

УДК 004.722

doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-61-70

Модели массового обслуживания с простейшими потоками для низкоорбитальной спутниковой системы

С.Б. Пичугин

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

Simplest Flow Queuing Models for LEO Satellite System

S.B. Pichugin

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

Показана актуальность работы, связанная с активным развертыванием низкоорбитальных систем связи и расширением исследований в области соответствующих спутниковых систем. Рассмотрена перспективная низкоорбитальная система связи на базе спутников-ретрансляторов с функцией маршрутизатора (СРФМ) пакетов сообщений и реализацией функций протокола BGP и функционала AAA на наземной станции. Для оценки характеристик межспутниковых трактов СРФМ создан сценарий поступления пакетов сообщений от группы межспутниковых трактов к одному абонентскому тракту. Разработаны соответствующие аналитические модели с применением математического аппарата систем массового обслуживания с простейшими потоками заявок и экспоненциальным распределением времени обслуживания. Спрогнозированы характеристики СРФМ перспективной низкоорбитальной системы связи. Предложено усложнить математический аппарат аналитических моделей для учета динамики перемещений и отказов СРФМ в низкоорбитальной системе связи.

Ключевые слова: низкоорбитальная система связи, спутник-ретранслятор, коммутация пакета сообщений, простейший поток заявок, экспоненциальный закон

The relevance of the work is associated with the active deployment of low-orbit communication systems and the expansion of research in the field of corresponding satellite systems. A promising low-orbit communication system based on relay satellites with the function (RSRF) of routing message packets is considered. The low earth orbit communications systems use the BGP protocol and the AAA functionality at the ground station. For assessing the characteristics of RSRF inter-satellite paths, a scenario was created for the message packets arrival from a group of inter-satellite paths to one subscriber path. The corresponding analytical models have been developed using the mathematical apparatus of queuing systems with the simplest flows of requests and exponential distribution of the service time. The RSRF characteristics of a promising low-orbit communication system are predicted. It is proposed to make the mathematical apparatus of analytical models more complicated to take into account the dynamics of displacements and failures of the RSRF in a low-orbit communication system.

Keywords: low orbit communications system, relay satellite, message packet switching, simplest flow of requests, exponential law

По сравнению с наземными системами сотовой связи, низкоорбитальные системы связи (НОСС) характеризуются динамикой перемещений и отказами спутников-ретрансляторов, входящих в их состав, а также большими ограничениями на массогабаритные показатели и энергопотребление бортовой аппаратуры спутников-ретрансляторов. Тем не менее поставлена задача сделать НОСС конкурентоспособными системам сотовой связи.

В разрабатываемых на сегодняшний день широкополосных НОСС Starlink и One Web планируется испытать межспутниковые тракты (МСТ), чтобы в соответствии с патентом Krebs–Google [1] обеспечить доставку сообщений от абонента к абоненту в любую точку мира за время, сравнимое с такой доставкой по системе сотовой связи.

В системах Starlink и One Web предполагается, что доставка сообщений будет осуществляться в соответствии с протоколом BGP (Border Gateway Protocol) [2, 3], который подразумевает коррекцию бортовых таблиц маршрутизации спутников-ретрансляторов при любом изменении конфигурации сети [4, 5]. Это усложняет и удорожает спутники и НОСС в целом.

Таким образом, формулируются научная и техническая задачи, связанные с необходимостью предложить и исследовать математически технические решения, улучшающие доставку сообщений в НОСС от абонента к абоненту в плане надежности и сокращения времени.

Цель работы — предложить и исследовать математически НОСС с улучшенными, по сравнению с системами Starlink и One Web, характеристиками.

Технические решения для НОСС. В перспективной НОСС [6–8] функция маршрутизации сообщений будет возложена на бортовую аппаратуру ее спутников-ретрансляторов с функцией маршрутизатора (СРФМ), но реализация протокола BGP, а также функции опознавания абонента, выделения ему ресурсов и тарификации предоставленных абоненту услуг, т. е. функции спектра Authorization — Authentication — Accounting (AAA), будут перенесены на наземную станцию или на соединенную с ней станцию спутниковой связи [2, 3].

Это, с одной стороны, позволяет доставлять абонентские сообщения по НОСС (по МСТ), минуя наземные станции, до СРФМ над районом, в котором находится абонент-получатель (далее получатель) сообщения, и обеспечивать время доставки, как в системах сотовой связи, а с другой — обращаться отправителю к наземной станции только один раз (до начала обмена с вызываемым абонентом), чтобы получить данные о том, как доставить сообщение получателю.

Процесс доставки сообщений в перспективной НОСС заключается в следующем. Абонент-отправитель (далее отправитель) с терминала абонента обращается служебным сообщением через СРФМ к земной станции — сайту с базой данных абонентов и функционалом AAA. Этот сайт сообщает ему код для отправки пакетов сообщений (ПС) получателю, после чего последний формирует ПС (последовательность ПС) с заголовками для доставки получателю.

В заголовке содержатся данные о местонахождении получателя (X_R, Y_R, Z_R). На борту СРФМ эти данные считываются, и ПС отправляется соседнему СРФМ, пока не достигнут СРФМ над зоной получателя, и доставляется

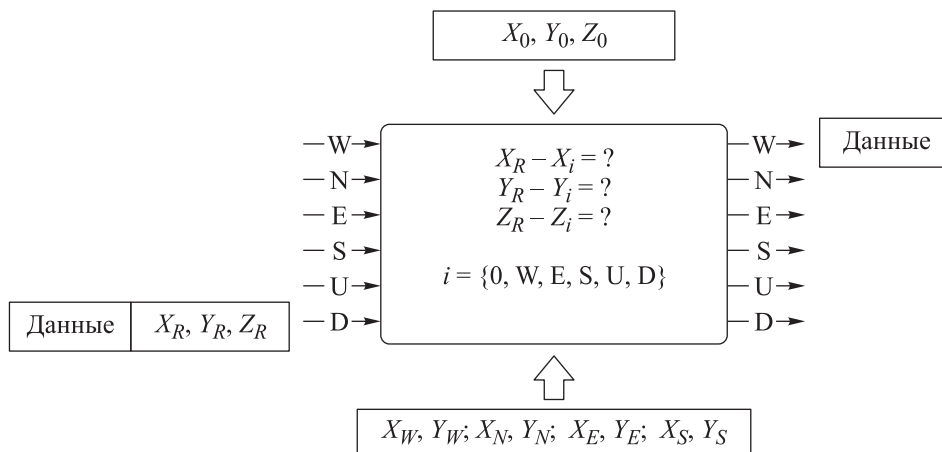


Рис. 1. Схема коммутации ПС на борту СРФМ перспективной НОСС

последнему. Число зон соответствует числу СРФМ [7].

Схема коммутации пакета сообщений получателю на борту СРФМ перспективной НОСС приведена на рис. 1.

Адресация ПС соседнему СРФМ в перспективной НОСС осуществляется по принципу «выбрать ближайшего к получателю». СРФМ определяет свои координаты (зону с координатами X_0, Y_0, Z_0) и получает координаты (номера зон) соседей с запада (W) X_W, Y_W , севера (N) X_N, Y_N , востока (E) X_E, Y_E и юга (S) X_S, Y_S . В заголов-

ке ПС от отправителя содержатся данные о координатах и расположении абонента сверху (U) или снизу (D) от СРФМ. Символ «0» соответствует отказу СРФМ.

Для доставки ПС получателю предложен ряд технических решений. В работах [6, 7] сформулированы два технических решения, обеспечивающих коммутацию ПС головным битом заголовка и коммутацию ПС с чтением части заголовка. Решения позволяют снизить стоимость СРФМ и его обслуживания, обеспечить массовость предоставления услуг НОСС и, соответ-

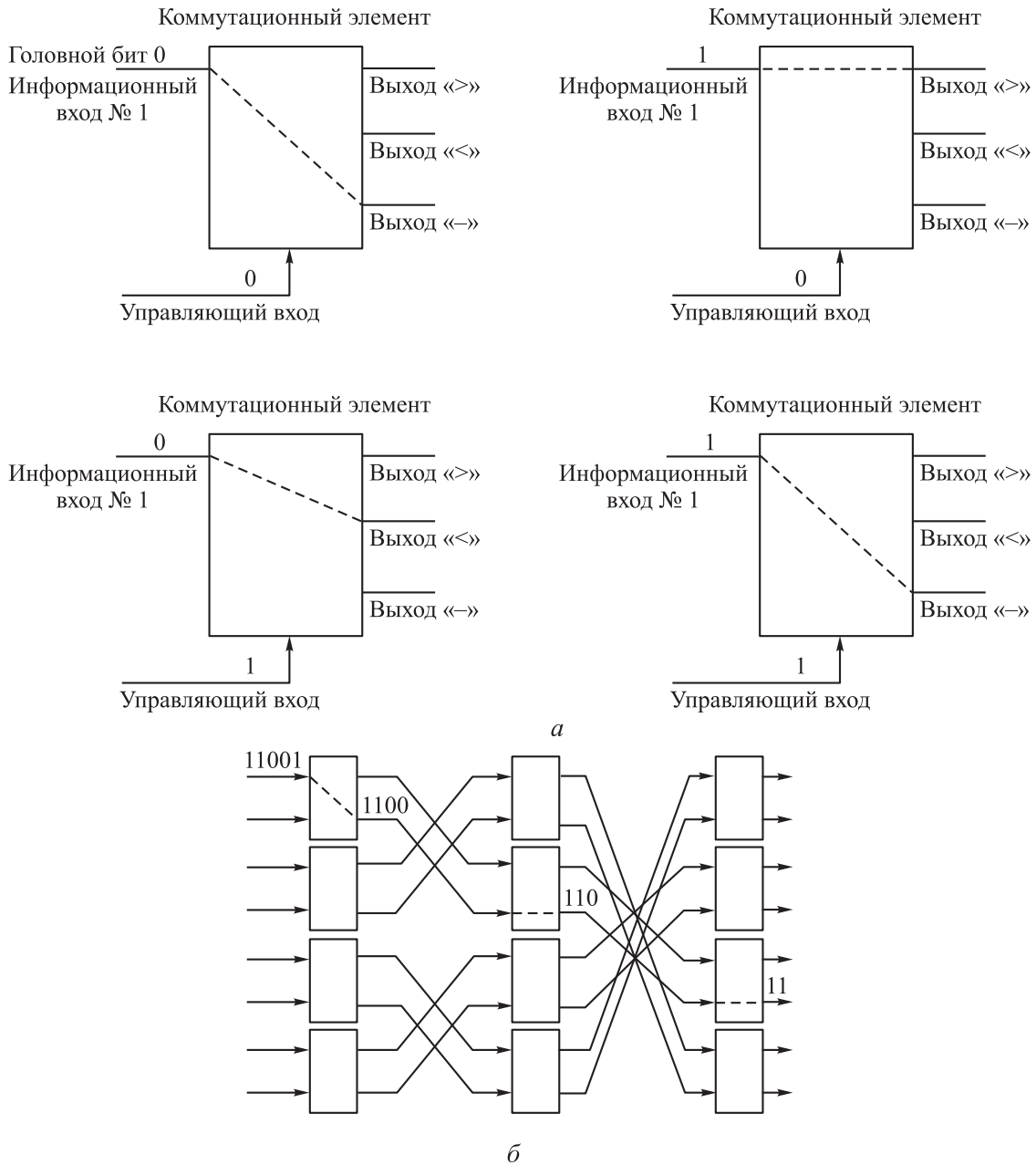


Рис. 2. Схемы коммутации ПС головным битом заголовка, с учетом динамики НОСС (а) и без учета динамики сети связи (б)

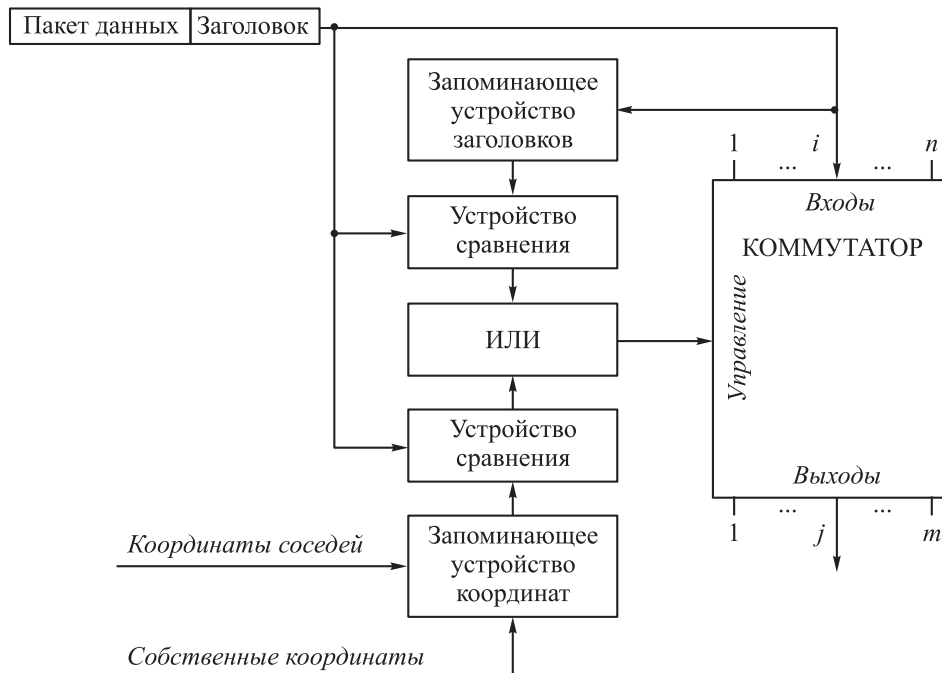


Рис. 3. Схема коммутации ПС с частичным чтением заголовка при выборе направления ретрансляции

ственно, приблизить услуги НОСС по цене, показателям скорости передачи и времени доставки информации к их наземным альтернативам.

Схема коммутации ПС головным битом заголовка приведена на рис. 2, а.

При коммутации ПС головным битом следует учитывать динамику НОСС, связанную с непрерывным перемещением абонентов и СРФМ, отказами или перегрузками СРФМ и т. д.

Предложенное в работе [3] решение учитывает такую динамику: каждый коммутационный элемент имеет управляющий вход и три выхода (больше, меньше или равно), позволяющие синхронизировать изменения коммутации в СРФМ с изменениями в НОСС.

Для сравнения на рис. 2, б приведена схема фрагмента коммутатора статичной наземной сети связи, где битовая последовательность с одного из двух входов поступает на один из двух выходов в строгом соответствии со значением головного бита. Чтобы учесть динамику, в эту схему приходится вводить мультиплексор, что увеличивает ее стоимость, массу, габаритные размеры и т. д.

Решение для коммутации ПС с частичным чтением заголовка при выборе направления ретрансляции приведено на рис. 3. Оно предполагает не читать всю битовую последовательность заголовка при коммутации, учитывая лишь ее, что еще больше ускоряет прохождение

ПС с входа на выход коммутатора. Такое решение может использовать младшие биты адреса получателя, отправляя ПС на нужный выход, не дожидаясь поступления оставшейся части.

При частичном чтении заголовка необходимо запомнить предыдущий в соответствующем устройстве и сравнивать его биты с битами следующего ПС. Динамика сети такого решения отслеживается учетом собственных координат СРФМ и его соседей через устройство сравнения.

Благодаря обработке всего одного головного бита или части заголовка предложенные решения позволяют существенно сократить время обслуживания при коммутации ПС и могут быть применены в бортовых коммутаторах СРФМ с МСТ радиодиапазона или СРФМ с МСТ оптического диапазона.

При этом в целях упрощения терминалов абонентов и условий прохождения сигналов абонентский тракт перспективнее реализовать в радиодиапазоне. Для оптических МСТ следует учесть проблемы, связанные с поиском и удержанием соседнего СРФМ в оптическом луче [8].

Основные характеристики. Характеристики доставки ПС зависят от числа связей СРФМ с соседями, и, следовательно, с характеристиками баллистического построения НОСС, в которой эти решения реализованы. Рассмотрена НОСС в двух вариантах баллистического построения:

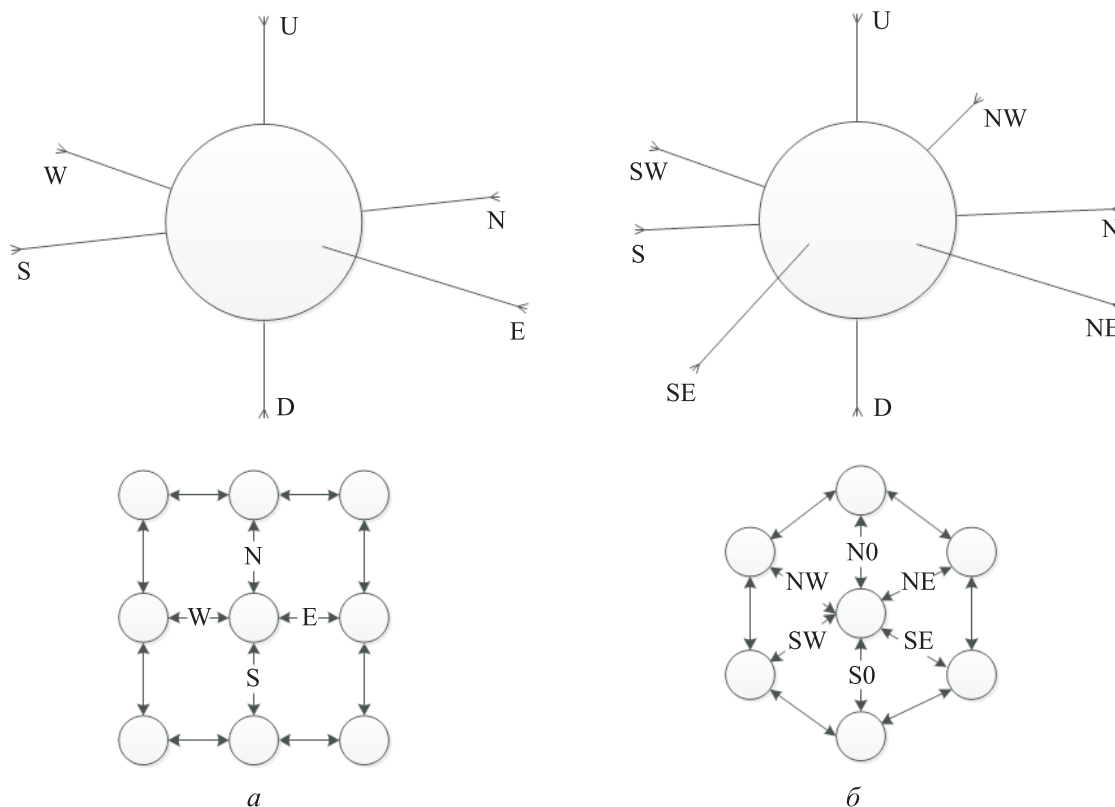


Рис. 4. Ортогональная (а) и гексагональная (б) схемы баллистического построения НОСС

с ортогональной и гексагональной структурами (рис. 4).

В НОСС с ортогональной схемой баллистического построения СРФМ (рис. 4, а) взаимодействует с четырьмя соседями и по двум направлениям связи (вверх и вниз) с абонентами (направления W, N, E, S, U, D). При гексагональной схеме (рис. 4, б) взаимодействие осуществляется по восьми направлениям — шести по МСТ с соседями (направления S, N, SW, NW, SE, NE) и двум — с абонентами (направления U, D).

Для исследования НОСС разработаны аналитические модели, позволяющие при заданных допущениях оценивать характеристики НОСС.

Допуская, что одно направление — входящее, а все остальные — исходящие, определено, что модель системы массового обслуживания (СМО) для ортогональной схемы включает в себя один входящий поток и пять обслуживающих приборов, а для гексагональной схемы — один входящий поток и семь обслуживающих приборов.

Принято также, что входящий поток является простейшим с параметром λ , а время обслуживания прибора — экспоненциально распределенным с параметром μ , одинаковым для всех приборов.

В символике Кендалла [7–10] СМО для ортогональной схемы обозначены как $\{\lambda, \mu, 5, 0\}$, а СМО для гексагональной схемы — $\{\lambda, \mu, 7, 0\}$.

Модели позволяют оценивать характеристики СРФМ из состава перспективной НОСС, в том числе: коэффициент простоя, коэффициент загрузки, вероятность поступления произвольного числа заявок, вероятность отказа, пропускную способность, среднее число заявок в СМО и среднее время обслуживания заявки.

В каждой СМО задано, что поток заявок — простейший с параметром λ , а время обслуживания распределено по экспоненциальному закону с параметром μ .

Число приборов в СМО $\{\lambda, \mu, 5, 0\}$ составляет 5, а длина очереди — 0, так как в этой системе очередь отсутствует. Вывод выражений для обеих СМО аналогичен, поэтому приведем рассуждения только для случая пятиканальной СМО.

Введем следующие обозначения: S_0 — состояние СМО, при котором в системе нет заявок; S_1, S_2, S_3, S_4 — состояние СМО, при котором в систему поступают одна, две, три и четыре заявки соответственно; S_5 — состояние СМО, при котором в системе есть пять заявок и происходит ее потеря.

Построим систему уравнений Колмогорова:

$$\begin{aligned} -\lambda p_0 + \mu p_1 &= 0; \\ -\lambda p_0 - \mu p_1 + \lambda p_1 + 2\mu p_2 &= 0; \\ -\lambda p_1 - 2\mu p_2 + \lambda p_2 + 3\mu p_3 &= 0; \\ -\lambda p_2 - 3\mu p_3 + \lambda p_3 + 4\mu p_4 &= 0; \\ -\lambda p_3 - 4\mu p_4 + \lambda p_4 + 5\mu p_5 &= 0; \\ p_0 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 &= 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где λ — интенсивность потока заявок; p_0, p_1, p_2, p_3 и p_4 — вероятность пребывания СМО в состоянии S_0, S_1, S_2, S_3 и S_4 соответственно; μ — параметр времени обслуживания; p_5 — вероятность пребывания СМО в состоянии S_5 (вероятность отказа $p_{\text{отк}}$), $p_5 = p_{\text{отк}}$.

Решение системы уравнений Колмогорова. Выражая вероятности p_1, p_2, p_3, p_4 и $p_{\text{отк}}$ для каждого уравнения системы (1) через p_0 , получаем

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 \frac{1}{1!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^1; & p_2 &= p_0 \frac{1}{2!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2; \\ p_3 &= p_0 \frac{1}{3!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^3; & p_4 &= p_0 \frac{1}{4!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^4; \\ p_{\text{отк}} &= p_0 \frac{1}{5!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^5. \end{aligned} \quad (2)$$

В обобщенном виде аналитические выражения (2) имеют вид

$$p_k = p_0 \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k; \quad (3)$$

$$p_{\text{отк}} = p_0 \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n, \quad (4)$$

где k — номер текущего состояния СМО; n — число каналов в СМО.

С учетом нулевой очереди и применения предельного перехода в формуле полной вероятности из шестого уравнения системы (1) запишем следующие соотношения

• для пятиканальной СМО

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \right]}; \quad (5)$$

$$p_{\text{отк}} = \frac{\frac{1}{5!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^5}{1 + \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \right]}; \quad (6)$$

• для семиканальной СМО

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^7 \left[\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \right]}; \quad (7)$$

$$p_{\text{отк}} = \frac{\frac{1}{7!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^7}{1 + \sum_{i=1}^7 \left[\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i \right]}. \quad (8)$$

Таким образом, уравнения (2), (5) и (6) являются уравнениями Колмогорова для пятиканальной СМО с отказами, а уравнения (7) и (8) — уравнениями Колмогорова для семиканальной СМО с отказами.

Введем следующие обозначения основных характеристик многоканальной СМО с отказами: $p_{\text{пр}}$ — коэффициент простоя; $p_{\text{загр}}$ — коэффициент загрузки; $p_{\text{отк}}$ — вероятность отказа; A — пропускная способность; $n_{\text{ср}}$ — среднее число заявок в СМО; $t_{\text{обсл}}$ — среднее время обслуживания заявки.

Для расчета основных характеристик воспользуемся следующими аналитическими соотношениями:

$$p_{\text{пр}} = p_0; \quad (9)$$

$$p_{\text{загр}} = 1 - p_{\text{пр}}; \quad (10)$$

$$p_{\text{отк}} = \frac{\frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{1 + \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \right]}; \quad (11)$$

$$A = \lambda(1 - p_{\text{отк}}); \quad (12)$$

$$n_{\text{ср}} = \sum_{k=1}^n (kp_k); \quad (13)$$

$$t_{\text{обсл}} = \frac{n_{\text{ср}}}{\lambda}. \quad (14)$$

На базе соотношений (2)–(14) рассчитаем характеристики пяти- и семиканальной СМО с отказами. Исходными данными для моделирования многоканальной СМО являлись следующие параметры: число каналов в пятиканальной СМО $n = 5$; число каналов в семиканальной СМО $n = 7$; длина очереди $m = 0$; интенсивность потока заявок $\lambda = 0 \dots 1,5$ заявок в секунду (заяв/с); параметр времени обслуживания $\mu = 1$ заяв/с.

Полученные выражения для расчета параметров пяти- и семиканальной СМО при отсутствии очереди приведены в таблице.

Выражения для расчета параметров пяти- и семиканальной СМО при отсутствии очереди

Параметр	Формула для расчета параметра	
	пятиканальной СМО	семиканальной СМО
Коэффициент простоя, %	$p_{пр} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{5!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i \right]}$	$p_{пр} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^7 \left[\frac{1}{7!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i \right]}$
Коэффициент загрузки	$p_{загр} = 1 - p_{пр}$	
Вероятность поступления одной заявки, %	$p_1 = p_{пр} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)$	
Вероятность поступления двух заявок, %	$p_2 = p_{пр} \frac{1}{2!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2$	
Вероятность поступления трех заявок, %	$p_3 = p_{пр} \frac{1}{3!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^3$	
Вероятность поступления четырех заявок, %	$p_4 = p_{пр} \frac{1}{4!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^4$	
Вероятность отказа*, %	$p_{отк} = \frac{\frac{1}{5!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^5}{1 + \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{5!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i \right]}$	$p_{отк} = \frac{\frac{1}{7!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^7}{1 + \sum_{i=1}^7 \left[\frac{1}{7!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i \right]}$
Пропускная способность, заяв.	$A = \lambda(1 - p_{отк})$	
Среднее число заявок в СМО, заяв.	$n_{ср} = \sum_{i=1}^5 (ip_i)$	$n_{ср} = \sum_{i=1}^7 (ip_i)$
Среднее время обслуживания заявки, с	$t_{обсл} = n_{ср} / \lambda$	
* В соответствии с государственным стандартом [15] порог вероятности отказа назначен равным 0,3 % при $\lambda/\mu < 0,33$.		

На базе выражений, указанных в таблице, построены графические зависимости коэффициента простоя $p_{пр}$, коэффициента загрузки $p_{загр}$, вероятности поступления одной заявки p_1 и вероятности отказа $p_{отк}$ от отношения λ/μ для пяти- и семиканальной СМО с отказами.

Из рис. 5 следует, что увеличение вдвое числа межспутниковых связей с ретрансляторами в соседних плоскостях орбит при одном и том же значении потерь данных (0,3 % согласно государственному стандарту [15]) обеспечивает увеличение нагрузки на сеть в 1,42 раза — с 33 до 47 %. Это позволяет сделать вывод о том, что

в плане обслуживания поступающей нагрузки гексагональная схема построения в 1,42 раза эффективнее, чем ортогональная.

Выраженный максимум кривой вероятности поступления одной заявки в СМО на рис. 5, объясняется тем, что с ростом интенсивности поступления заявок λ возрастает вероятность поступления в систему на интервале обслуживания более чем одной заявки.

В связи с тем, что выведенные выражения получены на основе допущений и ограничений, прежде всего о том, что потоки поступающих в СМО заявок являются простейшими, предполагается в дальнейших исследованиях исполь-

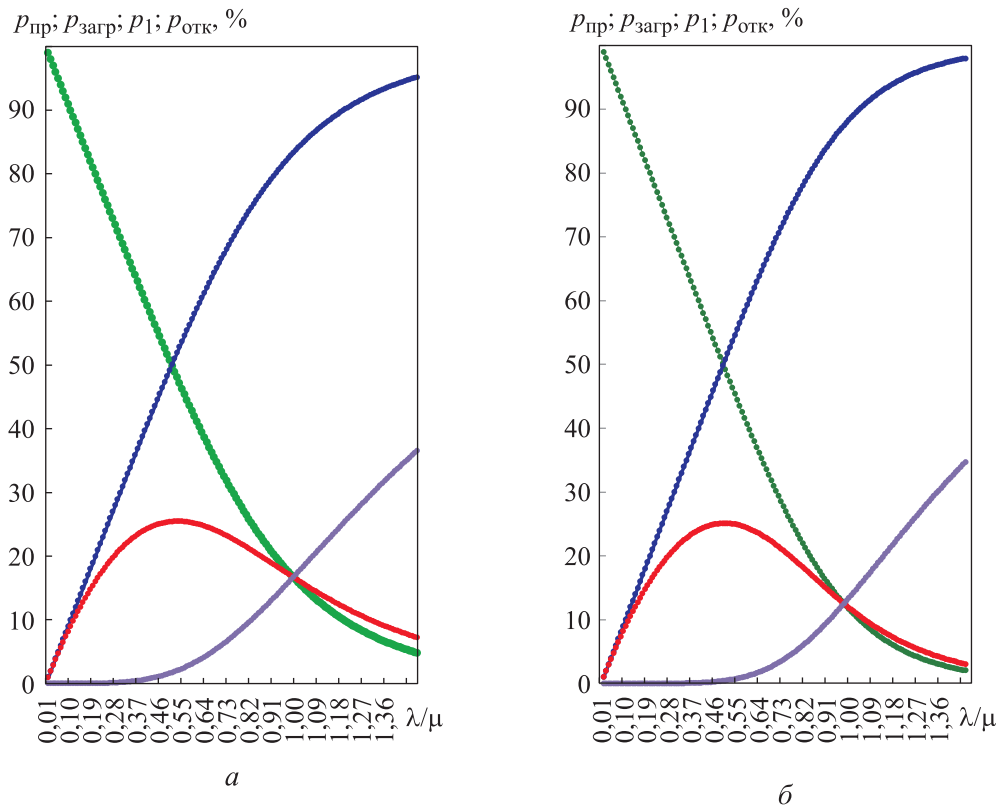


Рис. 5. Зависимости коэффициента простоя $p_{пр}$ (—), коэффициента загрузки $p_{загр}$ (—), вероятности поступления одной заявки p_1 (—) и вероятности отказа $p_{отк}$ (—) от отношения λ/μ для пяти- (а) и семиканальной (б) СМО с отказами

зовать модели [16], более точно характеризующие реальное функционирование НОСС.

Это связано с тем, что в реальных сетях вариация λ во времени велика. Кроме того, существенна корреляция нагрузок отдельных абонентов, т. е. их передачи зачастую взаимобусловлены. Таким образом, в дальнейшем исследование технических решений, приведенных в данной работе, будет проведено с привлечением более сложных моделей.

Выводы

1. Рассмотрена НОСС в двух вариантах баллистического построения — с ортогональной и гексагональной структурами. Важной особенностью такой НОСС является способность СРФМ общаться с ближайшими спутниками в соседних орбитальных плоскостях. Соседние СРФМ связаны МСТ, и топология этих трактов определяет название варианта баллистического построения.

2. Приведены технические решения, позволяющие путем реализации протокола BGP и функций AAA на наземной станции, а также

чтения части заголовка или только головного бита, сохранить скорость доставки сообщений, снизить стоимость СРФМ и его обслуживания, обеспечить массовость предоставления услуг НОСС, тем самым создав преимущества НОСС перед наземными сетями связи.

3. При исследовании штатного сценария работы рассматриваемой НОСС получены аналитические выражения для случая простейшего потока заявок без последствия в СМО с потерей заявок и в СМО без ограничения очереди и с ограниченной очередью.

4. Приведены результаты расчетов на основе выведенных выражений. Сравнение полученных результатов с требованиями стандартов по надежности доставки информации позволяет назначать соотношение между параметром времени обслуживания канала связи в НОСС и интенсивностью поступления заявок на него.

5. Отмечено, что при одинаковых показателях надежности доставки гексагональная структура баллистического построения НОСС позволяет существенно (в 1,42 раза) увеличить объем обслуживаемой нагрузки по сравнению с таковым для ортогональной структуры.

Литература

- [1] Бойкачев В.Н., Пичугин С.Б. Перспективы бортовой пакетной маршрутизации в низкоорбитальных сетях связи. *Радиопромышленность*, 2016, № 3, с. 71–74, doi: <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2016-3-71-74>
- [2] Адамс Б., Ченг Э., Фокс Т. и др. *Руководство по междоменной многоадресной маршрутизации*. Москва, Вильямс, 2004. 320 с.
- [3] Таненбаум Э., Уэзеролл Д. *Компьютерные сети*. Санкт-Петербург, Питер, 2019. 960 с.
- [4] Семенов Ю.А. *Алгоритмы телекоммуникационных сетей. Ч. 2. Протоколы и алгоритмы маршрутизации в Internet*. Москва, Бином. Лаборатория знаний, 2007. 832 с.
- [5] Хелеби С., Мак-Ферсон Д. *Принципы маршрутизации в Internet*. Москва, Вильямс, 2001. 448 с.
- [6] 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.
- [7] Пичугин С.Б. *Спутниковый ретранслятор «Аксай»*. Патент РФ 2097926. Заявл. 19.04.1994, опубл. 27.11.1997.
- [8] Пичугин С.Б. *Спутниковый ретранслятор*. Патент РФ 2673060. Заявл. 20.11.2017, опубл. 22.11.2018.
- [9] Бертсекас Д., Галлагер Р. *Сети передачи данных*. Москва, Мир, 1989. 544 с.
- [10] Назаров А.А., Терпугов А.Ф. *Теория массового обслуживания*. Томск, НТЛ, 2010. 228 с.
- [11] Назаров А.А., Терпугов А.Ф. *Теория вероятностей и случайных процессов*. Томск, НТЛ, 2010. 204 с.
- [12] Вентцель Е.С. *Теория вероятностей*. Москва, Юстиция, 2018. 658 с.
- [13] Сучилин В.А. Предельно достижимая скорость одноканальной передачи данных. *Современные научные исследования и инновации*, 2017, № 9. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/09/84289>
- [14] Абилов А.В. Сети связи и системы коммутации. *old.istu.ru: веб-сайт*. URL: <http://old.istu.ru/files/material-static/1350/sssk-lec-10.pdf> (дата обращения: 25.12.2019).
- [15] ГОСТ Р ИСО 13053-1-2015. *Статистические методы. Количественные методы улучшения процессов «Шесть сигм». Ч. 1. Методология DMAIC*. Москва, Стандартинформ, 2016. 46 с.
- [16] Вишнеvский В.М., Дудин А.Н., Клименок В.И. *Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях*. Москва, Техносфера, 2018. 564 с.

References

- [1] Boykachev V.N., Pichugin S.B. Perspectives of on-board packet routing in low-orbit communication networks. *Radiopromyshlennost'* [Radio industry (Russia)], 2016, no. 3, pp. 71–74, doi: <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2016-3-71-74> (in Russ.).
- [2] Adams B., Cheng E., Fox T., et al. *Interdomain multicast solutions guide*. Cisco systems, 2002. (Russ. ed.: *Rukovodstvo po mezhdomennoy mnogoadresatnoy marshrutizatsii*. Moscow, Vil'yams Publ., 2004. 320 p.)
- [3] Tanenbaum A. *Computer networks*. Pearson, 2011. 962 p. (Russ. ed.: *Komp'yuternye seti*. Sankt-Petersburg, Piter Publ., 2019. 960 p.)
- [4] Semenov Yu.A. *Algoritmy telekommunikatsionnykh setey. Ch. 2. Protokoly i algoritmy marshrutizatsii v Internet* [Algorithms of telecommunication networks. P. 2. Routing protocols and algorithms of the Internet]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2007. 832 p. (In Russ.).
- [5] Halabi S., McPherson D. *Internet routing architectures*, Cisco Press, 2001. 528 p. (Russ. ed.: *Printsiipy marshrutizatsii v Internet*. Moscow, Vil'yams Publ., 2001. 448 p.)
- [6] Pichugin S.B. *Sposob opredeleniya marshruta retranslyatsii paketa soobshcheniya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for determining of re-broadcast rout of the burst and device for its realisation]. Patent RU 2001532. Appl. 31.01.1992, publ. 15.10.1993. (In Russ.).

- [7] Pichugin S.B. *Sputnikovyy retranslyator «Aksay»* ["Aksay" satellite transmitter]. Patent RU 2097926. Appl. 19.04.1994, publ. 27.11.1997. (In Russ.).
- [8] Pichugin S.B. *Sputnikovyy retranslyator* [Satellite transmitter]. Patent RU 2673060. Appl. 20.11.2017, publ. 22.11.2018. (In Russ.).
- [9] Bertsekas D.P., Gallager R.G. *Data networks*. Prentice Hall, 1992. 576 p. (Russ. ed.: *Seti peredachi dannykh*. Moscow, Mir Publ., 1989. 544 p.)
- [10] Nazarov A.A., Terpugov A.F. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Theory of waiting lines]. Tomsk, HTL Publ., 2010. 228 p. (In Russ.).
- [11] Nazarov A.A., Terpugov A.F. *Teoriya veroyatnostey i sluchaynykh protsessov* [Theory of probability and stochastic processes]. Tomsk, NTL Publ., 2010. 204 p. (In Russ.).
- [12] Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Yustitsiya Publ., 2018. 658 p. (In Russ.).
- [13] Suchilin V.A. Maximum achievable speed for one-channel data transmission. *Sovremennyye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific researches and innovations], 2017, no. 9. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2017/09/84289> (in Russ.).
- [14] Abilov A.V. *Seti svyazi i sistemy kommutatsii* [Communication networks and commutation systems]. *old.istu.ru: website*. URL: <http://old.istu.ru/files/material-static/1350/sssk-lec-10.pdf> (accessed: 25.12.2019).
- [15] GOST R ISO 13053-1-2015. *Statisticheskie metody. Kolichestvennyye metody uluchsheniya protsessov «Shest' sigm»*. Ch. 1. *Metodologiya DMAIC* [State standard GOST R ISO 13053-1-2015. Statistical methods. Quantitative methods in process improvement "Six Sigma". Part 1. DMAIC methodology]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 46 p. (In Russ.).
- [16] Vishnevskiy V.M., Dudin A.N., Klimenok V.I. *Stokhasticheskie sistemy s korrelirovannymi potokami. Teoriya i primeneniye v telekommunikatsionnykh setyakh* [Stochastic systems with correlated flows. Theory and application in telecom systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018. 564 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 30.06.2021

Информация об авторе

Пичугин Сергей Борисович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (141070, Королёв, 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. PAO "S.P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia" (141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Lenin Str., Bldg. 4A. e-mail: sergey.pichugin@rsce.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пичугин С.Б. Модели массового обслуживания с простейшими потоками для низкоорбитальной спутниковой системы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 1, с. 61–70, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-61-70

Please cite this article in English as:

Pichugin S.B. Simplest Flow Queuing Models for LEO Satellite System. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 1, pp. 61–70, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-61-70