

Научная статья

УДК 621.37

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-72-80



Модель самоорганизующейся сети радиосвязи, функционирующей в сложной сигнально-помеховой обстановке

✉ Валерий Алексеевич Липатников, lipatnikovanl@mail.ru

✉ Михаил Игоревич Петренко ✉, petrenko.m.i@mail.ru

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного,
Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

Аннотация: Сети радиосвязи, в том числе применяющие адаптацию, предназначены для обмена информацией между отдельными корреспондентами и строятся, как правило, посредством радиотрасс, функционирующих в сложных условиях сигнально-помеховой обстановки. Необходимо учитывать степень влияния значений адаптивных параметров на показатели, описывающие соответствия требований к связи, энергетическую составляющую радиолинии, а также объем ресурсов радиолинии, затрачиваемые на ведение и восстановление связи. Получение оценок границ характеристик обслуживания трафика первичных и вторичных пользователей в самоорганизующейся радиосети, функционирующей в сложной сигнально-помеховой обстановке, является актуальным. Целью исследования является повышение достоверности результатов моделирования за счет получения граничных значений пропускной способности при передаче информации в самоорганизующейся сети радиосвязи. Проведено моделирование процессов, протекающих в сети радиосвязи, определены: граничные параметры задержки и загрузки; параметры выходного потока в сложных условиях сигнально-помеховой обстановки. Представлены выводы о достоинствах метода сетевого исчисления, по результатам серии проведенных вычислений. Получены аналитические оценки качества предоставления услуг в системе радиосвязи с использованием теории сетевого исчисления. Разработанная математическая модель позволяет исследовать показатели задержки, загрузки в самоорганизующейся сети радиосвязи при информационном обмене трафика различного вида в условиях воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех. Результаты аналитических расчетов, полученных при применении метода сетевого исчисления, могут быть использованы при формировании управляющих воздействий, а также решении задач повышения устойчивости радиолиний.

Ключевые слова: сетевое исчисление, модель, самоорганизующаяся сеть, поток, программно-определяемое радио, помехозащищенность, система массового обслуживания

Ссылка для цитирования: Липатников В.А., Петренко М.И. Модель самоорганизующейся сети радиосвязи, функционирующей в сложной сигнально-помеховой обстановке // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 2. С. 72–80. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-72-80

Model of a Self-Organizing Radio Network, Operating in a Complex Signal and Interference Environment

✉ Valery Lipatnikov, lipatnikovanl@mail.ru

✉ Mikhail Petrenko ✉, petrenko.m.i@mail.ru

Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Abstract: Radio communication networks, including those that use adaptation, are designed for information exchange between individual correspondents and are usually built via radio routes, functioning ones in a complex signal and interference environment. It is necessary to take into account the degree of influence values adaptive parameters for indicators that describe accordance requirements communication requirements, the energy component of the radio link, as well as the amount of radio link resources spent on maintaining and restoring communication. Getting estimates of the boundaries of primary and secondary user traffic service characteristics in a self-organizing radio network, functioning in difficult signal-to-noise conditions it is relevant. The aim of the research is to increase the reliability of the simulation results by obtaining the boundary values of the throughput when transmitting information in a self-organizing radio communication network. Modeling of processes occurring in the radio communication network is carried out, and the following parameters are determined: boundary parameters of delay and loading; parameters of the output stream in a complex signal-interference environment. Conclusions about the advantages of the network calculus method based on the results of a series of calculations are presented. Analytical estimates of the quality of service provision in the radio communication system are obtained using the theory of network calculus. The developed mathematical model makes it possible to study the delay and load indicators in a self-organizing radio network during the information exchange of traffic of various types under the influence of intentional and unintentional interference. The results of analytical calculations obtained by applying the network calculus method can be used in the formation of control actions, as well as solving problems of increasing the stability of radio links.

Keywords: network calculus, model, self-organizing network, flow, software-defined radio, noise immunity, queuing system

For citation: Lipatnikov V., Petrenko M. Model of a Self-Organizing Radio Network, Operating in a Complex Signal and Interference Environment. *Proc. of Telecom. Universities*. 2023;9(2):72–80. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-72-80

Введение

Требования к своевременности и достоверности информационного обмена в радиолиниях (р/л), функционирующих в сложной сигнально-помеховой обстановке (ССПО), противоречия между требованиями к помехоустойчивости и пропускной способности (ПС) р/л способствуют поиску новых способов моделирования. Наиболее прогрессивным является способ организации р/л с применением элементов интеллектуализации, позволяющий разрешить/смягчить вышеуказанное противоречие [1]. Однако применение интеллектуальных способов обуславливает необходимость получения граничных оценок состояния масштабных р/л при низком уровне их наблюдаемости. Требуется разработать новые способы оценки, т. к. классический методический аппарат не позволяет обеспечить достаточную адекватность прогноза изменения характеристик масштабируемых р/л, функционирующих в ССПО. Известны методы повышения помехоустойчивости линий радиосвязи [2–4]: путем применения помехоустойчивого кодирования, увеличения базы сигнала и пространственной обработки сигналов. Известны способы повышения ПС линий радиосвязи [5]. Отметим, что в большинстве работ применяется методический аппарат, использующий классическую теорию массового обслуживания [6]. В работе [7] функционирование р/л рассматривается в условиях квазистационарности внешней среды. Кроме того, при разработке методик не учитываются свойства самоорганизации р/л. Одной из актуальных проблем, связанных

с устойчивым функционированием самоорганизующейся сети радиосвязи в ССПО, является выполнение требований по их помехозащищенности. Решение может быть получено на основе синтеза алгоритмов адаптивного управления параметрами р/л, функционирующих в ССПО [8].

Объект исследования – технология когнитивно-го радио, позволяющая работать вторичным пользователям на частотных ресурсах первичных пользователей. Предмет исследования – граничные оценки характеристик качества обслуживания трафика в когнитивной радиосети в ССПО.

Цель: Повышение достоверности результатов моделирования за счет получения граничных значений ПС при передаче информации в самоорганизующейся сети радиосвязи.

Постановка задачи: Разработать модель самоорганизующейся сети для исследования зависимости характеристик входящего потока и качества обслуживания в условиях помех. Исследовать граничные задержки р/л, функционирующей в ССПО.

Исходные данные: Имеется самоорганизующаяся сеть радиосвязи с заданными параметрами, которая состоит из средств радиосвязи с изменяемыми рабочими характеристиками. Организация радиодоступа носимых терминалов осуществляется при помощи базовых станций различного частотно-территориального плана с временным разделением каналов. Настройки позволяют обеспечить передачу информации между корреспондентами в ССПО (рисунок 1).

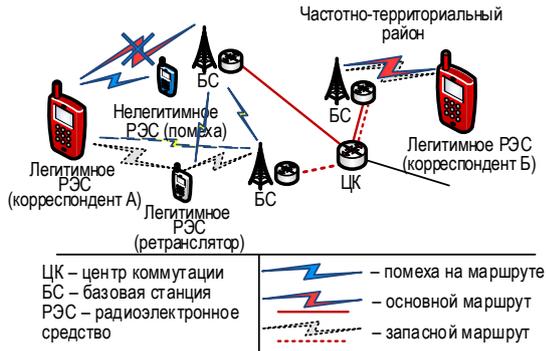


Рис. 1. Вариант построения самоорганизующейся сети радиосвязи

Fig. 1. Option for Building a Self-Organizing Radio Network

Введем следующие допущения относительно модели самоорганизующейся сети радиосвязи в ССПО:

- 1) известны: данные о характеристике радиointервала и режимах работы р/л, характеристики входного потока и дисциплины обслуживания FIFO (аббр. от англ. First-In First-Out, первый пришел – первый ушел), позиционирование места источников радиоизлучения;
- 2) имитация преднамеренных помех осуществляется на рабочей частоте РЭС (UE, аббр. от User Equipment), по одному сигналу (сигнально-кодовой конструкции);
- 3) работа алгоритмов управления р/л позволяет динамически изменять режимы работы РЭС;
- 4) р/л функционирует в соответствии с разработанными радиоданными.

С учетом сделанных допущений задача самоорганизации сводится к постоянному поддержанию требуемого качества канала в условиях ограниченного частотно-энергетического ресурса.

Решение задачи: Рассмотрено программно-определяемое РЭС как элемент р/л (рисунок 2).

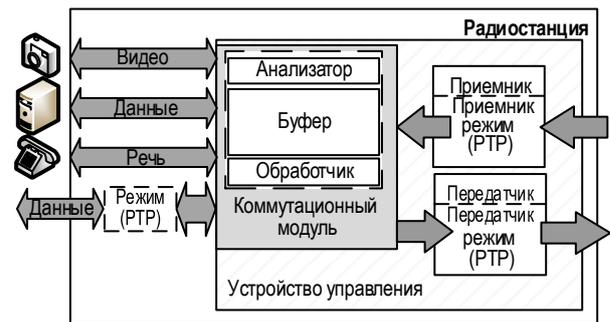


Рис. 2. Вариант функциональной схемы элемента радиосвязи

Fig. 2. Option Functional Diagram of a Radio Link Element

Для разработки и исследования модели р/л выбран метод сетевого исчисления (от англ. Network Calculus) [9]. Метод позволяет представить процессы, протекающие в функциональной схеме радиостанции (см. рисунок 2), в виде модели (рисунок 3), состоящей из элементов классической системы массового обслуживания (СМО) с обратной связью. Функция $\alpha(t)$, возрастающая в широком смысле, является кривой поступления для функции входящего потока $A(t)$ тогда и только тогда, когда для $\forall 0 \leq \tau \leq t$ справедливо неравенство: $A(t) - A(\tau) \geq \alpha(t - \tau)$. Имеется система обслуживания S и потоки трафика на входе и выходе этой системы $A(t)$ и $D(t)$, соответственно. Говорится, что система S реализует для потока $A(t)$ кривую обслуживания $\beta(t)$, если для любого момента времени $t \geq 0$ существует некоторое $t_0 \geq 0, t_0 \leq t$, такое, что $D(t) - A(t) \geq \beta(t - t_0)$.

Обслуживание заявок в СМО с обратной связью производится по закономерностям стохастических (случайных) процессов, и, как следствие, традиционная теория массового обслуживания [10] не дает возможности аналитически получить характеристики качества обслуживания заявок (QoS, аббр. от англ. Quality of Service).

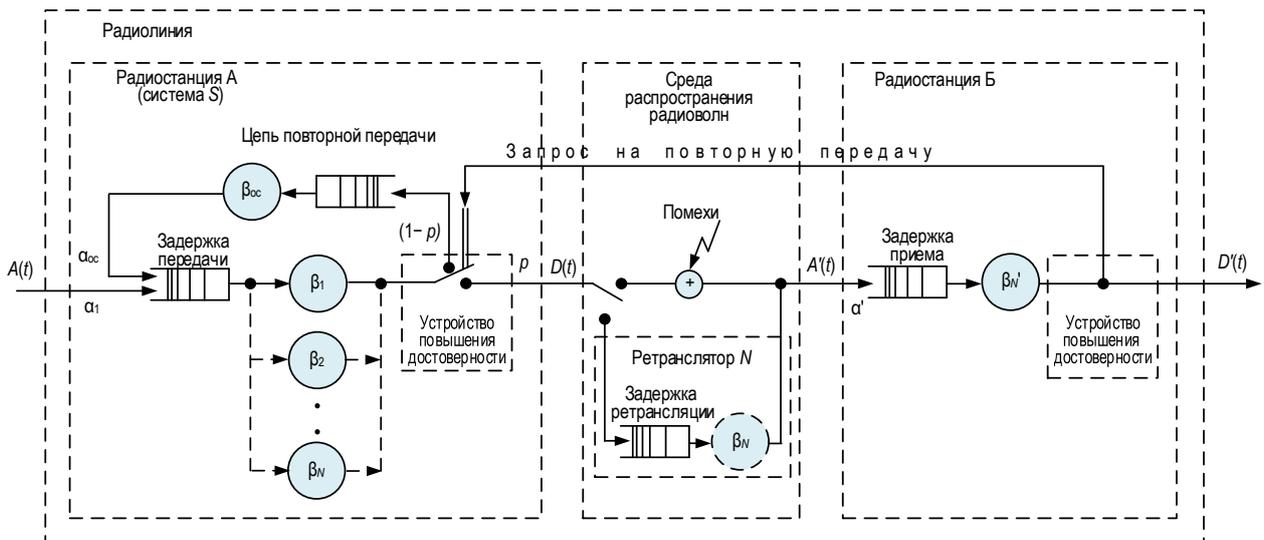


Рис. 3. Модель радиосвязи в ССПО

Fig. 3. Radio Link Model in a Complex Signal and Interference Environment

Предполагается, что применение нового метода позволит получить ряд аналитических оценок QoS сложного потока. Ранее в классических моделях СМО с агрегацией трафика, проведение аналитических расчетов не проводилось из-за проблем, обусловленных наличием сложного потока заявок на входе системы S .

Алгоритм функционирования имитационной модели

Рассмотрим модель р/л в терминах сетевого исчисления [11], представленную на рисунке 3. При

моделировании предполагается, что трафик передается в радиоэфир последовательно, по мере поступления в систему S с неограниченным буфером (без потерь). Поскольку потоки в телекоммуникационных сетях могут быть представлены в виде последовательности пакетов со сдвигом, то для их естественного описания лучше подходят дискретные модели. Моделирование проводится при значении параметров, удовлетворяющих достаточным условиям существования движения в системе [12]. Основные процессы, протекающие в модели приведены в виде отдельных блоков (рисунок 4).

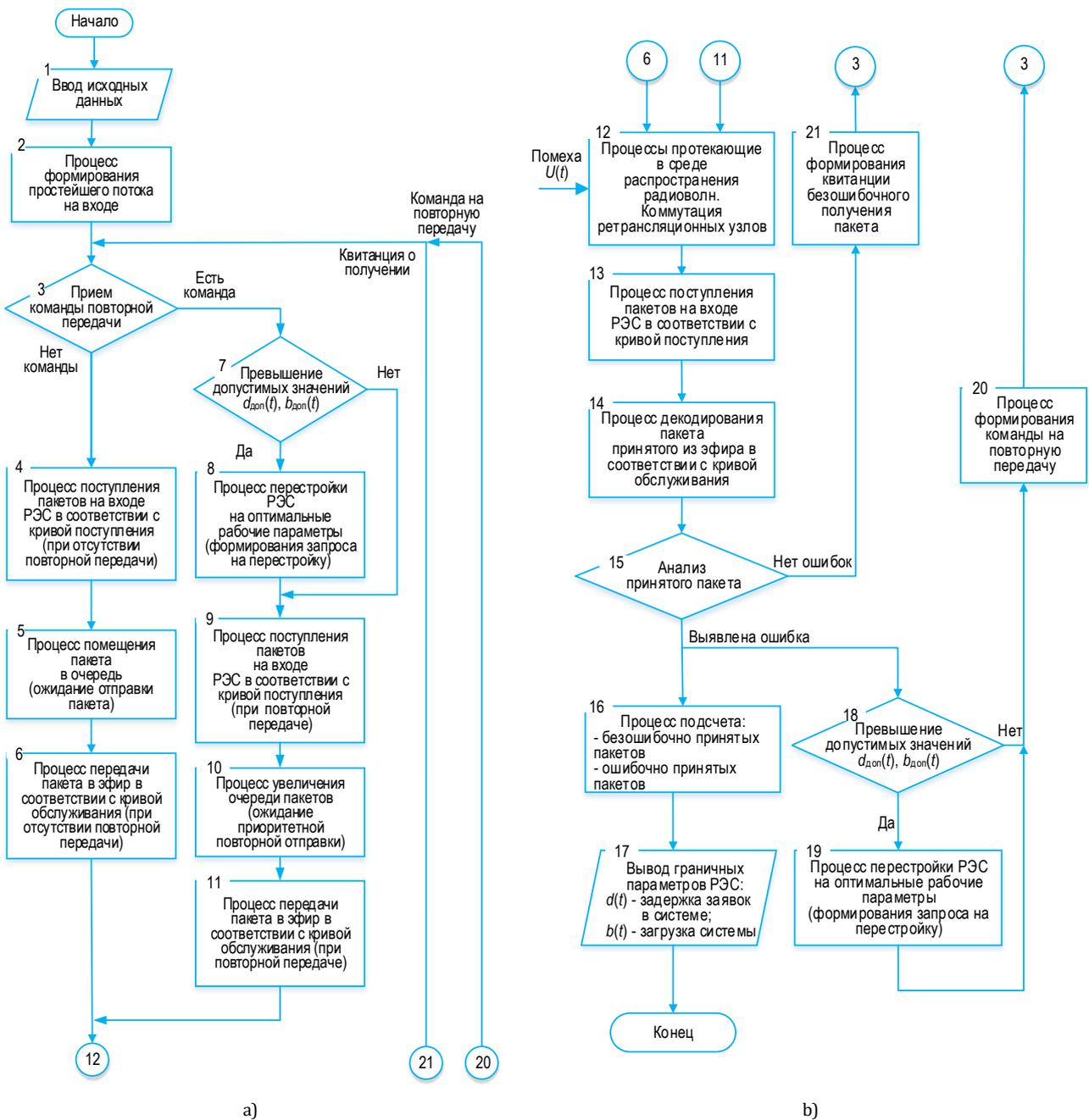


Рис. 4. Алгоритм функционирования модели: а) Радиостанция А; б) Радиостанция Б

Fig. 4. Operation Algorithm Models: a) Radio Station A; b) Radio Station B

1) Сначала задаются следующие входные параметры (блок 1): R – минимальная скорость обслуживания потока, бит/с; T – максимальная задержка потока; δ – предельная величина потока (берстность); ρ – устойчивая скорость потока; N – количество пакетов; $P_{ош}$ – вероятность ошибки.

2) Формируемый на входе системы простой поток заявок $\gamma_{\delta, \rho}$ (блок 2) соответствует кривой поступления (блок 4) при условии отсутствия запросов на повторную передачу пакетов:

$$\alpha(t) = \gamma_{\delta, \rho} = \begin{cases} \rho t + \delta, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$$

3) В модели предусмотрено устройство повышения достоверности передачи сообщений (блок 3), которое имеет возможность осуществлять повторную передачу пакета. В таком случае на входе будет формироваться сложный поток заявок:

$$\alpha(t) = \gamma_{\delta, \rho} \wedge \gamma_{\sigma_{OC}, \rho_{OC}} = \min\{\rho_N t + \sigma_N, \rho_{OC} t + \sigma_{OC}\}.$$

4) Очередной пакет помещается в бесконечный буфер, в соответствии с кривой поступления $\alpha(t)$. Процесс хранения пакета $\sum t_{задержки} = t_{дост} + t_{квит}$ (блок 5) продолжается до момента прихода на (блок 3) квитанции о безошибочном получении пакета, сформированной в блоке 21. Напротив, при приходе запроса на повторную передачу, устройство повышения достоверности (блоки 3, 15) осуществляет повторную передачу пакета, хранящегося в буфере, при этом процесс хранения продолжается до прихода следующей квитанции о правильном приеме от блока 21.

5) В соответствии с тактом работы модели осуществляется работа по передаче пакета в соответствии с кривой обслуживания:

– для случая безошибочной передачи (блок 6)

$$\beta(t) = \beta_{R, T} = \begin{cases} R(t - T), & t > T \\ 0, & t \leq T \end{cases}$$

– для других случаев (блок 11)

$$\beta_{oc}(t) = \{\beta_{R, T}\} \otimes \{\beta_{R_{OC}, T_{OC}}\}.$$

6) В условиях ухудшения сигнально-помеховой обстановки [13] возрастает $P_{ош}$, а следом – задержка $d(t)$ и загрузка $b(t)$ в системе S . Блоки 7, 18 позволяют оценить величину задержки и загрузки с допустимыми: $d(t) \leq d_{доп}(t)$ и $b(t) \leq b_{доп}(t)$, а также произвести перестройку рабочих параметров РЭС и сформировать запрос на перестройку рабочих параметров РЭС корреспондента (блоки 8, 19).

Отличительной особенностью современных и перспективных средств связи является возможность программной перестройки рабочих параметров: например, выбор рабочей сигнально-кодовой конструкции (с соответствующей скоростью) $\Delta\beta_N$, способной обеспечить обработку и передачу радиокорреспонденту входящего потока посылок $\alpha(t)$ (рисунок 5).

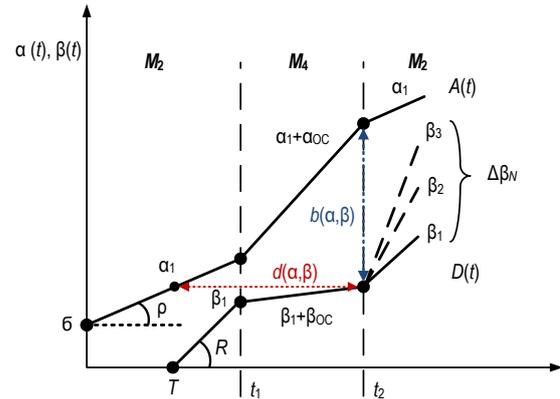


Рис. 5. Характеристики обслуживания потока при восстановлении связи M_4

Fig. 5. Characteristics of Thread Maintenance during Connection Recovery M_4

7) В процессе преодоления расстояния от одного корреспондента к другому в среде распространения радиоволн происходят процессы, оказывающие влияния на электромагнитный сигнал. В модели рассматривается процесс аддитивного влияния помехи $U(t)$ на информационный сигнал (блок 12). При формировании запроса на перестройку (блок 8) модель процесса функционирования р/л имеет возможность имитации работы ретрансляционных узлов (перестройки состава р/л).

8) Принятый сигнал поступает на бесконечный буфер приемного устройства со скоростью потока $\alpha'(t) = \gamma'_{\delta, \rho}(t)$ (блок 13) и хранится там до момента полного декодирования, которое осуществляется со скоростью $\beta'(t) = \beta'_{R, T}(t)$ (блок 14).

9) В случае выявления ошибок в блоке 15, происходит процесс формирования запроса на повторную передачу (блок 20). В свою очередь происходит работа устройства повышения достоверности (блоки 3, 15), благодаря которому передающая радиостанция осуществляет повторную передачу пакета, хранящегося в буфере.

10) Процесс повторной передачи характеризуется появлением на входе системы сложного, агрегированного трафика (блок 9), состоящего из пакета, хранящегося в буфере $\alpha_1(i)$, и очередного пакета $\alpha_1(t)$:

$$\alpha(t) = \gamma_{\delta, \rho} \wedge \gamma_{\sigma_{OC}, \rho_{OC}} = \min\{\rho_N t + \sigma_N, \rho_{OC} t + \sigma_{OC}\}.$$

Данная последовательность действий позволяет моделировать процессы восстановления связи M_3, M_4 . Стоит отметить, что пакет, хранящийся в очереди, имеет высший приоритет по отношению к пакетам, вновь поступающим в систему для передачи корреспонденту. Процесс хранения пакета $\sum t_{задержки} = \Delta t_{дост} + \Delta t_{пер} + t_{квит}$ (блок 10) продолжается до момента прихода на (блок 3) команды на повторную передачу пакета, сформированной в блоке 20.

11) Итерационный процесс передачи пакетов (блоки 6, 11) происходит, пока все N пакетов не будут приняты корреспондентом. Данная последовательность действий позволяет моделировать процессы восстановления связи M_1, M_2 . Блок 16 осуществляет функцию счетчика подсчета безошибочно принятых пакетов. Пользуясь свойствами идемпотентной алгебры [14], производится вывод результатов задержки заявок в системе $d(t)$, загрузки системы $b(t)$ (блок 17). В таблице 1 приведены формулы расчета задержки, загрузки для системы S при различных ситуациях.

В целях моделирования процессов восстановления связи M_3 или M_4 был выбран ситуационный подход в описании поведенческой модели нелегитимного РЭС, которое осуществляет свою работу

на лицензируемых частотах легитимных РЭС. Проведено имитационное моделирование функционирования р/л в ССПО [15], общие параметры которого представлены в таблице 2. Временная диаграмма – на рисунке 6.

В соответствии с алгоритмом функционирования модели р/л РЭС могут находиться в следующих устойчивых состояниях (рисунок 7):

- дежурный прием (M_0);
- входение в связь (M_1);
- ведение связи (M_2);
- восстановление связи без нарушения синхронизации (M_3);
- восстановление связи с нарушением синхронизации (M_4).

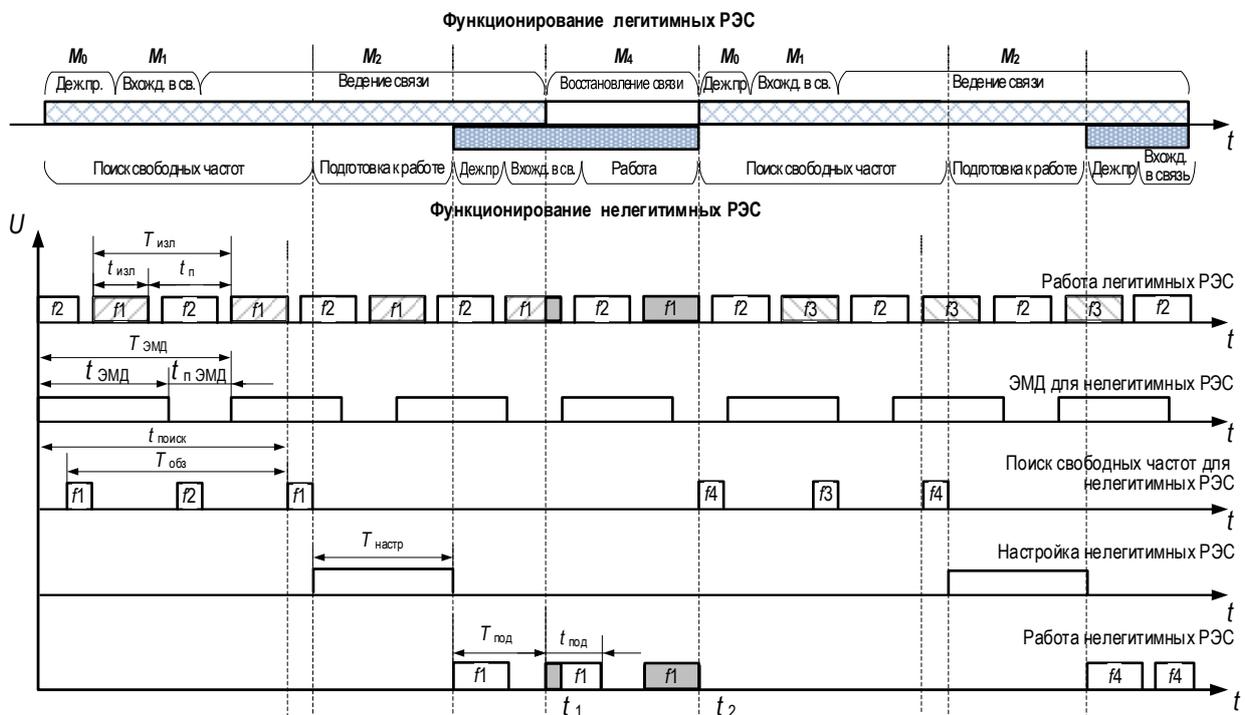


Рис. 6. Временная диаграмма функционирования РЭС

Fig. 6. Time Diagram of UE Operation

ТАБЛИЦА 1. Оцениваемые информационные показатели системы S

TABLE 1. Estimated Information Indicators of the System S

Показатели без обратной связи	Показатели с обратной связью
<i>Задержка в системе</i>	
$d(t) = \begin{cases} +\infty, & R < \rho \\ \frac{\sigma_N}{R_N + T_N}, & R \geq \rho \end{cases}$	$d(t) = \begin{cases} +\infty, & R < \rho \\ \sigma_N + \frac{\sigma_{OC} - \sigma_N (\rho_N - R)^+}{R_N \wedge R_{OC}} + (T_N, T_{OC}), & R \geq \rho \end{cases}$
<i>Загрузка системы</i>	
$b(t) = \begin{cases} +\infty, & R < \rho \\ \sigma_N + T_N \rho_N, & R \geq \rho \end{cases}$	$d(t) = \begin{cases} +\infty, & R < \rho \\ \sigma_N + \rho_{OC} \max\left(\frac{\sigma_{OC} - \sigma_N}{\rho_N - \rho_{OC}}, (T_N, T_{OC})\right), & R \geq \rho \end{cases}$

ТАБЛИЦА 2. Общие параметры функционирования радиолинии

TABLE 2. General Parameters of Radio Link Operation

Обозначение	Описание
$f_1, f_2 \dots f_N$	Лицензированные частоты для РЭС
$T_{изл}$	Период излучения легитимного РЭС
$t_{изл}$	Время излучения легитимного РЭС
$t_{п}$	Время перерыва между излучениями легитимного РЭС
$T_{ЭМД}$	Период электромагнитной доступности (ЭМД) легитимного РЭС
$t_{ЭМД}$	Время ЭМД работы легитимного РЭС
$t_{п ЭМД}$	Время перерыва в работе ЭМД легитимного РЭС
$T_{обз}$	Период обзора лицензионной частоты
$t_{поиск}$	Время поиска не занятой лицензионной частоты
$T_{настр}$	Время настройки не легитимного РЭС
$T_{под}$	Период подавления РЭС, работающего на лицензионной частоте
$t_{под}$	Время подавления РЭС, работающего на лицензионной частоте
M_0	Дежурный прием
M_1	Вхождение в связь
M_2	Ведение связи
M_3	Восстановление связи (без нарушения синхронизации)
M_4	Восстановление связи (с нарушением синхронизации)

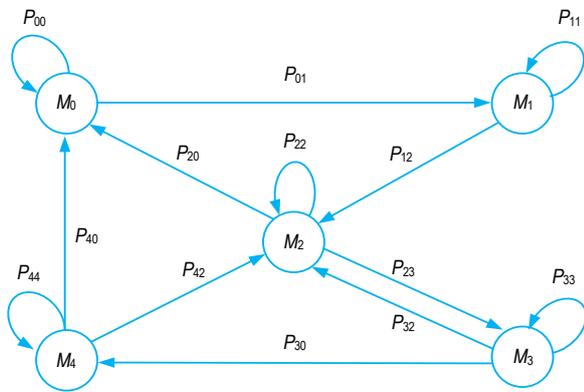


Рис. 7. Граф состояний радиолинии

Fig.7. Radio Link State Graph

Система переходит из одного состояния в другое с определенной вероятностью P , следовательно, можно воспользоваться аппаратом марковских случайных процессов, т. е. с помощью дифференциальных уравнений, в которых неизвестными являются P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 .

Контрольное решение

Пользуясь приведенными формулами, определим параметры выходного потока $\alpha'(t)$ и граничные параметры задержки $d(t)$, загрузки $b(t)$. Пусть на обслуживание поступает поток с постоянной

скоростью 6,4 Мбит/с, для его обслуживания выбран режим работы, позволяющий вести обмен со скоростью от 9,6 до 19,2 Мбит/с (в зависимости от вида модуляции) (рисунок 8).

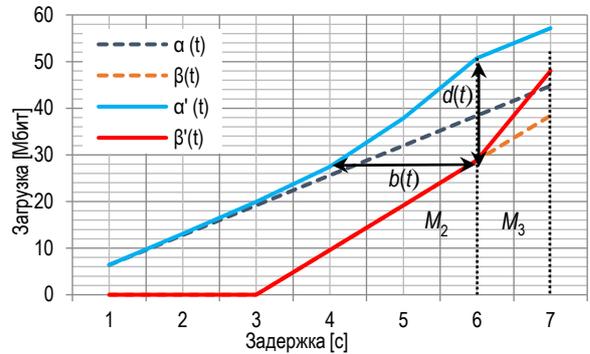


Рис. 8. Граничные характеристики загрузки буфера от задержки системы S

Fig. 8. Buffer Loading Boundary Characteristics as a Function of System Latency S

Для получения численных оценок рассматривается такт работы обслуживающего устройства, равным 1 секунде. Работа нелегитимного РЭС осуществляется за счет изменения величины $P_{ош}$ в пределах от 10^{-14} до 10^{-3} . В момент M_2 происходит включение нелегитимного РЭС (рисунок 6). При появлении помехи происходит изменение одного из исследуемых параметров $d_{max}(t) > d_{доп}(t)$ или $b_{max}(t) > b_{доп}(t)$, которое способствует нарушению устойчивой работы. Устройство управления фиксирует нарушение работы и приступает к реализации алгоритма поиска и настройки оптимальных рабочих параметров. На рисунке 8 представлены характеристики загрузки и обработки в системе S в моменты M_2, M_3 .

Момент M_2 характеризуется увеличением загрузки буфера из-за появления запросов на повторную передачу, а M_3 – сменой основного маршрута на запасной. Запасной маршрут включает в свой состав ретрансляционный пункт (рисунок 1), который поддерживает работу на оптимальной сигнально-кодовой конструкции со скоростью 19,2 Мбит/с. Данные характеристики работы запасного маршрута позволяют быстрее опустошить переполненный буфер системы S.

На рисунке 9 представлены результаты аналитического моделирования с использованием выражения $d(t)$ (таблица 1). В момент завершения восстановления M_3 система S имеет задержку $d(t)$ не более 8 % от $d_{max}(t)$. Из анализа результатов на рисунке 9а следует, что метод сетевого исчисления позволяет исследовать зависимость задержки в системы S при динамической смене рабочих параметров р/л, функционирующей в ССПО. Стоит отметить, что многие современные системы связи используют показатель задержки для оценки QoS.

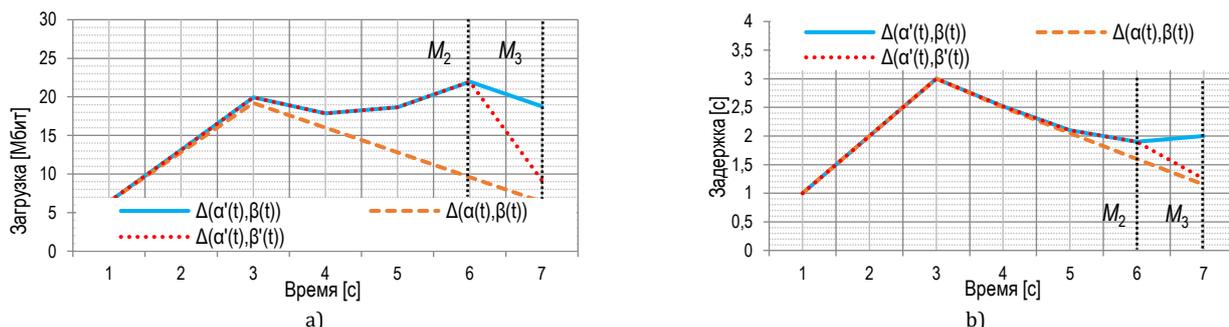


Рис. 9. Зависимость а) задержки и б) загрузки от времени моделирования радиолинии в ССПО

Fig. 9. The Delay (a) and Load (b) Dependence from the Simulation Time of Radio Line in a Complex Signal and Interference Environment

На рисунке 9б представлены результаты аналитического моделирования с использованием выражения $b(t)$ (таблица 1). В момент завершения восстановления M_3 система S имеет загрузку буфера $b(t)$ не более 18 % от $b_{max}(t)$. Из анализа результатов на рисунке 11 следует, что метод СИ позволяет исследовать зависимость загрузки буфера системы S при динамической смене рабочих параметров р/л, функционирующей в ССПО.

Новизна: Разработанная модель самоорганизующейся сети радиосвязи, функционирующая в ССПО, в отличие от известных, позволяет получить граничные значения информационной задержки и загрузки буфера при динамически изменяющихся па-

раметрах р/л. **Практическая значимость:** Разработанная математическая модель позволяет исследовать показатели задержки, загрузки в самоорганизующейся сети радиосвязи при информационном обмене трафика различного вида в условиях воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех.

Заключение: Исследование процессов при помощи модели самоорганизующейся сети радиосвязи позволяет определить зависимость ПС р/л в условиях воздействия преднамеренных и непреднамеренных помех, а также – смены помехозащищенных режимов работы для обеспечения требуемой ПС.

Список источников

1. Липатников В.А., Парфилов В.А., Петренко М.И. Общая модель самоорганизующейся радиосвязи с мультиплексированием потоков // Международная научно-практическая конференция «Транспорт России: Проблемы и перспективы – 2022» (09–10 ноября 2022 г.). СПб.: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2022. Т. 1. С. 293–297.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.
3. Рабин А.В. Помехоустойчивость систем цифровой связи с ортогональным кодированием и многопозиционной модуляцией. СПб.: ГУАП, 2019. 157 с.
4. Глушанков Е.И., Митянин С.А. Анализ совместной эффективности пространственно-временного кодирования и пространственной обработки сигналов в линиях радиосвязи // Заметки ученого. 2022. № 6. С. 187–192.
5. Дворников С.В., Манаенко С.С., Пшеничников А.В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 87–93.
6. Липатников В.А., Сахаров Д.В., Парфилов В.А., Петренко М.И. Имитационная модель распределенного объекта радиоконтроля, отражающая динамику перемещений и смену режимов работы радиоэлектронных средств // Юбилейная XVIII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2022)», Санкт-Петербург, Россия, 26–28 октября 2022 г. СПб.: Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2022. С. 556–558.
7. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Бурыкин Д.А. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью // Информация и космос. 2015. № 2. С. 4–7.
8. Сорокин К.Н. Модель системы управления параметрами линии радиосвязи на основе нечеткой логики // Информация и космос. 2018. № 4. С. 39–43.
9. Фёдоров И.В., Росляков А.В. Анализ характеристик когнитивной радиосети с использованием сетевого исчисления // XXI Международная научно-техническая конференция «III научный форум телекоммуникации: теория и технологии, ТТТ-2019», Казань, Россия, 18–22 ноября 2019 г. Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2019. Т. 1. С. 338–339.
10. Белов А.В., Липатников В.А., Фёдоров И.В. Модель когнитивной радиосети на основе теории стохастического сетевого исчисления // X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021)», Санкт-Петербург, Россия, 24–25 февраля 2021 г. СПб.: СПбГУТ, 2021. Т. 1. С. 86–90.
11. Росляков А.В., Лысыков А.В., Витевский В.Д. Сетевое исчисление (Network Calculus). Часть 1. Теоретические основы // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 1. С. 19–33. DOI:10.18469/ikt.2018.16.1.02
12. Кудрявцева Е.Н., Росляков А.В. Базовые принципы и перспективы использования теории сетевого исчисления (Network Calculus) // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т. 11. № 3. С. 34–39.

13. Алекаев А.Е., Белов А.В., Фёдоров И.В. Способ многоступенчатой адаптации низкоэнергетической радиолинии коротковолнового диапазона с учетом прогнозирования сигнально-помеховой обстановки // Международная научно-практическая конференция «Транспорт России: Проблемы и перспективы – 2021» (Санкт-Петербург, Россия, 09–10 ноября 2021 г.). Т. 2. СПб.: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2021. С. 157–161.
14. Кривулин Н.К. Методы идемпотентной алгебры в задачах моделирования и анализа сложных систем. СПб.: СПбГУТ, 2009. 256 с.
15. Пшеничников А.В. Оценка статистических параметров рабочих частот функциональных моделей радиолиний в конфликтной ситуации // Информация и космос. 2018. № 1. С. 46–50.

References

1. Lipatnikov V.A., Parfirov V.A., Petrenko M.I. General model of self-organizing radio communication with stream multiplexing. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Transport of Russia: Problems and Prospects – 2022, 09–10 November 2022, St. Petersburg, Russia, vol.1*. St. Petersburg: IPT RAN Publ.; 2022. p.293–297. (in Russ.)
2. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E. Noise Immunity of Radio Communication Systems with Signal Spectrum Expansion by Carrier Pseudorandom Sequence Modulation. Moscow: Radio and Communications Publ.; 2003. 640 p. (in Russ.)
3. Rabin A.V. Noise immunity of digital communication systems with orthogonal coding and multi-position modulation. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ.; 2019. 157 p. (in Russ.)
4. Glushankov E.I., Mityanin S.A. Analysis of the joint efficiency of spatial-time coding and spatial processing of signals in radio communication lines. *Zametki uchenogo*. 2022;6:187–192. (in Russ.)
5. Dvornikov S.V., Dvornikov S. S., Manaenko S.S., Pshenichnikov A.V. Spectral-efficient signals with the continuous phase. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2016;12(2):87–93. (in Russ.)
6. Lipatnikov V.A., Sakharov D.V., Parfirov V.A., Petrenko M.I. Simulation model of a distributed radio monitoring object, reflecting the dynamics of movements and changing modes of operation of radio-electronic means. *Proceedings of the Jubilee XVIII St. Petersburg International Conference on Regional Informatics (RI-2022), St. Petersburg, Russia, 26–28 October 2022*. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskoe Obshchestvo informatiki vychislitelnoi tekhniki sistem svyazi i upravleniia Publ.; 2022. p.556–558. (in Russ.)
7. Dvornikov S.V., Pshenichnikov A.V., Burykin D.A. Structural and functional model of a signal constellation with increased noise immunity. *Information and Space*. 2015;2:4–7. (in Russ.)
8. Sorokin K. N. Model of a radio link parameter management system based on fuzzy logic. *Information and Space*. 2018;4:39–43. (in Russ.)
9. Fedorov I.V., Roslyakov A.V. Analysis of the characteristics of a cognitive radio network using network calculus. *Proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference "III Scientific Forum of Telecommunications: Theory and Technology", TTT-2019, 18–22 November 2019, Kazan, Russia, vol.1*. Kazan: KAI Publ.; 2019. p.338–339. (in Russ.)
10. Belov A., Lipatnikov V., Fedorov I. Model of a cognitive radio network based on the theory of stochastic network calculation. *Proceedings of the Xth International Scientific and Technical and Scientific-Methodical Conference on Actual Problems of Infotelec Communications in Science and Education, 24–25 February 2021, St. Petersburg, Russia, vol.1*. St. Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. p.86–90.p. (in Russ.)
11. Roslyakov A.V., Lysikov A.V., Vitevsky V.D. Network Calculus. Part 1. Theoretical Foundations. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2018;16(1):19–33. (in Russ.) DOI:10.18469/ikt.2018.16.1.02
12. Kudryavtseva E.N., Roslyakov A.V. Basic principles and prospects of network calculus application. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2013;11(3):34–39. (in Russ.)
13. Alekaev A.E., Belov A.V., Fedorov I.V. Method for multi-stage adaptation of low-energy radio line of short-wave range taking into account forecasting signal-interference situation. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Transport of Russia: Problems and Prospects – 2021, 09–10 November 2021, St. Petersburg, Russia, vol.2*. St. Petersburg: Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences Publ.; 2021. p.157–161. (in Russ.)
14. Krivulin N.K. Methods of idempotent algebra in problems of modeling and analysis of complex systems. *St. Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.*; 2009. 256 p. (in Russ.)
15. Pshenichnikov A.V. Estimation of statistical parameters operating frequency of functional models of radio links in a conflict situation. *Information and Space*. 2018;1:46–50. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 30.01.2023; одобрена после рецензирования 27.02.2023; принята к публикации 15.03.2023.

The article was submitted 30.01.2023; approved after reviewing 27.02.2023; accepted for publication 15.03.2023.

Информация об авторах:

ЛИПАТНИКОВ
Валерий Алексеевич

доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0002-3736-4743>

ПЕТРЕНКО
Михаил Игоревич

адъюнкт научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0002-5402-402X>