

**Poluyanovich Nikolay Konstantinovich** – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79508609983; the Department of Electric Technics and Mechatronics; cand. of emg. sc.; associate professor.

**Kachelaev Oleg Vadimovich** – e-mail: 22.olezhka@mail.ru; phone: +79281163960; the Department of Techno-Sphere safety and Chemistry; postgraduate student.

**Dubyago Marina Nikolaevna** – e-mail: w\_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the Department of Electrical Engineering and Mechatronics. cand. of emg. sc.; associate professor.

**Malkov Stanislav Borisovich** – e-mail: sbmalkov@sfnedu.ru; phone: +79514917038; the Department of Electrical Engineering and Mechatronics; cand. of emg. sc.; associate professor.

УДК 531.383.11

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-219-230

**Т.В. Сазонова, М.С. Шелагурова**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ НАВИГАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

*Рассмотрены методы навигации БПЛА, основанные на данных дистанционного зондирования Земли: аэро- или космо- фотоснимках высокого разрешения, обработанных специальным образом. Для видеонавигации используются ортонормированные фотоснимки местности, для навигации по микрорельефу – фотоснимки, обработанные методом стереофотограмметрии. Методы видеонавигации основаны на выделении и сопоставлении характерных точек на текущем и опорном изображениях. В зависимости от наличия эталонных данных в виде фотоснимков видеонавигация подразделяется на одометрическую и по привязке изображений к местности. Одометрическая навигация не требует эталонных данных, что является её положительной чертой, однако в её принципы работы заложено нарастание ошибок определения навигационных параметров. Видеонавигация по привязке изображения обеспечивает более высокие точностные характеристики, но требует предварительной подготовки эталонных данных и использования бортовых вычислителей с большим объемом памяти. Разработанные методы видеонавигации проверены путем математического моделирования, результаты которого показали, что целесообразно комбинировать эти два метода. В этом случае ожидаемая точность навигации БПЛА с использованием предложенных методов сопоставима с точностью СНС. Реализация методов видеонавигации в бортовом вычислителе на базе одноплатного модуля NVIDIA Jetson TX2 показала их работоспособность в реальном масштабе времени. Методы навигации по микрорельефу основываются на поисковом оценивании координат БПЛА в пределах доверительного квадрата. Результаты математического моделирования навигации по микрорельефу показали, что метод работоспособен с высокой (3-8 м) точностью как при полете БПЛА над антропогенной местностью, так и при полете над естественным объектовым составом. Реализация навигации по микрорельефу в бортовом вычислителе, построенном на модуле Салют-Л 24ПМ2 РАЯЖ.441461.031, показала её работоспособность в реальном масштабе времени. Предложенные методы видеонавигации и навигации по микрорельефу были успешно апробированы на стенде полунатурного моделирования. В ближайшее время предполагаются их летные испытания. Для практической реализации разработанных методов высокоточной навигации необходимо решить вопрос с обеспечением потребителя эталонными данными, полученными на основе оперативной обработки актуальных космо- или аэро- фотоснимков местности высокого разрешения.*

*Видеонавигация; микрорельеф; дистанционное зондирование Земли; лазерный дальномер; детектор; детектор.*

**T.V. Sazonova, M.S. Shelagurova**

### **INVESTIGATION OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF NAVIGATION SYSTEMS USING REMOTE SENSING DATA**

*The article considers methods of the navigation for Unmanned Aerial Vehicles (UAV) based on the Earth remote probe data, i.e. high resolution aerial or space photographs which are specially processed. For video navigation, there are used orthonormal photographs of areal; for micros relief navigation, there are processed photographs by stereophotogrammetry method. The methods of video navigation are based*

*on the separation and comparison of characteristic points in the current and reference images. Depending on the available reference data as the photographs, the video navigation divides between the connections of terrain to the images and the odometry. The odometer navigation does need reference data which is its positive feature, but the principles of odometer navigation enclosure in an increase of errors along measurements of the navigation parameters. The video navigation with the connections of terrain to the images provides more accurate characteristics, but it requires a preliminary preparation of reference data and uses an on-board computer with a large memory capacity. The created methods of video navigation are examined by the mathematic modelling. The results demonstrated that it is advantageous to combine both methods. In this case, the expected accuracy of the UAV navigation using the introduced methods is comparable to accuracy of a satellite navigation system. The realization of video navigation methods in an on-board computer based on NVIDIA Jetson TX2 single-board module demonstrated its efficiency in real time. The methods of the navigation by micro relief are based on a search estimation of UAV coordinates within the limits of the confidential square. The results of mathematics modelling of the micro relief navigation demonstrated that this method is serviceable with a high accuracy (3 to 8 m) both in the UAV flights over a man-made environment and in the UAV flights over a natural objects composition. The realization of navigation by the micro relief in an on-board computer build with Salut-EL24PM2 RAYaZh.441461.031 module demonstrated its serviceability in real time. The introduced methods of video navigation and navigation by micro relief were successfully approved with a semi-natural modelling. In near time, the flight tests will be intended. For practical realization of the created methods for the high-precision navigation, it is required to resolve this question providing the user with referent data which should obtain the operative processing for actual space-and-aerial photographs with the high resolution against the area.*

*Video navigation; microrelief; remote sensing of the Earth; laser rangefinder; descriptor; detector.*

**Введение.** В настоящее время актуальной задачей является обеспечение высокоточной автономной навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях неработоспособности глобальных спутниковых навигационных систем (СНС). Для этого можно использовать данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) - результаты аэрофотосъемки или космофотосъемки, обработанные для использования в системах коррекции навигационных параметров БПЛА.

В данной статье рассматриваются два новых метода, основанных на использовании данных ДЗЗ:

- ◆ видеонавигация;
- ◆ навигация по микрорельефу.

Для решения задачи видеонавигации используются ортонормированные фотоснимки местности высокого разрешения (порядка 2 м) с плановой привязкой не хуже 1–2 м. Для решения задачи навигации по микрорельефу фотоснимки местности обрабатываются методом стереофотограмметрии [1], в результате чего формируется мелкоструктурное поле – микрорельеф, представляющий собой сумму рельефа и высот расположенного на нем объектового состава (ОС) искусственного и естественного происхождения. Точность карт микрорельефа – порядка 1–2 м в плане и по высоте, дискрет записи – 1–2 м.

Ниже будут рассмотрены вышеуказанные методы навигации, приведены результаты моделирования по оценке их точностных характеристик и возможности реализации в реальном масштабе времени в бортовых вычислителях.

**Методы видеонавигации.** В зависимости от наличия эталонных данных о местности методы видеонавигации можно разделить на две группы:

- ◆ одометрическая видеонавигация, в которой по характеру перемещения характерных точек (ХТ) изображения определяется изменение положения и ориентации самой камеры;
- ◆ видеонавигация по привязке изображения к эталонным данным о местности.

В основе предлагаемых методов видеонавигации лежит выделение информации о ХТ на опорном и текущем изображении, их сопоставление и определение сдвигов по положению и ориентации камеры [2]. Основным отличием является то, что в случае одометрической видеонавигации опорным изображением является ранее полученное изображение с камеры, а в случае видеонавигации по привязке изображения – синтезированное по эталонным данным изображение.

Основные этапы работы данных методов видеонавигации:

Этап 1 – только для метода видеонавигации по привязке изображения: синтез опорного изображения по эталонным данным;

Этап 2 – распознавание и сопоставление ХТ на опорном и текущем изображении;

Этап 3 – определение поправок к координатам и углам, при которых получен опорный кадр (в случае одометрической навигации поправки будут определять изменение положения БПЛА при пролете от опорного до текущего изображения).

**Этап 1.** Синтез опорного изображения проводится по фотоснимкам высокого разрешения (не хуже 2 м), матрице рельефа местности с дискретом не более 2" и данным о положении БПЛА и углах установки камеры.

Для реализации синтеза изображения на борту БПЛА в реальном масштабе времени фотоснимки и рельеф местности готовятся в специальном бортовом формате. Используется предложенная в [3] глобальная система записи координат. Выделяются 3 неполярные широтные зоны: от  $0^\circ$  до  $\pm 60^\circ$ , от  $\pm(60^\circ$  до  $76^\circ)$ , от  $\pm(76^\circ$  до  $84^\circ)$  и 2 полярные. Широтные зоны были выбраны по критерию уменьшения средней линии цилиндра проецирования примерно вдвое и отличаются дискретизацией записи информации по долготу. При этом для неполярных зон используется прямоугольная система координат «широта/долгота», а для полярных зон - полярная азимутальная эквидистантная проекция.

Бортовая база фотоснимков готовится в виде монохромных (серых) текстур с размером, кратным 2, и тем же размером текселя, что и исходный фотоснимок, порядка 2 м. После формирования бортовых фотоснимков в виде текстур к ним применяется метод сжатия S3TC, поддерживаемый графической библиотекой OpenGL, используемой при синтезе опорного изображения.

Примеры синтезированного опорного изображения приведены на рис. 1.

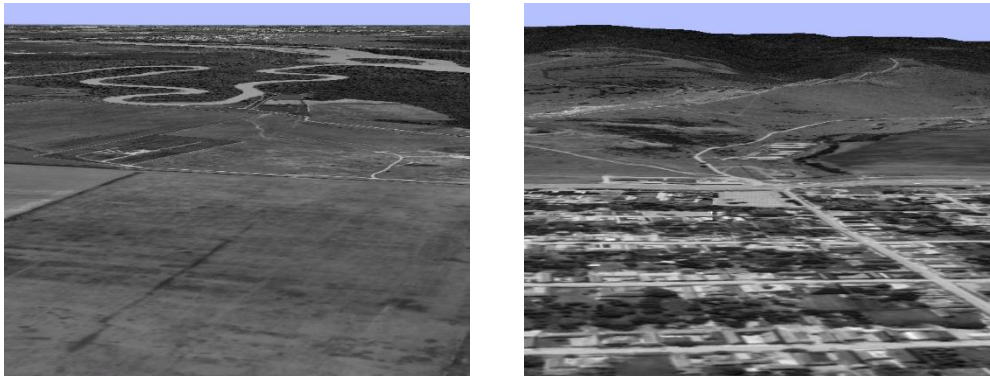


Рис. 1. Примеры синтезированного опорного изображения

**Этап 2.** К классическим методам распознавания ХТ на изображении можно отнести использование различных детекторов и дескрипторов. Детекторы выделяют на изображении особые точки, а дескрипторы формируют описательные элементы, инвариантные к изменению масштаба и поворота изображения. На сегодняшний день существует достаточно большое количество детекторов и дескрипторов, описанных в открытой библиотеке алгоритмов компьютерного зрения OpenCV.

Анализ технической литературы [4-10] показал, что наиболее эффективными детекторами являются: SURF, FAST, SIFT, KAZE, AKAZE и BRISK, а среди дескрипторов выделяются: SURF, BEBLID и BRIEF.

Математическое моделирование по выбору детекторов и дескрипторов проводилось с использованием зарегистрированных видеоизображений экспериментального образца многофункциональной системы технического и виртуального зрения (МСТВЗ), полученных в ходе летных исследований в районе аэродрома г. Воскресенска на самолете С-42. Характеристики телевизионной камеры, изображения с которой обрабатывались, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристики телевизионной камеры МСТВЗ**

Наименование параметра	Значение
Максимальное разрешение	2592x1944 при частоте 12 кадров/с
Максимальная частота кадров	25 кадров/с
Цвет	Цвет/ЧБ
Угол обзора	20°-40°

В ходе математического моделирования оценивались следующие характеристики по каждому исследуемому детектору и дескриптору:

- ◆ количество детектируемых точек на изображении;
- ◆ количество точек, совпавших на обоих изображениях;
- ◆ время выполнения операций, включая обнаружение особых точек, их описания через дескрипторы и сопоставление особых точек на паре изображений путем сравнения их дескрипторов.

В табл. 2 приведены результаты математического моделирования с наиболее приемлемым результатом выполнения операций по времени и количеству правильно опознанных точек (не менее 10).

Таблица 2

**Результаты исследования детекторов и дескрипторов**

Детектор	Дескриптор	Время распознавания на исходном изображении, сек	Время распознавания на изображении со сдвигом, сек	Время сопоставления, сек
SURF	SURF	0,100794	0,107354	0,001344
SURF	BEBLID	0,103892	0,095117	0,000288
SIFT	BEBLID	0,348751	0,345608	0,000660
KAZE	BEBLID	1,438133	1,455424	0,000164
AKAZE	BEBLID	0,262233	0,250903	0,000396
FAST	BEBLID	0,040212	0,036701	0,000369
BRISK	BEBLID	0,097899	0,099186	0,000699
FAST	BRIEF	0,095193	0,092076	0,000367

Анализ табл. 2 показал, что наиболее оптимальным является сочетание детектора FAST и дескриптора BEBLID.

На рис. 2 показан пример результата работы детектора FAST и дескриптора BEBLID по обнаружению и сопоставлению характерных точек на двух изображениях, полученных со сдвигом по времени на 0,5 сек.

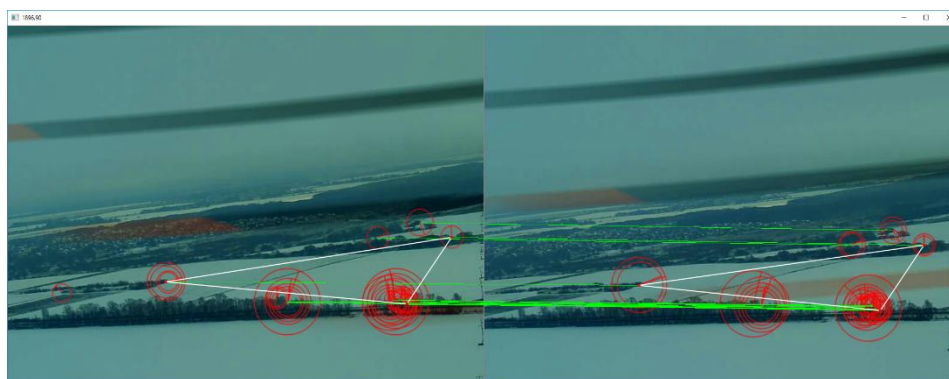


Рис. 2. Пример результата работы детектор FAST и дескриптора BEBLID

**Этап 3.** На третьем этапе для опорного изображения определяется матрица преобразований  $\mathbf{M}$  из мировой системы координат (СК) в видовую, использующая направляющие косинусы, вычисленные по данным об углах эволюции (крен, курс, тангаж) БПЛА и углах установки камеры.

Важно отметить, что для реализации дальнейших вычислений целесообразно даже для одометрической видеонавигации иметь на борту БПЛА матрицу рельефа местности. Если информация о рельефе отсутствует, то поверхность под БПЛА аппроксимируется плоскостью, высота которой определяется разницей между барометрической и геометрической высотами БПЛА.

По экраным координатам ХТ опорного изображения путем последовательных обратных преобразований с использованием вышеупомянутой матрицы  $\mathbf{M}$  определяется соответствующая трехмерная линия в мировой СК, ищется точка её пересечения с поверхностью рельефа местности и определяются трехмерные координаты ХТ в мировой СК. Если количество сопоставленных ХТ равно или больше 3-х, то зная их экраные координаты на текущем изображении, можно найти неизвестные параметры, входящие в матрицу  $\mathbf{M}$  для текущего изображения, а именно координаты, высоту и углы эволюции. Для этого решается система нелинейных уравнений с использованием методов Ньютона и Гаусса.

**Математическое моделирование** методов видеонавигации по оценке их точностных характеристик [11–16] показало, что метод по привязке изображений к эталонным данным о местности обеспечивает следующие точностные характеристики:

- ◆ порядка 5-12м ( $\sigma$ ) по широте и долготе,
- ◆ 4-7м ( $\sigma$ ) по высоте,
- ◆ 0,1-0,3°( $\sigma$ ) по крену и тангажу,
- ◆ 0,03-0,1°( $\sigma$ ) по курсу.

Оценка погрешностей одометрической видеонавигации показала, что со временем их значения существенно возрастают и могут достигать сотни метров при определении координат ЛА. Параметры кривой роста погрешностей одометрической видеонавигации зависят от скорости полета ЛА, качества сопоставления ХТ и наличия информации о рельефе местности.

**Бортовая реализация** методов видеонавигации проводилась на стенде полунатурного моделирования (ПНМ) с использованием одноплатного модуля NVIDIA Jetson TX2 (рис. 3), установленного на эталонной несущей плате Mini-ITX (170x170мм).



Рис. 3. Внешний вид модуля NVIDIA Jetson TX2, установленного на Mini-ITX

Основные технические характеристики модуля NVIDIA Jetson TX2:

- ◆ видеопроцессор GPU NVIDIA Pascal (256 ядер) тактовая частота 1300 МГц;
- ◆ центральный процессор ARM Cortex-A57 (четыре ядра) 2 ГГц + NVIDIA Denver2 (два ядра) 2 ГГц;
- ◆ оперативная память 8 Гбайт LPDDR4;
- ◆ интегрированный накопитель SSD eMMC 32 Гбайта;

- ◆ интерфейсы USB 3.0, 2.0, UART, SPI, I2C, I2S, GPIO, 2 x CAN, Ethernet;
- ◆ размер 50x87 мм, вес 85 г, мощность потребления 7,5 Вт.

С целью обеспечения функционирования программно-математического обеспечения (ПМО) видеонавигации по фотоснимкам местности, реализованного в модуле NVIDIA Jetson TX2, в его память (SSD) были загружены бортовая база данных фотоснимков местности объемом 5,28 Гб и карта рельефа объемом 10 Мб. ПМО видеонавигации разработано на языке C++ в виде программных модулей с использованием функций библиотек OpenGL и OpenCV.

Для обеспечения динамики движения БПЛА, показаний инерциальной навигационной системы (ИНС) и формирования изображений камеры использовался персональный компьютер, установленный на стенде ПНМ.

Для формирования изображения камеры в персональном компьютере использовались 10x10 фотоснимков местности размером 5x5 км района Кавказа (рис. 4) с разрешением от 1 до 2,5 м.



Рис. 4. Примеры фотоснимков района Кавказа размером 5x5 км

Технические характеристики имитируемой камеры приведены в табл. 4.

Таблица 4

#### Технические характеристики телевизионной камеры

ТХ	ТВ-камера 2
Оптический диапазон, мкм	0,38 – 0,75(цветное)
Поле зрения	20° × 15°
Размер кадра, пиксель	3200 × 2400
Отклонение оптической оси по тангажу	0°/ -15°
Частота выдачи изображения	1 Гц (не менее)

Изображение камеры поступало по интерфейсу Ethernet в модуль NVIDIA Jetson TX2. Каждое изображение сопровождалось информацией о навигационных параметрах (широта, долгота, высота и углы эволюции), полученных от ИНС.

При исследованиях задавался полет БПЛА на высоте над поверхностью около 500 м со скоростью 65 м/с. Выходом работы ПМО видеонавигации являлись поправки к навигационным параметрам ИНС, которые учитывались при формировании движения БПЛА.

На рис. 5 приведена иллюстрация выделения и сопоставления ХТ на синтезированном изображении (слева) и изображении от камеры (справа) с помощью ПМО видеонавигации, реализованном в модуле NVIDIA Jetson TX2 на стенде ПНМ.

Проведенные исследования бортовой реализации методов видеонавигации в модуле NVIDIA Jetson TX2 показали следующие результаты:

1. Время расчетов по формированию одного цикла поправок в ПМО видеонавигации меняется в диапазоне от 100 мс до 140 мс.

2. Точность метода по привязке изображений к местности соответствует результатам математического моделирования, однако формирование достоверных поправок производится достаточно редко.

3. Достоверные поправки к навигационным параметрам при одометрической видеонавигации формируются практически на каждом шаге, однако их погрешность растет со временем наблюдения и достигает сотни метров.

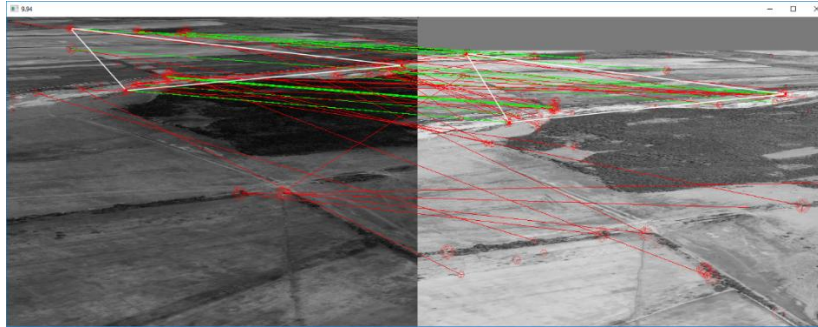


Рис. 5. Иллюстрация выделения и сопоставления ХТ на синтезированном изображении (слева) и изображении от камеры (справа)

Таким образом, можно сделать следующие выводы: во-первых, разработанное ПМО видеонавигации реализуемо в реальном масштабе времени на бортовых вычислителях, а, во-вторых, целесообразно использовать комплексирование методов одометрической видеонавигации и по привязке изображений к местности.

**Навигация по микрорельефу.**

В связи с развитием технологий получения с высоким разрешением данных о микрорельефе появилась возможность его использования для высокоточной коррекции координат БПЛА [18–20]. В качестве датчика микрорельефа используется лазерный дальномер, обеспечивающий высокоточное измерение геометрической высоты. Для формирования карт микрорельефа используются данные ДЗЗ.

Целью исследований являлась оценка точностных характеристик КЭНС по микрорельефу с искусственным и естественным ОС. Исследования проводились методом математического моделирования с использованием реальных картографических данных на участок городской застройки г. Коломна и участок с естественным ОС под г. Нижний Тагил (Н.Тагил).

Микрорельеф на участки г. Коломна размером 5100x5900 кв. м и под г. Н. Тагил размером 9650x10350 кв. м (рис. 6) был подготовлен на основе обработки космофотоснимков. Дискрет записи микрорельефа 1 м, погрешность картографирования: в плане 1-2 м, по высоте 2 м.

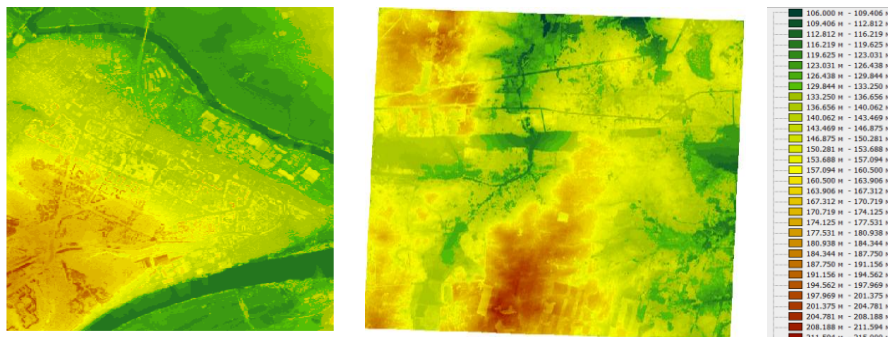


Рис. 6. Микрорельеф на участки г. Коломна (слева) и под г. Н. Тагил (справа)

Оценка информативности показала, что среднеквадратическое отклонение (СКО) микрорельефа на данных участках практически одинаково – порядка 6 м, а радиусы корреляции отличаются почти вдвое: 38 м г. Коломна и 65 м под Н. Тагилом.

**При математическом моделировании** в качестве датчика микрорельефа рассматривался лазерный дальномер LRF03C01S [17], измеряющий профиль подстилающей поверхности с погрешностью 1 м на высотах до 3000 м в простых метеусловиях (рис. 7).



Рис. 7. Внешний вид лазерного дальномера LRF03C01S

Имитировался тот же полет, что и при видеонавигации: на высоте 500 м со скоростью 65 м/с в условиях неработоспособности СНС. При этом среднеквадратические погрешности (СКП) определения параметров навигационной системы принимали следующие значения:

- ◆ СКП определения углов ориентации (курса, крена, тангажа) – 1°;
- ◆ СКП определения путевой скорости – 3 м/с;
- ◆ СКП определения координат (априорная погрешность) 100 м и 300 м.

В ходе моделирования оценивались следующие параметры:

- ◆ число проведенных коррекций;
- ◆ средняя длина зоны коррекции по микрорельефу;
- ◆ точность КЭНС по микрорельефу (круговая СКП).

Алгоритм КЭНС по микрорельефу базируется на поисковом функционале [3], рассчитывающем квадрат разности центрированных эталонного и текущего значений, при этом вводится «затухание» веса функционалов, рассчитанных на предыдущих шагах, что является весьма актуальным при нестационарном микрорельефе. В ходе работы алгоритма проводится селекция грубых ошибок датчика на основе знания минимального и максимального эталонного значений микрорельефа в пределах доверительного квадрата и ошибок лазерного дальномера.

В табл. 5 и 6 сведены результаты математического моделирования КЭНС по микрорельефу.

Таблица 5

**Результаты КЭНС по микрорельефу по участку Коломна**

Априорная погрешность, м	Дискрет $d_i$ , м	Число коррекций	Средняя длина коррекции, м	СКП коррекции круговая, м
100	2	228	331,43	2,15
	3	225	270,33	2,75
	4	225	252,81	3,14
	5	148	259,05	3,77
	6	115	269,56	4,21
	7	95	462,27	4,86
300	3	134	299,01	4,60
	4	115	273,66	4,21
	5	86	274,48	4,22
	6	50	276,91	4,26
	7	53	525,73	8,09



Таблица 6

## Результаты КЭНС по микрорельефу по участку под Н. Тагил

Априорная погрешность, м	Дискрет $di$ , м	Число коррекций	Средняя длина коррекции, м	СКП коррекции круговая, м
100	2	292	581,94	3,45
	3	328	431,70	3,87
	4	422	357,93	4,08
	5	418	313,00	4,79
	6	420	274,49	5,48
	7	306	466,03	5,60
300	3	294	451,67	4,26
	4	295	382,33	4,63
	5	275	340,70	5,52
	6	249	297,05	5,00
	7	188	483,12	6,65

Анализ приведенных в табл. 5 и 6 данных показывает, что точностные характеристики КЭНС при полете ЛА над городской застройкой и естественным ОС сопоставимы с точностью СНС в дифференциальном режиме.

**Бортовая реализация КЭНС** по микрорельефу исследовалась на стенде ПНМ с использованием модуля Салют-ЭЛ24ПМ2 РАЯЖ.441461.031 (см. рис.8), основные технические характеристики которого приведены ниже:

- ◆ тактовая частота процессора: до 816 МГц CPU, до 672 МГц DSP;
- ◆ ОЗУ: 2 x 1 Гбайт (DDR3L), 504 МГц;
- ◆ ПЗУ: 4 Гбайт (NAND Flash), 32 Гбайт (eMMC), 4 Мбайт (SPI Flash);
- ◆ интерфейсы: RS485, UART, Ethernet;
- ◆ масса 25 г, размеры 60,0×60,0×5,5 мм, мощность потребления 5 Вт.



Рис. 8. Внешний вид модуля Салют- Л24ПМ2

Оценка среднего времени расчета одного такта коррекции показала её работоспособность в реальном масштабе времени.

**Заключение.** Проведенные исследования показали, что ожидаемая точность определения навигационных параметров БПЛА с использованием методов ландшафтной навигации (видеонавигации и навигации по микрорельефу) сравнима с точностью спутниковой навигации. В ближайшее время планируются летные исследования методов ландшафтной навигации, в ходе которых будут получены реальные оценки их точностных характеристик. Предложенные в статье методы ландшафтной навигации реализуемы в бортовых вычислителях, однако они требуют подготовки эталонных данных на основе обработки фотоснимков местности высокого разрешения. В настоящее время уже разработаны методы получения эталонных данных для ландшафтной навигации на основе об-

работки космофотоснимков местности. Приведенные в данной статье результаты математического моделирования ландшафтной навигации базировались на эталонных данных, созданных именно такими методами. Основным требованием при создании эталонов ландшафтной навигации является использование актуальных космофотоснимков. Для практической реализации рассмотренных методов навигации БПЛА необходимо решить вопрос о создании и оперативном обновлении базы данных ортонормированных фотоснимков высокого разрешения и матриц микрорельефа. Доступ к базе данных должен осуществляться авторизованными потребителями удаленно, при этом должен быть реализован интерактивный интерфейс оператора по выбору картографируемых участков, типа эталонных данных и передаче информации потребителю.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козин Е.В., Карманов А.Г., Карманова Н.А. Фотограмметрия. – СПб.: Университет ИТМО, 2019.
2. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Исследование алгоритмов выделения и сопоставления особых точек на изображениях от датчиков технического зрения // Матер. XVI Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Т. 3. – Волгоград, 2023. – С. 61-64.
3. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Геоинформация в комплексах бортового оборудования летательных аппаратов: монография. – М., 2018.
4. Bay H. et al. Speeded-up robust features (SURF) // Computer vision and image understanding. – 2008. – Vol. 110, No. 3. – P. 346-359.
5. Компьютерное зрение OpenCV 4.5.1 // Open CV Сопоставление изображений SLAM BEBLID.
6. Rublee E. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // 2011 International conference on computer vision. – IEEE, 2011. – P. 2564-2571.
7. Alcantarilla P.F., Bartoli A., Davison A.J. KAZE features // European conference on computer vision. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. – P. 214-227.
8. Yang X., Cheng K.T. An ultra-fast feature for scalable augmented reality // IEEE, ACM Intl. Sym. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). – 2012. – P. 49-57.
9. Viswanathan D.G. Features from accelerated segment test (fast) // Proceedings of the 10th workshop on image analysis for multimedia interactive services, London, UK. 2009. – P. 6-8.
10. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints // 2011 International conference on computer vision. – IEEE, 2011. – P. 2548-2555.
11. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Исследование точностных характеристик алгоритмов видеонавигации по привязке изображений к местности // Сб. тезисов докладов V-ой Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». ФГУП «ГосНИИАС». Москва, 2023. – С. 339-341.
12. Леуцук О.Г., Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Результаты исследований реализации метода видеонавигации по фотоснимкам местности на бортовых вычислителях // Сб. тезисов докладов V-ой Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». ФГУП «ГосНИИАС», Москва, 2023. – С. 334-335.
13. Леуцук О.Г., Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Оценка точностных характеристик метода одометрической видеонавигации // Сб. тезисов докладов V-ой Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». ФГУП «ГосНИИАС», Москва, 2023. – С. 332-333.
14. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Сравнительные оценки точности видеонавигации по привязке изображений к местности и одометрической видеонавигации // Сб. тезисов докладов 22-й Международной конференции «Авиация и космонавтика». МАИ, Москва, 2023. – С. 168-169.
15. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Исследование методов видеонавигации для летательных аппаратов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 1. – С. 36-43.
16. Леуцук О.Г., Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Разработка и реализация методов видеонавигации для беспилотных летательных аппаратов // Сб. трудов научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Интеллектуальные системы наведения высокоточного оружия». Ч. 3. Геоинформационные платформы военного назначения. Технополис «Эра», Анапа, 2023. – С. 4-13.
17. Техническая спецификация лазерного дальномера LRF03C01S.
18. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С., Корнева Е.Г. Исследование режима экстремальной коррекции по полю рельефа методом математического моделирования с использованием результатов летных испытаний // Автоматизация. Современные технологии. – № 2021/05.

19. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Автономная высокоточная навигация летательных аппаратов по микрорельефу с искусственным и естественным объектовым составом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 2. – С. 25-29.
20. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Автономная высокоточная навигация летательных аппаратов по микрорельефу с искусственным и естественным объектовым составом // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика.. – 2024. – № 2. – С. 25-29.

## REFERENCES

1. Kozin E.V., Karmanov A.G., Karmanova N.A. Fotogrammetriya [Photogrammetry]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2019.
2. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Issledovanie algoritmov vydeleniya i sopostavleniya osobykh tochek na izobrazheniyakh ot datchikov tekhnicheskogo zreniya [Research of algorithms for identifying and comparing special points in images from technical vision sensors], *Mater. XVI Vserossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya* [Proceedings of the XVI All-Russian Multi-Conference on Control Problems]. Vol. 3. Volgograd, 2023, pp. 61-64.
3. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Geoinformatsiya v kompleksakh bortovogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov: monografiya [Geoinformation in on-board equipment systems of aircraft: monograph]. Moscow, 2018.
4. Bay H. et al. Speeded-up robust features (SURF), *Computer vision and image understanding*, 2008, Vol. 110, No. 3, pp. 346-359.
5. Komp'yuternoe zrenie OpenCV 4.5.1//Open CV Sopostavlenie izobrazheniy SLAM BEBLID [Computer Vision OpenCV 4.5.1//Open CV Image Matching SLAM BEBLID].
6. Rublee E. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, *2011 International conference on computer vision*. IEEE, 2011, pp. 2564-2571.
7. Alcantarilla P.F., Bartoli A., Davison A.J. KAZE features, *European conference on computer vision*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 214-227.
8. Yang X., Cheng K.T. An ultra-fast feature for scalable augmented reality, *IEEE, ACM Intl. Sym. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2012, pp. 49-57.
9. Viswanathan D.G. Features from accelerated segment test (fast), *Proceedings of the 10th workshop on image analysis for multimedia interactive services, London, UK, 2009*, pp. 6-8.
10. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints, *2011 International conference on computer vision*. IEEE, 2011, pp. 2548-2555.
11. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Issledovanie tochnostnykh kharakteristik algoritmov videonavigatsii po privyazke izobrazheniy k mestnosti [Study of the accuracy characteristics of video navigation algorithms for linking images to terrain], *Sb. tezisov dokladov V-oy Vserossiyskoy na-uchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem»*. FGUP «GosNIIAS». Moskva, 2023 [Collection of abstracts of reports of the V-th All-Russian Scientific and Technical Conference “Modeling of Aviation Systems”. FSUE “GosNIIAS”. Moscow, 2023], pp. 339-341.
12. Leshchuk O.G., Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Rezul'taty issledovaniy realizatsii metoda videonavigatsii po fotosnimkam mestnosti na bortovykh vychislitel'yakh [Results of research on the implementation of the method of video navigation using photographs of the area on on-board computers], *Sb. tezisov dokladov V-oy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem»*. FGUP «GosNIIAS», Moskva, 2023 [Collection of abstracts of reports of the V-th All-Russian scientific and technical conference “Modeling of aviation systems”. FSUE “GosNIIAS”, Moscow, 2023], pp. 334-335.
13. Leshchuk O.G., Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Otsenka tochnostnykh kharakteristik metoda odometricheskoy videonavigatsii [Assessment of the accuracy characteristics of the odometric video navigation method], *Sb. tezisov dokladov V-oy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem»*. FGUP «GosNIIAS», Moskva, 2023 [Collection of abstracts of the V-th All-Russian Scientific and Technical Conference “Modeling of Aviation Systems”. FSUE “GosNIIAS”, Moscow, 2023], pp. 332-333.
14. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Sravnitel'nye otsenki tochnosti videonavigatsii po privyazke izobrazheniy k mestnosti i odometricheskoy videonavigatsii [Comparative assessments of the accuracy of video navigation for georeferencing images and odometric video navigation], *Sb. tezisov dokladov 22-y Mezhdunarodnoy konferentsii «Aviatsiya i kosmonavtika»*. MAI, Moskva, 2023 [Collection of abstracts of the 22nd International Conference “Aviation and Cosmonautics”. MAI, Moscow, 2023], pp. 168-169.
15. Sazonova T.V., Shelagurova M.S. Issledovanie metodov videonavigatsii dlya letatel'nykh apparatov [Research of video navigation methods for aircraft], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2024, No. 1, pp. 36-43.

16. *Leshchuk O.G., Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Razrabotka i realizatsiya metodov videonavigatsii dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Development and implementation of video navigation methods for unmanned aerial vehicles], *Sb. trudov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu «Intellektual'nye sistemy navedeniya vysokotochnogo oruzhiya». Ch. 3. Geoinformatsionnye platformy voennogo naznacheniya. Tekhnopolis «Era», Anapa., 2023* [Collection of proceedings of the scientific and technical conference "State and prospects for the development of modern science in the direction of "Intelligent guidance systems for high-precision weapons". Part 3. Geoinformation platforms for military purposes. Technopolis "Era", Anapa., 2023], pp. 4-13.
17. Tekhnicheskaya spetsifikatsiya lazernogo dal'nomera LRF03C01S [Technical specification of laser rangefinder LRF03C01S].
18. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S., Korneva E.G.* Issledovanie rezhima ekstremal'noy korrektsii po polyu rel'efa metodom matematicheskogo modelirovaniya s ispol'zovaniem rezul'tatov letnykh ispytaniy [Study of the regime of extreme correction along the relief field by the method of mathematical modeling using the results of flight tests], *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], No. 2021/05.
19. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Avtonomnaya vysokotochnaya navigatsiya letatel'nykh apparatov po mikrorel'efu s iskusstvennym i estestvennym ob'ektovyim sostavom [Autonomous high-precision navigation of aircraft over microrelief with artificial and natural object composition], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and systems. Management, control, diagnostics], 2024, No. 2, pp. 25-29.
20. *Sazonova T.V., Shelagurova M.S.* Avtonomnaya vysokotochnaya navigatsiya letatel'nykh apparatov po mikrorel'efu s iskusstvennym i estestvennym ob'ektovyim sostavom [Autonomous high-precision navigation of aircraft over microrelief with artificial and natural object composition], *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika* [Instruments and systems. Control. Control. Diagnostics], 2024, No. 2, pp. 25-29.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

**Сазонова Татьяна Владимировна** – Акционерное общество «Раменское Приборостроительное конструкторское бюро (АО «РПКБ»); e-mail: tsazonova@rpkb.ru; г. Раменское, Россия; тел.: 89166834878; действительный член Академии Навигации и Управления Движением; д.т.н.; главный конструктор.

**Шелагурова Марина Сергеевна** – e-mail: marinashell@mail.ru; тел.: 89166143940; действительный член Академии Навигации и Управления Движением по секции молодых ученых; к.т.н.; начальник лабораторного сектора.

**Sazonova Tatyana Vladimirovna** – Joint Stock Company "Ramenskoye Design Company (JSC RDC)"; e-mail: tsazonova@rpkb.ru; Ramenskoye, Russia; phone: +79166834878; full member of the Academy of Navigation and Traffic Control; dr. of eng. sc.; chief designer.

**Shelagurova Marina Sergeevna** – e-mail: marinashell@mail.ru; phone: +79166143940; full member of the Academy of Navigation and Traffic Control of a section of young scientists; cand. of eng. sc.; head of the laboratory sector.

УДК 621.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-230-242

**В.В. Дядичев, С.Г. Менюк, Д.С. Менюк**

### **РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ОТ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ С ДВУХФАЗНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ ТЕРМОСИФОНОМ**

Цель данного исследования заключается в создании компьютерной модели, которая будет использоваться для улучшения системы пассивного отвода тепла от бассейна выдержки с двухфазным кольцевым термосифоном. Данная модель позволит провести анализ работы системы, определить набор квазиоптимальных решений для ее параметров и улучшить эффективность отвода тепла. Разработка такой модели может помочь улучшить процессы теплообмена и повысить эффективность работы системы в целом. **Метод.** Для решения поставленной задачи ис-