

УДК 303.732.4

# Обобщенная модель спутника-ретранслятора с функцией маршрутизации и межспутниковыми трактами

**С.Б. Пичугин**

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

## Generalized model of a relay satellite with the routing function and the inter-satellite paths

**S.B. Pichugin**

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energiya"

Рассмотрена низкоорбитальная система связи, включающая в себя спутники-ретрансляторы с функцией маршрутизации сообщений, на произвольное число абонентских и межспутниковых трактов, где трансляция пакетов сообщений от абонентов, поступающая из абонентского или межспутникового тракта, осуществляется в любой из них. Приведены две модели низкоорбитальной системы связи, реализованные на базе математического аппарата систем массового обслуживания, без взаимного перекрытия и с взаимным перекрытием зон обслуживания низкоорбитальной системы связи, на базе которых получены аналитические соотношения для модели с произвольным числом трактов. Установлено, что модель с произвольным числом трактов можно адекватно представить простейшей моделью без перекрытия зон обслуживания при условии правильной вариации нагрузки, поступающей на ее вход.

**EDN:** CCWKHT, <https://elibrary/ccwkht>**Ключевые слова:** низкоорбитальная система связи, межспутниковые тракты, спутник-ретранслятор с функцией маршрутизации

The paper considers a low-orbit communication system that includes relay satellites with the function of routing messages to an arbitrary number of subscriber and inter-satellite paths, where the subscriber message packets arriving from a subscriber or inter-satellite path are translated in any of them. It analyzes two models of the low-orbit communication system implemented on the basis of mathematical apparatus of the mass service systems without mutual overlap and with mutual overlap in the service zones of a low-orbit communication system, on the which basis the analytical relationships are obtained for a model with the arbitrary number of paths. It is found that a model with an arbitrary number of paths could be adequately represented by the simplest model without overlapping the zones, provided that the load arriving at its input is correctly varied.

**EDN:** CCWKHT, <https://elibrary/ccwkht>**Keywords:** low-orbit communication system, inter-satellite paths, relay satellite with a routing function

На текущем этапе развития низкоорбитальных спутниковых систем (НОСС) ведутся интенсивные разработки по маршрутизации сообщений на борту спутников-ретрансляторов с

функцией маршрутизации (СРФМ), что позволяет приблизить их возможности по передаче различных видов информации к возможностям наземных сетей пятого поколения [1–

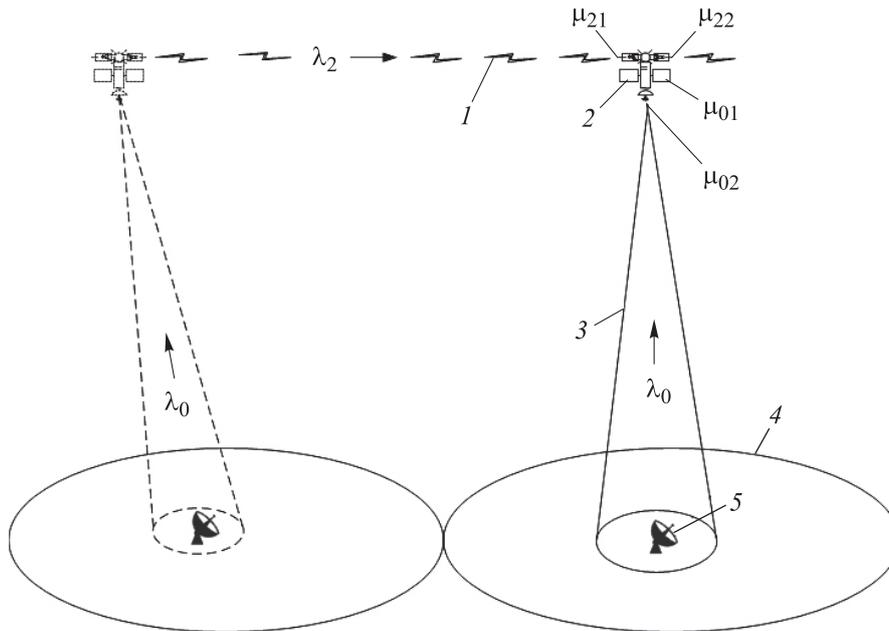


Рис. 1. Модель НОСС без перекрытия зон обслуживания

4]. Реализовывать планы по созданию таких НОСС затруднительно вследствие особенностей их функционирования и недостатков математических моделей [5–7], которые не позволяют дать адекватное описание, чтобы обосновать применение тех или иных технических решений.

В работе [8] рассмотрен СРФМ с неперекрывающимися зонами обслуживания, а в публикации [9] — СРФМ с перекрывающимися. В обоих случаях СРФМ имел возможность обмениваться сообщениями как минимум с одним соседним СРФМ.

Интерес представляют варианты баллистического построения НОСС, когда СРФМ общается с заданным числом соседних СРФМ, а зоны обслуживания абонентских трактов (АТ) СРФМ, входящих в состав НОСС, не перекрывают или перекрывают друг друга.

Цель работы — оценить вероятность доставки сообщения в НОСС, где зоны обслуживания СРФМ не перекрывают или перекрывают друг друга, а СРФМ общается с заданным числом соседних СРФМ.

Для оценки работы НОСС построены и исследованы математические модели на базе аппарата систем массового обслуживания. Сформулирована задача сравнить поведение НОСС, где СРФМ могут общаться с заданным числом соседних СРФМ, а АТ в направлении наземных абонентов организованы с перекрытием и без перекрытия зон обслуживания СРФМ.

**Модели спутниковой системы.** Модель НОСС с неперекрывающимися зонами обслуживания (рис. 1) включает в себя сообщество абонентов 5 и СРФМ 2, чьи зоны обслуживания 4 не перекрываются.

Сообщения от абонентов на СРФМ поступают по АТ 3 из зон обслуживания или по межспутниковому тракту (МСТ) 1 через соседние СРФМ. Сообщения транслируются в МСТ или АТ. Поток сообщений в обоих трактах — простейший с интенсивностью  $\lambda_0$  для АТ и  $\lambda_2$  для МСТ.

Время обслуживания сообщений, поступающих на СРФМ из АТ, распределено по экспоненциальному закону с параметром  $\mu_{01}$ , время обслуживания сообщений, передаваемых от СРФМ в АТ, — по экспоненциальному закону с параметром  $\mu_{02}$ . Время обслуживания сообще-

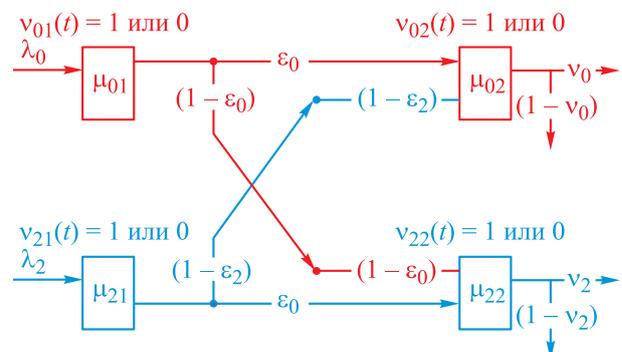


Рис. 2. Модель СРФМ в составе НОСС с неперекрывающимися зонами обслуживания

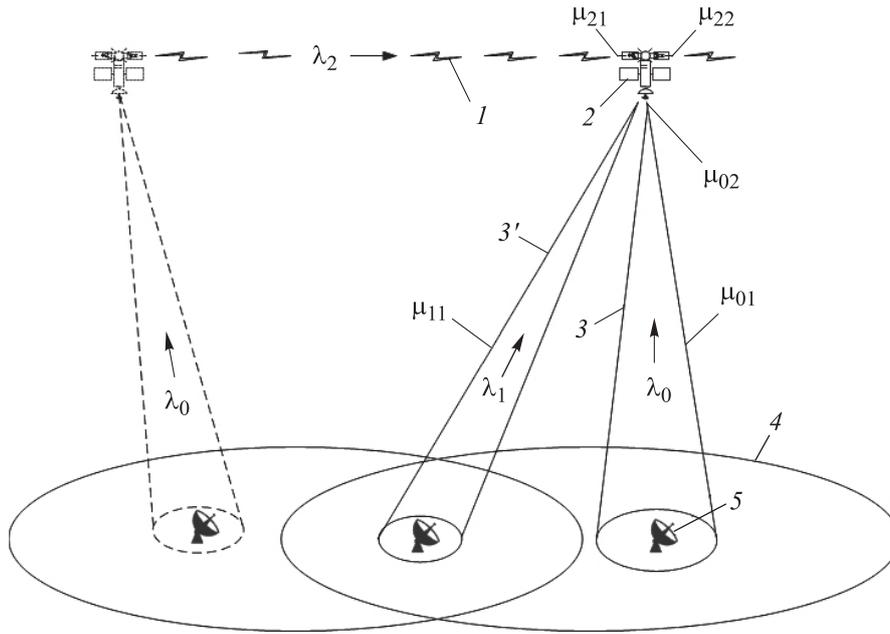


Рис. 3. Модель НОСС с перекрывающимися зонами обслуживания

ний, поступающих на СРФМ из МСТ, подчинено экспоненциальному закону с параметром  $\mu_{21}$ , время обслуживания сообщений, передаваемых от СРФМ в МСТ — экспоненциальному закону с параметром  $\mu_{22}$ .

Для исследования этой НОСС и оценки ее характеристик, в частности вероятности доставки сообщения, предложена двухфазная двухосевая с четырьмя обслуживающими приборами модель (модель  $2 \times 2$ ), показанная на рис. 2.

АТ и МСТ представлены двумя приборами обслуживания, имитирующими их работу на прием и передачу соответственно. Состояния приборов «занят» или «свободен» на текущий момент времени  $t$  соответствуют 0 или 1 вели-

чин  $v_{01}(t)$ ,  $v_{02}(t)$ ,  $v_{21}(t)$  и  $v_{22}(t)$ . Сообщение, поступившее из АТ с вероятностью  $\epsilon_0$ , транслируется в АТ, а с вероятностью  $(1 - \epsilon_0)$  — в МСТ. Сообщение, поступившее из МСТ с вероятностью  $\epsilon_2$ , транслируется в МСТ, а с вероятностью  $(1 - \epsilon_2)$  — в АТ.

Модель НОСС с перекрывающимися зонами обслуживания приведена на рис. 3.

Для исследования этой НОСС и оценки ее характеристик предложена двухфазная модель  $3 \times 2$ , показанная на рис. 4.

Сообщения от абонентов 5 на СРФМ 2 поступают по АТ 3 и 3' из зон обслуживания 4 или по МСТ 1 через соседние СРФМ. Сообщения транслируются в АТ 3 или МСТ. Поток сооб-

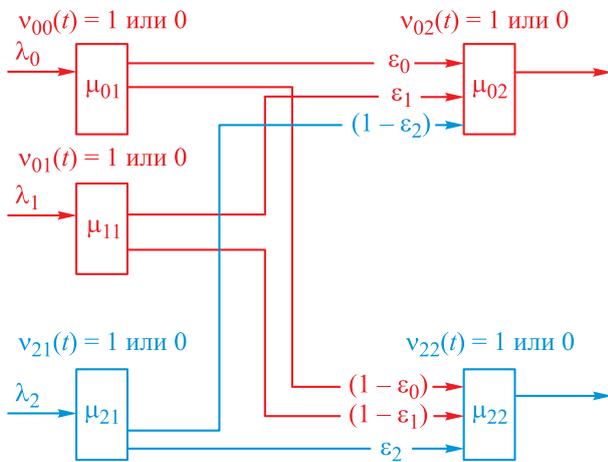


Рис. 4. Модель СРФМ в составе НОСС с перекрывающимися зонами обслуживания

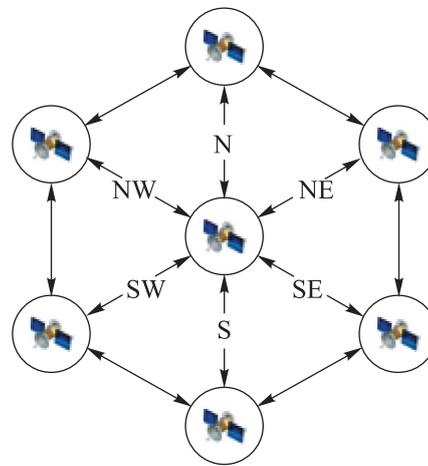


Рис. 5. Схема НОСС с гексагональной схемой баллистического построения

щений в обоих трактах — простейший с интенсивностью  $\lambda_0$  для АТ 3,  $\lambda_1$  для АТ 3' и  $\lambda_2$  для МСТ.

Время обслуживания сообщений, поступающих на СРФМ из АТ 3 и 3', распределено по экспоненциальному закону с параметром  $\mu_{02}$ , время обслуживания сообщений, передаваемых от СРФМ в АТ 3, — по экспоненциальному закону с параметром  $\mu_{22}$ . Время обслуживания сообщений, поступающих на СРФМ из МСТ, подчинено экспоненциальному закону с параметром  $\mu_{21}$ , время обслуживания сообщений,

передаваемых от СРФМ в МСТ — экспоненциальному закону с параметром  $\mu_{22}$ .

При рассмотрении НОСС [10–15], чьи СРФМ способны ретранслировать сообщения, поступающие по АТ заданному числу соседних СРФМ, взят конкретный пример [15] НОСС с гексагональной схемой баллистического построения, где СРФМ способны ретранслировать сообщения от двух АТ на шесть соседних СРФМ (рис. 5).

Двухфазная модель НОСС, чьи СРФМ способны ретранслировать сообщения от двух АТ

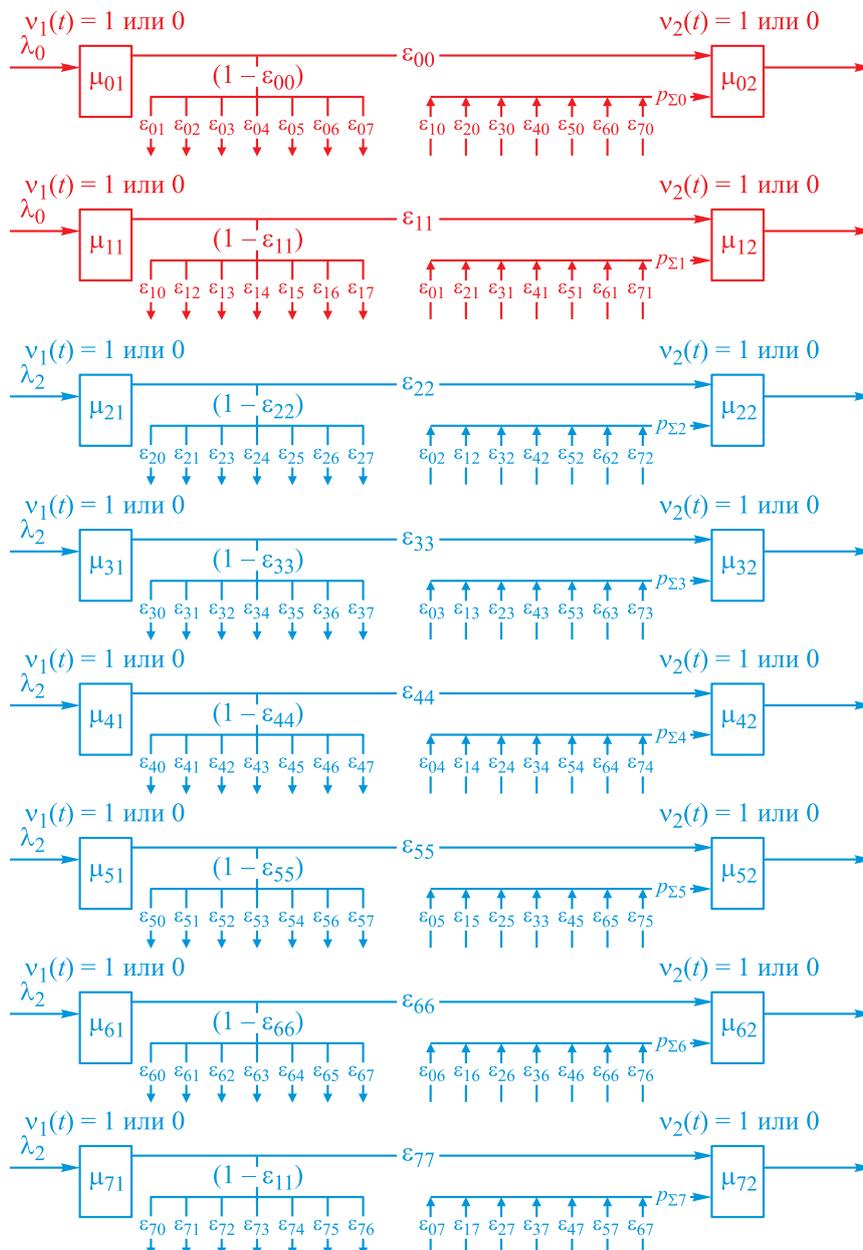


Рис. 6. Модель НОСС с гексагональной схемой баллистического построения без перекрытия зон обслуживания

на шесть соседних СРФМ, в графическом виде приведена на рис. 6. Эта модель не отражает возможность взаимного перекрытия зон обслуживания.

**Аналитические соотношения.** Для обеих моделей НОСС на основе дифференциальных уравнений Колмогорова получены системы уравнений для вероятностей возможных состояний в стационарном режиме.

Для модели 2×2 (см. рис. 4) система уравнений имеет

$$\begin{aligned}
 & p_{a_m^1 a_m^2 a_m^3 a_m^4} \sum_{\substack{m=0; \\ m \neq n}}^{N=2^4} [f(a_m^1 - a_n^1) + f(a_m^2 - a_n^2) + \\
 & + f(a_m^3 - a_n^3) + f(a_m^4 - a_n^4)] + \\
 & + \sum_{\substack{n=0; \\ n \neq m}}^{N=2^4} p_{a_n^1 a_n^2 a_n^3 a_n^4} [f(a_n^1 - a_m^1) + f(a_n^2 - a_m^2) + \\
 & + f(a_n^3 - a_m^3) + f(a_n^4 - a_m^4)] = 0, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 f(a_m^1 - a_n^1) &= \begin{cases} 1, & \mu_{01} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_0 \end{cases} \\
 f(a_m^2 - a_n^2) &= \begin{cases} 1, & \mu_{02} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2 (1 - \varepsilon_2) \end{cases} \\
 f(a_m^3 - a_n^3) &= \begin{cases} 1, & \mu_{21} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_2 \end{cases} \\
 f(a_m^4 - a_n^4) &= \begin{cases} 1, & \mu_{22} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_0 (1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2 \end{cases} \\
 f(a_n^1 - a_m^1) &= \begin{cases} 1, & \lambda_0 \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \mu_{01} \end{cases} \\
 f(a_n^2 - a_m^2) &= \begin{cases} 1, & \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_2 (1 - \varepsilon_2) \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \mu_{02} \end{cases} \\
 f(a_n^3 - a_m^3) &= \begin{cases} 1, & \lambda_2 \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \mu_{21} \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$f(a_n^4 - a_m^4) = \begin{cases} 1, & \lambda_0 (1 - \varepsilon_0) + \lambda_2 \varepsilon_2 \\ 0, & 0 \\ -1, & \mu_{22} \end{cases} .$$

Для модели 3×2 (см. рис. 4) система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned}
 & -p_{a_m^1 a_m^2 a_m^3 a_m^4 a_m^5} \sum_{\substack{m=0; \\ m \neq n}}^{N=2^5} [f(a_m^1 - a_n^1) + f(a_m^2 - a_n^2) + \\
 & + f(a_m^3 - a_n^3) + f(a_m^4 - a_n^4) + f(a_m^5 - a_n^5)] + \\
 & + \sum_{\substack{n=0; \\ n \neq m}}^{N=2^5} p_{a_n^1 a_n^2 a_n^3 a_n^4 a_n^5} [f(a_n^1 - a_m^1) + f(a_n^2 - a_m^2) + \\
 & + f(a_n^3 - a_m^3) + f(a_n^4 - a_m^4) + f(a_n^5 - a_m^5)] = 0, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 f(a_m^1 - a_n^1) &= \begin{cases} 1, & \mu_{01} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_0 \end{cases} \\
 f(a_m^2 - a_n^2) &= \begin{cases} 1, & \mu_{11} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_1 \end{cases} \\
 f(a_m^3 - a_n^3) &= \begin{cases} 1, & \mu_{02} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_1 \varepsilon_1 + \lambda_2 (1 - \varepsilon_2) \end{cases} \\
 f(a_m^4 - a_n^4) &= \begin{cases} 1, & \mu_{21} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_2 \end{cases} \\
 f(a_m^5 - a_n^5) &= \begin{cases} 1, & \mu_{22} \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \lambda_0 (1 - \varepsilon_0) + \lambda_1 (1 - \varepsilon_1) + \lambda_2 \varepsilon_2 \end{cases} \\
 f(a_n^1 - a_m^1) &= \begin{cases} 1, & \lambda_0 \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \mu_{01} \end{cases} \\
 f(a_n^2 - a_m^2) &= \begin{cases} 1, & \lambda_1 \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \mu_{11} \end{cases} \\
 f(a_n^3 - a_m^3) &= \begin{cases} 1, & \lambda_0 \varepsilon_0 + \lambda_1 \varepsilon_1 + \lambda_2 (1 - \varepsilon_2) \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \mu_{02} \end{cases} \\
 f(a_n^4 - a_m^4) &= \begin{cases} 1, & \lambda_2 \\ 0, & 0 \quad ; \\ -1, & \mu_{21} \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$f(a_n^5 - a_m^5) = \begin{cases} 1, & \lambda_0(1 - \varepsilon_0) + \lambda_1(1 - \varepsilon_1) + \lambda_2\varepsilon_2 \\ 0, & 0 \\ -1, & \mu_{22} \end{cases}.$$

Обобщая системы уравнений (1) и (2), получаем выражение для системы с произвольным числом МСТ и перекрытием зон обслуживания соседствующих СРФМ

$$-p_{a_m^1 \dots a_n^x} \sum_{\substack{m=0; \\ m \neq n}}^{N=2^x} [f(a_m^1 - a_n^1) + \dots + f(a_m^x - a_n^x)] + \sum_{\substack{n=0; \\ n \neq m}}^{N=2^x} p_{a_n^1 \dots a_m^x} [f(a_n^1 - a_m^1) + \dots + f(a_n^x - a_m^x)] = 0. \quad (3)$$

Слагаемые, входящие в состав системы уравнений (3), получают аналогично системам уравнений (1) и (2) в соответствии с моделью, построенной по тем же принципам, что и модели, приведенные на рис. 2 и 4.

Системы уравнений (1)–(3) дополняют уравнениями полной вероятности и решают методом обращения матриц. Так как полученные системы не являются квадратными, используют выражение в матричном виде

$$(A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B = X, \quad (4)$$

где **A** — матрица коэффициентов системы уравнений (1) или (2); **B** — матрица-столбец правых частей системы; **X** — матрица-строка вероятностей состояний системы.

Рассматривая систему уравнений для модели НОСС с шестью МСТ и двумя АТ (с восемью трактами) с неперекрывающимися зонами обслуживания, запишем

$$-p_{a_m^1 \dots a_n^x} \sum_{\substack{m=0; \\ m \neq n}}^{N=2^8} [f(a_m^1 - a_n^1) + \dots + f(a_m^x - a_n^x)] +$$

$$+ \sum_{\substack{n=0; \\ n \neq m}}^{N=2^8} p_{a_n^1 \dots a_m^x} [f(a_n^1 - a_m^1) + \dots + f(a_n^x - a_m^x)] = 0.$$

Матрица **A** системы уравнений (4), дополненная уравнением полной вероятности, имеет размерность 65 536×65 537, т. е. 2<sup>8</sup>·(2<sup>8</sup>+1) членов. Отмечая непропорциональный расход вычислительных ресурсов для решения такой системы, найдем решение, позволяющее получить оценку характеристик СРФМ и НОСС в целом, ограничивая расход указанных ресурсов.

Проанализируем графические зависимости, полученные путем решения систем уравнений (1) и (2) для значений вероятностей нахождения каждой из исследуемых систем в состояниях от «все приборы системы свободны» до «все приборы системы заняты», что позволяет оценить вероятность доставки сообщения.

На рис. 7 приведены зависимости вероятности нахождения систем в состояниях «все приборы свободны» и «все приборы заняты» от нагрузки λ<sub>0</sub>/μ<sub>01</sub>. Наложение графиков для модели с перекрытием и без перекрытия зон обслуживания на одном рисунке позволяет видеть, что максимум графиков, описывающих состояние «все приборы заняты» для моделей без перекрытия и с перекрытием зон обслуживания, идентичен по абсолютной величине графикам, которые разнятся только по его положению на оси нагрузок.

Это позволяет заключить, что увеличение размерности системы, реализующей модель СРФМ с произвольным числом МСТ и АТ с перекрытием и без перекрытия зон обслуживания, можно скомпенсировать соответствующей вариацией нагрузки, поступающей на вход модели, приведенной на рис. 1. То есть необходи-

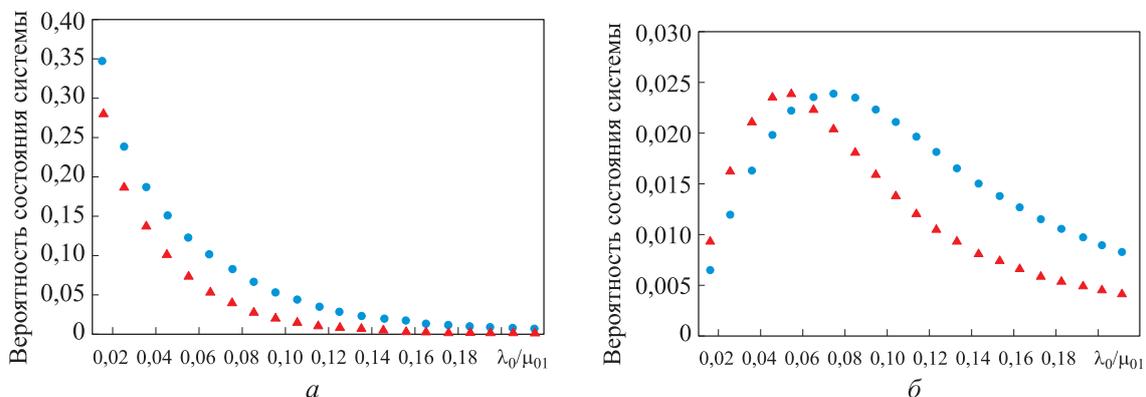


Рис. 7. Зависимости вероятности нахождения систем 2×2 (●) и 3×2 (▲) в состояниях «все приборы свободны» (а) и «все приборы заняты» (б) от нагрузки λ<sub>0</sub>/μ<sub>01</sub>

мость в модели, требующей непропорциональное количество вычислительных ресурсов, отпадает, и для практических расчетов вполне достаточно двухфазной двухосевой модели с четырьмя обслуживающими приборами.

## Выводы

1. В дополнение к уже исследованной НОСС без перекрытия зон обслуживания соседствующих СРФМ и к НОСС, где зоны обслуживания этих СРФМ перекрывали друг друга, рассмотрена НОСС, где СРФМ взаимодействует с произвольным числом соседних СРФМ. В качестве примера выбраны шесть соседних СРФМ, а баллистическое построение НОСС в целом представлено гексагональной схемой.

2. Для такой схемы построения отмечено, что при моделировании ее работы с помощью

математического аппарата теории массового обслуживания, размерность системы уравнений и соответствующей ей матрицы коэффициентов непропорционально велика и требует задействования чрезмерного объема вычислительных ресурсов. Однако, как показал анализ графических зависимостей ранее рассмотренных моделей с перекрытием и без перекрытия зон обслуживания, адекватной заменой модели с произвольным числом соседних СРФМ, является простейшая модель без перекрытия зон обслуживания при условии соответствующей вариации нагрузки, поступающей на вход указанной простейшей модели. Это позволяет существенно экономить ресурсы вычислительного оборудования при исследовании НОСС методом математического моделирования.

## Литература

- [1] Чепурнов П.А., Яковлев Р.С., Мишуков А.Н. Общая описательная модель низкоорбитальной многоспутниковой системы широкополосной связи ONEWEB. *Информация и космос*, 2022, № 3, с. 46–56.
- [2] Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink. *Системы управления, связи и безопасности*, 2022, № 4, с. 190–255, doi: <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-4-190-255>
- [3] Макаренко С.И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium. *Системы управления, связи и безопасности*, 2018, № 4, с. 1–34, doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2018-10401>
- [4] Пичугин С.Б., Бойкачев В.Н. Перспективы бортовой пакетной маршрутизации в низкоорбитальных сетях связи. *Радиопромышленность*, 2016, № 3, с. 71–74.
- [5] Wang C., Zhao Q., Guo J. et al. The contribution of intersatellite links to BDS-3 orbit determination: model refinement and comparisons. *Navig. J. Inst. Navig.*, 2019, vol. 66, no. 1, pp. 71–82, doi: <https://doi.org/10.1002/navi.295>
- [6] Savitri T., Kim Y., Jo S. et al. Satellite constellation orbit design optimization with combined genetic algorithm and semianalytical approach. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2017, vol. 2017, art. 1235692, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/1235692>
- [7] Vergoossen T., Loarte S., Bedington R. et al. Modelling of satellite constellations for trusted node QKD networks. *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 173, pp. 164–171, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.010>
- [8] Пичугин С.Б. Модели массового обслуживания с простейшими потоками для низкоорбитальной спутниковой системы. *XLV академические чтения по космонавтике*. Т. 3. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, с. 29–31.
- [9] Пичугин С.Б. Двухфазная модель многопролетной системы с дифференцированной пропускной способностью абонентских и межспутниковых трактов связи. *XLVII академические чтения по космонавтике*. Т. 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 364–367.
- [10] Пичугин С.Б. *Способ определения маршрута ретрансляции пакета сообщения и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2001532. Заявл. 31.01.1992, опубл. 15.10.1993.
- [11] Пичугин С.Б., Бурлаков М.В. *Спутниковая система связи «Кибол»*. Патент РФ 2033693. Заявл. 30.06.1992, опубл. 20.04.1995.

- [12] Пичугин С.Б. *Спутниковый ретранслятор «Аксай»*. Патент РФ 2097926. Заявл. 19.04.1994, 27.11.1997.
- [13] Пичугин С.Б. *Спутниковый ретранслятор*. Патент РФ 2673060. Заявл. 20.11.2017, опубл. 22.11.2018.
- [14] Пичугин С.Б. *Спутник-ретранслятор*. Патент РФ 2783202. Заявл. 09.03.2021, опубл. 09.11.2022.
- [15] Пичугин С.Б. *Спутник-ретранслятор*. Патент РФ 2793898. Заявл. 21.10.2022, опубл. 07.04.2023.

## References

- [1] Cherpurnov P.A., Yakovlev R.S., Mishukov A.N. General descriptive model of low-orbit multi-satellite broadband communication system ONEWEB. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space], 2022, no. 3, pp. 46–56. (In Russ.).
- [2] Pekhterev S.V., Makarenko S.I., Kovalskiy A.A. Descriptive model of Starlink satellite communication system. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2022, no. 4, pp. 190–255, doi: <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2022-4-190-255> (in Russ.).
- [3] Makarenko S.I. Descriptive model of Iridium satellite communication system. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2018, no. 4, pp. 1–34, doi: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2018-10401> (in Russ.).
- [4] Pichugin S.B., Boykachev V.N. Perspectives of on-board packet routing in low-orbit communication networks. *Radiopromyshlennost* [Radio Industry], 2016, no. 3, pp. 71–74. (In Russ.).
- [5] Wang C., Zhao Q., Guo J. et al. The contribution of intersatellite links to BDS-3 orbit determination: model refinement and comparisons. *Navig. J. Inst. Navig.*, 2019, vol. 66, no. 1, pp. 71–82, doi: <https://doi.org/10.1002/navi.295>
- [6] Savitri T., Kim Y., Jo S. et al. Satellite constellation orbit design optimization with combined genetic algorithm and semianalytical approach. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2017, vol. 2017, art. 1235692, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/1235692>
- [7] Vergoossen T., Loarte S., Bedington R. et al. Modelling of satellite constellations for trusted node QKD networks. *Acta Astronaut.*, 2020, vol. 173, pp. 164–171, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.010>
- [8] Pichugin S.B. [Queueing models with simple flows for low orbit satellite system]. *XLV akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. T. 3 [XLV Academic on Cosmonautics. Vol. 3]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021, pp. 29–31. (In Russ.).
- [9] Pichugin S.B. [Two-phase model of multi-hop system with differentiated capacity of its subscriber and inter-satellite links]. *XLVII akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. T. 2 [XLV Academic on Cosmonautics. Vol. 2]. Moskva, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2023, pp. 364–367. (In Russ.).
- [10] Pichugin S.B. *Sposob opredeleniya marshruta retranslyatsii paketa soobshcheniya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of determination of route of relaying of message package and device to implement it]. Patent RU 2001532. Appl. 31.01.1992, publ. 15.10.1993. (In Russ.).
- [11] Pichugin S.B., Burlakov M.V. *Sputnikovaya sistema svyazi «Kibol»* [Satellite communication system "Key ball"]. Patent RU 2033693. Appl. 30.06.1992, publ. 20.04.1995. (In Russ.).
- [12] Pichugin S.B. *Sputnikovyy retranslyator «Aksay»* [Satellite retransmitter]. Patent RU 2097926. Appl. 19.04.1994, 27.11.1997. (In Russ.).
- [13] Pichugin S.B. *Sputnikovyy retranslyator* [Satellite transmitter]. Patent RU 2673060. Appl. 20.11.2017, publ. 22.11.2018. (In Russ.).
- [14] Pichugin S.B. *Sputnik-retranslyator* [Repeater satellite]. Patent RU 2783202. Appl. 09.03.2021, publ. 09.11.2022. (In Russ.).
- [15] Pichugin S.B. *Sputnik-retranslyator* [Relay satellite]. Patent RU 2793898. Appl. 21.10.2022, publ. 07.04.2023. (In Russ.).

## Информация об авторе

**ПИЧУГИН Сергей Борисович** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (141070, Королев, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 4А, e-mail: sergey.pichugin@rsce.ru).

## Information about the author

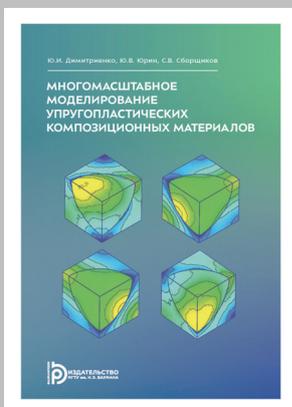
**PICHUGIN Sergey Borisovich** — Candidate of Science (Eng.), Leading Scientist. S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia” (141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 4A, e-mail: sergey.pichugin@rsce.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пичугин С.В. Обобщенная модель спутника-ретранслятора с функцией маршрутизации и межспутниковыми траекториями. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 2, с. 119–127.

### Please cite this article in English as:

Pichugin S.V. Generalized model of a relay satellite with the routing function and the inter-satellite paths. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 2, pp. 119–127.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Многомасштабное моделирование упругоэластических композиционных материалов»

**Авторы: Ю.И. Димитриенко, Ю.В. Юрин,  
С.В. Сборщиков**

Изложены основы многомасштабного моделирования упругоэластических композиционных материалов с использованием метода асимптотического осреднения (метода гомогенизации). Приведен алгоритм метода асимптотического осреднения периодических упругоэластических композиционных материалов при циклических нагружениях. Рассмотрена теория построения аналитических эффективных определяющих соотношений упругоэластических композиционных материалов при циклических нагружениях с использованием метода асимптотического осреднения. Предложены теории анизотропных упругоэластических сред при циклических нагружениях для случая квазиизотропии, трансверсальной изотропии и ортотропии.

Для студентов направления подготовки «Математика и компьютерные науки», изучающих дисциплины «Основы механики композитов», «Асимптотические методы в механике», «Многомасштабное моделирование конструкций из композиционных материалов», а также для студентов и аспирантов машиностроительных специальностей и специалистов, занимающихся моделированием композиционных материалов и расчетом конструкций из них.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>