18. *Gorelov V.A., Komissarov A.I.* Mathematical Model of the Straight–line Rolling Tire–Rigid Terrain Irregularities Interaction, *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 150, pp. 1322-1328.
19. *Gipser M.* FTire–the tire simulation model for all applications related to vehicle dynamics, *Vehicle System Dynamics*, 2007, Vol. 45, No. S1, pp. 139-151.
20. *Besselink I.J. M. et al.* The SWIFT tyre model: overview and applications, 2004, pp. 525-530.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. Н.Н. Болотник.

Комиссаров Александр Игоревич – МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Москва, Россия; тел.: 89037403586; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

Бяков Константин Евгеньевич – e-mail: konst.byakov@yandex.ru; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

Холоденко Вячеслав Борисович – e-mail: komissarov@bmstu.ru; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; аспирант.

Корниенко Олег Александрович – Инжиниринговый центр «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Москва, Россия; директор.

Komissarov Aleksandr Igorevich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Moscow, Russia; phone: +79037403586; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

Byakov Konstantin Evgen'yevich – e-mail: konst.byakov@yandex.ru; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kholodenko Vyacheslav Borisovich – e-mail: komissarov@bmstu.ru; the department of multipurpose tracked vehicles and mobile robots; post-graduate student.

Kornienko Oleg Aleksandrovich – Science Engineering Centre Robotics Automatic, Bauman Moscow State Technical University; e-mail: komissarov@bmstu.ru; Moscow, Russia; director.

УДК 519.872 DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-49-60

Д.А. Мищенко, А.А. Львов, Светлов М.С., А.А. Никифоров, А.Р.Д. Алалван

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Предложена полумарковская модель телекоммуникационной сети. Рассмотрен вариант динамического управления трафиком системы массового обслуживания как частного случая телекоммуникационной сети. Основная цель управления – минимизация средних затрат в единицу времени на обслуживание входящего потока информации (пакетов). При этом учтены различная пропускная способность каналов, скорость обработки информации в канале и информационная емкость буферов. Предложен подход к организации динамического управления с учетом помехоустойчивости (информационной надежности) и помехозащищенности (защиты информации). Рассмотрена задача динамического управления телекоммуникационной сетью на примере простой одноканальной структуры типа «точка-точка», которая моделируется как линейная однонаправленная Марковская цепь. Были введены параметры тарифа обслуживания, стоимости штрафа за отказ от обслуживания. Анализ позволяет сделать следующие замечания, что распределение входного информационного потока пакетов – пуассоновское, закон распределения длины пакетов и скорости их поступления имеет экспоненциальный характер, что в совокупности характеризует Марковский процесс. Однако одновременно имеют место задержки в обслуживании по отношению к моментам времени поступления запросов на обслуживание, включая задержки, связанные с переполнением буфера. Предложенная полумарковская модель телекоммуникационной сети может быть использована и для более сложных сетевых *структур. В частности, для телекоммуникационных сетей, состоящих не только из одной одноканальной системы передачи информации (одноканальной системы массового обслуживания), а представляющих собой совокупность нескольких систем, то есть для многоканальных телекоммуникационных сетей.*

Телекоммуникационная сеть; динамическое управление; системы массового обслуживания; пропускная способность; помехоустойчивость.

D.A. Mishchenko, A.A. L'vov, M.S. Svetlov, A.A. Nikiforov, A.R.J. Alalvan

SEMI-MARKOV MODEL OF TELECOMMUNICATION NETWORK WITH DYNAMIC CONTROL

The paper proposes a semi-Markov model of telecommunication network. The variant of dynamic traffic control of queuing system as a special case of telecommunication network is considered. The main purpose of control is to minimize the average cost per unit of time to service the incoming flow of information (packets). This takes into account the different bandwidth of the channels, the processing speed of information in the channel and the information capacity of the buffers. The approach to the organization of dynamic control taking into account noise immunity (information reliability) and information security is discussed. The problem of dynamic control of a telecommunication network is considered on the example of a simple single-channel structure of the "point-to-point" type, which is modeled as a linear unidirectional Markov chain. The parameters of the service tariff, the cost of the fine for refusal of service were introduced. The analysis allows us to make the following remarks that the distribution of the input information flow of packets is Poisson, the law of distribution of the length of packets and the speed of their arrival is exponential, which together characterizes the Markov process. However, there are concurrent service delays relative to the timing of service requests, including buffer overflow delays. The proposed semi-Markov model of a telecommunications network can be used for more complex network structures. In particular, for a telecommunication network, consisting not only of one single-channel information transmission system (single-channel queuing system), but representing a set of several systems, that is, for multichannel telecommunication networks.

Telecommunications network; dynamic control; queuing system; bandwidth; noise immunity.

Введение. Современные телекоммуникационные сети (ТКС) представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы распределенных систем передачи информации с разветвленными каналами связи различного типа, осуществляющие обслуживание терминалов по управлению сетевым трафиком с целью обеспечения надежного и качественного их функционирования [1–3]. С одной стороны, ТКС можно рассматривать как распределенные системы передачи данных различного функционального назначения (управления, контроля, измерения, сигнализации), с другой стороны, их можно интерпретировать как системы массового обслуживания (СМО), обеспечивающие выполнение некоторых определенных функций по запросам (заявкам) клиентов (пользователей) как внешних, так и внутренних структур систем [4–6]. Одной из основных задач при разработке и синтезе ТКС является задача обеспечения их качественного функционирования на базе специальных алгоритмов управления. Другими словами, необходимо решение задач оптимального управления трафиком ТКС, что гарантировало бы реализацию наилучших режимов выполнения ими своих целевых функций.

Отличительной особенностью преобладающего большинства современных ТКС является необходимость качественного функционирования не только при изменениях параметров и характеристик их внутренней и внешней сфер (сред), но и в условиях неконтролируемых изменений случайного характера, что накладывает дополнительные и достаточно жесткие требования на управления трафиком и ТКС в целом. В этом смысле, речь идет о необходимости использования принципов динамического управления, то есть, в известной мере, адаптивного по отношению к изменению параметров и условий работы ТКС управления [7].

Задачи динамического управления весьма разнообразны и формулируются в зависимости от целей управления как задачи оптимизации тех или иных параметров сети. Целями управления могут быть максимизация объема, пропускной способности, скорости, достоверности передачи трафика, минимизация времени задержки на обслуживание, энергетических затрат при передаче трафика, информационных потерь и числа отказов в обслуживании и др. [8]. При этом в общем случае задача оптимального динамического управления не решена. Сдерживающим фактором в построении качественных ТКС является невозможность оптимизации одновременно всех основных параметров и характеристик сети, так как почти всегда выигрыш в управлении по каким-либо одним показателям реализуется за счет вынужденного снижения качества управления по каким-либо другим показателям. Еще одним фактором, определяющим сложность реализации оптимального динамического управления, является необходимость учета тех или иных ограничений на качество обслуживания, что характерно для большинства современных ТКС, в частности для СМО с очередями и отказами в обслуживании. В общем случае всегда процесс управления сетью, как и все другие процессы, связанные с обслуживанием запросов в сети, то есть, по сути, с функционированием сети в целом, требует осуществления некоторых затрат. Поэтому независимо от их физической природы задача оптимального управления может быть сформулирована как задача минимизации затрат [9].

1. Динамическое управление ТКС. Тарифы обслуживания. Рассмотрим задачу динамического управления ТКС на примере простой одноканальной структуры типа «точка-точка», которая моделируется как линейная однонаправленная Марковская цепь, то есть как модель СМО с очередью при конечном объеме входного буфера (буферной памяти, роутера, маршрутизатора и т.п.) или, другими словами, при конечной пропускной способности сетевого канала.

Цель динамического управления состоит в том, чтобы минимизировать средние затраты в единицу времени (условно – среднюю «мощность» затрат) теоретически при неограниченном времени функционирования сети, но при условии ограничения на качество обслуживания.

Пусть поток пакетов данных, поступающий в систему, соответствует Пуассоновскому закону распределения с коэффициентом $\lambda = 1$. При этом поступающий пакет принимается, если входной буфер не заполнен (в более общем случае — канал свободен), в противном случае прием не возможен. Будем для общности считать, что информационные пакеты во входном потоке имеют разные размеры, и пусть распределение длин пакетов соответствует экспоненциальному закону. Если при этом скорость формирования любого элемента пакета (условная номинальная элементарная скорость) одинакова для всех пакетов, то скорость передачи пакетов также будет распределена экспоненциально. Будем считать, что начало и конец пакетной очереди формируются с одинаковой скоростью, то есть при свободном канале скорость «движения» очереди постоянна ($\lambda = 1$).

В контексте постановки задачи управления при n информационных пакетах введем в рассмотрение тарифы обслуживания μ_n, которые могут быть выбраны из некоторого определенного набора (множества) $M = [0, \mu]$ доступных тарифов на услуги в ТКС. Также зададим на множестве тарифов M функцию $c(x)$ нормы затрат, связанных со скоростью обслуживания x. Тогда функция $c(\mu_n), (\mu_n \in M)$ определяет необходимые затраты для обеспечения ставки тарифа μ_n. Предполагается, что эта функция $c(x)$ нормы затрат, связанных со скоростью x обслуживания, – монотонно возрастающая, строго выпуклая и непрерывно дифференцируемая функция на множестве *M* с начальным условием $c(x=0)=c(0)=0$. При этом нет принципиальной необходимости определять конкретный вид функции $c(x)$. Вместе с тем часто она задается в конкретном виде, например, в виде [10]:

$$c(x)=e^{ax}-1, x\in A,$$

где a – положительная константа, а A – набор возможных значений скорости обслуживания x. Строго говоря, именно это функция затрат удовлетворяет предположениям о стоимости управления $c(\mu_n)$.

Если считать, что пропускная способность канала определяется размером буфера *N*, то необходимый алгоритм управления должен характеризоваться вектором $\mu=(\mu_1,\mu_2...\mu_n)$ со всеми компонентами, принадлежащими множеству *M*. Следовательно, если длина очереди равна *n*, то μ_n интерпретируется как необходимый тариф обслуживания, соответствующий выбранному алгоритму управления при имеющихся ограничениях на качество управления. В частности, таким ограничением может быть нижняя граница долгосрочной средней пропускной способности, которая эквивалентна заданию верхней границы вероятности переполнения буфера (вероятности полной занятости канала), что, в свою очередь, соответствует стационарной Марковской модели. Более точно, рассматривается ограниченный Марковский процесс принятия решений с непрерывным временным параметром, конечным компактным пространством и инвариантным во времени долгосрочным критерием средней стоимости. Отметим, что Марковский процесс в его классическом понимании как раз и характеризуется пуассоновским распределением входного потока пакетов и экспоненциальным (или показательным) распределением времени обслуживания и функции затрат.

Для определенности и простоты будем считать, что, когда система пуста, скорость обслуживания в системе равна нулю. Для адекватности модели принципиально необходимо, чтобы выполнялось условие $\mu_n>0,(n=1,...,N)$. Одновременно это условие упрощает алгоритмически управление с использованием вектора тарифов μ и позволяет ввести в рассмотрение стационарное распределение $\eta(\mu)$ изменения длины очереди в рамках управляющего вектора тарифов μ в виде:

$$\eta(\mu)=[\eta_0(\mu),\eta_1(\mu)...\eta_N(\mu)].$$

Учитывая, что параметр $\lambda=1$ в рассматриваемом пуассоновском распределении входного потока пакетов, распределение $\eta(\mu)$ удовлетворяет следующим уравнениям баланса [11]:

$$\eta_n(\mu)=\mu_{n+1}\eta_{n+1} \text{ для } n=0,1,...,N-1; \tag{1}$$

$$\textstyle\sum_{n=0}^{N}\eta_n(\mu)=1. \tag{2}$$

Используя (1) и (2), определим $\eta(\mu)$:

$$\eta(\mu)=\left[\textstyle\prod_{i=n+1}^{N}\mu_i\right]\eta_N(\mu), n=0,1,...,N-1. \tag{3}$$

Параметр $\eta_N(\mu)$ в (3) определится по формуле:

$$\eta_N(\mu)=(1+\mu_N+\mu_N\mu_{N-1}+\mu_N\mu_{N-1}\mu_{N-2}+...+\mu_N...\mu_1)^{-1}. \tag{4}$$

Как упоминалось ранее, в качестве ограничения вводится верхняя граница вероятности переполнения буфера (полностью занятого канала) $\beta(0<\beta<1)$. Поэтому для любого допустимого процесса управления с использованием вектора тарифов μ должно выполняться условие $\eta_N(\mu)\le\beta$.

Таким образом, класс допустимых управлений может быть задан следующим набором M_η:

$$M_\eta=\{\mu\in R^n:\mu_n\in M\setminus\{0\}\,\text{для}\;n=1,...,N,\eta_N(\mu)\le\beta\}. \quad (5)$$

Предполагая, что множество M_η – не пустое, долгосрочная средняя стоимостная ставка z_μ, связанная с управлением с использованием вектора тарифов μ, определится как:

$$z_\mu=\sum_{n=1}^{N}\eta_N(\mu)c(\mu_n). \quad (6)$$

Далее определим минимальное значение средней стоимостной ставки z^*:

$$z^*=inf\{z_\mu:\mu\in M_\eta\}. \quad (7)$$

При оптимальном управлении $z^*=z_\mu$, что соответствует условию минимизации средней долгосрочной стоимостной ставки управления z_μ. Это условие и определяет цель управления по критерию минимума средней долгосрочной стоимостной ставки управления.

Очевидно, что при полностью загруженном буфере, то есть при занятом канале системы (состояние перегруженности), новая информация (поток пакетов) не поступает в систему, что, по сути, равносильно потере информации. Поэтому логично рассматривать проблему перегруженности не с точки зрения алгоритмов управления через компоненты достижения цели в условиях ограничения, а с точки зрения затрат при достижении цели управления. Другими словами, потеря информации как итог перегрузки системы может рассматриваться и оцениваться в виде штрафов за отказ от обслуживания.

2. Параметр стоимости штрафа. В частности, можно ввести в рассмотрение некоторую фиксированную стоимостную ставку штрафа $p>0$ за отказ от обслуживания. Как показывает анализ функционирования системы при очередях с отказами, можно не учитывать скорости возникновения отказов (скорости потери информационных пакетов). Для определенности будем считать, что выполняется условие $p>c'(0)$.

Тогда, как уже указывалось выше, для возможного набора *M* доступных тарифов на услуги и установленной стоимостной ставки затрат $c(x)$ проблема управления состоит в динамическом выборе тарифа на обслуживание как функции текущей длины очереди на обслуживание с целью минимизации долгосрочных средних затрат на единицу времени.

При формулировании этой проблемы допустимым остается управляющий алгоритм, характеризующийся использованием вектора тарифов $\mu=(\mu_1,\mu_2...\mu_N)$ со всеми компонентами, принадлежащими множеству тарифов *M*. При этом $\mu_n>0$ ($n=1,...,N$). Таким образом, класс допустимых стратегий M_η определится в соответствии с выражением (5):

$$M_\eta = \{\mu \in R^n : \mu_n \in M \setminus \{0\} \text{для } n = 1,\ldots,N, \eta_N(\mu) \le \beta\}. \quad (8)$$

Учитывая формулы (3) и (4) распределения входного потока пакетов, долгосрочная средняя стоимость γ_μ, связанная с управлением с использованием вектора тарифов μ, может быть записана в виде:

$$\gamma_\mu = \sum_{n-1}^{N} M_n(\mu) c(\mu_n) + M_N(\mu) p. \quad (9)$$

Если по аналогии с формулой (7) ввести в рассмотрение параметр γ^* как минимальную среднюю стоимость

$$\gamma^* = inf\{\gamma_\mu : \mu \in M_\eta\}, \quad (10)$$

то условием оптимальности будет равенство $\gamma^* = \gamma_\mu$, что соответствует условию минимизации долгосрочной средней стоимости γ_μ. Это условие и определяет цель управления по критерию минимума средней стоимости управления.

Анализ принимаемой к рассмотрению математической модели ТКС позволяет сделать следующие замечания. Распределение входного информационного потока пакетов – пуассоновское, а закон распределения длины пакетов и скорости их поступления имеет экспоненциальный характер, что в совокупности характеризует Марковский процесс, однако одновременно имеют место задержки в обслуживании по отношению к моментам времени поступления запросов на обслуживание, включая задержки, связанные с переполнением (перегруженностью) буфера. К тому же характер распределения процессов управления в общем случае не оговаривается и может быть любым. Это позволяет сделать вывод, что динамическое оптимальное управление в данном контексте должно рассматриваться как полумарковский процесс принятия решений со средним критерием стоимости [12–14].

Для такой модели можно ввести в рассмотрение функцию v относительной стоимости средних затрат на динамическое управление в виде вектора $v_n = (v_0, v_1, \ldots v_N)$ с целью обобщения понятия параметра γ:

$$v_1 = v_0 + \gamma; \quad (11)$$

$$v_n = \min_{x \in A} \left\{ \left[c(x) - \gamma + v_{n+1} + x v_{n-1} + (\bar{\mu} - x) v_n \right] / (1 + \bar{\mu}) \right\}, n = 1,\ldots,N-1; \quad (12)$$

$$v_n = \min_{x \in A} \left\{ \left[c(x) + p - \gamma + x v_{N-1} + (\bar{\mu} - x) v_n \right] / \bar{\mu}) \right\}. \quad (13)$$

Уравнения (11)–(13) определяют относительные затраты с точностью только до аддитивной константы, даже если параметр γ рассматривается как константа, известная по величине. Поэтому логично определить относительную величину стоимостного различия y_n:

$$y_n = v_n + v_{n-1} \text{ для } n = 1,\ldots,N. \quad (14)$$

Тогда можно переформулировать (11) и (12) следующим образом:

$$y_{n+1} = \max_{x \in A} \{x y_n - c(x)\} + \gamma, n = 1,\ldots,N-1, \quad (15)$$

$$p = \max_{x \in A} \{x y_N - c(x)\} + \gamma. \quad (16)$$

Если ввести в рассмотрение функцию $\varphi(y)$ как функцию, зависящую от относительной величины стоимостного различия и определяющую ее, в виде:

$$\varphi(y) = \sup_{x \in A} \{yx - c(x)\}, y > 0, \tag{17}$$

тогда выражения (11), (15) и (16) могут быть эквивалентно представлены следующим образом:

$$y_1 = \gamma, \tag{18}$$

$$y_{n+1} = \gamma + \varphi(y_n), n = 1,..., N-1, \tag{19}$$

$$p = \gamma + \varphi(y_N). \tag{20}$$

Приведенные уравнения (18)–(20) можно интерпретировать как уравнения оптимальности.

С учетом допущений о норме затрат $c(x)$ и наборе M доступных тарифов на услуги можно сделать вывод о том, что функция (17) конечна для всех $y \geq 0$, и существует некоторая функция $\psi(y_n)$, максимизирующая каждый из параметров $y \geq 0$.

Если считать, что γ и $(y_1,..., y_N)$ – это решения уравнений оптимальности (18)–(20), тогда, если $y_n \geq 0$ ($n = 1,..., N$), то справедливы алгоритмы управления, соответствующие условию $\mu_N = \psi(y_n)$. В свою очередь, это означает, что при $\mu_n > 0$ ($n = 1,..., N$) условием оптимальности будет равенство $\gamma_\mu = \gamma = \gamma^*$, что, как уже указывалось ранее, полностью соответствует условию управления при минимизации средних затрат на управление.

Вместе с тем необходимо выразить параметрическую зависимость решения уравнений оптимальности от ставки штрафа p.

Функция $\psi(y)$, максимизирующая значения параметров y, может быть записана в виде:

$$\psi(y) = \operatorname{argmax} \{yx - c(x)\}, y \geq 0, x \in A. \tag{21}$$

Анализируя поведение функции $\psi(y)$ при различных значениях параметра y, можно детализировать значения функции $\psi(y)$ следующим образом:

$$\psi(y) = \begin{cases} 0, \text{ если } 0 \leq y \leq c'(0); \\ (c')^{-1}(y), \text{ если } c'(0) < y < c'(\bar{\mu}); \\ \bar{\mu}, \text{ если } y \geq c'(\bar{\mu}). \end{cases} \tag{22}$$

Зависимость между функцией $\varphi(y)$, определяющей относительную величину стоимостного различия затрат на управление, и функцией $\psi(y)$, максимизирующей значения относительных разностных величин y, определяется формулой (15):

$$\varphi(y) = \int_0^y \psi(u) du, \ y \geq 0, \tag{23}$$

где $\psi(y)$ соответствует формуле (21) (или (22)) при значениях обобщенного параметра u, последовательно и поочередно равного компонентам вектора $(y_1...., y_N)$.

Анализ свойств функций φ и ψ – формулы (22) и (23) – с учетом их физического смысла и связи с параметрами алгоритма управления дает возможность сделать вывод, что при решении уравнений оптимальности для каждого параметра $\gamma > c'(0)$ определится соответствующее значение $y_n(\gamma)$ для $n = 1,..., N$ следующим образом:

$$y_1(\gamma) \equiv \gamma \ и \ y_{n+1}(\gamma); \ \gamma + \varphi(y_{n+1}(\gamma)), n = 1,...,N-1. \quad (24)$$

Следовательно, справедливо выражение:

$$f(\gamma) \equiv \gamma + \varphi(y_n(\gamma)), \gamma > c'(0), \quad (25)$$

где $f(\gamma)$ – функция связи со ставкой штрафа.

Другими словами, для каждого значения параметра штрафа $p > c'(0)$ можно однозначно выбрать значение параметра $\gamma > c'(0)$ так, чтобы выполнялось условие:

$$\gamma(p) \equiv p. \quad (26)$$

В заключение рассмотрим минимизацию средних затрат с учетом введенного ограничения по перегрузке буфера [16].

3. Минимизация средних затрат с учетом ограничения перегрузки буфера. Пусть $\beta(p)$ – долгосрочная средняя скорость отказов в поступлении пакетов при оптимальном алгоритме с использованием вектора тарифов μ, которая может быть определена через распределение $\eta_N(\mu(p))$. Найдем ее параметрическую зависимость от штрафной ставки p.

Используя зависимости (3) и (4), можно получить выражение для долгосрочной средней скорости отказов в обслуживании как функции от величины штрафа в виде:

$$\beta(p) = \left[1 + \mu_N(p) + \mu_N(p)\mu_{N-1}(p) + ... + \mu_N(p)...\mu_1(p)\right]^{-1}, \quad (27)$$

где $\mu_N(p) = \psi[y_n(\gamma(p))]$ ($n = 1,..., N$).

Из выражения (27) следует, что для всех $n = 1,..., N$ справедливо равенство $\mu_n(p) = \overline{\mu}$. Тогда анализ выражений (22) и (27) позволяет утверждать, что существует такое значение величины штрафа p^*, при котором $\beta(p^*) = \beta$.

Имея в виду формулы (6) и (7), можно получить:

$$z_{\mu(p)} = z^* = \gamma^* - p^*\beta. \quad (28)$$

Таким образом, формула (28) позволяет определить величину штрафа в зависимости от долгосрочных средних стоимостных затрат на реализацию алгоритма управления с использованием вектора тарифов μ из множества M возможных тарифов.

4. Анализ результатов. В случае многоканальных ТКС необходимо учитывать разную пропускную способность каналов, различия в скорости обработки информации в каждом канале и в информационной емкости буферов. Одновременно следует учитывать, что полная потеря информации в таких многоканальных структурах возможна лишь в условиях полной занятости одновременно всех каналов. Это накладывает условия на определение величины штрафа при разных длительностях очередей в различных каналах. Также надо иметь в виду, что в многоканальных ТКС целесообразно режим очередей с отказами заменить на режим с ожиданием и условными отказами, что позволит применять более эффективные алгоритмы управления трафиком, что, в конечном счете, повысит качество обслуживания [17].

Отдельно следует сказать, что одним из определяющих показателей эффективности и качества ТКС является информационная надежность, то есть помехоустойчивость информационных каналов, позволяющая обеспечить требуемые характеристики по достоверности приема информации, передаваемой по каждому каналу. При этом, имея в виду распределенный характер структур ТКС, причем, как правило, с каналами, распределенными по большой территории, необходимо учитывать не только возможное различие типов физических каналов, но и разную статистику канальных помех [18–20]. Очевидно, можно обеспечить необходимый уровень достоверности приема, ориентируясь на наихудшие с точки зрения помеховой обстановки канальные условия. Например, можно считать, что все каналы работают в условиях действия помех большой интенсивности, когда $f_{\text{с.п.}} / f_{\text{к}} \geq 3$ ($f_{\text{с.п.}}$ и $f_{\text{к}}$ – частоты следования импульсов в потоке случайных импульсных помех и следования информационных кодовых посылок в канале, соответственно). Однако такой вариант оказывается самым не экономичным, так как требует сложных многокаскадных кодовых форматов и, следовательно, далеко не просто реализуемых аппаратно-программных средств кодирования и декодирования. Поэтому целесообразным является вариант использования адаптивных режимов функционирования сетевых каналов, учитывающих специфику статистики помех каналов.

Еще одним условием обеспечения высокого качества функционирования ТКС является необходимость обеспечения требуемого уровня помехозащищенности, что подразумевает учет требований по информационной безопасности, включая вопросы несанкционированного доступа и парирование действия специально организованных помех.

В свете сказанного, для синтеза эффективных алгоритмов оптимального динамического управления необходима разработка обобщенного критерия эффективности, который должен быть многопараметрическим и учитывающим основные показатели, характеризующие качество функционирования ТКС.

Такой комплексный критерий эффективности одновременно мог бы служить оценкой используемых моделей ТКС, что повысило бы качество и эффективность моделирования ТКС различных структур, типов и функциональных особенностей.

Заключение. В работе предложен вариант динамического управления ТКС на основе полумарковской модели СМО как частного случая ТКС. Работа характеризует круг актуальных перспективных проблем исследования и синтеза качественных ТКС и алгоритмов оптимального динамического управления, инвариантных к контролируемым и неконтролируемым изменениям условий функционирования ТКС.

Предложенная полумарковская модель ТКС может быть использована и для более сложных сетевых структур. В частности, для ТКС, состоящих не только из одной одноканальной системы передачи информации (одноканальной СМО), а представляющих собой совокупность нескольких систем, т.е. для многоканальных ТКС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.
2. *Нейман В.И.* Системы и сети передачи данных на ж.-д. транспорте. – М.: Маршрут, 2005. – 470 с.
3. *Алиев Т.И.* Сети ЭВМ и телекоммуникации: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 400 с.
4. *Гаранин М.В., Журавлев В.И., Кунегин С.В.* Системы и сети передачи информации: учеб. пособие. – М.: Радио и связь, 2001. – 336 с.
5. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с
6. *Саати Т.Л.* Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. – М.: Сов. радио, 1971. – 520 с.
7. *Лившиц Б.С.* Особенности характеристик качества обслуживания примитивного потока вызовов // В кн.: Теория телетрафика и информационные сети. – М.: Наука, 1977. – С. 67-80.

8. *Долгов В.И., Митрофанов Ю.И., Рогачко Е.С.* Метод анализа сетей массового обслуживания с динамическим управлением интенсивностями обслуживания // Известия Саратовского университета. Серия «Математика. Механика. Информатика». – 2009. – Т. 9. – Вып. 3. – С. 22-27.
9. *Эллдин А., Линд Г.* Основы теории телетрафика. – М.: Связь, 1972. – 199 с.
10. *Духовный И.М., Шимко М.Ф.* Оценка эффективности контроля состояний пучков каналов на сети с динамическим управлением // В кн.: Теория телетрафика и информационные сети. – М.: Наука, 1977. – С. 91-98.
11. *Karlin S., Taylor H.M.* A First Course in Stochastic Processes. – 2nd ed. – Academic Press, San Diego, CA, 1997. – 573 p.
12. *Кемени Дж.Дж., Снелл Дж.Л.* Конечные цепи Маркова. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
13. *Королюк В.С., Турбин А.Ф.* Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – Киев: Наук. думка, 1982. – 236 с.
14. *Карманов А.В.* Исследование управляемых конечных марковских цепей с неполной информацией (минимаксный подход). – М.: Физматлит, 2002. – 176 с.
15. *George J.M., Harrison J.M.* Dynamic control of a queue with adjustable service rate // Oper. Res. – 2001. – Issue 49. – No. 5. – P. 720-731.
16. *Rockafellar R.T.* Convex Analysis. – Princeton University Press, Princeton, NJ, 1997. – 472 p.
17. *Svetlov M.S., L'vov A.A., Mishchenko D.A., Vagarina N.S.* Mathematical Model of Information and Communication Networks // Proc. of the XIII Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov, Russia: IEEE, 2018. – DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542330.
18. *Mishchenko D.A., Svetlov M.S., L'vov A.A., Svetlov I.M., Vagarina N.S., Svetlova M.K.* Mathematical model of the control system for network with recovery // Тр. Междунар. симп. «Надежность и качество»: в 2 т. Т. 1. – Пенза: ПГУ, 2018. – С. 242-245.
19. *Алалван А.Р.Д., Львов П.А., Светлов М.С., Львов А.А., Мищенко Д.А., Никифоров А.А.* Проблемы обеспечения надежности беспроводных сетей датчиков // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. тр. X Всерос. науч. конф. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 273-280.
20. *Мищенко Д.А.* Методы моделирования надежности для сетей связи // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Сб. научных статей. – Саратов: Изд. центр «Наука», 2021. – С. 399-401.

REFERENCES

1. *Olifer V.G., Olifer N.A.* Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: uchebnik dlya vuzov [Computer networks. Principles, technologies, protocols: textbook for universities]. Saint Petersburg: Piter, 2010, 944 p.
2. Neyman V.I. Sistemy i seti peredachi dannyh na zh.-d. transporte [Systems and data transmission networks on railway transport]. Moscow: Marshrut, 2005, 470 p.
3. *Aliev T.I.* Seti EVM i telekommunikatsii: ucheb. posobie [Computer networks and telecommunications: a textbook]. Saint Petersburg: SPbGU ITMO, 2011, 400 p.
4. *Garanin M.V., Zhuravlev V.I., Kunegin S.V.* Sistemy i seti peredachi informatsii: ucheb. posobie [Information transmission systems and networks: textbook]. Moscow: Radio i svyaz', 2001, 336 p.
5. *Kleynrok L.* Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 432 p.
6. *Saati T.L.* Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya [Elements of the theory of queuing and its applications]. Moscow: Sov. radio, 1971, 520 p.
7. *Livshits B.S.* Osobennosti harakteristik kachestva obsluzhivaniya primitivnogo potoka vyzovov. V kn.: Teoriya teletrafika i informatsionnye seti [Features of the service quality characteristics of a primitive call flow. In the book: Theory of teletraphy and information networks]. Moscow: Nauka, 1977, pp. 67-80.
8. *Dolgov V.I., Mitrofanov Yu.I., Rogachko E.S.* Metod analiza setey massovogo obsluzhivaniya s dinamicheskim upravleniem intensivnostyami obsluzhivaniya [A method for analyzing queuing networks with dynamic management of service intensities], *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya "Matematika. Mekhanika. Informatika"* [News of Saratov University. The series "Mathematics. Mechanics. Informatics"], 2009, Vol. 9, Issue 3, pp. 22-27.

9. *Elldin A., Lind G.* Osnovy teorii teletrafika [Fundamentals of the theory of teletraphy]. Moscow: Svyaz', 1972, 199 p.
10. *Duhovnyy I.M., Shimko M.F.* Otsenka effektivnosti kontrolya sostoyaniy puchkov kanalov na seti s dinamicheskim upravleniem [Evaluation of the effectiveness of monitoring the states of channel bundles on a network with dynamic control], *V kn.: Teoriya teletrafika i informatsionnye seti* [In the book: The theory of teletraphy and information networks]. Moscow: Nauka, 1977, pp. 91-98.
11. *Karlin S., Taylor H.M.* A First Course in Stochastic Processes. 2nd ed. Academic Press, San Diego, CA, 1997, 573 p.
12. *Kemeni Dzh.Dzh., Snell Dzh.L.* Konechnye tsepi Markova [Finite Markov chains]. Moscow: Nauka, 1970, 272 p.
13. *Korolyuk V.S., Turbin A.F.* Protsessy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti system [Markov recovery processes in system reliability problems]. Kiev: Nauk. dumka, 1982, 236 p.
14. *Karmanov A.V.* Issledovanie upravlyaemyh konechnyh markovskih tsepey s nepolnoy informatsiey (minimaksnyy podhod) [Investigation of controlled finite Markov chains with incomplete information (minimax approach)]. Moscow: Fizmatlit, 2002. 176 p.
15. *George J.M., Harrison J.M.* Dynamic control of a queue with adjustable service rate, *Oper. Res.*, 2001, Issue 49, No. 5, pp. 720-731.
16. *Rockafellar R.T.* Convex Analysis. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1997, 472 p.
17. *Svetlov M.S., L'vov A.A., Mishchenko D.A., Vagarina N.S.* Mathematical Model of Information and Communication Networks, *Proc. of the XIII Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, Russia: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542330.
18. *Mishchenko D.A., Svetlov M.S., L'vov A.A., Svetlov I.M., Vagarina N.S., Svetlova M.K.* Mathematical model of the control system for network with recovery, *Tr. Mezhdunar. simp. «Nadezhnost' i kachestvo»* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]: in 2 vol. Vol. 1. Penza: PGU, 2018, pp. 242-245.
19. *Alalvan A.R.D., L'vov P.A., Svetlov M.S., L'vov A.A., Mishchenko D.A., Nikiforov A.A.* Problemy obespecheniya nadezhnosti besprovodnykh setey datchikov [Problems of ensuring the reliability of wireless sensor networks], Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. tr. X Vseros. nauch. konf. [System synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, pp. 273-280.
20. *Mishchenko D.A.* Metody modelirovaniya nadezhnosti dlya setey svyazi [Methods of reliability modeling for communication networks], *Problemy upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemakh: Sb. nauchnykh statey* [Management problems in socio-economic and technical systems: A collection of scientific articles]. Saratov: Izd. tsentr «Nauka», 2021, pp. 399-401.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Землянухин.

Мищенко Дмитрий Алексеевич – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; e-mail: mishchenkoda@sstu.ru; г. Саратов, Россия; тел. +79093353999; аспирант.

Львов Алексей Арленович – e-mail: alvova@mail.ru; тел.: +79172015675; кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций; д.т.н.; профессор.

Никифоров Александр Анатольевич – e-mail: ieei_director@mail.ru; тел.: +79172182375; к.т.н.; директор Института электронной техники и приборостроения.

Алалван Амин Раад Джихад – e-mail: ameenraad2@gmail.com; тел. +79915003091; аспирант.

Светлов Михаил Семенович – Институт проблем точной механики и управления РАН; e-mail: svetlovms@yandex.ru; г. Саратов, Россия; тел.: +79878263745; лаборатория системных проблем управления и автоматизации в машиностроении; д.т.н.; в.н.с.

Mishchenko Dmitriy Alekseevich – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: mishchenkoda@sstu.ru; Saratov, Russia; phone: +79093353999; postgraduate student.

L'vov Alexey Arlenovich – e-mail: alvova@mail.ru; phone: +79172015675; the department of radioelectronics and telecommunications; dr. of eng. sc.; professor.

Nikiforov Alexander Anatolievich – e-mail: ieei_director@mail.ru; phone: +79172182375; cand. of eng. sc.; Director of the Institute of Electronic Engineering and Instrumentation.

Alalvan Amin Raad Jihad – e-mail: ameenraad2@gmail.com.ru; phone: +79915003091; post-graduate student.

Svetlov Michael Semenovich – Institute of Precision Mechanics and Control of RAS; e-mail: svetlovms@yandex.ru; Saratov, Russia; phone: +79878263745; Laboratory of system problems of control and automation in mechanical engineering; dr. of eng. sc.; leading researcher.

УДК 004.7 DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-60-68

И.В. Родыгина, В.А. Новак

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ MESH-СЕТЬ НА ОСНОВЕ СПЕЦИФИКАЦИИ ZigBee

В настоящее время наиболее распространенной технологией беспроводного доступа, которая повсеместно применяется для передачи большого количества трафика различного вида, является стандарт беспроводных локальных сетей IEEE 802.11. Одним из самых перспективных направлений развития технологии стали MESH-сети. MESH-сети предоставляют наиболее интересные решения, интегрирующие различные технологии беспроводного доступа. Возможность организации с помощью MESH-топологии локальных (LAN) и городских (MAN) сетей, легко интегрируемых в глобальные сети (WAN), является положительным фактором для применения на судне. В морской практике все чаще используют системы, основанные на оцифровке и автоматизации, объединенные в сети. В данной статье рассматривается моделирование взаимодействия устройств в MESH-сети на основе спецификации ZigBee, принцип работы канального уровня, который используется в этой сети, а также вариант метода предотвращения повышенного потребления энергии, используемой сети. Одним из преимуществ сети ZigBee является способность отслеживания участников сети и самой топологии в режиме их частых подключений, отключений и переподключений. В этом случае необходимо произвести анализ скорости сети, надежности, пропускной способности. Для данной цели проведены оценка среднего времени ожидания на подключение узла, вероятность успешного подключения узла к сети, вероятность нахождения канала занятым при первом и втором зондировании несущей и тест пропускной способности рассматриваемой сети. Полученные результаты анализа свидетельствуют о работоспособности сети в различных ситуациях: как при обычных условиях, так и в сложной помеховой обстановке.

Беспроводная сеть; ZigBee; MESH-сеть; CSMA/CA.

I.V. Rodygina, V.A. Novak

SIMULATION OF WIRELESS MESH NETWORK BASED ON ZigBee SPECIFICATION

Currently, the most widespread wireless access technology, which is widely used to transmit a large amount of traffic of various types, is the IEEE 802.11 wireless LAN standard. MESH networks have become one of the most promising areas of technology development. MESH networks provide the most interesting solutions integrating various wireless access technologies. The possibility of organizing local (LAN) and metropolitan (MAN) networks using MESH topology, easily integrating into wide area networks (WAN), is a positive factor for use on a ship. In maritime practice, networks based on digitalization and automation are increasingly used. This article discusses modeling the interaction of devices in a MESH network based on the ZigBee specification, the principle of operation of the data link layer, which is used in this network, as well as a variant