

УДК: 621.396

DOI: 10.53816/23061456_2022_3-4_9

**МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ**
**METHOD OF DISTRIBUTION OF THE TIME-FREQUENCY RESOURCE
OF THE SATELLITE COMMUNICATION NETWORK**

*Канд. техн. наук Е.С. Абазина, канд. техн. наук С.Х. Зиннуров, канд. техн. наук К.Н. Лукинов,
канд. техн. наук В.Е. Федосеев*

Ph.D. E.S. Abazina, Ph.D. S.H. Zinnurov, Ph.D. K.N. Lukinov, Ph.D. V.E. Fedoseev

ВКА им. А.Ф. Можайского

В статье предложена методика распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи. В условиях постоянного увеличения абонентской базы систем спутниковой связи и принципиальной ограниченности частотно-временного ресурса сети спутниковой связи необходимо оперативное распределение радиоресурса. Решением представленной проблемной ситуации является совершенствование методов планирования и распределения частотно-временного ресурса с целью повышения эффективности его использования. Предлагаемая авторами методика отличается от известных разделением каналов спутниковой связи на основные — планируемые в соответствии со схемой организации связи и дополнительные — предоставляемые в случае увеличения интенсивности нагрузки по средствам использования канала управления. Предложенная методика позволяет повысить эффективность использования ограниченного радиоресурса сети спутниковой связи в ситуациях, когда происходит увеличение интенсивности передаваемого трафика или количества абонентов.

Ключевые слова: система спутниковой связи, частотно-временной ресурс, земная станция, канал связи, распределение радиоресурса.

The article proposes a method for distributing the time-frequency resource of a satellite communication network. In the conditions of a constant increase in the subscriber base of satellite communication systems and a fundamental limitation of the time-frequency resource of the satellite communication network, an operational distribution of the radio resource is necessary. The solution to the presented problem situation is to improve the methods of planning and distributing the time-frequency resource in order to increase the efficiency of its use. The method proposed by the authors differs from the known ones by dividing satellite communication channels into the main ones — planned in accordance with the communication organization scheme and additional ones — provided in case of an increase in the load intensity through the use of a control channel. The proposed method makes it possible to increase the efficiency of using the limited radio resource of the satellite communication network in situations where an increase in the intensity of transmitted traffic or the number of subscribers is predicted.

Keywords: satellite communication system, time-frequency resource, earth station, communication channel, radioresource distribution.

Введение

Анализ основных направлений военно-технического развития Российской Федерации на ближайшую перспективу [1] свидетельствует о принятии на вооружение новых образцов техники, требующих управления по беспроводным и спутниковым каналам связи. Вводимые в эксплуатацию средства вооружения и военной техники по отношению к системе спутниковой связи являются дополнительными абонентами, что приводит к значительному росту загрузки сети спутниковой связи (ССС). Распределение частотно-временного ресурса (ЧВР) между земными станциями ССС в настоящее время осуществляется в рамках суточного планирования по заявкам в центр управления связью (ЦУС), который осуществляет распределение частотно-временного ресурса равномерно между всеми земными станциями (ЗС) с профицитом, необходимым для обеспечения гарантированной передачи данных в случае увеличения числа абонентов и обеспечения требуемого качества передачи. Статистические данные показывают, что частотно-временной ресурс между земными станциями ССС выделяется под пиковые (максимальные) значения информационной нагрузки с запасом в 15–20% [2–4]. Анализ загрузки типовой спутниковой радиолинии с общей пропускной способностью 2 Мбит/с, представленный на рис. 1, свидетельствует о том, что 80% времени частотно-временной ресурс используется не более чем на 15–20%. Это приводит к недоиспользованию частотно-временного ресурса, при его общем дефиците.

При подключении дополнительных абонентов и распределении ограниченного частотно-временного ресурса ССС с учетом потреб-

ностей абонентов в соответствии с принятым принципом очевиден дефицит пропускной способности. Возможным решением представленной проблемной ситуации является совершенствование методов планирования и распределения частотно-временного ресурса с целью повышения эффективности его использования.

Задача распределения частотно-временного ресурса ССС заключается в нахождении необходимого частотного диапазона для каждой ЗС, а также продолжительности и периода сеанса связи через космический аппарат связи (КАС) с учетом ограничений, накладываемых на процесс планирования (рис. 2).

Вместе с тем некоторые виды трафика, например голосовой, потоковое видео, видеоконференцсвязь, имеют пульсирующий характер, который выражается в резком возрастании скорости передачи информации, значительно отличающейся от средней скорости передачи трафика. Такая ситуация является наиболее типичной при увеличении динамики сцен видеоряда (движение, взрывы, частая смена фона и т.д.), а также речевого трафика, где не менее 30% времени переговоров составляют паузы [4, 5]. При этом в отличие от трафика, не обладающего пульсирующим характером, предоставление пропускной способности в ССС осуществляется в соответствии с прогнозируемыми пиковыми значениями скоростей для каждого вида трафика (рис. 1).

В существующем подходе к планированию спутниковой связи предоставление ресурса на ССС происходит следующим образом. Анализируя поступающие заявки и оценивая обстановку по связи, ЦУС планирует на сеть требуемое количество каналов K с постоянной пропускной способностью для обеспечения заданного качества обслуживания. В рамках сети предо-

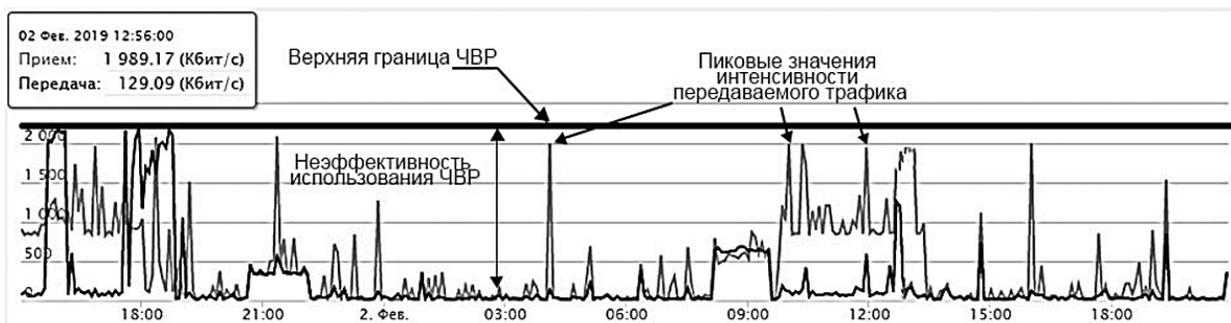


Рис. 1. Загрузка типовой спутниковой радиолинии

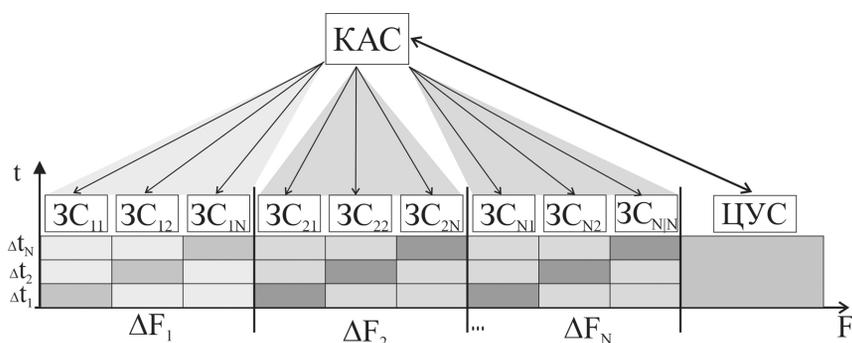


Рис. 2. Распределение ресурса центральной станцией

ставленный ресурс (спутниковые каналы связи) закрепляются на постоянной основе за ЗС на суточном интервале планирования. Такой подход характеризуется низкой эффективностью использования ресурса при небольшой нагрузке и невозможностью оперативного маневра каналным ресурсом в случае колебаний входящей нагрузки, например, при увеличении количества абонентов или организации связи между дополнительными абонентами в реальном масштабе времени [6, 7].

Целью работы является разработка методики распределения ресурса ССС, позволяющей повысить эффективность использования ограниченного ресурса ССС в условиях вариации трафика, поступающего от различных земных станций.

Описание методики

В интересах повышения эффективности использования частотно-временного ресурса ССС предлагается планировать его предоставление без профицита. Распределяемый ресурс ССС условно подразделяется на основной и резервный. Под основным частотно-временным ресурсом понимается частотный диапазон и время сеансов связи, планируемые для каждой ЗС в соответствии с усредненной потребностью абонентов — источников трафика, по заявкам на предстоящие сутки. Резервный ресурс — частотный диапазон и время сеансов связи, предоставляемые дополнительно в случае пиковых нагрузок. Резервный ресурс предоставляется за время, равное времени двух прохождений сигнала через спутник до начала действительной передачи данных с использованием постоянно-го канала управления. Причины возникновения

пиковых нагрузок в ССС могут быть связаны с необходимостью проведения внеплановой видеоконференции, необходимостью получения видеоизображения от беспилотных летательных аппаратов и (или) космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в режиме реального времени или увеличением числа подключаемых абонентов. В случае если для передачи трафика в ССС достаточно спланированного основного частотно-временного ресурса ССС, резервный ресурс может быть использован для передачи фонового трафика, не критичного к требованиям по качеству передачи (передача телеметрической информации), или находиться в оперативном резерве.

Функционирование отдельных ЗС, объединенных в ССС, может быть описано системой массового обслуживания (СМО) [7–9]. Задача минимизации ресурса пропускной способности ЗС, выделяемой для каждого радионаправления, с учетом пульсирующего характера трафика и возможности оперативного подключения дополнительного ресурса, сформулирована как задача нелинейного программирования. Решение данной задачи для отдельной ЗС в составе ССС подробно представлено в работах [9–11].

Анализ процесса функционирования ЦУС показал, что решение задачи распределения частотно-временного ресурса ССС осуществляется его дежурной сменой в соответствии с заявками, поступающими от земных станций ССС, и анализа предстоящей нагрузки. Планирование и распределение частотно-временного ресурса предполагает последовательное выполнение следующих взаимосвязанных операций:

- сбор и анализ исходных данных для распределения частотно-временного ресурса ССС на интервале времени 24 часа (сведения о

текущем состоянии ССС (количество ЗС, КАС, рабочих диапазонов частот), прогнозируемая нагрузка абонентов ССС с учетом решаемых задач, требования к качеству обслуживания);

– сбор и анализ статистики о временных параметрах трафика абонентов ССС;

– оценка обстановки по связи (оценка условий радиоэлектронной обстановки, помеховой обстановки, воздействия возмущающих факторов на ССС);

– планирование частотно-временного ресурса КАС между ЗС (назначение частотного диапазона для каждой земной станции, назначение продолжительности и периодичности сеанса связи через КАС);

– формирование решения по связи и доведение его до подчиненных ЗС (приказ на организацию связи; частотно-временной план ССС; схема организации связи).

Перечисленные операции составляют основу методики распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи центральной станцией, исходными данными для которой является следующая совокупность параметров.

Количественный состав земных станций в сети связи, прикрепленных (обслуживаемых) к одной центральной земной станции

$$\mathbf{A} = \{A_v, v = \overline{1, n}\},$$

где n — общее количество ЗС.

Интервал моделирования (интервал планирования частотно-временного ресурса ССС):

$$T = [t_0, t_{fin}],$$

где t_0 — начало моделирования, t_{fin} — конец моделирования.

Трафик, поступающий для обслуживания на ЗС, представлен массивом временных интервалов между заявками.

Интенсивность входного потока трафика:

$$\lambda_i^y = \frac{1}{t_i^y},$$

где $T^y = |t_i^y|$, $y = 1, 2, 3$, $i \in I^y$ — массив упорядоченных по возрастанию моментов времени поступления заявок на обслуживание, y — параметр, определяющий вид передаваемого тра-

фика: $y = 1$ — речевой трафик, $y = 2$ — видеотрафик, $y = 3$ — трафик данных).

Обработка заявок постами расчетов производится по мере поступления заявок на обслуживание.

Длительность обслуживания заявки является директивной величиной τ_{\max} , определяемой нормативами каждого расчета для обработки соответствующего вида трафика.

Время, необходимое для обслуживания заявок, определяется как $T_{ob} = [\tau_i^y]$, при условии, что $\tau_i^y \leq \tau_{\max}$, $y = \overline{1, 4}$.

Интенсивность обработки заявок соответствующим расчетом определяется как

$$\mu_i^y = \frac{1}{\tau_i^y}.$$

Для обоснования достаточного количества частотно-временного ресурса (ЧВР), необходимого для функционирования ССС, требуется определить:

$$k^* = \min_{k \in \Delta} f(k), \quad (3)$$

где $\Delta = \{k_{\text{осн}} \times k_{\text{рез}}\}$ — конечное множество ЧВР ресурса, предоставляемого каждой ЗС, которое состоит из множества основных $K_{\text{осн}}$ и дополнительных каналов $K_{\text{рез}}$.

Методика планирования и распределения ЧВР центральным узлом связи позволяет определить необходимое и достаточное количество основных $K_{\text{осн}}$ и дополнительных ($K_{\text{рез}}$) каналов в результате выполнения операций, представленных на рис. 3.

В первом блоке задаются исходные данные о составе, структуре и параметрах КАС, ЗС а также системе технических и технологических ограничений.

Данные о КАС содержат информацию о пространственном положении каждого КА, для ЗС содержится информация по каждому абоненту ЗС (вид передаваемого трафика, требования по качеству обслуживания).

Во втором блоке методики формируются исходные данные для планирования ЧВР ССС: множество ЗС $\mathbf{A} = \{A_v, v = \overline{1, n}\}$;

– множество $\mathbf{B} = \{B_\mu, \mu = \overline{1, m}\}$ сеансов связи;

– множество объемов частотно-временного ресурса ССС

$$\mathbf{C}_1 = \{C_v^1, v_1 = \overline{1, n}\};$$

– множество ограничений

– потенциал доступности

$$C_2 = \{C_{v_1 v_2}^2; v_1 = \overline{1, n}; v_2 = \overline{1, n}; v_1 \neq v_2\}$$

$$D = \{D_{v_1 v_2}, v_1 = \overline{1, n}, v_2 = \overline{1, n}, v_1 \neq v_2\},$$

на скорость передачи информации между соседними v_1 и v_2 элементами ССС;

определяющий наличие ребра между v_1 и v_2 узлами ССС;

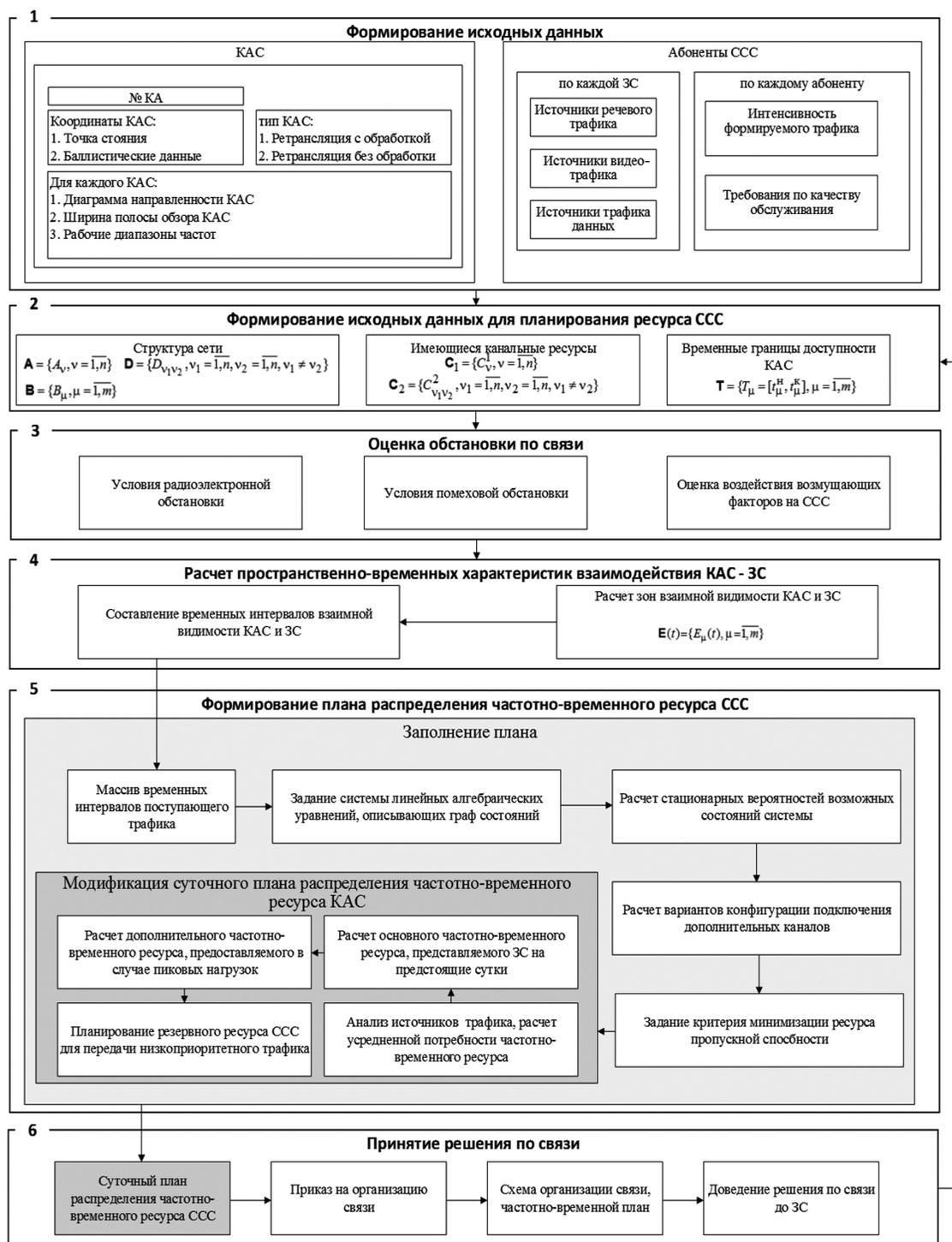


Рис. 3. Методика планирования частотно-временного ресурса сети спутниковой связи

– множество интервалов доступности КАС

$$\mathbf{T} = \{T_{\mu} = [t_{\mu}^h, t_{\mu}^k], \mu = \overline{1, m}\};$$

– контактный потенциал

$$\mathbf{E}(t) = \{E_{\mu}(t), \mu = \overline{1, m}\},$$

где

$$E_{\mu}(t) = \begin{cases} 1, & t \in T_{\mu}; \\ 0, & t \notin T_{\mu}. \end{cases}$$

В третьем блоке методики производится оценка обстановки по связи: оценка условий радиоэлектронной обстановки, условий помеховой обстановки, воздействия возмущающих факторов на ССС.

В четвертом блоке методики производится расчет пространственно-временных характеристик КАС-ЗС, а именно, расчет зон взаимной видимости КАС и ЗС, составление временных интервалов взаимной видимости КАС и ЗС.

В пятом блоке методики производится формирование плана распределения частотно-временного ресурса ССС. Для каждой ЗС с учетом прогнозируемой нагрузки производится расчет минимально необходимой потребности в пропускной способности, данная оптимизационная задача решается с использованием итерационного алгоритма оптимизации на основе метода возможных направлений [10–12]. Далее в соответствии с частотно-временным планом каждой ЗС предоставляются основные каналы связи $K_{\text{осн}}$. Далее ЦУС формирует так называемый резерв частотно-временного ресурса (дополнительные каналы связи $K_{\text{рез}}$, который предоставляется по запросу от ЗС.

Результатом методики является решение по связи (суточный план распределения ЧВР, приказ на организацию связи, схема организации связи), которое включает информацию по представляемому частотно-временному ресурсу для каждой ЗС. Решение по связи доводится до каждой ЗС.

Результаты применения методики

Предлагаемая методика является основой для проведения имитационного моделирования распределения частотно-временного ресурса

сети спутниковой связи центральной станцией, поскольку решение сформулированной задачи планирования и распределения ЧВР ЦУС ССС методами аналитического расчета не представляется возможным [13, 14]. Это связано с тем, что методы расчета СМО эффективны лишь для ограниченного числа законов распределения поступления и обслуживания заявок [15, 16].

Для апробации разработанной методики планирования ресурса ССС на основе СМО был использован программный продукт, рекомендованный для проведения научных исследований в области математического и имитационного моделирования, — MATLAB/Simulink.

На основе имитационной модели, разработанной с использованием программного продукта MATLAB/Simulink, было проведено имитационное моделирование, в результате которого была получена зависимость количества каналов, предоставляемых на ССС при различных вариантах распределения (рис. 4).

Параметры имитационной модели:

- количество ЗС (обслуживаемых центральной станцией) — 10; 15; 20; 25;
- значения интенсивности трафика меняются в зависимости от количества обслуживаемых абонентов;
- передаваемые виды трафика (речевой трафик, видеотрафик, трафик данных);
- время планирования ресурса сети связи — 20 мин.;
- среднее время распространения радиосигнала от ЗС до КАС и обратно 0,25 с.

Для оценивания эффективности применения предлагаемой методики планирования и распределения частотно-временного ресурса центральной станцией был выбран показатель ρ — коэффициент использования пропускной способности:

$$\rho = C_{\text{реал}} / F_{\text{план}},$$

где $C_{\text{реал}}$ — фактически используемая (реальная) пропускная способность частотно-временного ресурса ССС, $F_{\text{план}}$ — спланированный частотно-временной ресурс.

Полученные в ходе моделирования результаты приведены на рис. 4, 5.

На рис. 4 показано, что на ССС предоставляется ЧВР с учетом усредненного значения

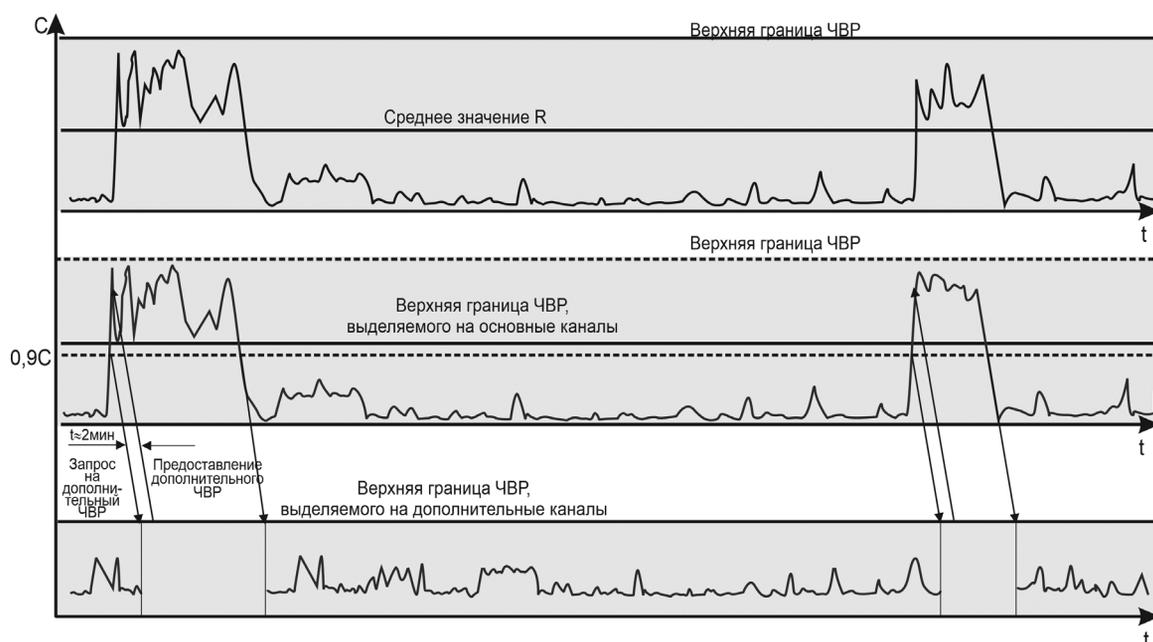


Рис. 4. Зависимость количества каналов, предоставляемых на сеть спутниковой связи

потребности ЗС в пропускной способности. В случае увеличения скорости передачи информации ЗС формирует запрос на подключение дополнительного ЧВР. В случае, если основного ЧВР ССС достаточно для организации связи между ЗС, дополнительный ресурс используется для передачи фонового трафика.

Предложенная методика распределения частотно-временного ресурса ССС позволяет более гибко учитывать ожидаемую нагрузку на сеть связи, топологическую структуру сети, величину задержек при предоставлении дополнительного канального ресурса. Использо-

вание методики распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи позволяет уменьшить число основных каналов предоставляемых ЗС на 10–38 % по сравнению с подходом предоставления фиксированной пропускной способности, а использование дополнительных каналов позволяет оперативно варьировать частотно-временным ресурсом ССС для обеспечения требуемого качества передачи трафика. Стоит отметить, что коэффициент повышения пропускной способности (рис. 5) зависит от класса передаваемого трафика. Чем выше требования к качеству обслуживания, тем

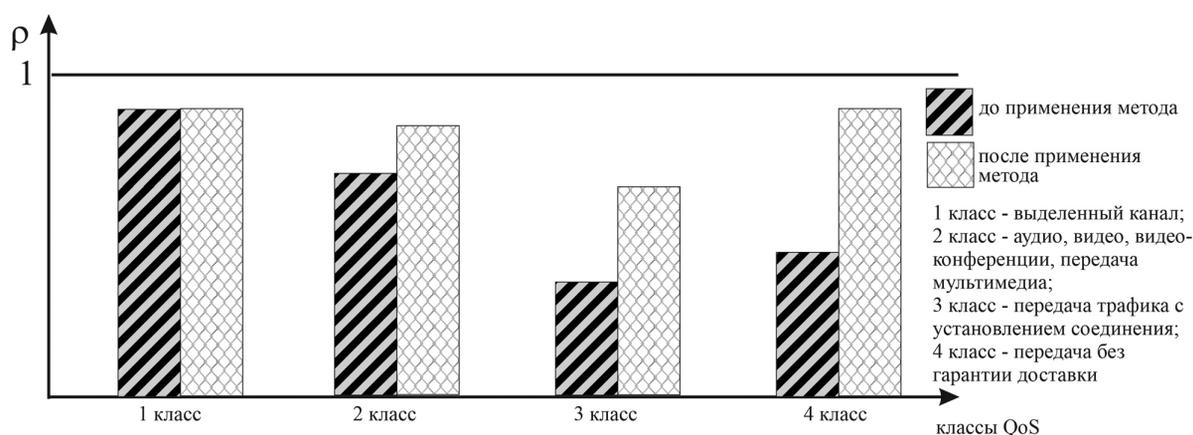


Рис. 5. Зависимость количества каналов, предоставляемых на сеть спутниковой связи, при различных вариантах планирования

меньше коэффициент повышения пропускной способности. Так, при наиболее жестких требованиях к качеству обслуживания выигрыш составит до 5%, при менее жестких — до 40%.

Заключение

В работе представлен подход к распределению ресурса сети спутниковой связи, предполагающий разделение частотно-временного ресурса на основной и дополнительный. Предложенная методика позволяет экономить каналный ресурс в ситуациях, когда не прогнозируется увеличение интенсивности абонентов, а также повысить оперативность предоставления дополнительного ресурса, когда это необходимо. Полученные результаты могут быть реализованы при совершенствовании алгоритмического обеспечения центра управления связью.

Литература

1. Буртный К.П. Россия в современном мире. Основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития страны. Задачи офицерского состава на 2021 учебный год. <http://army.ric.mil.ru> [Электронный ресурс], дата обращения 29.06.2021.
2. Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф. Цифровая обработка речи. — М.: Радио и связь. 2000. 256 с.
3. Vesga Ferreira J.C., Contreras M.F., Sierra J.E. Modeling and Characterization Traffic Voice, Video, Data and Telemetry under Pareto Distribution-Oriented Networks have on Power Line // *Communications. Indian Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 11 (42). Doi:10.17485/ijst/2018/v11i42/131033.
4. Коган А.В. IP-телефония: оценка качества речи // *Технологии и средства связи*. 2001. № 1. С. 78–84.
5. Алиев Р.Т., Король В.В. Анализ характеристик мультимедийного трафика в локальных вычислительных сетях // *Имитационное моделирование. Теория и практика*. 2003. Т. 1. С. 45–49.
6. Новиков Е.А., Павлов А.Р., Зиннуров С.Х. Метод оперативного планирования частотно-временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // *Авиакосмическое приборостроение*. 2014. № 5. С. 14–23.
7. Новиков Е.А., Косяков Е.Н., Павлов А.Р. Динамическое резервирование радиоресурса в сетях спутниковой связи при передаче самоподобного трафика // *Труды Научно-исследовательского института радио*. 2014. № 2. С. 49–60.
8. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем: учеб. пособие. — СПб: НИУ ИТМО. 2009. 363 с.
9. Ryzhikov Y.I. Multi-channel Queuing Systems with Markovian Impatience // *Communication in Computer and Information Science*. 2018. Vol. 912. Pp. 83–92. Doi:10.1007/978-3-319-97595-5_7.
10. Новиков Е.А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // *Информационно-управляющие системы*. 2014. № 2 (69). С. 79–87.
11. Новиков Е.А. Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2014. № 3 (15). С. 62–69.
12. Зиннуров С.Х., Новиков Е.А., Степанова Е.А. Моделирование процессов генерации и обслуживания трафика со сложной структурой с использованием программного комплекса логико-событийного моделирования MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2020. № 675. С. 69–76.
13. Бахарева Н.Ф., Карташевский И.В., Тарасов В.Н. Анализ и расчет непуассоновских моделей трафика в сетях ЭВМ // *Инфокоммуникационные технологии*. 2009. Т. 7. № 4. С. 61–66.
14. Ушанев К.В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа Ра/М/1, Н2/М/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой // *Системы управления, связи и безопасности*. — СПб. 2015. № 4. С. 217–251.
15. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии / Ю.И. Рыжиков. — СПб.: Корона принт. 2004. 380 с.
16. Одоевский С.М., Бусыгин А.В. Аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // *Системы управления, связи и безопасности*. 2020. № 1. С. 74–108. Doi:10.24411/2410-9916-2020-10104.

References

1. Burtnyj K.P. Rossiya v sovremennom mire. Osnovnye napravleniya social'no-ekonomicheskogo, politicheskogo i voenno-tehnicheskogo razvitiya strany. Zadachi oficerskogo sostava na 2021 uchebnyj god. <http://army.ric.mil.ru> [Electronic resource], accessed 29.06.2021.
2. Shelukhin O., Luk'iantsev N. Tsifrovaia obrabotka rechi. — Moscow. Radio i sviaz'. Publ., 2000. 256 p. (In Russian).
3. Vesga Ferreira J.C., Contreras M.F., Sierra J.E. Modeling and Characterization Traffic Voice, Video, Data and Telemetry under Pareto Distribution-Oriented Networks have on Power Line // Communications. Indian Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 11 (42). Doi:10.17485/ijst/2018/v11i42/131033.
4. Kogan A.V. IP-Telephony: Assessment of Quality of the Speech. 2001. № 1. Pp. 78–84 (in Russian).
5. Aliev R.T., Korol V.V. Analiz harakteristik mul'timedijnogo trafika v lokal'nyh vychislitel'nyh setjah // Imitating Simulation. Theory and Practice, 2003. Vol. 1. Pp. 45–49 (in Russian).
6. Novikov E.A., Pavlov A.R., Zinnurov S.H. Method of operative planning of the satellite repeater's time-and-frequency resource under non stationary ingress flow // Aerospace Instrument Making. 2014. № 5. Pp. 14–23 (in Russian).
7. Novikov E.A., Kosyakov E.N., Pavlov A.R. Dynamic reservation of a radio resource in satellite communication networks by transfer of the self-similar traffic // Trudi NIIR. 2014. № 2. Pp. 49–60 (in Russian).
8. Aliev T.I. Osnovy modelirovaniia diskretnykh system // — Saint-Petersburg, Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ. 2009. 363 p. (in Russian).
9. Ryzhikov Y.I. Multi-channel Queuing Systems with Markovian Impatience // Communication in Computer and Information Science. 2018. Vol. 912. Pp. 83–92. Doi:10.1007/978-3-319-97595-5_7.
10. Novikov E.A. Operativnoe raspredelenie radioresursa sputnik-retranslyatora pri nestacionarnom vhodnom potoke soobhchenij s uchyotom zpazdyvaniya v upravlenii // Information and Control Systems. 2014. Vol. 69. № 2. Pp. 79–87 (In Russian).
11. Novikov E.A. Assessment of reflecting satellite transmission capacity when reserving a feed-forward radio resource // Radio and Telecommunication Systems. 2014. Vol. 15. № 3. Pp. 62–69. (In Russian).
12. Zinnurov S.H., Novikov E.A., Stepanova E.A. Modeling of processes of generation and services of the traffic with a complex structure using the MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW logic-event modeling software package // Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy. 2020. № 675. Pp. 77–86 (in Russian).
13. Bakhareva N.F., Kartashevskii I.V., Tarasov V.N. Analiz i raschet nepuassonovskikh modelei trafika v setiakh EVM // Infokommunikacionnye Tehnologii. 2009. Vol. 7. № 4. Pp. 61–66 (in Russian).
14. Ushanev K.V. Simulation Models of Queuing Systems of Type Pa/M/1, H2/M/1 and Research on the Basis of their Quality of Service Traffic with a Complicated Structure // Systems of Control, Communication and Security. — SPb. 2015. № 4. Pp. 217–251 (in Russian).
15. Ryzhikov Ju. I. Imitating modeling. Teorija I tehnologija. — Spb: Korona print. 2004. 380 p.
16. Odoevsky S.M., Busygin A.V. Approximation of statistical characteristics of the multimedia traffic service process based on the Pareto distribution // Systems of Control, Communication and Security. 2020. № 1. Pp. 74–108 (in Russian).