

УДК 621.396

## Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов в земных станциях спутниковой связи

Новиков Е. А., Зиннуров С. Х.

**Актуальность.** В настоящее время наблюдается повышенный спрос на услуги переноса мультимедийного контента, телефонной и видеосвязи и передачи данных, который в ряде случаев может быть удовлетворен только за счет использования сетей спутниковой связи. Формируемая при этом нагрузка на сеть связи (трафик), как правило, имеет сложную структуру. Обширность зон обслуживания сетей спутниковой связи с одной стороны, и принципиальная ограниченность орбитального радиоресурса, с другой стороны, требуют оперативного управления радиоресурсом с целью повышения эффективности его использования. Одним из путей повышения эффективности использования радиоресурса является уплотнение спутниковых радиолиний с учетом статистических характеристик передаваемого трафика и режимов работы спутникового модема. **Целью работы** является разработка модели гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритма оперативного резервирования дополнительных каналов в земных станциях при вариации трафика, поступающего от различных абонентов земной станции, позволяющей повысить эффективность использования радиоресурса (пропускной способности, выраженной в числе доступных каналов) сети спутниковой связи за счет оперативного резервирования канального радиоресурса. **Результаты:** сформулирована задача оперативного резервирования дополнительных каналов в виде задачи нелинейного программирования и приведен пример ее решения при обслуживании трафика сложной структуры, формируемого группой абонентов. **Новизна** подхода состоит в том, разработана новая модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры земной станцией, отличающаяся от известных учетом динамики изменения пропускной способности при смене режимов работы модемного оборудования. Разработанная модель в виде четырехмерной марковской цепи была получена на основе расширения пространства состояний с использованием моделей изменения конфигурации модемного оборудования, группового источника трафика сложной структуры, процесса резервирования канального ресурса с запаздыванием, а также процесса обслуживания трафика одноканальной системой. В качестве ограничений приняты допущения об экспоненциальных законах распределения продолжительности периодов активности и пауз абонентов, задержки в подключении дополнительного канального ресурса, длительностей передачи отдельных сообщений и интервалов между ними и длительностей интервалов времени перестройки модемного оборудования. На основе разработанной модели предложен алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов земной станцией, отличающийся от известных учетом текущего распределения канального ресурса, и позволяющий в случае существенного увеличения мощности множества альтернатив найти оптимальный момент подключения дополнительного канала. Приведен пример решения поставленной задачи. **Практическая значимость.** Совокупность полученных результатов в виде модели гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритма оперативного резервирования дополнительных каналов позволит повысить пропускную способность сети спутниковой связи на 10-40% при обеспечении заданного качества обслуживания абонентов.

### Библиографическая ссылка на статью:

Новиков Е. А., Зиннуров С. Х. Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов в земных станциях спутниковой связи // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 98–115.  
URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/07-Novikov.pdf>

### Reference for citation:

Novikov E. A., Zinnurov S. Kh. Flexible Service Model of Complex Traffic and Real-time Algorithm of Channel Reserve for Satellite Earth Stations. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 1, pp. 98–115. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/07-Novikov.pdf> (in Russian).

*Ключевые слова:* спутник-ретранслятор, радиоресурс, земная станция, прерываемый пуассоновский поток, модулированный марковский процесс, оперативное резервирование, трафик сложной структуры.

## Введение

В современных условиях важное место в телекоммуникационной инфраструктуре занимают сети спутниковой связи (ССС). Применение СССР при организации доступа к современным инфокоммуникационным услугам для абонентов, находящихся в труднодоступных и удаленных регионах является безальтернативным. При этом возрастающий уровень автоматизации приводит к значительному росту передаваемых информационных потоков, а также качественному изменению их структуры. Такие информационные потоки предъявляют существенно различающиеся и все более жесткие требования к качеству обслуживания. Так, допустимая задержка в доставке пакетов, генерируемых приложениями реального времени, например, IP-телефонии, сопоставима со временем распространения радиосигнала до спутника-ретранслятора (СР) на геостационарной орбите, а при передаче данных допускаются значительные задержки, но исключаются потери данных [1]. Известно, что доля трафика реального времени (речь, видеоконференцсвязь, передача данных), передаваемого с использованием СССР составляет до 60% от общего объема передаваемой информации [2, 3]. Известные технические решения, применяемые при распределении ограниченного частотно-временного радиоресурса СР, имеют ряд недостатков. Одним из них является то, что предоставление радиоресурса происходит под пиковые значения интенсивности информационного потока без учета статистических характеристик передаваемого трафика, что выражается в недоиспользовании радиоресурса при общем его дефиците.

Неотъемлемой составной частью бортового ретрансляционного комплекса современного СР является система адаптивной помехозащиты, основной задачей которой является удержание вероятности ошибочного приема на заданном уровне за счет адаптивной перестройки модемной конфигурации, а именно выбора оптимальных сочетаний вида модуляции и скорости помехозащищенного кодирования. На рис. 1 показана расчетная зависимость конфигурации модемного оборудования земной станции (ЗС) от помеховой обстановки для стандарта DVB-S [4]. Последовательное изменение вида модуляции и скорости кодирования, с одной стороны, позволяет удержать вероятность ошибки на бит на заданном уровне, а с другой стороны, снижает информационную скорость в канале спутниковой связи, что проявляется в снижении пропускной способности, выраженной в числе каналов на сетевом уровне. На рис. 1  $\rho$  – отношение числа виртуальных каналов связи, организуемых мультиплексором ЗС, к числу стандартных физических каналов мультиплексора ЗС.

В этой связи возникает проблемная ситуация, которая состоит в невозможности удовлетворить требования по объемам информации и качеству обслуживания (QoS) абонентов СССР вследствие ограниченности радиоресурса

СР. Одним из путей решения сформулированного противоречия является уплотнение спутниковых радиолиний с учетом статистических характеристик передаваемого мультисервисного трафика и режимов работы спутникового модема. Решение данной задачи осложнено разнородностью структуры трафика, формируемого различными приложениями, а также необходимостью учета изменений пропускной способности ЗС в условиях изменения режимов работы спутникового модема. Достижимый в результате статистического уплотнения эффект экономии пропускной способности  $\Delta C$  по сути и составляет выигрыш в пропускной способности. Для компенсации запаздывания в управлении текущий ресурс, закрепляемый за конкретной ЗС, предоставляется с некоторым запасом (резервом), который способен обеспечить требуемое качество обслуживания при внезапном повышении интенсивности нагрузки.

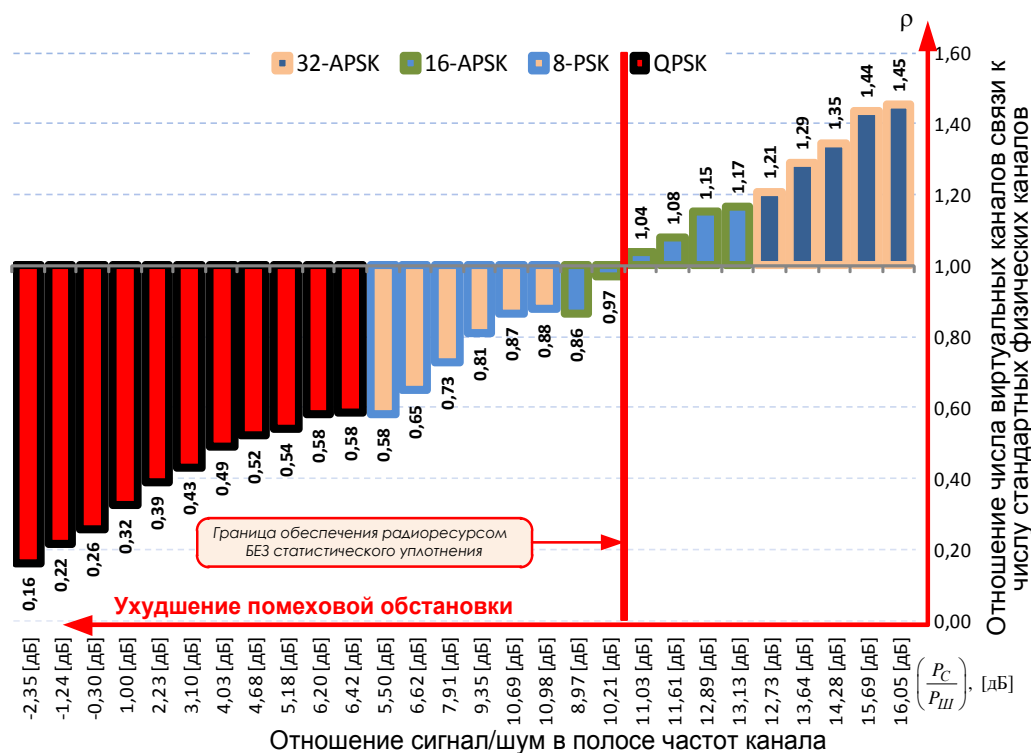


Рис. 1. Изменение конфигурации модемного оборудования ЗС в зависимости от помеховой обстановки

### Разработка модели гибкого обслуживания

#### трафика сложной структуры земной станцией спутниковой связи

Существующие технические решения по распределению радиоресурса ССС ориентированы на поддержание допустимого качества обслуживания на интервалах времени наибольшей нагрузки и не обеспечивают высокую эффективность использования радиоресурса СР на интервалах времени «простоя». При снижении нагрузки радиоресурс используется не полностью, так как радиоресурс предоставляется из расчета на пиковые значения интенсивности нагрузки. Разрешение указанного противоречия требует построения особого класса моделей, которые, с одной стороны, способны

учитывать статистические свойства трафика, его разнородность, а с другой стороны, изменение режимов работы модемного оборудования ЗС.

При использовании пакетной формы представления различных видов информации появляется возможность совместной передачи речевого трафика, видео трафика, трафика данных от нескольких абонентов в едином цифровом потоке. Из-за разнородности источников передаваемой информации, обоснованно предъявляются различные требования по качеству обслуживания (QoS) соответствующего вида трафика. Кроме того, существуют категории абонентов, которые требуют приоритетного обслуживания при организации связи с использованием ССС, что предполагает разделение передаваемого трафика по приоритетам. Следовательно, понятие мультисервисный трафик – является комплексным, и включает в себя нагрузку, создаваемую потоком разнородных вызовов, сообщений и сигналов в сети связи, способной обеспечить требуемое качество (сервис) для каждого вида передаваемой информации с учетом приоритетов передаваемого трафика.

Анализ работ по исследованию структуры трафика, передаваемого в современных сетях связи, показал его существенное отличие от простейшего потока. Передаваемый трафик характеризуется отсутствием стабилизации его статистических характеристик, как на малых, так и на больших масштабах времени и наличием долговременных корреляционных зависимостей [5, 6]. В работе [7] показано, что мультисервисный трафик является трафиком *сложной структуры*. При этом под *трафиком сложной структуры* понимается трафик, у которого коэффициент вариации  $c_\tau$  интервалов времени между поступающими пакетами имеет значение  $\sigma_\tau / m_\tau = c_\tau > 1$ , где  $\tau$  - интервал времени между пакетами трафика,  $m_\tau$  - математическое ожидание значений интервалов времени между поступлением пакетов трафика;  $\sigma_\tau$  - среднее квадратическое отклонение значений интервалов времени между поступлением пакетов трафика. В работе [7] также показано, что трафик с коэффициентом вариации  $c_\tau > 1$  можно представить в виде аппроксимации с гиперэкспоненциальным распределением второго порядка  $H_2(\lambda_1, \lambda_2, p)$ , которое образуется двумя экспоненциальными фазами. В работе [8] показано, что распределение интервалов времен между пакетами по гиперэкспоненциальному закону  $H_2(\lambda_1, \lambda_2, p)$  является частным случаем марковского модулированного пуассоновского процесса (ММП)  $f(\lambda, \alpha, \beta)$  и между параметрами этих распределений может быть найдено однозначное соответствие в следующем виде:

$$\lambda = p_H \lambda_{H_1} + (1 - p_H) \lambda_{H_2}.$$

$$\alpha = p_H (1 - p_H) (\lambda_{H_1} - \lambda_{H_2})^2 / \lambda.$$

$$\beta = \lambda_{H_1} \lambda_{H_2} / \lambda.$$

Таким образом, использование моделей ММП позволяет получить модель трафика сложной структуры, оставаясь при этом в рамках математического аппарата марковских процессов гибели и размножения, а

допущение об экспоненциальных законах распределения периодов активности и пауз абонента, запаздывания в управлении, обусловленным задержкой распространения радиосигнала в линии спутниковой связи, а также периодов перестройки режимов работы модемного оборудования, позволяет получить решение поставленной задачи в аналитическом виде [9, 10, 11].

Частным случаем таких марковских модулированных пуассоновских процессов являются модели прерываемых пуассоновских процессов (ON-OFF модели), которые используются для моделирования отдельного источника трафика. Граф модели прерываемого пуассоновского процесса представлен на рис. 2. Каждый источник трафика имеет следующую структуру. В период активности (ON-периоды) источник генерирует пуассоновский поток пакетов. После периода активности следует пауза (OFF-период), когда источник не генерирует пакеты. Длительности периодов активности и пауз являются случайными величинами, распределенными по экспоненциальному закону. Комбинация нескольких таких ON-OFF источников образует прерываемый пуассоновский процесс, интенсивность которого изменяется во времени, что позволяет учесть нестационарность реальных входных потоков.

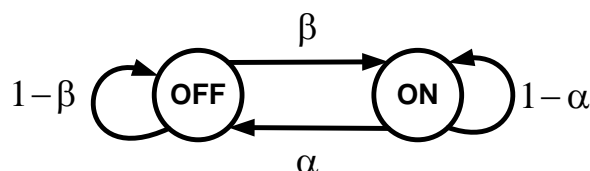


Рис. 2. Граф модели прерываемого пуассоновского процесса

При разработке модели изменения режимов работы модемного оборудования использовалось допущение об экспоненциальном распределении периодов перестройки модемного оборудования, что позволило представить процесс изменения режимов работы модемного оборудования в виде марковской цепи (рис. 3). На рис. 3 представлена модель процесса изменения конфигурации модемного оборудования, в качестве примера рассматриваются следующие варианты использования сигнально-кодовых конструкций в зависимости от уровня помех в линии связи ЗС – СР: QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK [4]. Элементу пространства состояний ставится в соответствие вид модуляции и скорость кодирования модемного оборудования, которая определяет интенсивность обработки данных в канале спутниковой связи ( $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ ). При этом время, необходимое для перестройки модемного оборудования оценивалось на основе тестирования функционирования спутникового модема ЗС.

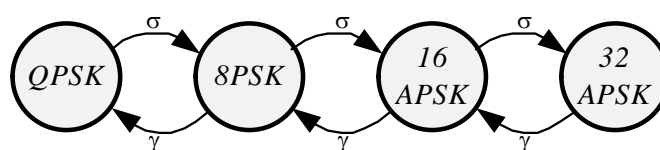


Рис. 3. Граф модели изменения режимов работы модемного оборудования

Интенсивность перестройки модема ( $\sigma, \gamma$ ) является величиной обратно пропорциональной среднему времени перестройки модема:  $\sigma = 1/\bar{T}_{n1}$ ,  $\gamma = 1/\bar{T}_{n2}$ , где  $\bar{T}_{n1}$  – среднее время, необходимое для изменения конфигурации модема при изменении помеховой обстановки в канале связи и смене сигнально-кодовой конструкции, и, как следствие, увеличения скорости передачи данных;  $\bar{T}_{n2}$  – среднее время, необходимое для изменения конфигурации модема при изменении помеховой обстановки в канале связи и смене сигнально-кодовой конструкции, и, как следствие, уменьшения скорости передачи данных.

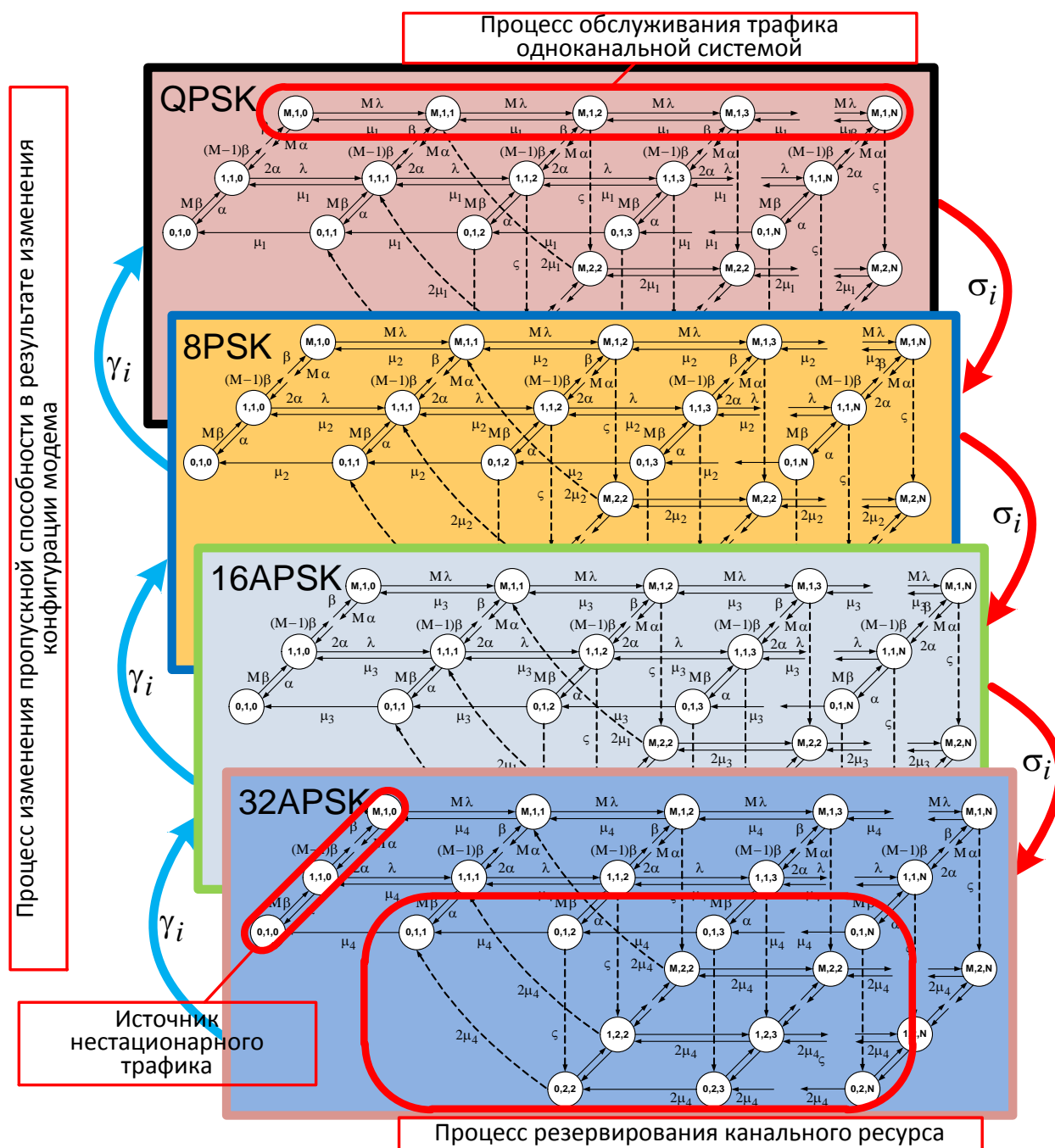


Рис. 4. Граф модели гибкого обслуживания трафика сложной структуры ЗС

Модель резервирования канального ресурса одноканальной системой была ранее рассмотрена в работах [12, 13, 14], однако в данной модели не было учтено изменение режимов работы модемного оборудования. В работе [15], были рассмотрены вопросы организации статистического уплотнения передаваемого трафика в каналообразующей аппаратуре ЗС. Однако в данной работе не учитывалась сложная структура передаваемого трафика. Допущение об экспоненциальных законах распределения длительностей передачи и поступления речевых пакетов, периодов активности и пауз абонента, запаздывания в управлении и изменении режимов работы спутникового модема позволило за счет расширения пространства состояний получить модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры ЗС, и представить моделируемый процесс в виде четырехмерной цепи Маркова (рис. 4).

Интенсивности переходов между состояниями графа на рис. 4:

$\lambda$  – интенсивность поступления пакетов;

$\mu$  – интенсивность обслуживания пакетов;

$\gamma$  – интенсивность перестройки модемного оборудования ЗС (определяется характеристиками модема);

$\sigma$  – интенсивность перестройки модемного оборудования ЗС (определяется характеристиками модема);

$\beta$  – интенсивность перехода источника в активное состояние;

$\alpha$  – интенсивность перехода источника в выключенное состояние;

$\zeta$  – интенсивность подключения дополнительного канала – определяются как обратные соответствующим временным интервалам, величины которых имеют экспоненциальное распределение.

Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры в ЗС может быть формализована в виде системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чэпмена для вероятностей состояний многомерного марковского процесса:

$$\dot{p}_{\mathcal{Q}}(n, h, t) = f_{\mathcal{Q}}\left(p(n, h, t), U_{\mathcal{Q}}(\mu, C(q), t), (\alpha_m, b_m, m = \overline{1, M}), (\sigma_l, \gamma_l, l = \overline{1, L}), \zeta\right), \mathcal{Q} = \overline{1, Q},$$

где  $C(q)$  - объем ресурса ССС, доступного при текущем значении отношения «сигнал/шум»  $q$ ;

$M$  - суммарное число абонентов, подключенных к ЗС; в состоянии «0» («OFF») абонент не генерирует пакеты, а в состоянии «1» («ON»)  $m$ -й абонент генерирует пакеты с интенсивностью  $\lambda_m$ ,  $0 < \lambda_m < \infty$ ,  $m = \overline{1, M}$ ;

$\alpha_m$  и  $\beta_m$  - параметры экспоненциального распределения времени пребывания  $m$ -го абонента в состояниях «0» и «1», соответственно;

$r_m$ ,  $0 \leq r_m \leq C(q)$ ,  $m = \overline{1, M}$  - число ресурсных единиц, доступных пакету от  $m$ -го источника;

$\mu$ ,  $0 < \mu < \infty$  - параметр экспоненциального распределения времени обслуживания одной ресурсной единицей (каналом);

$\sigma, \gamma$  - параметры экспоненциального распределения времени, необходимого для перестройки режимов работы модемного оборудования;

$l = \overline{1, L}$  - число возможных режимов работы модемного оборудования;

$\zeta, 0 < \zeta < \infty$  - параметр экспоненциального распределения времени, необходимого на предоставление дополнительной ресурсной единицы (канала);

$n_m(t), 0 < n_m(t) < r_m(t)$  - число пакетов от  $m$ -го абонента в системе массового обслуживания в момент времени  $t > 0$ ;

$h_m(t) \in \{0, 1\}$  - состояние  $m$ -го ММПП потока в момент времени  $t > 0$ ;

$\mathbf{X}(t) = (\mathbf{n}(t), \mathbf{h}(t))$  - составной марковский процесс, описывающий поведение исследуемой системы на множестве состояний:

$$X = N \times H, N = \left\{ \mathbf{n} : \sum_{m=1}^M n_m \leq C(q), 0 \leq n_m \leq r_m, m = \overline{1, M} \right\}, H = \{0, 1\}^M;$$

$\Pi_m^b = \{(\mathbf{n}, \mathbf{h}) \in X : n_m = r_m; h_m = 1\}$  - множество состояний блокировки из-за того, что в системе уже обслуживается  $r_m$  заявок того же типа;

$\Pi_m^C = \{(\mathbf{n}, \mathbf{h}) \in X : n_m = C(q); n_m \neq r_m; h_m = 1\}$  - множество состояний блокировок  $m$ -заявок из-за отсутствия свободных приборов;

$B_m = \Pi_m^b \cup \Pi_m^C$  - множество состояний, в которых система не может принять на обслуживание  $m$ -й пакет (состояние блокировки);

$p(\mathbf{n}, \mathbf{h}, t)$  - вероятность пребывания системы в состоянии  $(\mathbf{n}, \mathbf{h})$  в момент времени  $t$ ;

$S, S = \{S_{\vartheta}(\mu, C(q)), \vartheta = \overline{1, Q}\}$  - множество стратегий резервирования с запаздыванием;

$$p(B_m, t) = \sum_{(\mathbf{n}, \mathbf{h}) \in \Pi_m^b} p(\mathbf{n}, \mathbf{h}, t) + \sum_{(\mathbf{n}, \mathbf{h}) \in \Pi_m^C} p(\mathbf{n}, \mathbf{h}, t) - \sum_{(\mathbf{n}, \mathbf{h}) \in \Pi_m^b \cap \Pi_m^C} p(\mathbf{n}, \mathbf{h}, t) -$$

вероятность блокировки;

$U_{\Delta}^{\vartheta}(\mu, C(q), t) \in S_{\vartheta}(\mu, C(q))$  - множество допустимых управлений при резервировании с запаздыванием  $S_{\vartheta}$ .

Экономия радиоресурса СР за счет оперативного резервирования дополнительных каналов ( $\Delta C$ ) эквивалентна повышению пропускной способности ССС:

$$\rho_{\vartheta}(f_{\vartheta}(\cdot)) = \frac{C_{\Sigma}(q)}{C_{\Sigma}(q) - \Delta \rho_{\vartheta}(f_{\vartheta}(\cdot))}, \vartheta = \overline{1, Q}, \quad (1)$$

где  $C_{\Sigma}(q)$  – суммарное число стандартных каналов ССС при заданных условиях (радиоресурс ССС);  $\Delta \rho_{\vartheta}$  – величина экономии радиоресурса за счет оперативного резервирования;  $f_{\vartheta}(\cdot), \vartheta = \overline{1, Q}$  – модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры.

Задача оперативного резервирования канального ресурса может быть решена на основе модели гибкого обслуживания трафика сложной структуры



$f_{\vartheta}(\cdot)$  за счет разработки алгоритма оперативного резервирования дополнительных каналов  $U_{\vartheta}^{opt}(\mu, C(q), t)$ ,  $\vartheta = \overline{1, Q}$ , обеспечивающего:

$$U_{\vartheta}^{opt}(\mu, C(q), t) = \arg \max_{U_{\vartheta}(\mu, C(q), t) \in \Delta U_{\vartheta}} \Delta \rho_{\vartheta}(f_{\vartheta}(\cdot)), \vartheta = \overline{1, Q}. \quad (2)$$

Стационарные вероятности состояний марковской цепи модели гибкого обслуживания трафика сложной структуры ЗС (рис. 4), описываются системой линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} P_{nmkl} = f_{nmkl}(P_{nmkl}, n = \overline{0, N}, m = \overline{0, M}, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}); \\ \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L P_{nmkl} = 1; \\ P_{nmkl} \geq 0, \forall n \in \overline{0, N}, \forall m \in \overline{0, M}, \forall k \in \overline{1, K}, \forall l \in \overline{1, L}; \end{cases}$$

где  $P_{nmkl}$  – стационарная вероятность состояния системы, определяемая количеством  $n$  пакетов в буфере, количеством  $m$  активных абонентов, количеством каналов  $k$  и уровнем пропускной способности  $l$  канала, линейные функции  $f_{nmkl}$  определяются путем последовательного разрешения относительно  $P_{nmkl}$  уравнений баланса переходов между состояниями системы массового обслуживания.

Задача определения момента формирования запроса на подключение дополнительного канала может быть интерпретирована как последовательное (слева направо и сверху вниз) удаление перехода вниз на графе (рис. 4). Задачу минимизации ресурса пропускной способности (2), выделяемой для каждого радионаправления, с учетом прерывистого характера трафика, изменения режимов работы модемного оборудования и возможности оперативного подключения дополнительного ресурса можно решить для моделей небольшой размерности, например, при емкости буфера ( $N_{буф}$ ) 10 – 40 пакетов, путем прямого перебора. Сначала для каждого варианта управления решается задача поиска минимального значения средней интенсивности обслуживания при ограничении на вероятность отказа  $P_{отк} \leq 0,01$ , затем решается задача выбора варианта управления, доставляющего минимальное значение средней интенсивности обслуживания. В зависимости от класса QoS ограничениями являются вероятность потери пакетов  $P_{отк}$ , определяемая емкостью буфера ЗС  $N_{буф}$ , и предельная задержка пакетов  $T_3$ , определяемая «длительностью жизни» пакета. Для случая двухканальной системы показана возможность увеличения нагрузки системы  $y = \lambda / \mu$  в зависимости от количества пакетов в буфере, при котором подключается второй канал (рис. 5). При этом предоставление второго канала происходит таким образом, чтобы значение коэффициента использования дополнительного канала  $K_2 = t_{p2} / T_{общ}$  было минимальным, но обеспечивалось заданное качество обслуживания  $P_{отк} \leq 0,01$  (рис. 6).

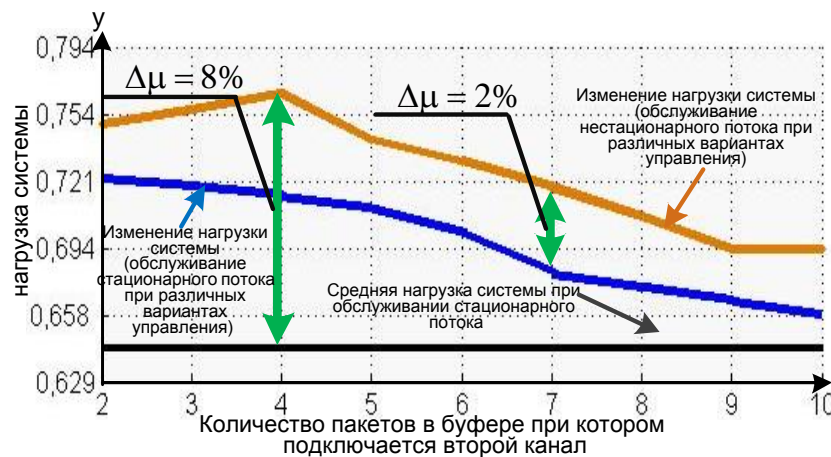


Рис. 5. Зависимость нагрузки двухканальной системы  $y$  от количества пакетов в буфере  $N_{буф}$ , при котором подключается второй канал

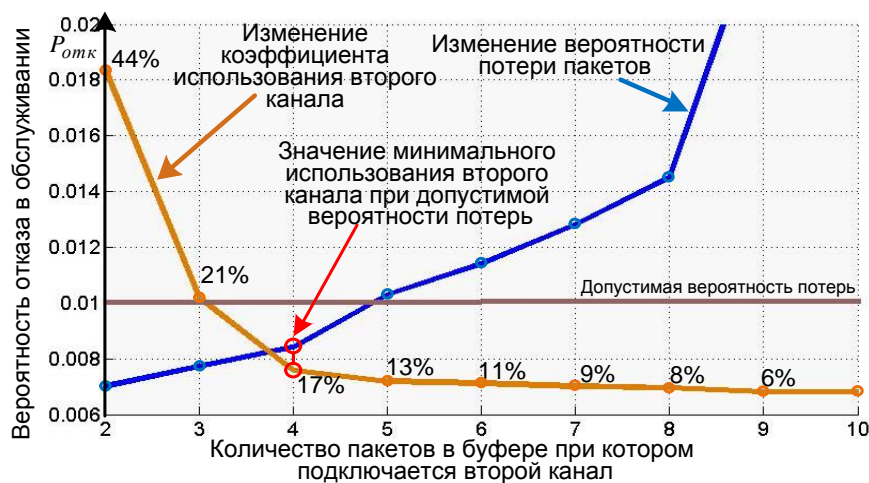


Рис. 6. Зависимость вероятности отказа в обслуживании пакетов  $P_{отк}$  от количества пакетов в буфере  $N_{буф}$ , при котором подключается второй канал (коричневой линией показано изменение коэффициента использования второго канала  $K_2(\%)$ )

Небольшой объем буфера ЗС  $N_{буф} = 10...40$ , в приведенном примере позволяет определить оптимальный момент вызова дополнительного канала для двухканальной системы путем прямого перебора небольшого количества вариантов подключения второго канала.

### Разработка алгоритма оперативного резервирования дополнительных каналов в земных станциях спутниковой связи

В случае наращивания размерности модели (рис. 4), например, при увеличении емкости буфера или числа дополнительных каналов, происходит существенное увеличение мощности множества альтернатив подключения дополнительного канала  $\Delta U_9$ , и поиск оптимального момента вызова дополнительного канала путем прямого перебора становится затруднительным.

В этой связи, для поиска оптимального момента подключения дополнительного канала потребовалось разработать алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов в ЗС.

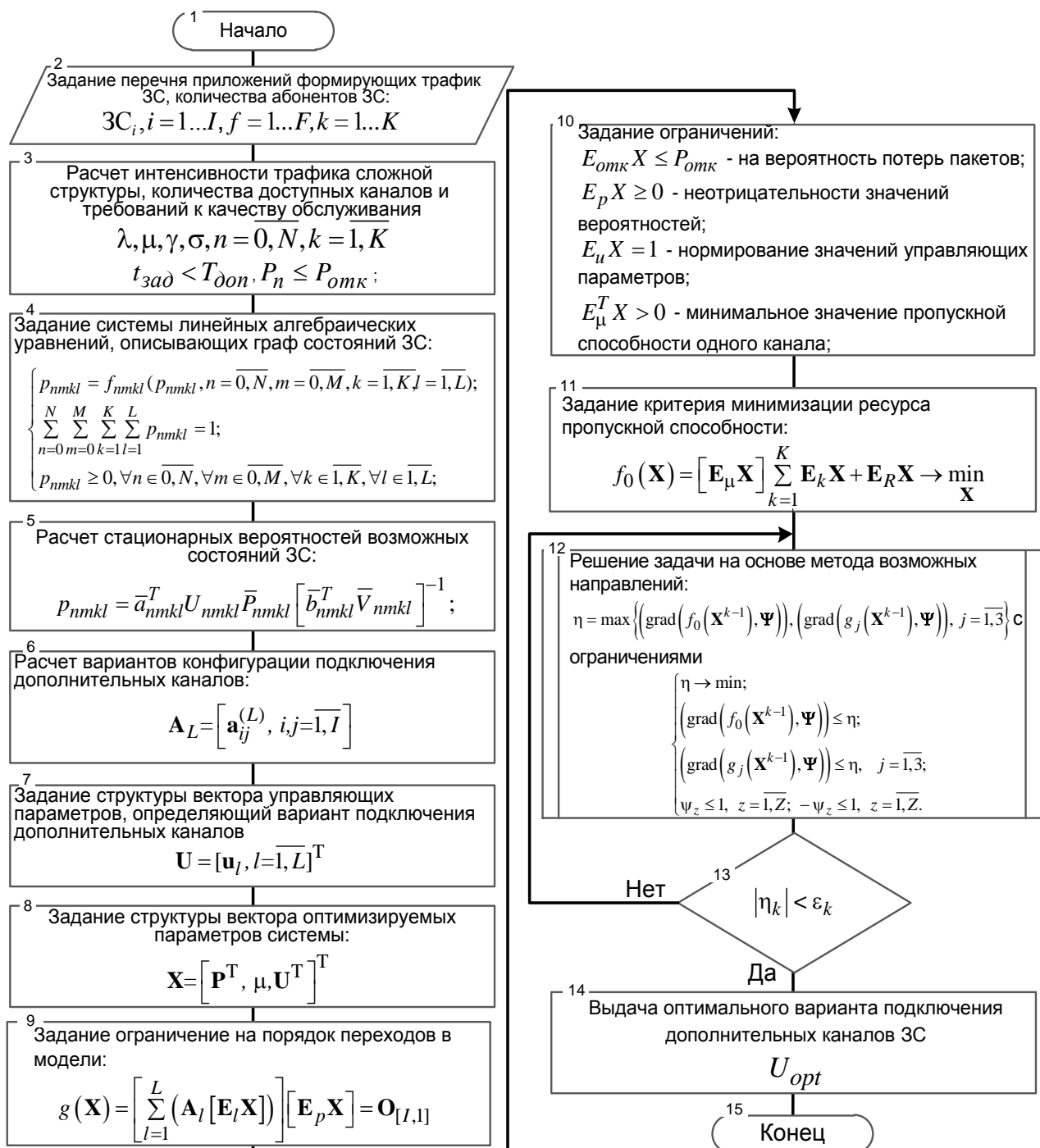


Рис. 7. Алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов ЗС сети спутниковой связи

Разработанный алгоритм (рис. 7), отличается от известных учетом текущего распределения канального ресурса ССС. В разработанном алгоритме учтены зависимости изменения вероятностно-временных характеристик модели при распределении пропускной способности.

Алгоритмизация поиска оптимального момента вызова дополнительных каналов потребовала аналитического описания представленной модели (рис. 4) на основе матричного подхода. Расчет оптимального момента вызова дополнительного канала происходит следующим образом.

В блоках 2-3 алгоритма происходит определение перечня мультимедийных приложений, используемых абонентом ССС и формирующих трафик, а также формализация процесса обслуживания трафика сложной структуры. В блоке 4 алгоритма составляется система уравнений баланса переходов, которая приводится к системе линейных алгебраических уравнений, описывающих граф модели (рис. 4).

Далее в блоке 5 рассчитываются стационарные вероятности  $P_{nmkl}$  модели. Расчет возможных вариантов конфигурации подключения дополнительных каналов производится в блоке 6. Формирование вектора управляющих параметров, определяющего тот или иной вариант подключения дополнительных каналов, производится в блоке 7. После формируется вектор оптимизируемых параметров системы (блок 8) и задаются ограничения на порядок переходов в модели (блок 9). Далее формируются ограничения (блоки 10-12) и проводится постановка задачи минимизации ресурса пропускной способности:

$$f_0(\mathbf{X}) = [\mathbf{E}_\mu \mathbf{X}] \sum_{k=1}^K \mathbf{E}_k \mathbf{X} + \mathbf{E}_R \mathbf{X} \rightarrow \min_{\mathbf{X}}$$

В блоках 12, 13 проводится реализация итерационного алгоритма оптимизации на основе метода возможных направлений.

1. Формализация вспомогательной задачи линейного программирования:

$$\eta = \max \left\{ \left( \text{grad} \left( f_0(\mathbf{X}^{k-1}), \Psi \right) \right), \left( \text{grad} \left( g_j(\mathbf{X}^{k-1}), \Psi \right) \right), j = \overline{1,3} \right\} \quad (3)$$

с ограничениями

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta \rightarrow \min; \\ \left( \text{grad} \left( f_0(\mathbf{X}^{k-1}), \Psi \right) \right) \leq \eta; \\ \left( \text{grad} \left( g_j(\mathbf{X}^{k-1}), \Psi \right) \right) \leq \eta, \quad j = \overline{1,3}; \\ \psi_z \leq 1, \quad z = \overline{1, Z}; \quad -\psi_z \leq 1, \quad z = \overline{1, Z}. \end{array} \right. \quad (4)$$

2. Решение задачи (3) – (4) при помощи алгоритма симплекс-метода для определения вектора  $\Psi_k$  возможного направления спуска.

3. Формализация вспомогательной задачи линейного программирования:

$$\varphi_k(\theta) = f_0(\mathbf{X}^{k-1} + \theta \Psi^k) \rightarrow \min,$$

с ограничением

$$0 < \theta \leq \bar{\theta}_k.$$

4. Решение задачи при помощи алгоритма симплекс-метода для определения величины шага  $\theta$  спуска.

5. Перемещение в выбранном направлении

$$\mathbf{X}^k = \mathbf{X}^{k-1} + \theta_k \Psi^k.$$

6. Проверка условия прекращения итераций

$$|\eta_k| < \varepsilon_k,$$

где  $\varepsilon_k > 0$  – заданный параметр точности поиска.

7. Нахождение оптимального варианта подключения дополнительного канала:

$$U_g^{opt}(\mu, C(q), t) = \arg \max_{U_g(\mu, C(q), t) \in \Delta U_g} \Delta \rho_g(f_g(\cdot)), \mathcal{G} = \overline{1, Q}.$$

Разработанный алгоритм (рис. 7) позволяет получить оптимальный вариант резервирования пропускной способности, доставляющий максимум коэффициента повышения пропускной способности  $\Delta \rho_g$  (рис. 8).

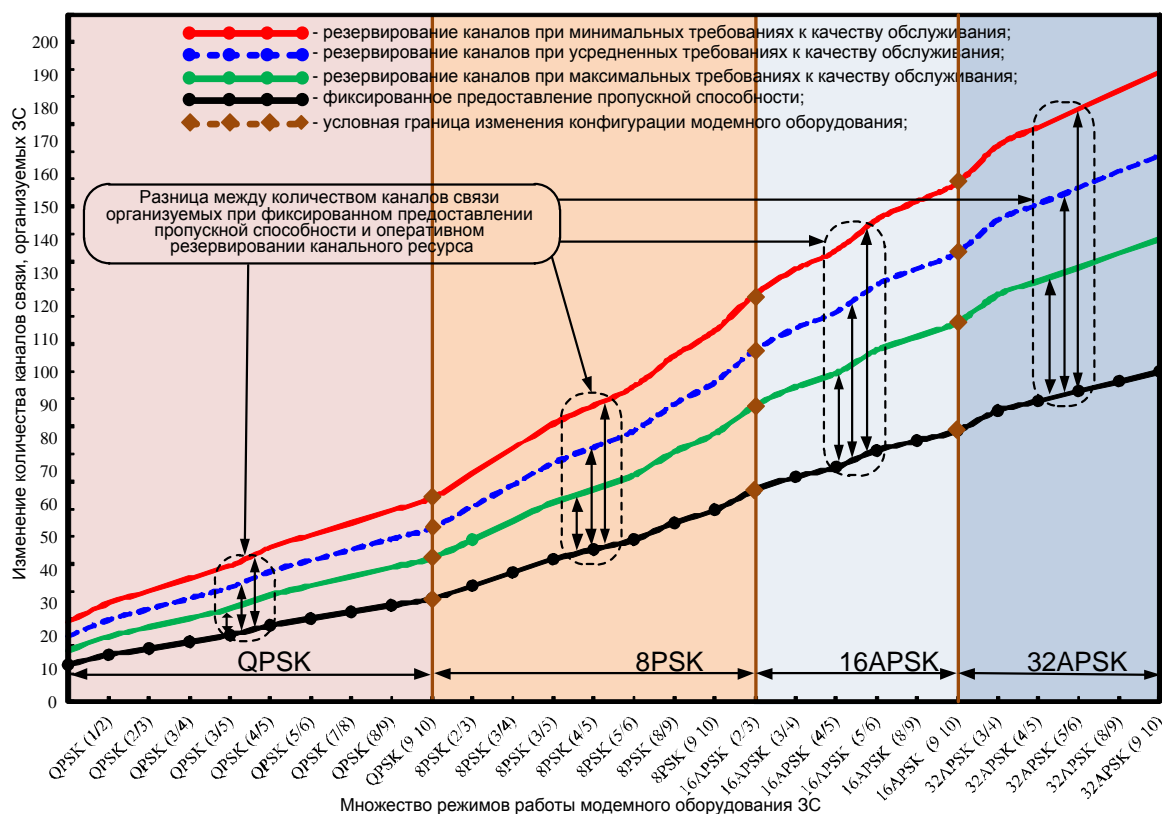


Рис. 8. График изменения количества каналов связи, организуемых ЗС, при оперативном резервировании дополнительных каналов

Применение полученного алгоритма за счет выбора оптимального варианта подключения дополнительного канала позволяет обеспечить обслуживание трафика сложной структуры в условиях изменения режимов работы модема, что соответствует выигрышу по пропускной способности. Стоит отметить, что коэффициент повышения пропускной способности (рис. 8) зависит от требований к качеству обслуживания трафика. Чем выше требования к качеству обслуживания, тем меньше коэффициент повышения пропускной

способности  $\Delta p_d$ . Так, при наиболее жестких требованиях к качеству обслуживания, выигрыш составит до 10%, при менее жестких до 40%.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование алгоритма оперативного резервирования дополнительных каналов ЗС ССС при передаче нестационарного трафика позволяет заметно увеличить число каналов, организуемых ЗС по сравнению с подходом предоставления фиксированной пропускной способности, что соответствует повышению пропускной способности ЗС ССС (рис. 8).

На рис. 8 по оси ординат показано изменение количества каналов связи, организуемых ЗС, а по оси абсцисс указаны сигнально кодовые конструкции, соответствующие режимам работы спутникового модема ЗС, при этом в скобках указана скорость кодирования. При этом стоит отметить, что повышение пропускной способности будет зависеть от требований, предъявляемых к качеству обслуживания, структуры передаваемого трафика, а также от условий помеховой обстановки.

### Заключение

В работе получены следующие результаты, обладающие новизной.

1. Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры ЗС, учитывающая факторы самоподобия и нестационарности входных информационных потоков, формируемых абонентами с использованием разнородных мультимедийных приложений; фактор наличия существенной задержки в линии спутниковой связи, соизмеримой с предельными требованиями по оперативности доставки пакетов мультисервисного трафика; фактор снижения объема доступного радиоресурса в условиях изменения режимов работы модемного оборудования.

2. Алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов ЗС, который позволяет определять величину запрашиваемого ресурса (дополнительных каналов) и момент отправки запроса на предоставление ресурса в зависимости от заполнения буфера ЗС.

Использование полученных результатов в составе математического обеспечения ЗС позволяет повысить эффективность использования ограниченной пропускной способности СР, следовательно, повысить пропускную способность. Следует ожидать, что распространение разработанного подхода к управлению ограниченным ресурсом СР на случай подключения к каждой ЗС группы из  $M$  абонентов, позволит добиться еще более существенного выигрыша в экономии радиоресурса СР за счет оперативного резервирования дополнительного канального ресурса. Однако изучение этого вопроса, учитывая существенное увеличение размерности задачи, является предметом отдельного исследования.

## Литература

1. Bae J. J., Suda T. Survey of Traffic Control Schemes and Protocols in ATM Networks // Proc. IEEE. 1991. vol. 79. № 2. P. 170–186.
2. Антонян А. Б. Пакетная коммутация для передачи речи // Вестник связи. 1999. № 5. С. 68–71.
3. Коган А. В. IP-телефония: оценка качества речи // Технологии и средства связи. 2001. № 1. С. 78–84.
4. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л., Новиков Е. А. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально–помеховой обстановки // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (дата доступа 01.03.2015).
5. Шелухин О. И., Тенякшев А. М., Осин А. В. Моделирование информационных систем. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
6. Шелухин О. И., Лукьянцев Н. Ф. Цифровая обработка речи. – М.: Радио и связь, 2000. – 256 с.
7. Ушанев К. В., Макаренко С. И. Аналитико-имитационная модель функционального преобразования трафика сложной структуры // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 26-44.
8. Akimaru H., Kawashima K. Teletraffic: theory and applications // Springer Science & Business Media. 2012. P. 137–140.
9. Anjum B. MMPP-2 approximation of aggregate IPPs with application to expedited forwarding class in ipbased networks // Communication Technology, 13th IEEE International Conference on Communication Technologies (ICCT), 2011. – P. 494–498.
10. Rajabi A., Wong J. W. MMPP characterization of web application traffic // Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS), 2012. – P. 107–114.
11. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б. С. Цыбакова. М.: Мир, 1979. – 600 с.
12. Косяков Е. Н., Новиков Е. А. Метод оперативного управления радиоресурсом спутника-ретранслятора на основе динамического резервирования каналов с запаздыванием // Информация и космос. 2014. №3. С. 9–13.
13. 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.
14. Новиков Е. А. Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 3 (15). С. 62-69.
15. Ковальский А. А. Модели статистического уплотнения и алгоритмы диспетчеризации разнородного трафика земных станций спутниковой связи в условиях изменяющейся помеховой обстановки // Труды МАИ. 2016. № 90. С. 20. URL: <http://mai.ru/science/trudy/published.php?ID=74818> (дата доступа 20.03.2017).

## Reference

1. Bae J. J., Suda T. Survey of Traffic Control Schemes and Protocols in ATM Networks. *Proc. IEEE*, 1991, vol. 79, no. 2, pp. 170–186.
2. Antonian A. B. Paketnaia kommutatsiia dlia peredachi rechi [Package Switching for a Speech Transmission]. *Vestnik svyazi*, 1999, no. 5, pp. 68–71 (In Russian).
3. Kogan A. V. IP-telefoniia: otsenka kachestva rechi [IP-Telephony: Assessment of Quality of the Speech]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*, 2001, no. 1, pp. 78–84 (In Russian).
4. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. The Research of Data Link Layer and Network Layer Parameters of Communication Channel in the Conditions Dynamic Vary of the Signal and Noise Situation. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 10, p. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (accessed 03 March 2014) (in Russian).
5. Shelukhin O. I., Teniakshev A. M., Osin A. V. *Modelirovanie informatsionnykh sistem* [Modeling of information systems]. Moscow, Radio engineering Publ, 2005. 368 p. (In Russian).
6. Shelukhin O. I., Lukyantsev N. F. *Tsifrovaia obrabotka rechi* [Digital processing of speech]. Moscow, Radio and communication, 2000. 256 p. (In Russian).
7. Ushanev K. V., Makarenko S. I. Analytical-Simulation Model of Functional Conversion of Complex Traffic. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 2, pp. 26-44. (In Russian).
8. Akimaru H., Kawashima K. Teletraffic: theory and applications. *Springer Science & Business Media*, 2012, pp. 137–140.
9. Anjum B. MMPP-2 approximation of aggregate IPPs with application to expedited forwarding class in ipbased networks. *Communication Technology*, 13th IEEE International Conference on Communication Technologies (ICCT), 2011, pp. 494–498.
10. Rajabi A., Wong J. W. Mmpp characterization of web application traffic, *Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, 2012. – pp. 107–114.
11. Kleinrock L. *Queueing Systems: Volume II – Computer Applications*. New York: Wiley Interscience, 1975, 576 p.
12. Kosiakov E.N., Novikov E.A. Method of operational radio-resource management on the basis of the dynamic reservations with delay. *Information and Space*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 9–13. (In Russian).
13. Novikov E. A. Operative distribution of Satellite repeater radio resource in terms of non-stationary ingress flow with account of time lagged control. *Information and Control Systems*, 2014, vol. 69, no. 2, pp. 79-87 (In Russian).
14. Novikov E. A. Assessment of reflecting satellite transmission capacity when reserving a feed-forward radio resource. *Radio and Telecommunication Systems*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 62-69. (In Russian).



15. Kovalsky A. A. Models of statistical consolidation and algorithms of scheduling of the diverse traffic terrestrial stations of satellite communication in the conditions of the changing interfering situation. *Trudy MAI*, 2016, no. 90, pp. 20. Available at: <http://mai.ru/science/trudy/published.php?ID=74818> (accessed 20 March 2017). (in Russian).

Статья поступила 20 марта 2017 г.

### Информация об авторах

*Новиков Евгений Александрович* – доктор технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: системы управления, системный анализ, теория сложных систем, системы и комплексы связи космического назначения. E-mail: [novikov.evg.al@gmail.com](mailto:novikov.evg.al@gmail.com)

*Зиннуров Салават Халилович* – кандидат технических наук. Инженер учебной лаборатории кафедры систем и средств радиоэлектронной борьбы. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: системный анализ, системы управления связью, системы и комплексы связи космического назначения. E-mail: [zinnurov\\_salavat@mail.ru](mailto:zinnurov_salavat@mail.ru)

*Адрес:* 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13.

---

## Flexible Service Model of Complex Traffic and Real-time Algorithm of Channel Reserve for Satellite Earth Stations

E. A. Novikov, S. Kh. Zinnurov

**Relevance.** At present, there is a high demand on services transmitting a multimedia content, telephone and video communications and transferring data which can be satisfied by using satellite networks in certain cases. The traffic load created at the same time generally has a complex structure. The coverage of servicing areas of satellite networks, on the one hand, and the principal scarcity of the orbital radio resource, on the other hand, require online radio resource management in order to increase its use efficiency. One of the ways to improve the radio resource use efficiency is multiplexing satellite radio lines taking into account the statistical characteristics of the relayed traffic and the operating modes of the satellite modem. **The paper purpose** is to develop the model of the flexible service of the complex structure traffic and an real-time algorithm of channels reserve in the earth stations through variation of the traffic received from various subscribers of the earth station which allows to improve the radio resource use efficiency (the capacity expressed in the number of available channels) of the satellite communication network by means of online backup of the channel radio resource. **Results.** The searching of backup channels is defined as a non-linear programming task, as well as the example how to resolve it while servicing the complex structure traffic created by a group of subscribers is provided. **The novelty** of the approach is that a new model of the flexible service of the complex structure traffic provided by the earth station different from the known ones due to taking into account the dynamics of the capacity change when switching between the operating modes of the modem equipment is developed. The developed model as a four-dimensional Markov chain was obtained on the basis of the state space extension using models of the configuration change of the modem equipment, of the group source of the complex structure traffic, of channel resource backup with time delay, as well as of the service process of the single channel system traffic. The assumptions concerning the exponential laws of distribution of duration of subscribers' activity and pauses, delay in connecting to an auxiliary channel resource, duration of transferring individual communications, and intervals between them, as well as time interval sizes for the readjustment of the

modem equipment are adopted as limitations. The algorithm different from the known ones due to taking into account the current allocation of the channel resource is proposed on the basis of the developed model and allows to find an optimal moment of the auxiliary channel connection in case of a significant increase in the power of a set of alternatives. An example how to complete the set task is provided. **Practical significance.** The total results obtained as a model of the flexible service of the complex structure traffic and as the algorithm will allow increasing the capacity of the satellite communication network by 10-40% while ensuring the specified quality of the subscribers' service.

**Key words:** relay satellite, radio resource, earth station, interrupted Poisson flow, modulated Markov process, online backup, complex structure traffic.

### Information about Authors

*Evgenii Aleksandrovich Novikov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Network and Communication Systems of Space Systems. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: control systems, systems analysis, theory of complex systems, network and communication systems of space systems. E-mail: novikov.evg.al@gmail.com

*Salavat Khalilovich Zinnurov* – Ph.D. of Engineering Sciences. Engineer at Laboratory at the Systems and Electronic Warfare Department. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: systems analysis, the control communication systems, network and communication systems of space systems. E-mail: zinnurov\_salavat@mail.ru

Address: Russia, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.