	1000	56	17,26
4	1500	41	25,31
	1333	47	21,84
	1200	51	19,87
	1000	59	15,67
2	1500	76	24,17
	1333	87	21,29
	1200	96	18,48
	1000	116	14,96

Программная модель алгоритма StereoBM была скомпилирована с максимальным распараллеливанием на все доступные ядра микропроцессора. Ожидалось, что существенный вклад в снижение энергопотребления внесет отключение ядер микропроцессора. Из таблицы видно, что максимальное сокращение энергопотребления, ожидаемо получилось на конфигурации с 2 активными ядрами и частотой 1000 МГц. Снижение энергопотребления составило 46 % при увеличении времени выполнения алгоритма на 214 %. Однако, снижение тактовой частоты с 1500 до 1333 МГц на конфигурации с 8 активными ядрами оказало такой же эффект на энергопотребление, как и отключение 6 ядер. При этом, время выполнения увеличилось только на 5 % при конфигурации 1333 МГц/8 ядер, а на конфигурации 1500 МГц/2 ядра увеличилось время выполнения на 105 %.

Таблица 3

Результаты экспериментального исследования на модели StereoSGBM

Количество ядер	Тактовая частота, МГц	Время выполнения, мс	Среднее значение тока, А
8	1500	1056	26,89
	1333	1172	22,85
	1200	1291	20,7
	1000	1523	16,57
4	1500	1056	24,81
	1333	1172	21,55
	1200	1290	19,66
	1000	1525	15,44
2	1500	1056	24,32
	1333	1174	21,21
	1200	1293	18,66
	1000	1529	15,01

Программная модель алгоритма StereoSGBM была собрана в однопоточном режиме. Соответственно ожидалось снижение энергопотребления в основном за счет снижения тактовой частоты. Как видно из таблицы, отключение ядер снижало энергопотребление микропроцессора не более чем на 12 %. За счет снижения тактовой частоты удалось добиться снижения энергопотребления в среднем на 38 %. Максимальное снижение энергопотребления составило 44 % на конфигурации 1000 МГц/2ядра при увеличении времени выполнения на 45 %.

Таблица 4

Результаты экспериментального исследования на модели SmartID

Количество ядер	Тактовая частота, МГц	Время выполнения, с	Среднее значение тока, А
8	1500	166	29,14
	1333	187	25,48
	1200	207	23,05
	1000	248	18,74
4	1500	326	26,19
	1333	365	22,52
	1200	405	20,34
	1000	490	16,31
2	1500	645	24,39
	1333	725	20,98
	1200	816	18,89
	1000	971	14,68

Программная модель алгоритма распознавания SmartID была собрана в режиме совместимости с Эльбрус-8С и использовала распараллеливание с помощью библиотеки *tbb* на максимально доступное число потоков. Из таблицы видно, что отключение ядер вызвало существенное замедление выполнения программы пропорционально количеству доступных ядер. Снижение тактовой частоты, в свою очередь, снижало время выполнения программы на 13–50 % при снижении энергопотребления на 13–36 %.

Заключение. В данной статье рассмотрен вопрос применимости микропроцессора «Эльбрус-8СВ» для решения вычислительно сложных задач технического зрения в бортовых вычислительных комплексах при ограничениях энергопотребления. Рассмотрены существующие методы снижения энергопотребления микропроцессора, такие как: отключение физических ядер, снижение тактовой частоты, отключение конвейера, отключение синхроимпульсов в состоянии простоя. В работе проведены экспериментальные исследования по оценке энергопотребления и времени выполнения алгоритмов технического зрения при снижении тактовой частоты и отключения ядер микропроцессора. Эксперименты показали возможность снижения энергопотребления ядер микропроцессора Эльбрус-8СВ на 36–46% с увеличением времени выполнения программ. Таким образом, можно говорить о применимости микропроцессора Эльбрус-8СВ для создания перспективных бортовых вычислительных комплексов, имеющих возможность работы как в режиме высокой производительности, так и пониженного энергопотребления. Результаты проведенного исследования говорят о перспективах импортозамещения в области робототехники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бычков И.Н., Чучко П.А.* Решения для средств вычислительной техники на основе процессора «Эльбрус-8СВ» // *Наноиндустрия*. – 2019. – № S89. – С. 57-59.
2. *Волконский В.Ю., Иванов М.А., Ким А.К., Семенухин С.В.* Комплекс программных средств антивирусной защиты компьютерных систем, функционирующих под управлением ОС семейства «Эльбрус» // *REDS: Телекоммуникационные устройства и системы*. – 2015. – Т. 5, № 3. – С. 282-285.

3. *Ким А.К., Перекатов В.И., Ермаков С.Г.* Микропроцессоры и вычислительные комплексы семейства "Эльбрус". – СПб.: Питер, 2013. – 272 с.
4. *Renan Augusto Starke, Andreu Carminati, Rymulo Silva de Oliveira*, Evaluation of a low overhead predication system for a deterministic VLIW architecture targeting real-time applications // *Microprocessors and Microsystems*. – 2017. – Vol. 49. – P. 1-8.
5. *Нейман-заде М.И., Волконский В.Ю.* Среды программирования и оптимизирующие компиляторы для компьютеров с микропроцессорами архитектуры «Эльбрус» // *Приборы*. – 2018. – № 8. – С. 21-29.
6. *Волконский В.Ю., Брегер А.В., Бучнев А.Ю., Грабежной А.В., Ермолицкий А.В., Муханов Л.Е., Нейман-заде М.И., Степанов П.А., Четверина О.А.* Методы распараллеливания программ в оптимизирующем компиляторе // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ*. – 2012. – Вып. 3. – С. 63-88.
7. *Ермолицкий А.Е., Нейман-заде М.И., Четверина О.А., Маркин А.Л., Волконский В.Ю.* Агрессивная инлайн-подстановка функций для VLIW-архитектур // *Тр. ИСП РАН*. – 2015. – Т. 27. – Вып. 6.
8. *Волконский В.Ю., Грабежной А.В., Муханов Л.Е., Нейман-заде М.И.* Исследование влияния подсистемы памяти на производительность распараллеленных программ // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ*. – 2011. – Вып. 3. – С. 22-37.
9. *Иванов Д.С.* Распределение регистров при планировании инструкций для VLIW-архитектур // *Программирование*. – 2010. – № 6. – С. 74-80.
10. *Букин А.Г., Лычагов А.С., Садеков Р.Н., Славин О.А.* Аппаратно-программный комплекс компьютерного зрения для решения задач навигации наземных подвижных объектов // *Гироскопия и навигация*. – 2015. – № 2. – С. 58-66.
11. *Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Славин О.А., Янко Д.В.* Оценка перспектив использования вычислительных средств семейства «Эльбрус» при реализации алгоритмов распознавания в современных робототехнических комплексах // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2018. – № 2. – С. 99-105.
12. *Suman Harapanahalli, Niall O Mahony, Gustavo Velasco Hernandez, Sean Campbell, Daniel Riordan, Joseph Walsh*, Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 38. – P. 1524-1531. – ISSN 2351-9789. – <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.134>.
13. *Pileun Kim, Jisoo Park, Yong K. Cho, Junsuk Kang*, UAV-assisted autonomous mobile robot navigation for as-is 3D data collection and registration in cluttered environments // *Automation in Construction*. – 2019. – Vol. 106. – P. 102918. – ISSN 0926-5805. – <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102918>.
14. *Bulatov K., Arlazarov V., Chernov T., Slavin O., Nikolaev D.* Smart IDReader: Document Recognition in Video Stream // *The 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2017), CBDAR 2017: November 9–12, Kyoto, Japan, 2017*. – P. 39-44.
15. *Арлазаров В.В., Арлазаров В.Л., Булатов К., Николаев Д.П., Полевой Д., Славин О.* Система распознавания документов в видеопоследовательности // *Государственный реестр полезных моделей Российской Федерации*.
16. *Limonova E.E., Bocharov N.A., Paramonov N.B., Bogdanov D.S., Arlazarov V.V., Slavin O.A., Nikolaev D.P.* Performance Evaluation of a Recognition System on the VLIW Architecture by the Example of the Elbrus Platform // *Programming and Computer Software*. – 2019. – Vol. 45 (1). – P. 12-17. – Doi: 10.1134/S0361768819010055.
17. *Нейман-заде М.И., Королёв С.Д.* Руководство по эффективному программированию на платформе «Эльбрус». – 2020.
18. Intel® Threading Building Blocks (Intel TBB). – URL: <https://www.threadingbuildingblocks.org/> (дата обращения: 18.02.2021).
19. *Кравцунов Е.М., Михайлов М.С., Семенхин С.В.* Использование прерываний системного контроля SCI для управления энергопотреблением микропроцессоров семейства «Эльбрус» // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ*. – 2015. – Вып. 1.
20. *Аблакатов М.А.* Управление энергопотреблением сервера семейства «Эльбрус», основанное на отключении процессорных ядер по данным подсистемы балансировки загрузки // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2017. – № 3. – С. 48-51.
21. *David Meisner, Brian T. Gold, Thomas F. Wenisch*. PowerNap: Eliminating Server Idle Power, ASPLOS'09, March 7-11 2009, Washington DC, USA.

22. Advanced Configuration and Power Interface Specification, Hewlett-Packard Corporation, Intel Corporation, Microsoft Corporation, Phoenix Technologies Ltd, Toshiba Corporation, Revision 4.0a, April 5, 2010.
23. *Кравцунов Е.М., Семенухин С.В.* Управление энергопотреблением СНК «Эльбрус-2С+» в состоянии простоя процессорного ядра // Вопросы радиоэлектроники. – 2013. – Т. 4, № 3. – С. 143-157.
24. *Thomas Gleixner, Douglas Niehaus.* Hrtimers and Beyond: Transforming the Linux Time Subsystems // Proceedings of the Linux Symposium. – 2006. – Vol. One. – P. 333.
25. *Venkatesh Pallipadi, Shaohua Li, Adam Belay.* cpuidle – Do nothing, efficiently... // Proceedings of the Linux Symposium. – 2007. – Vol. Two. – P. 119.
26. TPS53667 6-Phase, D-CAP+, Step-Down, Buck Controller with NVM and PMBus™ Interface for ASIC Power and High-Current Point-of-Load. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps53667.pdf> (дата обращения: 18.02.2021).
27. TPS53819A3-Vto28-VInput, 40-A, Eco-Mode™, D-CAP2™ Synchronous Buck Controller With PMBus™. – URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps53819a.pdf> (дата обращения 18.02.2021).

REFERENCES

1. *Bychkov I.N., Chuchko P.A.* Resheniya dlya sredstv vychislitel'noy tekhniki na osnove protsessora «El'brus-8SV» [Solutions for computer equipment based on the processor "Elbrus-8SV"], *Nanoindustriya* [Nanoindustria], 2019, No. S89, pp. 57-59.
2. *Volkonskiy V.Yu., Ivanov M.A., Kim A.K., Semenikhin S.V.* Kompleks programnykh sredstv antivirusnoy zashchity komp'yuternykh sistem, funktsioniruyushchikh pod upravleniem os semeystva El'brus [A set of software tools for anti-virus protection of computer systems operating under the control of the "Elbrus" OS family], *REDS: Telekommunikatsionnye ustroystva i sistemy* [REDS: Telecommunications devices and systems], 2015, Vol. 5, No. 3, pp. 282-285.
3. *Kim A.K., Perekatov V.I., Ermakov S.G.* Mikroprotssory i vychislitel'nye komplekсы semeystva "El'brus" [Microprocessors and computing systems of the "Elbrus" family]. Saint Petersburg: Piter, 2013, 272 p.
4. *Renan Augusto Starke, Andreu Carminati, Rymulo Silva de Oliveira,* Evaluation of a low overhead predication system for a deterministic VLIW architecture targeting real-time applications, *Microprocessors and Microsystems*, 2017, Vol. 49, pp. 1-8.
5. *Neyman-zade M.I., Volkonskiy V.Yu.* Sredy programirovaniya i optimiziruyushchie kompilyatory dlya komp'yutеров s mikroprotssorami arkhitektury «El'brus» [Programming environments and optimizing compilers for computers with microprocessors of the "ELBRUS" architecture], *Pribory* [Devices], 2018, No. 8, pp. 21-29.
6. *Volkonskiy V.Yu., Breger A.V., Buchnev A.Yu., Grabeznoy A.V., Ermolitskiy A.V., Mukhanov L.E., Neyman-zade M.I., Stepanov P.A., Chetverina O.A.* Metody rasparallelivaniya programm v optimiziruyushchem kompilyatore [Methods of program parallelization in an optimizing compiler], *Voprosy radioelektroniki. Ser. EVT* [Questions of radio electronics. EVT series], 2012, Issue 3, pp. 63-88.
7. *Ermolitskiy A.E., Neyman-zade M.I., Chetverina O.A., Markin A.L., Volkonskiy V.Yu.* Agressivnaya inlayn-podstanovka funktsiy dlya VLIW-arkhitektur [Aggressive inline function substitution for VLIW architectures], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2015, Vol. 27, Issue 6.
8. *Volkonskiy V.Yu., Grabeznoy A.V., Mukhanov L.E., Neyman-zade M.I.* Issledovanie vliyaniya podsistemy pamyati na proizvoditel'nost' rasparallelennykh programm [Investigation of the effect of the memory subsystem on the performance of parallelized programs], *Voprosy radioelektroniki. Ser. EVT* [Questions of radio electronics. EVT series], 2011, Issue 3, pp. 22-37.
9. *Ivanov D.S.* Raspredelenie registrov pri planirovanii instruksiy dlya VLIW-arkhitektur [Register allocation when planning instructions for VLIW architectures], *Programirovanie* [Programming], 2010, No. 6, pp. 74-80.
10. *Bukin A.G., Lychagov A.S., Sadekov R.N., Slavin O.A.* Apparatno-programmnyy kompleks komp'yuternogo zreniya dlya resheniya zadach navigatsii nazemnykh podvizhnykh ob'ektov [Hardware and software complex of computer vision for solving problems of navigation of ground mobile objects], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2015, No. 2, pp. 58-66.
11. *Bocharov N.A., Paramonov N.B., Slavin O.A., Yanko D.V.* Otsenka perspektiv ispol'zovaniya vychislitel'nykh sredstv semeystva «El'brus» pri realizatsii algoritmov raspoznavaniya v sovremennykh robototekhnicheskikh kompleksakh [Evaluation of the prospects for the use of

- computing tools of the "Elbrus" family in the implementation of recognition algorithms in modern robotic complexes], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics], 2018, No. 2, pp. 99-105.
12. *Suman Harapanahalli, Niall O Mahony, Gustavo Velasco Hernandez, Sean Campbell, Daniel Riordan, Joseph Walsh*, Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment, *Procedia Manufacturing*, 2019, Vol. 38, pp. 1524-1531. ISSN 2351-9789. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.134>.
 13. *Pileun Kim, Jisoo Park, Yong K. Cho, Junsuk Kang*, UAV-assisted autonomous mobile robot navigation for as-is 3D data collection and registration in cluttered environments, *Automation in Construction*, 2019, Vol. 106, pp. 102918. ISSN 0926-5805. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102918>.
 14. *Bulatov K., Arlazarov V., Chernov T., Slavin O., Nikolaev D.* Smart IDReader: Document Recognition in Video Stream, *The 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2017), CBDAR 2017: November 9–12, Kyoto, Japan, 2017*, pp. 39-44.
 15. *Arlazarov V.V., Arlazarov V.L., Bulatov K., Nikolaev D.P., Polevoy D., Slavin O.* Sistema raspoznavaniya dokumentov v videoposledovatel'nosti [Document recognition system in video sequences], *Gosudarstvennyy reestr poleznykh modeley Rossiyskoy Federatsii* [State Register of Utility Models of the Russian Federation].
 16. *Limonova E.E., Bocharov N.A., Paramonov N.B., Bogdanov D.S., Arlazarov V.V., Slavin O.A., Nikolaev D.P.* Performance Evaluation of a Recognition System on the VLIW Architecture by the Example of the Elbrus Platform, *Programming and Computer Software*, 2019, Vol. 45 (1), pp. 12-17. Doi: 10.1134/S0361768819010055.
 17. *Neyman-zade M.I., Korolev S.D.* Rukovodstvo po effektivnomu programmirovaniyu na platforme «El'brus» [Guide to effective programming on the "Elbrus" platform], 2020.
 18. Intel® Threading Building Blocks (Intel TBB). Available at: <https://www.threadingbuildingblocks.org/> (accessed 18 February 2021).
 19. *Kravtsunov E.M., Mikhailov M.S., Semenikhin S.V.* Ispol'zovanie preryvaniy sistemnogo kontrolya SCI dlya upravleniya energopotrebleniem mikroprotessorov semeystva «El'brus» [Use of interrupts of the SCI system control for power consumption control of the "Elbrus" family of microprocessors], *Voprosy radioelektroniki. Ser. EVT* [Questions of radio electronics. EVT series], 2015, Issue 1.
 20. *Ablakatov M.A.* Upravlenie energopotrebleniem servera semeystva «El'brus», osnovannoe na otklyuchenii protsessornykh yader po dannym podsistemy balansirovki zagruzki [Power management of the server of the "Elbrus" family, based on the shutdown of processor cores according to the load balancing subsystem], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics], 2017, No. 3, pp. 48-51.
 21. *David Meisner, Brian T. Gold, Thomas F. Wenisch.* PowerNap: Eliminating Server Idle Power, ASPLOS'09, March 7-11 2009, Washington DC, USA.
 22. Advanced Configuration and Power Interface Specification, Hewlett-Packard Corporation, Intel Corporation, Microsoft Corporation, Phoenix Technologies Ltd, Toshiba Corporation, Revision 4.0a, April 5, 2010.
 23. *Kravtsunov E.M., Semenikhin S.V.* Upravlenie energopotrebleniem SNK «El'brus-2S+» v sostoyanii prostoya protsessornogo yadra [Power consumption management of the SNK "Elbrus-2S+" in the idle state of the processor core], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics], 2013, Vol. 4, No. 3, pp. 143-157.
 24. *Thomas Gleixner, Douglas Niehaus.* Hrtimers and Beyond: Transforming the Linux Time Subsystems, *Proceedings of the Linux Symposium*, 2006, Vol. One, pp. 333.
 25. *Venkatesh Pallipadi, Shaohua Li, Adam Belay.* cpuidle – Do nothing, efficiently... , *Proceedings of the Linux Symposium*, 2007, Vol. Two, pp. 119.
 26. TPS53667 6-Phase, D-CAP+, Step-Down, Buck Controller with NVM and PMBus™ Interface for ASIC Power and High-Current Point-of-Load. Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps53667.pdf> (accessed 18 February 2021).
 27. TPS53819A3-Vto28-VInput, 40-A, Eco-Mode™, D-CAP2™ Synchronous Buck Controller With PMBus™. Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps53819a.pdf> (accessed 18 February 2021).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Б. Парамонов.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Москва, Россия; тел.: +79167346437; к.т.н.; начальник отдела.

Зув Александр Геннадьевич – e-mail: Alexander.G.Zuev@mcst.ru; начальник отдела.

Славин Олег Анатольевич – ИСА ФИЦ «Информатика и управление» РАН; e-mail: oslavin@isa.ru; Москва, Россия; д.т.н.; зав. лабораторией.

Bocharov Nikita Alexeevich – PJSC «Brook INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; cand. of eng. sc.; chief of department.

Zuev Alexander Gennadevich – e-mail: Alexander.G.Zuev@mcst.ru; chief of department.

Slavin Oleg Anatolevich – ISA FRC “Computer Science and Control” RAS; e-mail: oslavin@isa.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; head of the laboratory.

УДК 528.722.4

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-271-281

А.М. Федулин, Д.М. Дрягин

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ БПЛА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Целью приведенного в настоящей работе исследования является оценка перспективности применения крупноразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) большой продолжительности полета для решения задачи регулярного комплексного обследования территорий большой площади относительно других применяемых для этого средств, таких как: малоразмерные БПЛА, космические аппараты для дистанционного зондирования Земли и пилотируемые летательные аппараты. Рассмотрен вопрос практического построения программно-аппаратного комплекса бортовой системы технического зрения на основе крупноразмерного БПЛА «Орион» взлетной массой более тонны, обеспечивающего аэрофотографическую съемку в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне и воздушное лазерное сканирование подстилающей поверхности с автоматической обработкой получаемых данных на борту в режиме времени, близком к реальному, с целью выявления произошедших с предыдущего обследования интересующих изменений. Определены ключевые составные части системы технического зрения, включая требуемую для решения функциональных задач программно-аппаратную платформу для обеспечения высокопроизводительных вычислений и хранения больших объемов данных. В работе приведена перспективная архитектура построения такой системы, даны расчетные оценки по ее поисковой производительности, массе и потребляемой мощности, определена типовая высота выполнения полетов, обеспечивающая пространственное разрешение получаемой видовой информации, необходимое для надлежащей работы алгоритмов объектно-ориентированного распознавания интересующих изменений, построенных на машинном обучении сверточных нейронных сетей. Предложены организационно-технические решения по ускорению цикла обработки данных, с учетом требований законодательства в части рассекречивания данных аэросъемки. Полученные в ходе выполнения работы результаты подтверждают, что после выдачи БПЛА «Орион» Федеральным агентством воздушного транспорта сертификата типа воздушного судна, дающего право выполнения коммерческих полетов в общем воздушном пространстве Российской Федерации, на его базе с использованием современных технологий съемки и интеллектуальной обработки данных можно будет реализовать аэросъемочный комплекс высокой производительности и степени автономности, тактико-технические и экономические характеристики которого будут на порядки превосходить существующие на данный момент решения, особенно для труднодоступных районов страны.

Крупноразмерный БПЛА; диверсификация БПЛА; система технического зрения; ретроспективный анализ; автоматическая обработка данных аэросъемки; объектно-ориентированное выявление изменений; нейронные сети.

A.M. Fedulin, D.M. Driagin

PROSPECTS OF MALE-CLASS UAVS USING FOR THE HUGE TERRITORIES AERIAL SURVEY

The aim of the study is to estimate the MALE-class (Medium Altitude Long Endurance) UAV (Unmanned Air Vehicles) using possibility to solve the problem of regular aerial survey of huge areas relative to other means used for this, such as: small-sized UAVs, satellite remote sensing and manned aircrafts. Considered is the issue of practical construction of onboard computer vision system based on a UAV "Orion" with a takeoff weight of more than a ton, which provides aerial photography in the visible and near infrared range and airborne laser scanning of the underlying surface with automatic processing of the received data on board in near real-time mode detecting the changes occurred since the previous survey. It has been determined the key components of the computer vision system both the hardware and software platform required high-performance computing and big-data storage. It has been presented a promising architecture, given estimates for its search performance, weight and power consumption, determined the typical flight altitude, which provides the input data spatial resolution, which is necessary for object-oriented change detection algorithms, based on a convolutional neural networks machine learning. It has been proposed organizational and technical solutions to speed up the data processing cycle, taking into account the requirements of the legislation regarding the declassification of aerial survey data. The results obtained confirm that after the issuance of the Orion UAV by the Federal Air Transport Agency of the aircraft type certificate, which gives the right to perform commercial flights in the shared airspace of the Russian Federation, it will be possible to implement an aerial survey complex of high productivity and degree of autonomy using cut of the edge CV & ML technologies. It seems the tactical, technical and economic capabilities of which proposed will be orders of magnitude superior to the currently existing solutions especially for hard-to-reach regions.

MALE-class UAV; computer vision systems; automatic aerial images processing; neural networks; aerial image change detection.

Введение. Одним из важнейших вопросов социально-экономической повестки является комплексное развитие территорий, ключевым драйвером которого может стать эффективное обеспечение конечных потребителей актуальной семантической информацией о местности и расположенных на ней объектах. На основе таких данных исполнительные органы государственной власти могут проводить инвентаризацию работ по благоустройству дорожной сети, дворовых территорий, выявлять незаконные свалки, вырубки, нецелевое использование земельных участков и множество других задач различного уровня, где требуется принятие управленческих решений на основе точной и актуальной информации. Коммерческие организации вместо того, чтобы заказывать локальные работы по картографированию, смогут через цифровые сервисы получить доступ к интересующим их регулярно обновляемым данным, чтобы оценить актуальное состояние пространственной инфраструктуры, такой как линий электропередач, трубопроводы, лесные и сельскохозяйственные угодья и пр. Особенно эффективно такой подход может применяться для районов Дальнего Востока и Сибири с огромными по площади территориями с относительно неразвитой наземной инфраструктурой [1].

Традиционным методом решения указанной задачи является аэросъемка территории оснащенными специализированной съемочной аппаратурой космическими или авиационными средствами, как беспилотными, так и пилотируемыми [2]. Очевидно, что решения на основе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) не являются эффективными ввиду их малой производительности и отсутствия возможности применения нескольких средств аэросъемки, построенных на различных физических принципах. Российские космические аппараты для дистанционного зондирования Земли («Канопус-В», «Ресурс-П», «Метеор-М», «Электро-М») не могут обеспечить требуемое пространственное разрешение

съемки [3], а также имеют ограничения, связанные с применением в сложных метеорологических условиях, характерных для большинства регионов нашей страны. Таким образом, в настоящий момент единственным способом решения поставленной задачи является пилотируемая авиация. Однако, использование пилотируемых вертолетов и самолетов в среднем на 1–2 порядка дороже, чем их беспилотных аналогов, что при требуемых больших площадях приведет к экономической нецелесообразности их применения.

В 2019г. в Федеральное агентство воздушного транспорта была подана заявка на получение сертификата типа для БПЛА «Орион» (рис. 1) [4], первоначально разработанного для решения задач государственной авиации. Это первая заявка для аппаратов взлетной массой более одной тонны, летно-технические характеристики которых позволяют находиться в воздухе более 24 часов, неся при этом целевое оборудование массой до 200 кг с потребляемой мощностью до 2КВт.



Рис. 1. БПЛА «Орион» на выставке МАКС-2019

К настоящему времени концептуальные и технические вопросы диверсификации БПЛА такого класса для решения задач народного хозяйства не рассмотрены [5]. На первый взгляд кажется, что все технические решения с учетом сопоставимых массогабаритных и энергетических возможностей можно заимствовать из пилотируемой авиации. Однако, законодательная необходимость контрольного просмотра военным цензором исходных данных аэросъемки для их дальнейшего использования в открытом доступе с учетом регистрируемых за один полет объемов информации приведет к растягиванию цикла обработки до нескольких недель, что делает такой подход абсолютно неактуальным в контексте решаемых задач. Целью данной работы является описание методологии автономной аэросъемки территорий большой площади с использованием БПЛА «Орион», которая бы позволила ускорить до нескольких часов получение конечными потребителями информации, а также обоснование решений, применяемых в реализующей описанную методологию системе технического зрения (СТЗ).

Методология аэросъемки. Предлагаемый нами подход основывается на переносе всей обработки на борт и исключении из цикла крайне затратного по вычислительным ресурсам этапа формирования точного ортофотоплана, ограничившись выявлением на совмещенных исходных данных аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования методами объектно-ориентированного ретроспективного анализа интересующих изменений, объем которых при цикличности проведения полетов раз в несколько недель будет на порядки меньше, что позволит выполнить их контрольный просмотр за время не более нескольких часов (рис. 2). Получаемой при этом точности координат объектов будет более чем достаточно для привязки на местности.

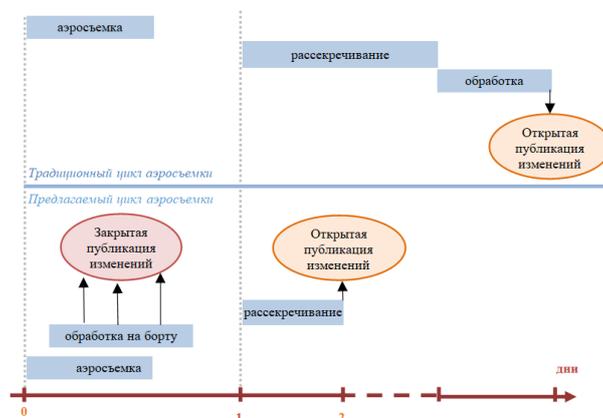


Рис. 2. Циклограмма работ по аэросъёмке

Более того, результаты обработки еще до контрольного просмотра могут быть оперативно переданы непосредственно с борта по защищенному спутниковому каналу в закрытые сегменты сетей органов государственной власти, так что к ним смогут получить доступ лица, имеющие соответствующий допуск. Это может оказаться крайне актуально, например, при мониторинге развития чрезвычайных происшествий или незаконных действий, требующих оперативной реакции.

Для реализации функции объектно-ориентированного выявления изменений местности непосредственно на борту в автоматическом режиме с достоверностью не менее 80–90 % необходимо выполнить аэросъёмку с пространственным разрешением не менее 10 см на пиксель [6]. Среди разработанных к настоящему моменту методов объектно-ориентированного анализа [7–12] наиболее перспективным видится алгоритм, который первоначально выполняет сегментацию изображений по классам с использованием нейросетевого подхода, а затем сравнения сегментированных изображений. На рис. 3 приводится пример работы такого алгоритма.

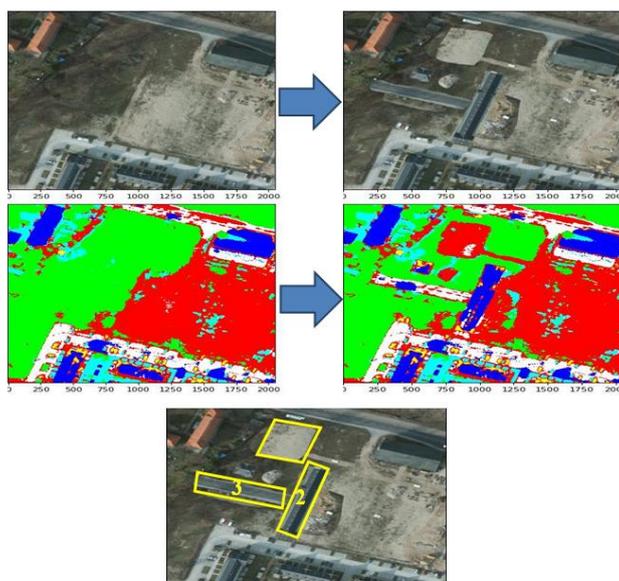


Рис. 3. Пример работы алгоритма анализа изменений

На двух верхних изображениях приводятся два аэрофотоснимка одной и той же местности, выполненные в разные периоды времени. На двух средних изображениях – результаты их сегментации с использованием сверточной нейронной сети U-Net [13], где красным цветом маркированы пустыри (поверхности без травяного покрова), зеленым цветом – газоны, бирюзовым – кустарники, белым – асфальтированные покрытия, а синим – строения (сооружения). Если попиксельно сравнить два сегментированных изображения, будут с высокой степенью достоверности выделены зоны объектовых изменений, которые обозначены на нижнем изображении: №1 – появление отсыпанной площадки на месте газона, №2 – появление здания на месте пустыря, №3 – появление асфальтированного покрытия на месте пустыря и газона.

Исходя из семантических изменений типа, достаточно легко определить, какие нарушения могли возникнуть при этом, и быстро проверить по имеющимся информационным базам данных, согласовано ли указанное использование территории с учетом известных координат объектов, а потом представить «подозрительные» случаи на окончательное рассмотрение лицам, принимающим решения.

Технические решения, реализующие предложенную методологию. С учетом изложенной выше методологии оценим возможность создания и реально достижимые характеристики подходящей для БПЛА «Орион» аппаратной платформы для автономной системы технического зрения (СТЗ), состоящей из нескольких разнотипных сенсоров, системы хранения данных, системы автоматической обработки, а также интерфейсов взаимодействия на базе существующего оборудования, первоначально разработанного для пилотируемой авиации.

Аэрофотографическую систему рассмотрим на примере Ultracam Condor Mark 1 фирмы Vexcel Imaging, масса которой составляет 64 кг при потребляемой мощности 350 ватт [14]. Данное изделие обеспечивает одновременную съемку в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Частота съемки составляет 1 кадр за 1,75 секунды, что при средней скорости полета 180 км/ч с учетом продольной проекции кадра в 500 метров обеспечит перекрытие соседних кадров порядка 80%. Такая степень перекрытия в том числе уменьшает вероятность «затенения» объекта в условиях нахождения БПЛА в зонах переменной облачности.

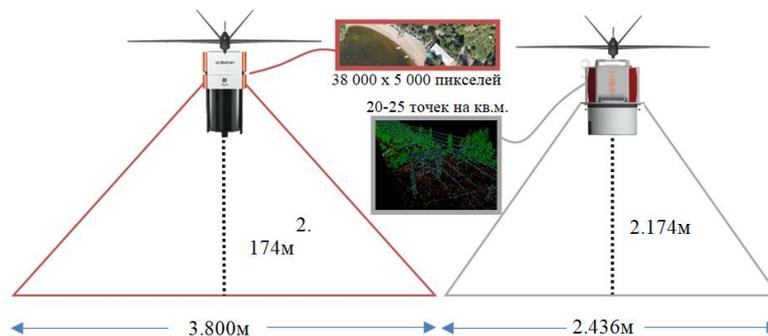


Рис. 4. Геометрические параметры устройств аэросъемки

Система воздушного лазерного сканирования (ВЛС) эффективно дополняет аэрофотографическую систему, значительно повышая точность привязки данных аэрофотосъемки, достоверность классификации объектов в сравнении с фотограмметрическими методами 3D-реконструкции рельефа и, как следствие, повышает скорость обработки до требуемого для данной задачи масштаба времени, близкого к реальному [15].

Для примера рассмотрим систему ВЛС RIEGL VQ-1560 II-S, масса которой составляет 60 кг при потребляемой мощности 370 ватт [16]. Данное изделие при скорости полета в 180 км/ч обеспечит получение облака точек 20-25 точек на квадратный метр.

Абсолютная поисковая производительность формирования фотоплана с разрешающей способностью 10 см на пиксель с получаемым таким образом поперечным перекрытием 35 % и облака точек плотностью 20–25 точек на кв. м. за 8 часов составит порядка 3500 кв. км. (рис. 4), что сопоставимо по размерам с Тосненским районом Ленинградской области. Для сравнения, применение малоразмерного БПЛА весом до 30 кг позволит снять за световой день порядка 50 кв. км. с указанной разрешающей способностью, т.е. для выполнения аналогичной работы понадобится 70 летних дней.

На рис. 5 приведен типовой профиль полета, соответствующий летно-техническим характеристикам БПЛА «Орион». Взлетев в аэропорту Новосибирска и сев через 10 часов в аэропорту Барнаула, БПЛА может обеспечить аэрофото-съемку бассейна Оби порядка 3 000 квадратных километров с заданной точностью 10 пикселей на квадратный метр.



Рис. 5. Типовой профиль полета БПЛА «Орион»

Суммарный объем данных, накопленный в ходе такого полета, составит порядка 16 500 снимков общим объемом около 14,5 Тб и около 70 млрд точек общим объемом порядка 1,5 Тб, что с учетом необходимости хранения данных за предыдущий полет потребует наличие системы хранения данных емкостью не менее 32 Тб.

Для реализации бортовых вычислений можно использовать доступные со-процессоры общего назначения GPGPU [17]. Достоинством таких изделий помимо их высокой производительности является наличие большого количества прикладного программного обеспечения, обеспечивающего быстрый процесс создания функциональных программных модулей с использованием геоинформационных технологий, алгоритмов компьютерного зрения и нейронных сетей. Нарращивание вычислительной мощности обеспечивается за счет масштабирования числа GPGPU.

Примером реализации такого подхода является высокопроизводительная система Agile Condor (США) [18] (рис. 6), обрабатывающая в реальном масштабе времени непосредственно на борту получаемые от сенсоров данные.



Рис. 6. Вычислительная система Agile Condor для БПЛА MQ-1 Predator

Спецификация предлагаемой нами автономной СТЗ приводится в табл. 1. Как видно, предложенное решение по массе и потребляемой мощности соответствует заявленным летно-техническим характеристикам БПЛА «Орион».

Таблица 1

Спецификация СТЗ

Составная часть	Масса, кг	Мощность, ватт
Ultracam Condor Mark 1	64	350
RIEGL VQ-1560 II-S	60	370
Бортовой регистратор данных	6	50
Вычислительный кластер 40ТФлопс	12	150
Аппаратура шифрации	1	10
Бортовой спутниковый терминал	45	600
ИТОГО:	188	1530

Суммарно, схему работы СТЗ можно представить следующим образом (рис. 7).

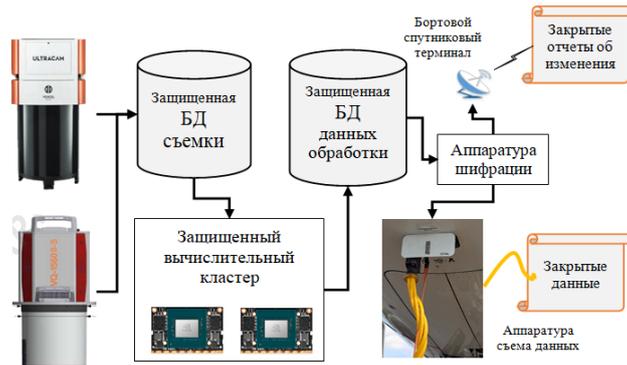


Рис. 7. Архитектура защищенной автономной СТЗ

В заключении описания предлагаемой архитектуры и технических решений необходимо отметить, что даже для изделий гражданской авиации крайне желательно строить элементы СТЗ на доверенной программно-аппаратной платформе, т.к. в противном случае нельзя исключить, что импортные компоненты, получая в процессе работы точную и детальную информацию о местности, могут передавать

ее за границу, минуя какие-либо проверки. Также, в [19] опубликован ряд практических способов информационных атак на применяемые для распознавания образов глубокие нейронные сети, которые были обучены на открытых наборах данных, что также накладывает ограничения на наземную инфраструктуру ведения баз знаний. В [20] рассмотрены сопроцессоры GPGPU, на основе которых в 2022–2023 гг. ожидается, можно будет создать отечественную аппаратную платформу СТЗ, перенеся на нее программное обеспечение, разработанное под импортную элементную базу.

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы.

Предложенная в работе методология комплексного обследования территорий большой площади с использованием крупноразмерных БПЛА сможет обеспечить значительное повышение оперативности доведения информации о произошедших изменениях до конечных потребителей за счет высокой поисковой производительности БПЛА данного класса, совместного использования средств аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования, а также достигнутых к настоящему моменту программно-аппаратных возможностей по их автоматическому выявлению непосредственно на борту.

Элементами научной новизны авторы считают приведенное в работе обоснование практической возможности в ближайшей перспективе создания такой высокопроизводительной бортовой вычислительной интеллектуальной системы (в том числе на доверенной отечественной элементной базе), которая может кардинально изменить методологию проведения аэросъемочных работ в масштабах страны.

В ближайшее время ожидается получение первым крупноразмерным БПЛА «Орион» сертификата типа воздушного судна, после чего в достаточно короткие сроки можно будет произвести его дооснащение описанной автономной системой технического зрения с целью проведения практической апробации полученного таким образом аэросъемочного комплекса в различных климатических и географических условиях по предложенной в настоящей работе методологии и получения реально достижимых технических и экономических оценок эффективности его применения относительно других способов и методов проведения аэросъемочных работ, особенно в удаленных малонаселенных районах РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шайтура С.В., Васкина М.Ю.* Комплексная цифровая модель мониторинга района // Геоэкология. – 2019. – № 4. – С. 71-76. – Doi: 10.24411/1816-1863-2019-14071.
2. *Журавлев Г.Р., Шаповалов Д.А.* Принципы и предложения использования результатов аэрофотосъемки, полученных с помощью БПЛА, в целях выявления незарегистрированных объектов недвижимости // Московский экономический журнал. – 2020. – № 6. – С. 135-143.
3. *Брагина Е.В., Черных Ж.В.* Современный уровень и тенденции развития группировки космических средств ДЗЗ в интересах получения оперативной космической информации о земной поверхности // Сб. трудов XXX Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь» по направлению секции «Совершенствование тактики действий спасательных воинских формирований МЧС России», Химки, 19 марта 2020 г. – 2020. – С. 27-37.
4. *Долженков Н.Н., Федюлин А.М., Дрягин Д.М.* Пути повышения автономности крупноразмерных беспилотных авиационных систем двойного назначения // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2020. – № 9. – С. 3-11.
5. *Костин А.С.* Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения // Системный анализ и логистика. – 2019. – № 1 (19). – С. 70-80.
6. *Quispe D., Sulla-Torres J.* Automatic Building Change Detection on Aerial Images using Convolutional Neural Networks and Handcrafted Features // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2020. – Vol. 11, No. 6. – P. 679-684.

7. *Huang X., Zhang L.* Morphological building/shadow index for building extraction from high-resolution imagery over urban areas // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* – 2012. – No. 2. – Vol. 5. – P. 161-172.
8. *Tang Y., Huang X., Zhang L.* Fault-tolerant building change detection from urban high-resolution remote sensing imagery // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* – 2013. – No. 09. – Vol. 10. – P. 1060-1064.
9. *Huang X., Zhang L., Zhu T.* Building change detection from multitemporal high-resolution remotely sensed images based on a morphological building index // *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of.* – 2014. – No. 01. – Vol. 7. – P. 105-115.
10. *Wen D., Huang X., Zhang L., Benediktsson J.* A novel automatic change detection method for urban high-resolution remotely sensed imagery based on multiindex scene representation // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2015. – No. 1. – Vol. 54. – P. 1-17.
11. *Dornaika F., Moujahid A., El Merabet Y., Ruichek Y.* Building detection from orthophotos using a machine learning approach: An empirical study on image segmentation and descriptors // *Expert Systems with Applications.* – 2016. – No. 3. – Vol. 58.
12. *Ji S., Wei S., Lu M.* Fully convolutional networks for multisource building extraction from an open aerial and satellite imagery data set // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2018. – No. 8. – P. 1-13.
13. *Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // *MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science.* – Vol. 9351. – Springer, Cham.
14. ULTRACAM CONDOR MARK 1. – https://www.vexcel-imaging.com/brochures/UC_Condor_M1_ru.pdf (дата обращения: 14.02.2021).
15. *Гришина А.И., Рамазанов Р.Р., Глухов А.В., Левченко Е.Н.* Комбинирование методов наземного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата для повышения эффективности контроля промышленного строительства // *Вектор ГеоНаук.* – 2020. – № 3. – С. 55-67. – Doi: 10.24411/2619-0761-2020-10032.
16. RIEGL VQ-1560 II-S. – http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/RIEGL_VQ-1560II-S_Preliminary-Datasheet_2020-10-05_01.pdf (дата обращения: 14.02.2021).
17. *Vega A., Lin C., Swaminathan K., Buyuktosunoglu A., Pankanti S., Bose P.* Resilient, UAV-embedded real-time computing // 2015 33rd IEEE International Conference on Computer Design (ICCD), New York, NY, 2015. – P. 736-739. – Doi: 10.1109/ICCD.2015.7357189.
18. *Barnell M., Raymond C., Capraro C., Isereau D., Cicotta C., Stokes N.* High-Performance Computing and Machine Learning Demonstrated in Flight Using Agile Condor® // 2018 IEEE High Performance extreme Computing Conference», Waltham, MA, 25 - 27 September 2018, USA. 2018. – P. 1-4. – Doi: 10.1109/HPEC.2018.8547797.
19. *Федулин А.М., Горбачев В.С., Осадчук А.В.* Концептуальный подход к созданию наземной инфраструктуры машинного обучения систем технического зрения для беспилотной авиации // *Общероссийский научно-технический журнал «ПОЛЕТ».* – 2020. – № 11. – С. 32-38.
20. *Адамов А.А., Павлухин П.В., Биконов Д.В., Эйсымонт А.Л., Эйсымонт Л.К.* Альтернативные современным GPGPU перспективные универсальные и специализированные процессоры-ускорители // *Вопросы кибербезопасности.* – 2019. – № 4. – С. 13-21.
21. *Осипенко П.Н., Увкин И.В.* Блок тензорных вычислений для ускорения расчета искусственных нейронных сетей // *Наноиндустрия.* – 2020. – Т. 13, № S4 (99). – С. 261-262. – Doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.261.262.

REFERENCES

1. *Shaytura S.V., Vaskina M.Yu.* Kompleksnaya tsifrovaya model' monitoringa rayona [Integrated digital area monitoring model], *Geoekologiya [Geocology]*, 2019, No. 4, pp. 71-76. Doi: 10.24411/1816-1863-2019-14071.
2. *Zhuravlev G.R., Shapovalov D.A.* Printsipy i predlozheniya ispol'zovaniya rezul'tatov aerofotos"emki, poluchennykh s pomoshch'yu BPLA, v tselyakh vyyavleniya nezaregistrovan-nykh ob"ektov nedvizhimosti [Principles and proposals for using the results of aerial photography obtained with the help of UAVs in order to identify unregistered real estate objects], *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal [Moscow Economic Journal]*, 2020, No. 6, pp. 135-143.

3. *Bragina E.V., Chernykh Zh.V.* Sovremennyy uroven' i tendentsii razvitiya gruppировки kosmicheskikh sredstv DZZ v interesakh polucheniya operativnoy kosmicheskoy informatsii o zemnoy poverkhnosti [Current level and trends in the development of a constellation of space-based DZ tools for the purpose of obtaining operational space information on the earth's surface], *Sb. trudov XXX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Predotvrashchenie. Spasenie. Pomoshch'» po napravleniyu sektsii «Sovershenstvovanie taktiki deystviy spasatel'nykh voinskikh formirovaniy MChS Rossii», Khimki, 19 marta 2020 g.* [Proceedings of the XXX International Scientific and Practical Conference “Prevention. Rescue. Help” in the direction of the section “Improving the tactics of actions of rescue military units of the EMERCOM of Russia”, Khimki, 19 march 2020], 2020, pp. 27-37.
4. *Dolzhenkov N.N., Fedulin A.M., Dryagin D.M.* Puti povysheniya avtonomnosti krupno-razmernykh bespilotnykh aviatsionnykh sistem dvoynogo naznacheniya [Improvements of the MALE-class UAS autonomy], *Obshcherossiyskiy nauchno-tehnicheskii zhurnal «Polet»* [Journal «POLIOT»], 2020, No. 9, pp. 3-11.
5. *Kostin A.S.* Klassifikatsiya grazhdanskikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov i sfery ikh primeneniya [Classification of civil unmanned aerial vehicles and their scope of application], *Sistemnyy analiz i logistika* [System analysis and logistics], 2019, No. 1 (19), pp. 70-80.
6. *Quispe D., Sulla-Torres J.* Automatic Building Change Detection on Aerial Images using Convolutional Neural Networks and Handcrafted Features, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2020, Vol. 11, No. 6, pp. 679-684.
7. *Huang X., Zhang L.* Morphological building/shadow index for building extraction from high-resolution imagery over urban areas, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, No. 2, Vol. 5, pp. 161-172.
8. *Tang Y., Huang X., Zhang L.* Fault-tolerant building change detection from urban high-resolution remote sensing imagery, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, No. 09, Vol. 10, pp. 1060-1064.
9. *Huang X., Zhang L., Zhu T.* Building change detection from multitemporal high-resolution remotely sensed images based on a morphological building index, *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 2014, No. 01, Vol. 7, pp. 105-115.
10. *Wen D., Huang X., Zhang L., Benediktsson J.* A novel automatic change detection method for urban high-resolution remotely sensed imagery based on multiindex scene representation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, No. 1, Vol. 54, pp. 1-17.
11. *Dornaika F., Moujahid A., El Merabet Y., Ruichek Y.* Building detection from orthophotos using a machine learning approach: An empirical study on image segmentation and descriptors, *Expert Systems with Applications*, 2016, No. 3, pp. 58.
12. *Ji S., Wei S., Lu M.* Fully convolutional networks for multisource building extraction from an open aerial and satellite imagery data set, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, No. 8, pp. 1-13.
13. *Ronneberger O., Fischer P., Brox T.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, *MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9351. Springer, Cham.
14. ULTRACAM CONDOR MARK 1. Available at: https://www.vexcel-imaging.com/brochures/UC_Condor_M1_ru.pdf (accessed 14 February 2021).
15. *Grishina A.I., Ramazanov R.R., Glukhov A.V., Levchenko E.N.* Kombinirovanie metodov nazemnogo lazernogo skanirovaniya i aerofotos"emki s bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya povysheniya effektivnosti kontrolya promyshlennogo stroitel'stva [The Combining ground-based laser scanning and aerial photography from an unmanned aerial vehicle to improve the efficiency of industrial construction control], *Vektor GeoNauk* [Vector of Geosciences], 2020, No. 3, pp. 55-67. Doi: 10.24411/2619-0761-2020-10032.
16. RIEGL VQ-1560 II-S. Available at: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-1560II-S_Preliminary-Datasheet_2020-10-05_01.pdf (accessed 14 February 2021).
17. *Vega A., Lin C., Swaminathan K., Buyuktosunoglu A., Pankanti S., Bose P.* Resilient, UAV-embedded real-time computing, *2015 33rd IEEE International Conference on Computer Design (ICCD), New York, NY, 2015*, pp. 736-739. Doi: 10.1109/ICCD.2015.7357189.
18. *Barnell M., Raymond C., Capraro C., Isereau D., Cicotta C., Stokes N.* High-Performance Computing and Machine Learning Demonstrated in Flight Using Agile Condor®, *2018 IEEE High Performance extreme Computing Conference», Waltham, MA, 25 - 27 September 2018, USA. 2018*, pp. 1-4. Doi: 10.1109/HPEC.2018.8547797.

19. Fedulin A.M., Gorbatshevich V.S., Osadchuk A.V. Kontseptual'nyy podkhod k sozdaniyu nazemnoy infrastruktury mashinnogo obucheniya sistem tekhnicheskogo zreniya dlya bespilotnoy aviatsii [General Approach to the Trusted Machine Learning of the UAV Computer-Vision Systems], *Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal «POLET»* [Journal «POLIOT»], 2020, No. 11, pp. 32-38.
20. Adamov A.A., Pavlukhin P.V., Bikonov D.V., Eysymont A.L., Eysymont L.K. Al'ternativnye sovremennym GPGPU perspektivnye universal'nye i spetsializirovannye protsessory-uskoriteli [Modern GPGPU alternative perspective universal and specialized processors-accelerators], *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity issues], 2019, No. 4, pp. 13-21.
21. Osipenko P.N., Uvkin I.V. Blok tenzornykh vychisleniy dlya uskoreniya rascheta iskusstvennykh neyronnykh setey [Tensor computing block for speeding up the calculation of artificial neural networks], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S4 (99), pp. 261-262. Doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.261.262.

Статью рекомендовал к опубликованию доцент Д.А. Антонов.

Федулин Андрей Михайлович – АО «КТ – Беспилотные Системы»; e-mail: af@kronshtadt.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88124499090; директор центра разработки ПО.

Дрягин Дмитрий Михайлович – e-mail: dd@kronshtadt.ru; к.т.н.; генеральный директор.

Fedulin Andrei Mikhaylovich – JSC «КТ – UAV Systems»; e-mail: af@kronshtadt.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78124499090; software director.

Driagin Dmitrii Mikhaylovich – e-mail: dd@kronshtadt.ru; cand. of eng. sc.; chief executive officer.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылку на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.