Научная статья
УДК 621.391
DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-50-56

Исследование качества обслуживания трафика реального времени в условиях сложной помеховой обстановки

Евгений Александрович Новиков[1], novikov.evg.alex@yandex.ru
Андрей Сергеевич Севостьянов[1] ✉, andrei17365@mail.ru
Александр Геннадьевич Шадрин[1], ag_shadrin@mail.ru

[1]Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

Аннотация: *В статье проведено исследование процесса обслуживания трафика в сети радиосвязи в условиях сложной помеховой обстановки на основе аналитического и имитационного моделирования. Разработана аналитико-имитационная модель обслуживания трафика реального времени в сложной помеховой обстановке, алгоритм расчета одноканальной системы массового обслуживания с экспоненциальным распределением времени между поступающими заявками и гамма-распределением времени обслуживания в канале.*

Ключевые слова: *гамма-распределение, система массового обслуживания, имитационное моделирование, MATLAB/Simulink/Stateflow, параллельные стохастические развивающиеся процессы*

Ссылка для цитирования: Новиков Е.А., Севостьянов А.С., Шадрин А.Г. Исследование качества обслуживания трафика реального времени в условиях сложной помеховой обстановки // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 50–56. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-50-56

Study of the Service Quality of Real Time Traffic in a Complex Interference Environment

Evgeny Novikov[1], novikov.evg.alex@yandex.ru
Andrey Sevostyanov[1] ✉, andrei17365@mail.ru
Alexander Shadrin[1], ag_shadrin@mail.ru

[1]Military Aerospace Academy,
St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Abstract: *The process of servicing traffic in a radio communication network in a complex interference environment is studied based on analytical and simulation modeling. A developed analytic-simulation model for servicing real-time traffic in a complex interference environment is described along with an algorithm for calculating a single-channel queuing system with an exponential time distribution between incoming requests and gamma distribution of service time in a channel.*

Keywords: *gamma distribution, queuing system, simulation modeling, MATLAB/Simulink/Stateflow, parallel stochastic developing processes*

For citation: Novikov E., Sevostyanov A., Shadrin A. Study of the Service Quality of Real Time Traffic in a Complex Interference Environment. *Proc. of Telecom. Universities.* 2022;8(3):50–56. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-50-56

ВВЕДЕНИЕ

Функционирование современных сетей радиосвязи зачастую связано с воздействием на них электромагнитных помех различного происхождения. В случае умышленного формирования помеховых воздействий на линию связи возникает задача оптимального маневра имеющимся радиоресурсом с целью передачи трафика реального времени с требуемым качеством. При этом для выработки алгоритма маневра радиоресурсом в условиях преднамеренного воздействия необходимо знать, как в таком случае происходит обслуживание трафика реального времени в канале, т. е. закон распределения длительности передачи пакета трафика. Концептуальная модель процесса конфликтного взаимодействия радиотехнических систем представлена на рисунке 1.

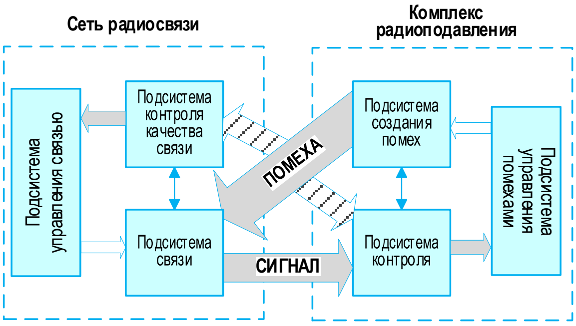


Рис. 1. Концептуальная модель процесса конфликтного взаимодействия радиотехнических систем

Fig. 1. Conceptual Model of the Radio Engineering Systems Conflict Interaction Process

Для исследования взаимодействия сложных радиотехнических систем (СРТС) часто используют имитационное или аналитико-имитационное моделирование. Проведение натурных испытаний ввиду дороговизны и ответственности решаемых задач такими системами является нецелесообразным, а зачастую и невозможным, а исследование функционирования СРТС аналитическими методами может быть затруднено в виду высокой сложности математического описания. В работе [1] представлен подход описания процесса функционирования СРТС в условиях целенаправленного помехового воздействия на основе использования математического аппарата параллельных развивающихся стохастических процессов. В данной статье представлено исследование пропускной способности радиоканала, функционирующего в условиях сложной помеховой обстановки при передаче трафика реального времени на основе применения гипердельтной аппроксимации на этапе аналитического моделирования и элементов математического аппарата параллельных развивающихся стохастических процессов на этапе имитационного моделирования в среде MATLAB/Stateflow/Simulink.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ В СЛОЖНОЙ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКЕ

В качестве объекта исследования в статье рассмотрена сеть радиосвязи (рисунок 2), действующая в сложной помеховой обстановке и передающая трафик реального времени, требования по качеству обслуживания которого определяются следующим образом:

– предельное время «жизни» пакета – $T = 400$ мс;
– допустимый процент потерь – $P_{\text{пот.}} < 1$ %.

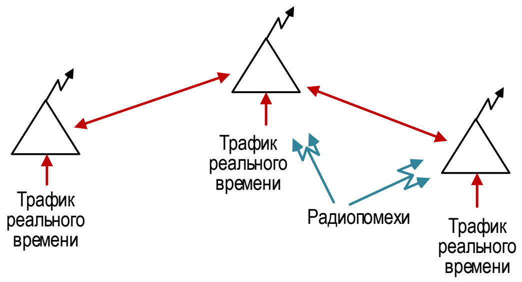


Рис. 2. Сеть радиосвязи в условиях сложной помеховой обстановки

Fig. 2. Radio Communication Network in a Complex Interference Situation

Процесс поступления трафика на радиостанцию описывается экспоненциальным законом, при этом распределение времени передачи пакета в радиоканале в сложной помеховой обстановке, как показано в [1], может быть аппроксимировано гамма-распределением, плотность которого описывается соотношением:

$$f_{\gamma}(x) = \begin{cases} \dfrac{\theta^k}{\Gamma(k)} x^{k-1} e^{-\theta x}, x > 0 \\ 0, x < 0, \end{cases}, \qquad (1)$$

где $k \geq 0, \theta \geq 0$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ РЕСУРСА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИОКАНАЛА В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ

Для описания процесса передачи трафика по радиоканалу, функционирующему в условиях сложной помеховой обстановки, рассмотрим систему массового обслуживания (СМО) (рисунок 3), описываемую в нотации Кендала следующим образом: $M/g/1/N$.

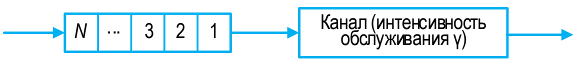


Рис. 3. Система массового обслуживания $M/g/1/N$

Fig. 3. Queuing System $M/g/1/N$

Для исследования пропускной способности радиоканала, как правило, проводят расчет СМО. Однако аналитический расчет СМО с длительностью обслуживания трафика, распределенной по гаммазакону, представляет собой сложную задачу. Известен подход, основанный на гипердельтной аппроксимации, который позволяет получить приближенную аппроксимацию произвольной функции распределения [2–4].

Задача расчета СМО типа $M/g/1/N$ заключается в определении минимального значения пропускной способности μ СМО, которое обеспечивало бы вероятность потерь не хуже требуемой ($0 < P_{пот.} \le$ $\le P_{пот.треб}$) при обслуживании трафика реального времени с интенсивностью λ:

$$\mu \underset{0<P_{пот.}\le P_{пот.треб}}{\to} \min. \quad (2)$$

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА НЕМАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ $M/g/1/N$

Как правило, для расчета СМО принято использовать подход, основанный на построении графа марковской цепи с последующим решением системы уравнений Колмогорова – Чепмана. В рассматриваемом случае с учетом принятых распределений вероятностей такой подход не может быть применен. В этой связи предлагается использовать подход к расчету системы $M/g/1/N$, основанный на построении системы уравнений баланса в изображениях Лапласа. Соответствующий граф в изображениях Лапласа показан на рисунке 4, где символы $*$ и s – изображение Лапласа и его комплексной переменной; $a^*(s)$ – изображение Лапласа функции плотности экспоненциального распределения; $b^*(s)$ – изображение Лапласа функции плотности гамма-распределения; α – условная вероятность поступления нового пакета; β – условная вероятность обслуживания текущего пакета.

Условные вероятности задаются следующими соотношениями:

$$\alpha = \int_0^\infty \big(1 - B(x)\big)dA(x) = \\ = \int_0^\infty \left(1 - \frac{\theta^k \int_0^x x^{k-1}e^{-\theta t}dt}{\Gamma(k)}\right)\lambda e^{-\lambda x}dx, \quad (3)$$

$$\beta = \int_0^\infty \big(1 - A(x)\big)dB(x) = \\ = \int_0^\infty \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda x}\right)\right]\frac{\theta^k\left(x^{k-1}e^{-\theta x}\right)}{\Gamma(k)}dx, \quad (4)$$

где $A(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ и $B(x) = \frac{\theta^k \int_0^x x^{k-1}e^{-\theta t}dx}{\Gamma(k)}$ – функции экспоненциального распределения и гамма-распределения, соответственно.

Система уравнений баланса для графа состояний одноканальной СМО, представленной в изображениях Лапласа, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} a^*(s)P_1^*(s) = \beta b^*(s)P_2^*(s); \\ (\alpha a^*(s) + \beta b^*(s))P_2^*(s) = a^*(s)P_1^*(s) + b^*(s)P_3^*(s); \\ \vdots \\ b^*(s)P_N^*(s) = \alpha a^*(s)P_{N-1}^*(s); \\ \sum_{i=0}^{N} P_i^*(s) = \frac{1}{s}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\sum_{i=0}^{N} P_i^*(s) = \frac{1}{s}$ – условие нормирования изображений вероятностей.

Решением системы уравнений (5) являются выражения для вероятностей состояний системы в изображениях Лапласа (6).

$$\begin{cases} P_1^*(s) = \frac{1}{s}\left[1 + \frac{\alpha^{N-2}a^*(s)^{N-1}}{\beta^{N-2}b^*(s)^{N-1}} + \sum_{i=1}^{N-2}\frac{\alpha^{i-1}a^*(s)^i}{\beta^i b^*(s)^i}\right]^{-1}; \\ P_2^*(s) = \frac{1}{s}\left[\frac{\beta b^*(s)}{a^*(s)} + \frac{\alpha^{N-2}a^*(s)^{N-2}}{\beta^{N-3}b^*(s)^{N-2}} + \sum_{i=1}^{N-2}\left(\frac{\alpha a^*(s)}{\beta b^*(s)}\right)^{i-1}\right]^{-1}; \\ \vdots \\ P^*_{\ n=\overline{3,N-2}}(s) = \frac{1}{s}\left[\frac{\beta^{N-n}b^*(s)^{N-n}}{\alpha^{N-n-1}a^*(s)^{N-n}} + \frac{\alpha^{n-1}a^*(s)^{n-1}}{\beta^{n-2}b^*(s)^{n-1}} + \sum_{i=1}^{N-2}\left(\frac{\alpha a^*(s)}{\beta b^*(s)}\right)^{n-1-i}\right]^{-1}; \\ \vdots \\ P^*_{\ N-1}(s) = \frac{1}{s}\left[\frac{\alpha a^*(s)}{b^*(s)} + \frac{\beta^{N-2}b^*(s)^{N-2}}{\alpha^{N-3}a^*(s)^{N-2}} + \sum_{i=1}^{N-2}\left(\frac{\beta b^*(s)}{\alpha a^*(s)}\right)^{i-1}\right]^{-1}; \\ P_N^*(s) = \frac{1}{s}\left[1 + \frac{\beta^{N-2}b^*(s)^{N-1}}{\alpha^{N-2}a^*(s)^{N-1}} + \sum_{i=1}^{N-2}\frac{\beta^{i-1}b^*(s)^i}{\alpha^i a^*(s)^i}\right]^{-1}; \\ \sum_{i=0}^{N} P_i^*(s) = \frac{1}{s}. \end{cases} \quad (6)$$

Используя подход на основе гипердельтной аппроксимации произвольных плотностей распределений, можно получить выражения для функций плотностей экспоненциального и гамма-распределений. Для этого предварительно необходимо определить их первые три начальных момента:

$$\nu_s = \int_0^\infty x^s f(x)dx, \qquad (7)$$

где s – порядок начального момента.

Далее, на основе использования полученных моментов распределений вычисляются соотношения для поиска коэффициентов гипердельтной аппроксимации плотностей гамма-распределения и экспоненциального распределения с использованием метода моментов:

$$\begin{gathered} C_1 + C_2 = 1;\ \ C_1 T_1 + C_2 T_2 = \nu_1; \\ C_1 T_1^2 + C_2 T_2^2 = \nu_2;\ \ C_1 T_1^3 + C_2 T_2^3 = \nu_3, \end{gathered} \qquad (8)$$

которые имеют следующий вид (9, 10).

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{2}\left[1 + \frac{(3\nu_2\nu_1 - \nu_3 - 2{\nu_1}^3)}{\sqrt{\nu_3^2 - 6\nu_3\nu_2\nu_1 - 3\nu_2^2\nu_1^2 + 4\nu_3\nu_1^3 + 4\nu_2^3}}\right]; \\ C_2 &= \frac{1}{2}\left[1 - \frac{(3\nu_2\nu_1 - \nu_3 - 2{\nu_1}^3)}{\sqrt{\nu_3^2 - 6\nu_3\nu_2\nu_1 - 3\nu_2^2\nu_1^2 + 4\nu_3\nu_1^3 + 4\nu_2^3}}\right], \end{aligned} \qquad (9)$$

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\nu_3 - \nu_2\nu_1 - \sqrt{\nu_3^2 - 6\nu_3\nu_2\nu_1 - 3\nu_2^2\nu_1^2 + 4\nu_3\nu_1^3 + 4\nu_2^3}}{2(\nu_2 - \nu_1^2)}; \\ T_2 &= \frac{\nu_3 - \nu_2\nu_1 + \sqrt{\nu_3^2 - 6\nu_3\nu_2\nu_1 - 3\nu_2^2\nu_1^2 + 4\nu_3\nu_1^3 + 4\nu_2^3}}{2(\nu_2 - \nu_1^2)}. \end{aligned} \qquad (10)$$

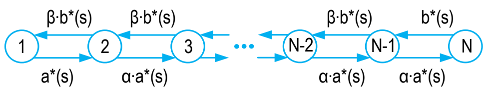


Рис. 4. Граф состояний одноканальной СМО в изображениях Лапласа

Fig. 4. Graph of a Single-Channel Queuing System States in Laplace Images

Аппроксимированные плотности вероятностей используемых законов распределений определяются в соответствии с соотношением:

$$f_{ап}(t) = C_1\ \Delta(t - T_1\ ) + C_2\ \Delta(t - T_2\ ), \qquad (11)$$

где $\Delta(t - T)$ – дельта-функция Дирака со смещением T.

Применив к формулам аппроксимированных плотностей вероятности преобразование Лапласа, можно получить следующие выражения плотностей вероятности в изображениях Лапласа:

$$\begin{gathered} a^*(s) = L\left[f_{ап}^{\exp}(t)\right] = C_1^{\exp} e^{-T_1^{\exp} s} + C_2^{\exp} e^{-T_2^{\exp} s}; \\ b^*(s) = L\left[f_{ап}^{\gamma}(t)\right] = C_1^{\gamma} e^{-T_1^{\gamma} s} + C_2^{\gamma} e^{-T_2^{\gamma} s}. \end{gathered} \qquad (12)$$

Используя формулы Алфрея [5], можно перейти от изображений Лапласа (12) к приближенным выражениям, полученным относительно переменной времени:

$$f(t) \approx s f^*(t) \quad \text{при } s = \frac{1}{t}. \qquad (13)$$

Получить систему уравнений баланса, решенную относительно переменной времени, можно путем следующих преобразований. Предварительно необходимо рассчитать соотношения для условных вероятностей (3–4), а также соотношения для плотностей распределений в изображениях Лапласа (12). Подставив получившиеся выражения в систему уравнений (6) и приведя подобные, производится замена переменной в соответствии с формулой Алфрея (13). Решение преобразованной системы уравнений (6) позволяет получить конечные значения вероятностей состояний системы не только в стационарном режиме, но и в переходных нестационарных режимах.

АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Аналитико-имитационное моделирование проводилось в четыре этапа.

Этап 1. Исследование времени передачи пакета трафика в канале.

Этап 2. Аппроксимация времени передачи в канале экспоненциальным распределением и гамма-распределением.

Этап 3. Расчет параметров входного потока для различных законов распределения при ограничениях на процент потерь пакетов трафика.

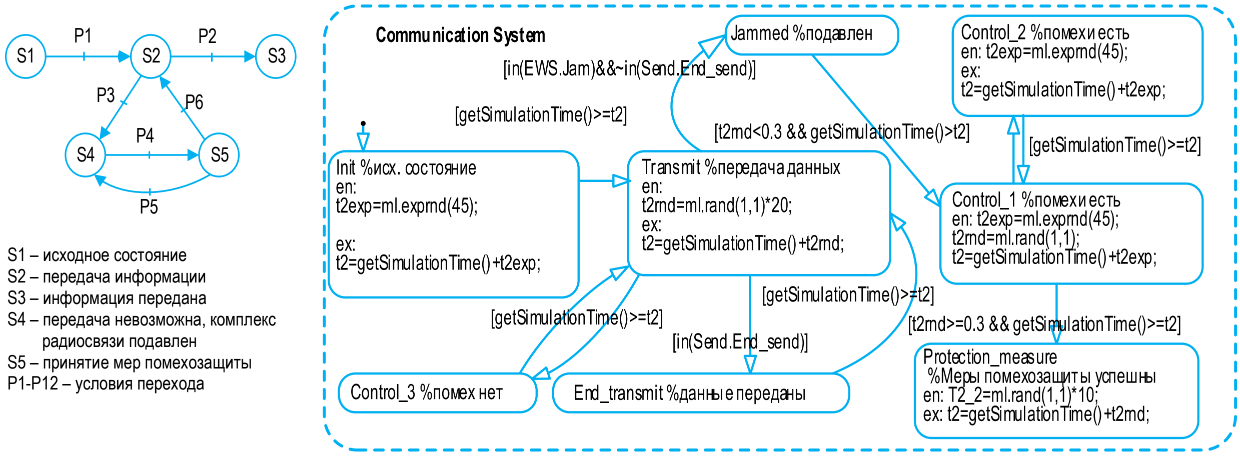
Этап 4. Получение вероятности потерь путем имитационного моделирования для различных параметров входного потока, полученных на 3 этапе.

На первом этапе для исследования использовалась имитационная модель канала в условиях сложной помеховой обстановки, построенная на основе программного продукта MATLAB/Simulink/Stateflow [6]. Объем статьи не позволяет произвести расшифровку синтаксиса программного продукта MATLAB/Simulink/Stateflow.

Модель канала включает в себя модели комплекса радиосвязи (рисунки 5, 7) и комплекса радиоподавления (рисунки 6, 8).

В момент занятия канала имитируется передача трафика в сети радиосвязи в условиях сложной помеховой обстановки. В ходе исследования путем многократного прогона имитационной модели был получен массив из 10^6 значений времени передачи пакета трафика в канале.

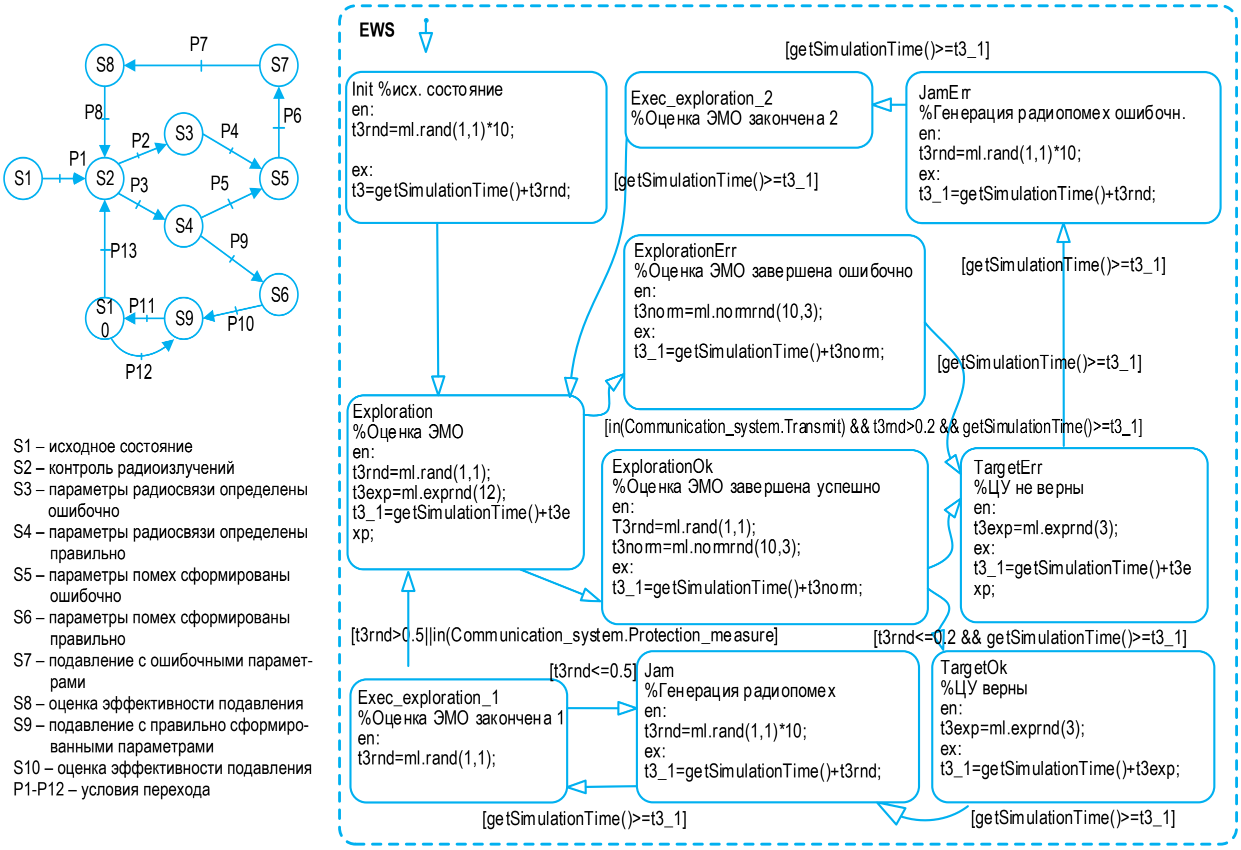
На втором этапе была проведена аппроксимация массива значений времени передачи пакета в канале экспоненциальным распределением и гамма-распределением. При аппроксимации экспоненциальным распределением был получен параметр μ, равный 0,049, а при аппроксимации гамма-распределением были получены: $k = 6{,}8$ и $\theta = 3$.



a) b)

Рис. 5. Модель комплекса радиосвязи: a) структура; b) программная реализация

Fig. 5. Model of the Radio Communication Complex: a) Structure; b) Software Implementation



a) b)

Рис. 6. Модель комплекса радиоподавления: a) структура; b) программная реализация

Fig. 6. Model of the Radio Suppression Complex: a) Structure; b) Software Implementation

На третьем этапе, используя известный расчет марковской модели СМО $M/M/1/1$ [7], была получена интенсивность входного потока $\lambda_1 = 0{,}001$, при аппроксимации времени обслуживания экспоненциальным распределением и вероятности потери пакета $P_{пот.} < 0{,}01$.

Для расчета параметров входного потока, в случае аппроксимации времени обслуживания в канале гамма-распределением, были использованы формулы (3–13), в результате применения которых была получена интенсивность входного потока $\lambda_2 = 0{,}007$, обеспечивающая вероятности потери пакета $P_{пот.} < 0{,}01$

На четвертом этапе было проведено моделирование с использованием имитационной модели СМО, построенной на основе программного продукта MATLAB/Simulink/Stateflow. Модель состоит из трех диаграмм состояний (Chart): «Источник», «Буфер» и «Канал» (рисунок 9). В диаграмме состояний «Источник» (рисунок 10a) имитируется генерация трафика с длительностью интервалов времени между пакетами, распределенной по экспоненциальному закону.

Диаграмма состояний «Канал» (рисунок 10b) применялась на первом этапе и подробно описана выше. В результате имитационного моделирования были получены следующие результаты:

– для интенсивности входного потока $\lambda_1 = 0{,}001$ (в случае аппроксимации времени обслуживания в канале экспоненциальным распределением) вероятность потери пакета трафика составила $P_{пот} = 0{,}0008$;

– для интенсивности входного потока $\lambda_2 = 0{,}007$ (в случае аппроксимации времени обслуживания в канале гаммараспределением) вероятность потери пакета трафика составила $P_{пот} = 0{,}0099$.

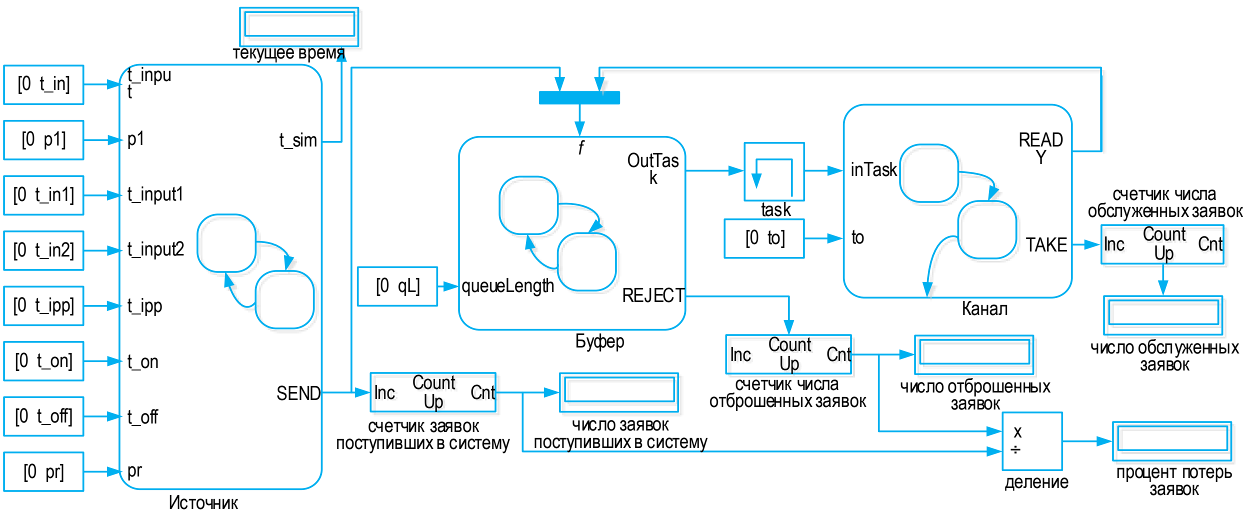
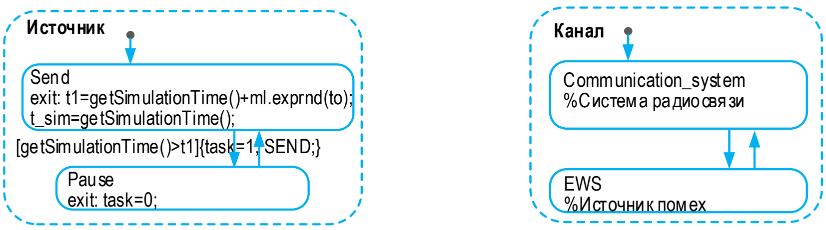


Рис. 9. Модель генерации и обслуживания трафика сложной структуры

Fig. 9. A Model of Generating and Servicing Traffic of a Complex Structure



a) b)

Рис. 10. Диаграмма состояний «Источник» (a) и «Канал» (b)

Fig. 10. Diagram of the "Source" (a) and "Channel" (b) States

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты аналитико-имитационного моделирования показали, что аппроксимация времени обслуживания пакета в канале радиосвязи в сложной помеховой обстановке экспоненциальным законом дает грубую оценку процесса обслуживания в канале по сравнению с аппроксимацией гамма-распределением, что приводит к существенному недоиспользованию канального ресурса. В результате интенсивность входного потока при аппроксимации экспоненциальным распределением получается в 7 раз меньше, чем может обслужить канал с требуемым качеством. Фактически ресурс радиоканала используется всего на 14 %. Аппроксимация времени обслуживания в канале в условиях сложной помеховой обстановки гамма-распределением позволяет максимально использовать имеющийся канальный ресурс. А применение гипердельтной аппроксимации гамма-распределения позволяет точно рассчитать требуемую пропускную способность канала для известного потока.

Список источников

1. Мальцев Г.Н., Вознюк В.В., Туктамышев М.Р. Моделирование конфликта сложных радиотехнических систем методом параллельных развивающихся стохастических процессов // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5(66) С. 26–33.
2. Смагин В.А., Филимонихин Г.В. О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // Автоматика и вычислительная техника. 1990. № 3. С. 25–31.
3. Смагин В.А., Гусеница Я.Н. Моделирование одноканальных нестационарных систем обслуживания, представленных циклическим графом состояний // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 10. С. 801–806. DOI:10.17586/0021-3454-2016-59-10-801-806
4. Смагин В.А. Коррекция гипердельтного распределения в теории случайных процессов // Информация и космос. 2015. № 4. С. 68–72.
5. Смагин В.А. Немарковские задачи теории надежности. Л.: МО СССР, 1982. 269 с.
6. Сирота А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. М.: Техносфера, 2006. 280 с.
7. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 600 с.

References

1. Maltsev G.N., Voznyuk V.V., Tuktamyshev M.R. Modeling the Conflict of Complex Radio Engineering Systems by the Method of Parallel Developing Stochastic Processes. *Information and Control Systems*. 2013;5(66):26–33. (in Russ.)
2. Smagin V.A., Filimonikhin G.V. On Modeling Random Processes Based on Hyperdelta Distribution. Avtomatika i vychislitelnaia tekhnika. 1990;3:25–31. (in Russ.)
3. Smagin V.A., Gusenitsa Ya.N. Modeling Single-Channel Non-Stationary Queueing Systems Presented in the Form of a Cyclic Graph of States. *Journal of Instrument Engineering*. 2016;59(10):801–806. (in Russ.) DOI:10.17586/0021-3454-2016-59-10-801-806
4. Smagin V.A. Adjusting the hyperdelta distribution in the theory of random processes. *Information and Space*. 2015;4:68–72. (in Russ.)
5. Smagin V.A. *Non-Markovian Problems of Reliability Theory.* Leningrad: USSR Ministry of Defense Publ.; 1982. 269 p. (in Russ.)
6. Sirota A.A. *Computer Modeling and Evaluation of the Efficiency of Complex Systems.* Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2006. 280 p. (in Russ.)
7. Kleinrock L. *Queueing Systems. Volume 1: Theory*. Wiley-Interscience, 1975. 417 p.

Статья поступила в редакцию 27.04.2022; одобрена после рецензирования 30.09.2022; принята к публикации 08.09.2022.
The article was submitted 27.04.2022; approved after reviewing 30.09.2022; accepted for publication 08.09.2022.

Информация об авторах:

НОВИКОВ Евгений Александрович — доктор технических наук, доцент, начальник кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского
https://orcid.org/0000-0003-4632-9824

СЕВОСТЬЯНОВ Андрей Сергеевич — адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского
https://orcid.org/0000-0002-2359-6818

ШАДРИН Александр Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского
https://orcid.org/0000-0002-2830-233X