

УДК 621.396

Оценка своевременности связи при передаче мультисервисного трафика в сети спутниковой связи специального назначения

Новиков Е. А., Уткин Д. Р., Шадрин А. Г., Квасов М. Н.

Постановка задачи. Повышение интенсивности пользовательской нагрузки на земные станции сетей спутниковой связи специального назначения актуализирует вопросы обеспечения требований к связи, в частности, к своевременности связи. Известные способы обеспечения своевременности связи в сетях спутниковой связи специального назначения с обратным спутниковым каналом обладают низкой эффективностью, т.к. основываются на механизмах введения избыточности в величину запрашиваемого ресурса спутника-ретранслятора. Необоснованная избыточность сформированного запроса ресурса приводит к невыполнению требований к качеству обслуживания мультисервисного трафика, что впоследствии негативно сказывается на своевременности связи. **Целью работы** является обеспечение требований к своевременности связи в сети спутниковой связи специального назначения с обратным спутниковым каналом при передаче мультисервисного трафика. **Используемые методы.** Предлагается применять модификацию метода прогнозирования интенсивности пользовательской нагрузки на основе использования механизмов прямого и обратного дискретного вейвлет-преобразования с целью повышения качества прогноза интенсивности мультисервисного трафика. **Новизна.** элементами новизны представленного решения является учет долговременных корреляционных зависимостей, характерных для нестационарного мультисервисного трафика, обладающего свойствами самоподобия, а также учет возможности определения границы масштабирования при осуществлении прямого дискретного вейвлет-преобразования. **Результаты.** Разработана модель прогнозирования интенсивности пользовательской нагрузки в сети спутниковой связи специального назначения, учитывающая особенности процессов обработки и передачи трафика. На примере расчета своевременности связи с использованием предлагаемой модели продемонстрированы возможности использования дискретного вейвлет-преобразования для обработки анализируемых временных рядов. **Практическая значимость.** Представленное решение предлагается реализовать в составе математического обеспечения коммутационного оборудования сетей с организацией обратного спутникового канала стандарта DVB-RCS. Использование вейвлет-преобразования для построения прогноза интенсивности пользовательской нагрузки позволяет повысить своевременность связи в сети спутниковой связи специального назначения по сравнению со штатными механизмами резервирования на величину до 48% и осуществлять эффективное использование выделенного ресурса пропускной способности в обратных каналах сетей спутниковой связи специального назначения.

Ключевые слова: спутниковая сеть связи, обратный спутниковый канал, требования к связи, мультисервисный трафик, вейвлет-преобразование.

Актуальность

Анализ применения сетей спутниковой связи (ССС) специального назначения (СН) в современных условиях, показал, что структура передаваемого в

Библиографическая ссылка на статью:

Новиков Е. А., Уткин Д. Р., Шадрин А. Г., Квасов М. Н. Оценка своевременности связи при передаче мультисервисного трафика в сети спутниковой связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 136-155. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/07-Novikov.pdf>

Reference for citation:

Novikov E. A., Utkin D. R., Shadrin A. A., Kvasov M. N. Assessment of Timeliness for a Transmission Process of Multi-Service Traffic in a Satellite Communication Network of Special Purpose. Systems of Control, Communication and Security, 2018, no. 1, pp. 136-155. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/07-Novikov.pdf> (in Russian).

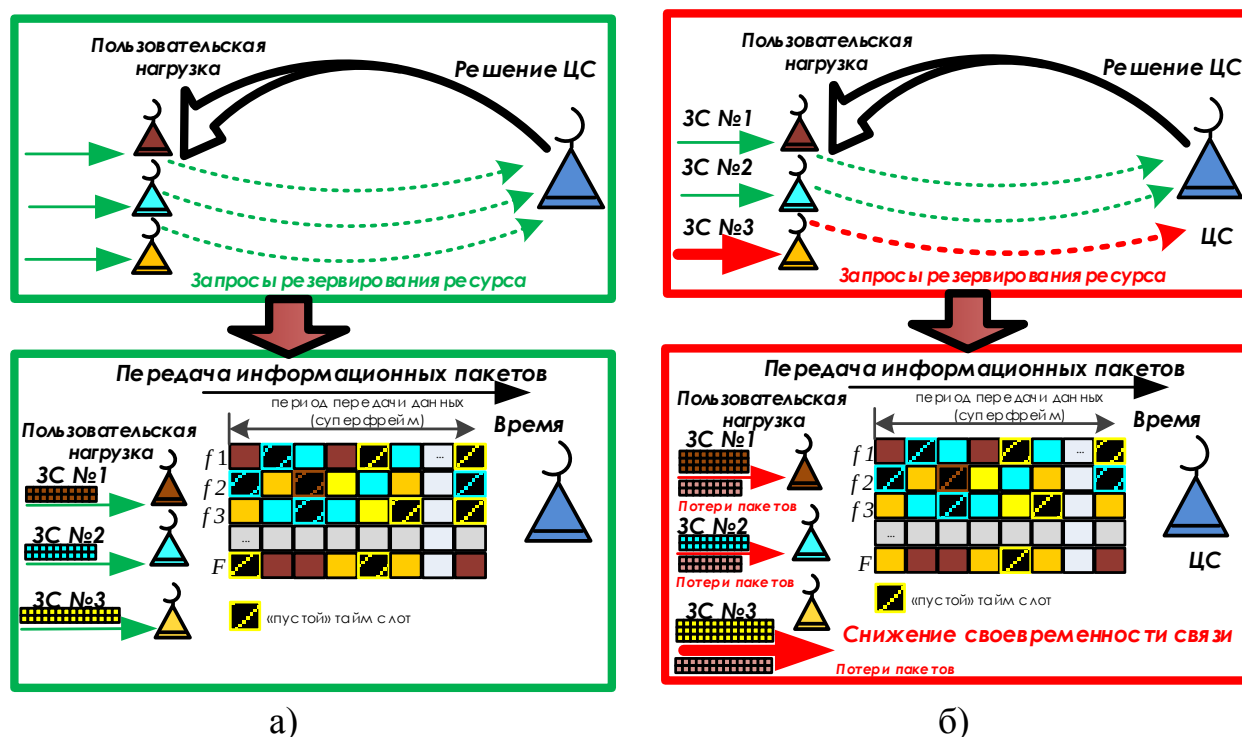
сетях потока сообщений (мультисервисного трафика) становится все более сложной и характеризуется нестационарностью и долговременной корреляционной зависимостью (так называемое свойство «самоподобия»), что особенно отчетливо проявляется при необходимости передачи больших объемов информации. Под мультисервисным трафиком понимается нагрузка на сеть связи, создаваемая различными службами сети, которые генерируют потоки речевой и видео информации, электронной корреспонденции, управляющих сигналов [1]. Степень «самоподобия» трафика определяется показателем самоподобия H (коэффициент Херста). Значение $H=0,5$ соответствует низкой степени самоподобия, а значение $H \rightarrow 1$ соответствует высокой степени самоподобия (нестационарный трафик, трафик со сложной структурой).

Согласно [2] оборудование существующих и перспективных CCC СН совместимо со спецификацией открытого стандарта DVB-RCS (Digital Video Broadcasting Return Channel via Satellite) [3, 4]. Методологическую основу стандарта DVB-RCS составляет метод многочастотного множественного доступа MF-TDMA (Multiple-Frequency Time-Division Multiple Access) земных станций (ЗС) CCC СН к ресурсу спутника-ретранслятора (СР) [4]. Обслуживание трафика в вышеуказанных сетях осуществляется с использованием протоколов резервирования, которые базируются на формировании запросов резервирования пропускной способности обратного канала под поступающую нагрузку. Рекомендованные стандартом DVB-RCS механизмы предоставления ресурса обратного канала по требованию могут основываться на процедуре выделения каждой земной станции (ЗС) CCC СН временных слотов в структуре кадра в соответствии с поступающими от ЗС запросами резервирования на центральную станцию (ЦС). В настоящее время в большинстве CCC СН запросы от ЗС формируются с учетом величины дополнительного резерва (резервирования с запасом) на основе построения прогнозов интенсивности пользовательской нагрузки [2, 5] и в сумме могут превышать необходимую пропускную способность обратного канала т. е. запросы резервирования ресурса могут являться избыточными [2, 5]. Степень соответствия величины суммы запросов и величины необходимого ресурса обратного канала зависит от качества сформированных прогнозов интенсивности пользовательской нагрузки на ЗС CCC СН. При усложнении структуры трафика качество прогнозов интенсивности пользовательской нагрузки на ЗС CCC СН снижается, а избыточность запросов резервирования радиоресурса увеличивается. Анализ литературы [2, 6-9] показал, что в существующих CCC СН для решения задачи прогнозирования интенсивности трафика используются подходы на базе механизмов оценки, основанных на регрессионном анализе, гармоническом анализе, экспоненциальном сглаживании [11]. Такие подходы при прогнозировании нестационарных временных рядов, к которым относятся и ряд значений интенсивности трафика в CCC СН, обладают рядом недостатков, в частности:

- 1) необходимостью предварительной подготовки нестационарного ряда путем приведения к стационарному виду;

- 2) высокой вычислительной сложностью алгоритмов прогнозирования при необходимости учета временных зависимостей между значениями ряда.

Следствием избыточности запросов на предоставление ограниченного ресурса СР является нехватка пропускной способности обратного канала ССС СН, что приводит к возрастанию очередей пакетов, ожидающих передачи на ЗС и, соответственно, росту задержек отдельных потоков трафика в то время, как часть избыточного ресурса обратного канала используется не полностью (рис. 1).



а)
Рис. 1. Процесс функционирования ССС СН

а) при штатной пользовательской нагрузке;

б) при лавинообразном увеличении пользовательской нагрузки

Проведенный анализ литературы [2, 5-12] показал, что возрастание очередей пакетов, ожидающих передачи в буфере ЗС приводит к невыполнению требований к длительности передачи и приема сообщений или, другими словами, к невыполнению требований к своевременности связи [6]. Под своевременностью связи понимается способность связи обеспечить передачу пакетов различных видов трафика в заданное время [6]. При обмене информацией в ССС СН прогноз интенсивности пользовательской нагрузки строится автоматически. В связи с этим своевременность связи напрямую зависит от уровня знаний о текущем и будущем значениях интенсивности пользовательской нагрузки.

В связи с вышесказанным, исследования, направленные на повышение качества запросов резервирования ресурса обратного канала ССС СН, являются актуальными. Предлагаемые в статье изменения в процедуру резервирования ресурса обратного канала сети заключаются в использовании подхода на основе

дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) при прогнозировании интенсивности пользовательской нагрузки отдельной ЗС и дальнейшем учете значений ожидаемой нагрузки при формировании запросов от ЗС к ЦС по резервирования ресурса обратного канала. Под ресурсом ССС СН понимается число каналов спутниковой связи, выделяемых каждой ЗС.

В статье предлагается подход к обеспечению своевременности связи в ССС СН в условиях повышенной пользовательской нагрузки при поступлении нестационарного трафика.

Постановка задачи

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
K_C	– своевременность связи при использовании механизмов дискретного вейвлет-преобразования выборки трафика
$q = \overline{1,4}$	– вид трафика (1 – сигналы управления, 2 – данные, 3 – речь, 4 – видео)
$P_{\text{треб}}^q$	– требуемая своевременность связи
$T_{\text{пп}}^{q \text{ треб}}$	– требуемый интервал времени передачи пакета
$\Delta t_{\text{пп}}^q$	– интервал времени передачи пакета
$\Delta t_{\text{ож}}^q$	– интервал времени ожидания пакета в буфере
$\hat{\Delta t}_{\text{ож}}^q$	– прогнозируемый интервал времени ожидания пакета в буфере
$T_{\text{ож}}^{q \text{ треб}}$	– требуемый интервал времени ожидания пакета в буфере
$T_{\text{л}}$	– интервал времени распространения сигнала в спутниковой линии
$P_{\text{ож}}^q$	– вероятность того, что время ожидания пакета не превысит требуемое
$P_{\text{кач}}^q$	– вероятность качественного прогноза
Δt_i	– дискрет времени, для которого строится прогноз
$N(\Delta t_i)$	– число пакетов трафика, поступившее на ЗС ССС СН в течение Δt_i
$\lambda_q^{\text{opt}}(\Delta t_i)$	– максимальная интенсивность поступления пакетов при минимальной интенсивности обслуживания пакетов
$\lambda_q(\Delta t_i)$	– интенсивность поступления пакетов
$\hat{\lambda}_q(\Delta t_i)$	– прогнозируемая интенсивность поступления пакетов
$\mu_q^{\text{opt}}(\Delta t_i)$	– минимальная интенсивность обслуживания пакетов при максимальной интенсивности поступления пакетов
$\mu_q(\Delta t_i)$	– интенсивность обслуживания пакетов

Обозначение	Физический смысл обозначения
$\hat{\mu}_q(\Delta t_i)$	– прогнозируемая интенсивность обслуживания пакетов
ρ_q^{opt}	– нагрузка при максимальной интенсивности поступления пакетов и минимальной интенсивности обслуживания пакетов
γ_q	– качество прогноза интенсивности пользовательской нагрузки
$i = \overline{1, I}$	– шаг прогнозирования на исходном временном ряду
$j = \overline{0, J}$	– уровни масштаба вейвлет-преобразования
$k = \overline{1, K}$	– количество коэффициентов вейвлет-преобразования
z	– запас выделяемого ресурса
$\hat{p}_v$	– прогнозируемая вероятность нахождения системы в состоянии v

Своевременность связи характеризуется показателем K_C , представляемым в следующем виде:

$$K_C = P_C^q(\Delta t_{пп}^q \leq T_{пп}^{q \text{ треб}}) = 1 - P_{НС}^q(\Delta t_{пп}^q \geq T_{пп}^{q \text{ треб}}), \quad (1)$$

где:

$P_C^q(\Delta t_{пп}^q \leq T_{пп}^{q \text{ треб}})$ – вероятность того, что длительность интервала времени передачи пакета $\Delta t_{пп}^q = t_{ппj}^q - t_{ппj-1}^q$, не превысит требуемую длительность $T_{пп}^{q \text{ треб}}$;

$P_{НС}^q(\Delta t_{пп}^q \geq T_{пп}^{q \text{ треб}})$ – вероятность того, что длительность интервала времени передачи пакета превысит требуемую (невыполнение требования к своевременности связи); $q = \overline{1, 4}$ – вид трафика (например: 1 – сигналы управления, 2 – данные, 3 – речь, 4 – видео).

Длительность интервала времени передачи пакета является случайной величиной, значение которой зависит от влияния достаточно большого числа факторов различной природы [10], как целенаправленных, так и нецеленаправленных. В общем случае время передачи пакета выражается:

$$\Delta t_{пп}^q = \Delta t_{ож}^q + T_{л} \Rightarrow \Delta t_{ож}^q = \Delta t_{пп}^q - T_{л}, \quad (2)$$

где:

$\Delta t_{ож}^q = t_{ожj}^q - t_{ожj-1}^q$ – время ожидания пакета в очереди;

$T_{л}$ – время распространения сигнала в линии спутниковой связи от ЗС к СР.

Требуемое время передачи пакета выражается:

$$T_{пп}^{q \text{ треб}} = T_{ож}^{q \text{ треб}} + T_{л} \Rightarrow T_{ож}^{q \text{ треб}} = T_{пп}^{q \text{ треб}} - T_{л}, \quad (3)$$

где $T_{ож}^{q \text{ треб}}$ – верхний предел времени ожидания пакета q -го вида трафика в очереди.

При $T_{л} = \text{const}$, с учетом (2) и (3) имеем:

$$P_{ож}^q(\Delta t_{ож}^q \leq T_{ож}^{q \text{ треб}}) \geq P_{треб}^q \text{ т.е. } K_C = P_C^q(\Delta t_{пп}^{l,m,q} \leq T_{пп}^{q \text{ треб}}) \geq P_{треб}^q, \quad (4)$$

где $P_{\text{треб}}^q$ – требуемая своевременность связи для q -го вида трафика (таблица 2) [11].

Таблица 2 – Требования к своевременности связи в ССС СН

Вид	Трафик нереального времени (максимальное время доведения сообщения (с)/вероятность доведения сообщения)	
1	Приоритетные сообщения объемом до 100 байт	10/0,99
2	Сообщения объемом до 400 байт	15/0,97
Трафик реального времени (максимальное время доставки пакета $T_{\text{пп}}^q$ (мс)/вероятность доставки пакета $P_{\text{треб}}^q$)		
3	Телефония	350/0,95
4	Видеотелефония	400/0,95

Анализ работ [12-14, 18], посвященных оценке вероятностно-временных характеристик процессов обслуживания трафика в ССС СН, а также численному расчету узлов сетей с ограниченным буфером при обслуживании различных видов трафика, позволил оценить влияние качества прогноза интенсивности пользовательской нагрузки на время ожидания пакета в буфере.

В качестве характеристики качества прогноза интенсивности пользовательской нагрузки целесообразно использовать среднюю ошибку аппроксимации, которая определяется по формуле вида [15]:

$$\gamma_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\lambda_q(\Delta t_i) - \hat{\lambda}_q(\Delta t_i)|}{\lambda_q(\Delta t_i)}, \quad (5)$$

где:

$\lambda_q(\Delta t_i)$ – реальное значение интенсивности трафика на интервале времени Δt_i ;

$\hat{\lambda}_q(\Delta t_i)$ – прогнозируемое значение интенсивности трафика на интервале времени Δt_i .

Уменьшение величины γ_q , т.е. улучшение качества прогноза позволяет обеспечить ЗС требуемым количеством ресурса, сократить время ожидания пакета в буфере ЗС и достигнуть необходимой своевременности связи в ССС СН.

Для оценки своевременности связи ССС СН рассмотрим случайную величину – время ожидания пакета в буфере ЗС – $\Delta t_{\text{ож}}^q$. Для анализа процесса передачи пакетов ЗС ССС СН используется математический аппарат случайных марковских процессов [16], позволяющий определять зависимости между случайными величинами [17]. Процесс передачи пакетов характеризуется дискрет-

ным множеством состояний с непрерывным временем. Каждое состояние соответствует числу пакетов, находящихся в очереди в буфере ЗС ССС СН.

Требуемое (прогнозируемое) количество ресурса или, другими словами, прогноз интенсивности обслуживания пакетов $\hat{\mu}_q(\Delta t_i)$ определяется как:

$$\hat{\mu}_q(\Delta t_i) = z \cdot \hat{\lambda}_q(\Delta t_i) / \rho_q^{opt}(\Delta t_i), (6)$$

где z – запас выделяемого ресурса (при качественном прогнозе – $\gamma_q \leq 0,1$, запас

выделяемого ресурса $z = 1 + \gamma_q$), $\rho_q^{opt} = \frac{\lambda_q^{opt}(\Delta t_i)}{\mu_q^{opt}(\Delta t_i)}$ – оптимальная нагрузка, т.е.

нагрузка, соответствующая минимальному значению интенсивности обслуживания пакетов $\mu_q^{opt}(\Delta t_i)$ при максимальной интенсивности поступления пакетов $\lambda_q^{opt}(\Delta t_i)$. Цветные линии на рис. 2 соответствуют оптимальной нагрузке ρ_q^{opt}

для различных видов трафика ($q = \overline{1,4}$). Также, на рисунке заштрихованными областями показаны состояния системы «нехватка ресурса» (один штрих), и «избыточность ресурса» (два штриха) для вида трафика – видеотрафик ($q = 4$), выбранного в качестве примера.

Величина $M[\Delta t_{ож}^q]$ определяется прогнозируемыми значениями стацио-

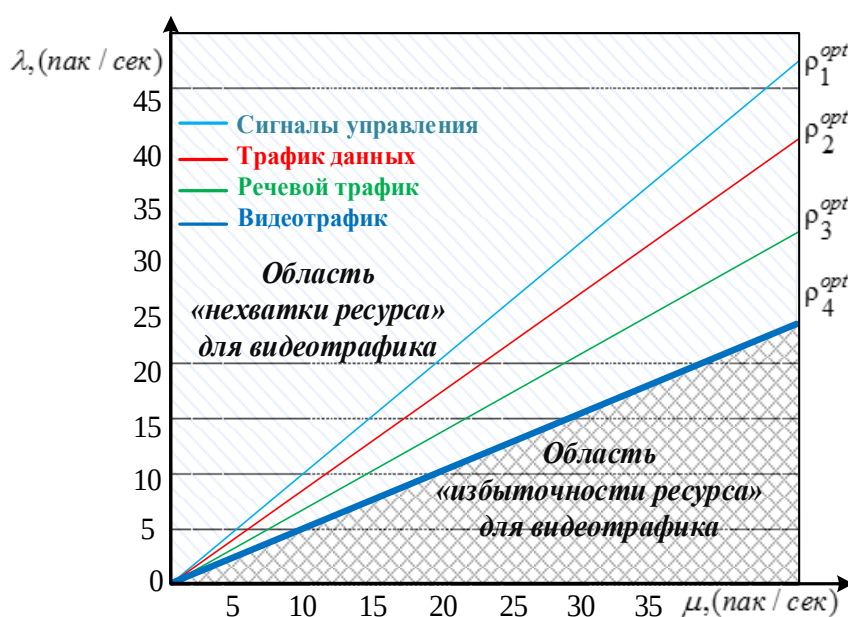


Рис. 2. Оптимальная нагрузка. Взаимосвязь интенсивности обслуживания пакетов и интенсивности поступления пакетов

нарных вероятностей состояний марковского процесса, которые для речевого и видеотрафика (графы переходов состояний марковского процесса представлены на рис. 3) вычисляются по формуле 7 [18]:

$$\hat{p}_v(v = \overline{0, r+1}) = \begin{cases} \frac{(\rho_q^{opt})^r (1 - \rho_q^{opt})}{1 - (\rho_q^{opt})^{r+2}}, & \rho_q^{opt} \neq 1 \\ \frac{(\rho_q^{opt})^r}{r+2}, & \rho_q^{opt} = 1 \end{cases}, \quad (7)$$

С учетом (6), (7), количества пакетов в буфере v , емкости буфера r (значение $r+1$ соответствует состоянию «перегрузка»), среднее прогнозируемое время ожидания пакетов в буфере $M[\Delta \hat{t}_{ож}^q]$ для речевого и видеотрафика определяется по формулам 8, 9 с использованием известных моделей массового обслуживания [18]:

– для речевого трафика:

$$M[\Delta \hat{t}_{ож}^3] = \frac{\sum_{v=1}^{r+1} (v-1) \sum_{m=0}^M \hat{p}_v}{\hat{\lambda}_3(\Delta t_i)(1 - \hat{p}_{r+1})}, \quad (8)$$

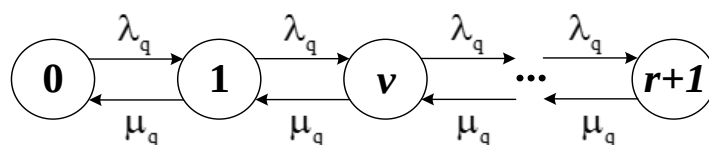


Рис. 3. Граф переходов состояний для ЗС ССС СН при передаче речевого и видеотрафика

– для видеотрафика:

$$M[\hat{t}_{ож}^4] = \frac{\sum_{v=1}^{r+1} (v-1) \sum_{m=0}^M \hat{p}_v}{\hat{\lambda}_4(\Delta t_i)(1 - \hat{p}_{r+1})}, \quad (9)$$

Для трафика данных и сигналов управления (граф переходов состояний марковского процесса с учетом буфера неограниченной ёмкости представлен на рис. 4) вероятности $\hat{p}_{v,m}(v = \overline{0, r+1})$, вычисляются по формуле 10 [18]:

$$\hat{p}_v(v = \overline{0, r+1}) = (\rho_q^{opt})^r (1 - \rho_q^{opt}) \quad (10)$$

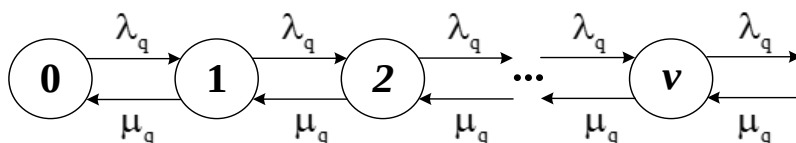


Рис. 4. Граф переходов состояний для ЗС ССС СН при передаче трафика данных и сигналов управления

Тогда среднее время ожидания пакетов в буфере для трафика данных и

сигналов управления определяется как:

$$M[\hat{t}_{ож}^1] = M[\hat{t}_{ож}^2] = \frac{(\rho_1^{opt})^2}{(1 - \rho_1^{opt})} = \frac{(\rho_2^{opt})^2}{(1 - \rho_2^{opt})} \quad (11)$$

Вероятность того, что время ожидания пакета не превысит прогнозируемое время ожидания пакета (вероятность качественного прогноза) определяется:

$$P_{кач}^q(\Delta t_{ож}^q \leq M[\hat{t}_{ож}^q]) \geq P_{треб}^q, \text{ при } \gamma \leq 0,1 \text{ и } \hat{\lambda}_q(\Delta t_i) \geq \lambda_q^{\min}(\Delta t_i), \quad (12)$$

где $\lambda_q^{\min}(\Delta t_i)$ – минимальная интенсивность входного потока пакетов, т.е. интенсивность входного потока, обеспечивающая передачу пакетов в любых условиях обстановки.

При этом распределение случайной величины времени ожидания пакета в буфере $\Delta t_{ож}^q$ аппроксимируется гамма-распределением $\Gamma_{a,b}(\Delta t_{ож}^q)$ [19] с параметрами $a > 0$ (параметр формы), $b > 0$ (параметр масштаба).

Обобщая полученные зависимости, своевременность связи в ССС СН определяется:

$$P_{кач}^q \geq P_{треб}^q \Rightarrow P_{ож}^q \geq P_{треб}^q \Rightarrow P_{пп}^q \geq P_{треб}^q \quad (13)$$

Снижение точности прогноза из-за усложнения структуры трафика приводит к снижению качества резервирования ресурса обратного канала ССС СН [20]. Снижение качества резервирования ресурса обратного канала приводит к тому, что выделяемый ЗС ресурс перестает соответствовать поступающей нагрузке, и соответственно, к увеличению значения $\Delta t_{ож}^q$, что соответствует снижению уровня своевременности связи, что показано на рис. 5.

Модель прогнозирования пользовательской нагрузки в сети спутниковой связи

Проведенный анализ подходов к прогнозированию нестационарных временных рядов, к которым относится и ряд интенсивности трафика, показал, что алгоритмы на основе известных методов [15] обладают высокой вычислительной сложностью при необходимости учета долговременных корреляций. Предлагаемая модель прогнозирования интенсивности пользовательской нагрузки на ЗС ССС СН основана на механизмах прямого и обратного ДВП, а также оценивания и прогнозирования коэффициентов разложения на основе оптимизации параметров алгоритма скользящей средней. Структура полимодельного комплекса показана на рис. 6.

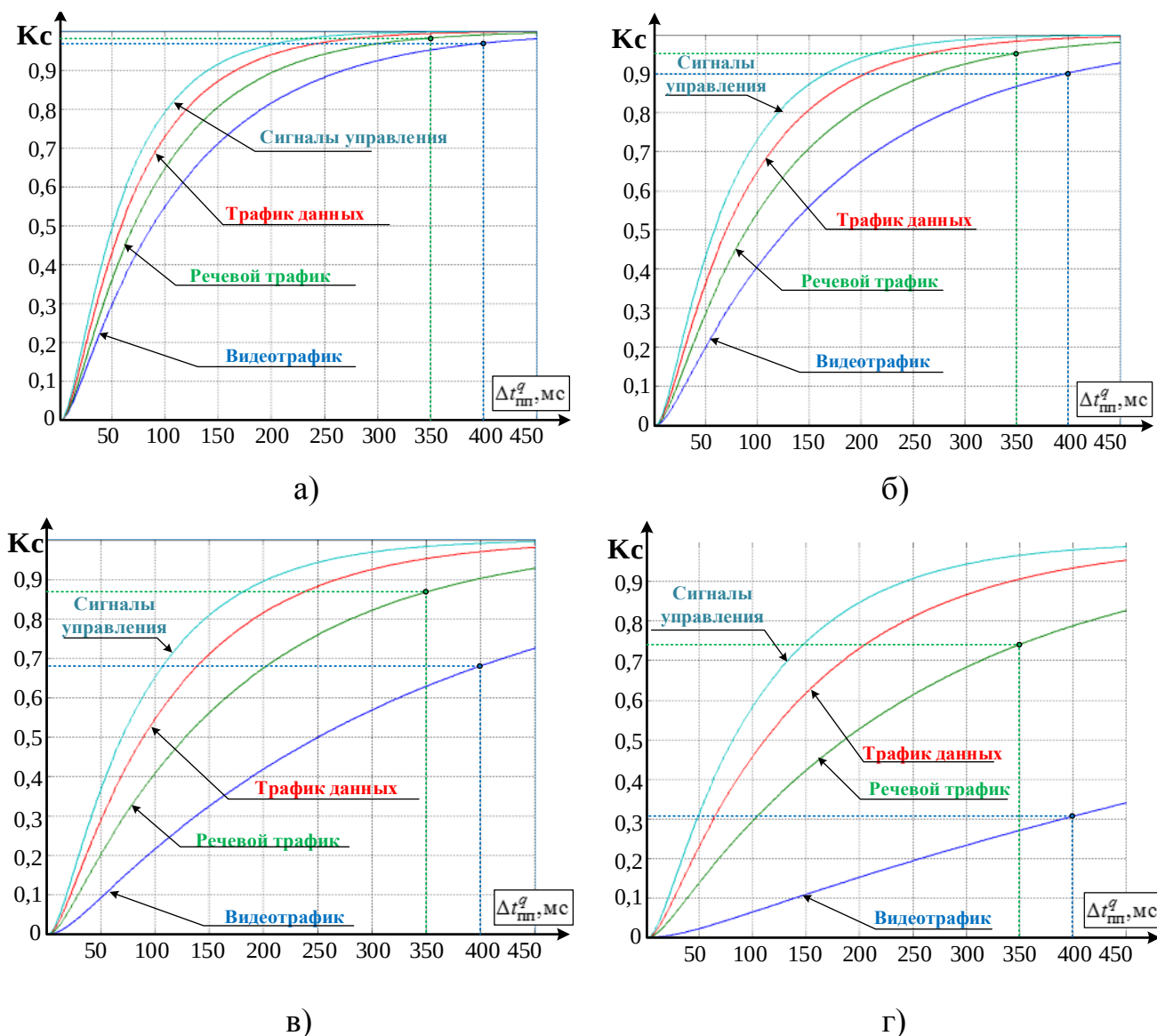


Рис. 5. Своевременность связи в ССС СН
при усложнении структуры трафика:
а) Показатель Херста $H=0,58$; б) Показатель Херста $H=0,75$;
в) Показатель Херста $H=0,81$; г) Показатель Херста $H=0,87$

Для решения задач прогнозирования интенсивности пользовательской нагрузки процесс поступления трафика на ЗС ССС СН представлен в виде временного ряда (количество пакетов/дискрет) [21, 22]:

$$\tilde{N}(\Delta t_i) = N(t_i) - N(t_{i-1}), \quad t_i \in [0, T_{ан}], \quad (14)$$

где $N(\Delta t_i)$ – число пакетов трафика, поступившее на ЗС ССС СН в течение интервала времени $[t_{i-1}, t_i]$, $N(t_i)$ – число пакетов трафика, поступившее на ЗС ССС СН в течение интервала времени $[0, t_i]$; $T_{ан}$ – длительность интервала анализа трафика. Необходимо отметить, что предел $\lim_{(t_i - t_{i-1}) \rightarrow 0} \frac{N(t_i) - N(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}$ есть мгновенное значение интенсивности поступления пакетов трафика $\lambda(\Delta t_i)$ в момент времени t_i .

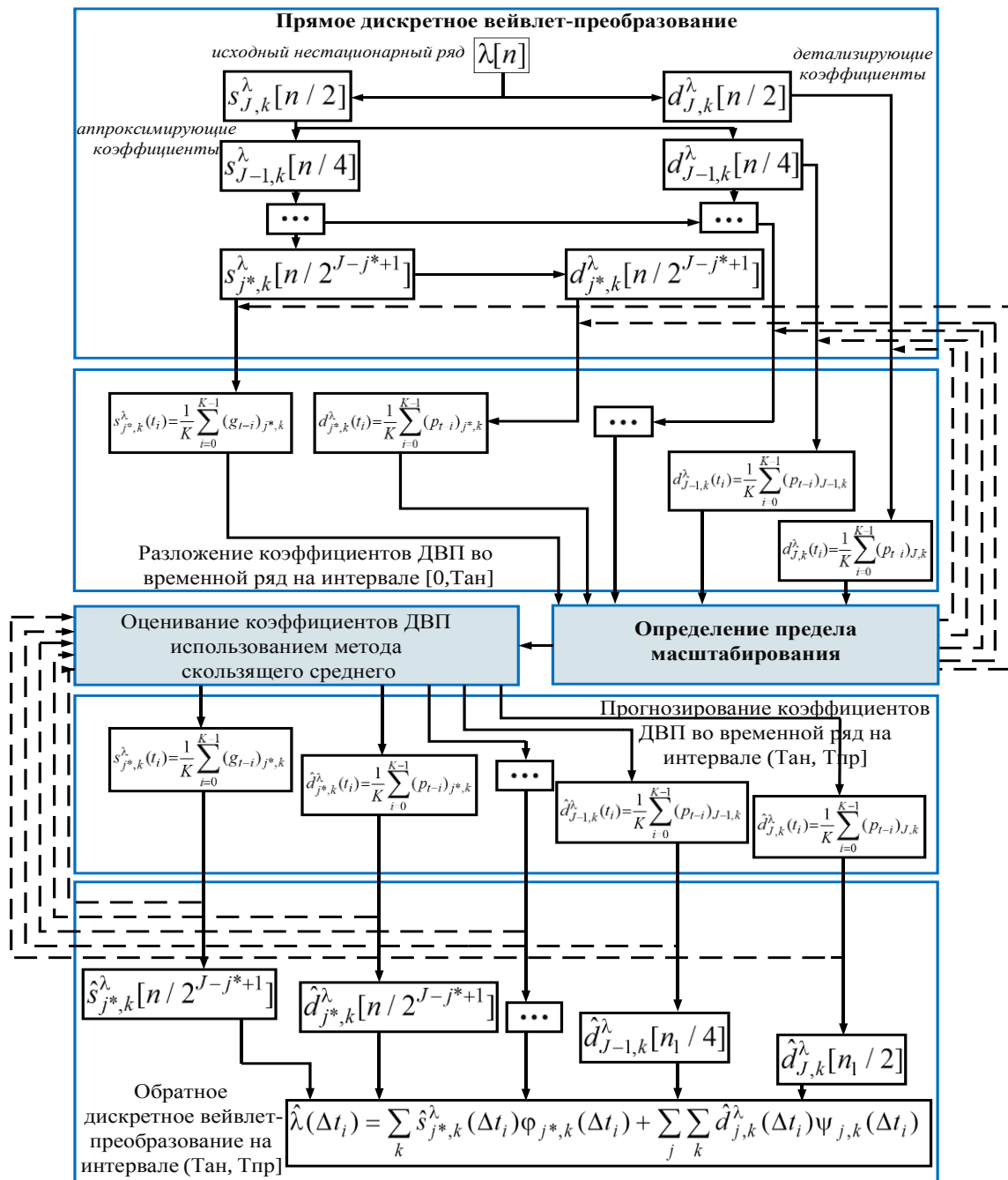


Рис. 6. Структура полимодельного комплекса прогнозирования интенсивности трафика

Прямое ДВП на основе вейвлета Хаара позволяет последовательно определить коэффициенты разложения $s_{j-1,k} = (s_{j,2k} + s_{j,2k+1}) / \sqrt{2}$ и $d_{j-1,k} = (s_{j,2k} - s_{j,2k+1}) / \sqrt{2}$ на необходимом числе уровней $J+1$, где $s_{j-1,k}$ – аппроксимирующие коэффициенты ДВП; $d_{j-1,k}$ – детализирующие коэффициенты ДВП; $j = \overline{0, J}$ – уровень ДВП; k – сдвиг по временной оси. В этом случае ряд $N(t_i)$ может быть представлен в виде:

$$\lambda(\Delta t_i) = s_{0,0}^{\lambda} \varphi_{0,0}(\Delta t_i) + \sum_j \sum_k d_{j,k}^{\lambda}(\Delta t_i) \psi_{j,k}(\Delta t_i), \quad t_i \in [0, T_{\text{ан}}]. \quad (15)$$

Далее осуществляется представление коэффициентов $s_{j*,k}^\lambda$ в виде временно-го ряда на требуемом уровне: $\hat{s}_{j*,k}^\lambda(\Delta t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{K-1} (g_{t-i})_{j*,k}$ и коэффициентов $d_{j*,k}^\lambda$ на требуемом уровне и на всех предшествующих: $\hat{d}_{j*,k}^\lambda(\Delta t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{K-1} (p_{t-i})_{j*,k} \dots \hat{d}_{j,k}^\lambda(\Delta t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{K-1} (p_{t-i})_{j,k}$. Осуществляется прогнозирование коэффициентов ДВП (формула 18) [15].

Обратное ДВП, в свою очередь, позволяет на основе значений коэффициентов, рассчитанных на интервале прогноза, получить прогнозную реализацию функции интенсивности от времени на интервале прогноза:

$$\hat{\lambda}(\Delta t_i) = \hat{s}_{0,0}^\lambda(\Delta t_i) \varphi_{0,0}(\Delta t_i) + \sum_j \sum_k \hat{d}_{j,k}^\lambda(\Delta t_i) \psi_{j,k}(\Delta t_i), \quad t_i \in [T_{\text{ан}}, T_{\text{пр}}] \quad (16)$$

Особенностью прогнозирования нестационарных рядов является способность ошибки прогнозирования накапливаться по мере приближения к требуемому горизонту прогнозирования.

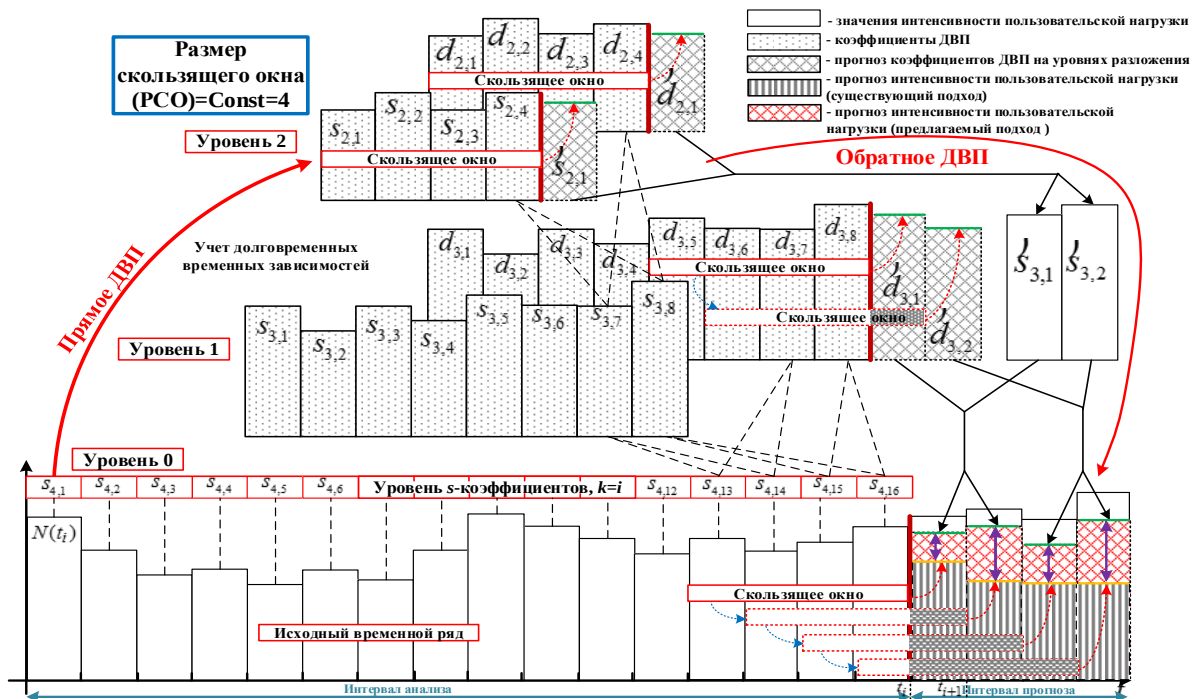


Рис. 7. Процедура дискретного вейвлет-преобразования

Учет долговременных корреляционных зависимостей, характерных для мультисервисного трафика осуществляется за счет способности коэффициентов ДВП без ущерба раскладываться на различные уровни масштаба вейвлет-преобразования (рис. 7). Особенностью предложенной модели является возможность настройки ее параметров, осуществление подбора оптимального размера окна для получения наилучшего прогноза коэффициентов. При этом выборка временного ряда интенсивности трафика, полученная на интервале анализа, делится на две равные части.

Первая часть выборки используется для определения оптимального размера скользящего окна, а вторая часть для проверки точности полученного прогноза. За

счет этого удастся оптимизировать (получить лучшую с точки зрения точности прогноза) процедуру прогноза.

$$N_{opt} = \arg \min \left\{ \gamma_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\lambda_q(\Delta t_i) - \hat{\lambda}_q(\Delta t_i)|}{\lambda_q(\Delta t_i)} \right\}, \Delta t_i \in (T_{ан} / 2, T_{ан}] \quad (17)$$

После оценивания оптимального размера «окна» решается задача прогнозирования коэффициентов ДВП на интервале времени $(T_{ан}, T_{пр}]$.

Для построения прогнозов коэффициентов ДВП, на уровнях масштаба, используется метод скользящей средней:

$$\hat{d}_{J,k}^{\lambda}(\Delta t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{K-1} (g_{t-i})_{J,k}; \quad \hat{s}_{0,k}^{\lambda}(\Delta t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{K-1} g_{t-i}. \quad (18)$$

При использовании предлагаемого подхода удастся повысить уровень своевременности связи при увеличении пользовательской нагрузки на ЗС ССС СН по сравнению со штатными механизмами резервирования на величину до 48% и обеспечить требуемый уровень своевременности связи (рис. 8, рис. 9).

Разброс значений показателя своевременности связи обусловлен различным качеством решения задачи прогнозирования пользовательской нагрузки.

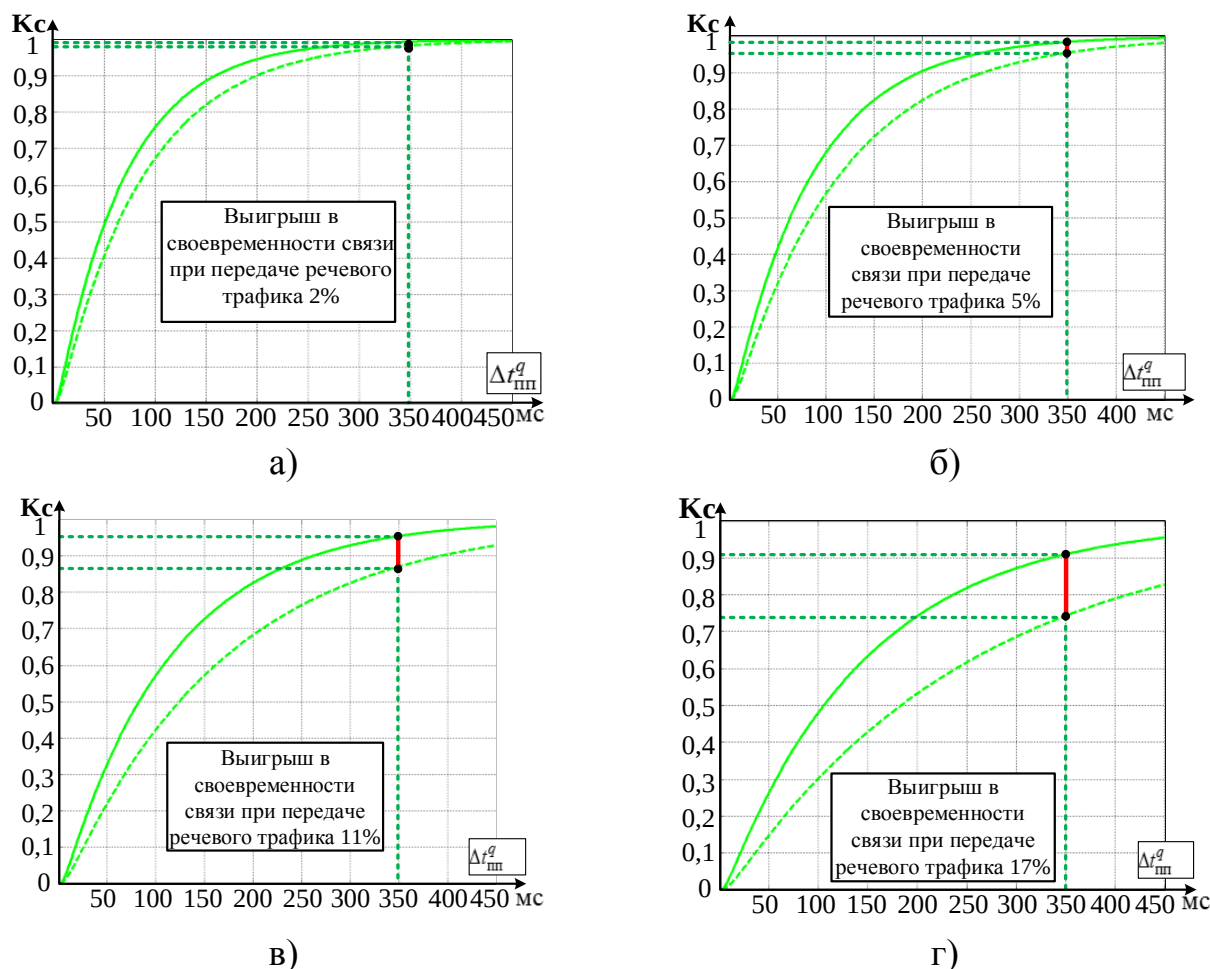


Рис. 8. Выигрыш в своевременности связи в ССС СН при использовании предлагаемого подхода (речевой трафик) при различных значениях показателя Херста: а) $H=0,58$; б) $H=0,75$; в) $H=0,81$; г) $H=0,87$

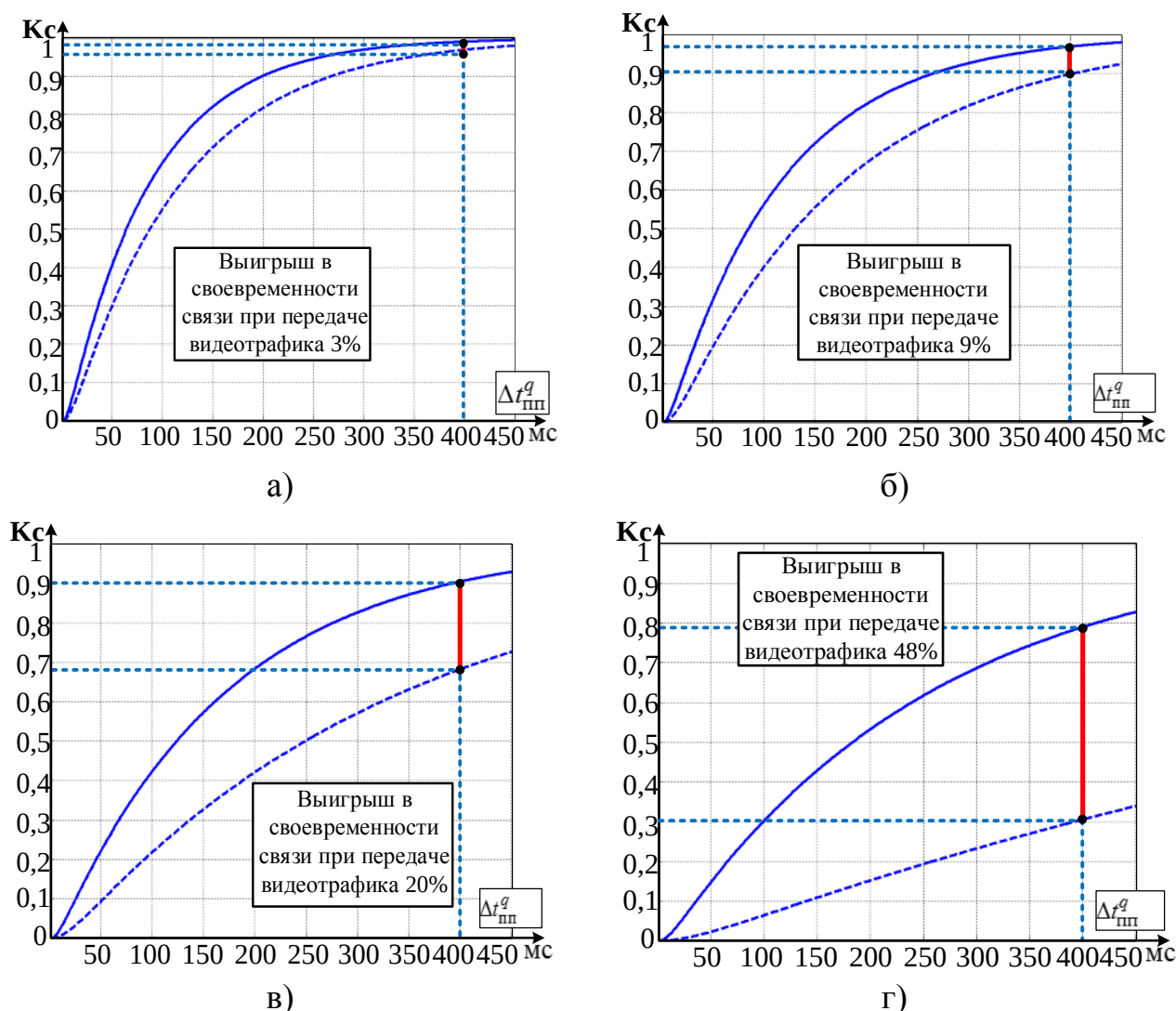


Рис. 9. Выигрыш в своевременности связи в ССС СН при использовании предлагаемого подхода (видеотрафик) при различных значениях показателя Херста:
а) $H=0,58$; б) $H=0,75$; в) $H=0,81$; г) $H=0,87$

Выводы

Использование механизмов дискретного вейвлет-преобразования выборки трафика при прогнозировании пользовательской нагрузки на ЗС позволяет повысить качество запроса резервирования ресурса обратного канала ССС СН.

Элементом новизны представленного решения является учет особенностей процессов генерации, обработки и передачи трафика в условиях повышенной пользовательской нагрузки. Представленная модель позволяет учитывать долговременные корреляционные зависимости, характерные для нестационарного мультисервисного трафика, обладающего свойствами самоподобия. Контроль динамики коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования осуществляется за счет определения оптимального размера скользящего окна на уровнях вейвлет-разложения. Использование предложенного подхода позволяет управлять выделяемым для каждой ЗС ресурсом, в зависимости от качества решения задачи прогнозирования пользовательской нагрузки.

Дальнейшие исследования планируется проводить в направлении разработки математических моделей планирования ограниченного ресурса ССС СН с учетом текущих условий распространения радиосигнала в спутниковых линиях связи и изменения сигнально-помеховой обстановки.

Литература

1. О связи. Федеральный закон РФ от 07 июля 2003 № 126-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации от 14 июля 2003 г. № 28 ст. 2.
2. Илюхин А. А., Дубровин А. Г. Оптимизация структуры суперфрейма для запросных каналов в спутниковых сетях стандарта DVB-RCS // Информационные системы и технологии. 2009. № 2 (52). С.68-73.
3. ETSI EN 301 459. Satellite Earth Stations and Systems (SES); Harmonized EN for Satellite Interactive Terminals (SIT) and Satellite User Terminals (SUT) transmitting towards satellites in geostationary orbit in the 29,5 to 30,0 GHz frequency bands covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive. 2007.
4. ETSI EN 301 790. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems. 2009.
5. 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.79-86.
6. Ермишян А. Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях: Учебник. Часть 1. Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи. – СПб.: ВАС, 2005. – 740 с.
7. Москвитин В. Д. От взаимоувязанной сети связи к Единой сети электросвязи России // Вестник связи. 2003. №8. С.33-48.
8. Гребешков А. Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
9. Засецкий А. В., Иванов А. Б., Постников С. Д., Соколов И. В. Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Часть 2, под редакцией А.Б. Иванова – М.: Компания Сайрус Системс, 2001. – 336 с.
10. Шелухин О. И. Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 576 с.
11. Азаров Г. И. Теоретические основы анализа оперативности передачи информации в системах управления и связи. – М.: АГПС МЧС, 2012. – 62 с.
12. Рыжиков Ю. И. Расчет систем обслуживания с групповым поступлением заявок // Информационно-управляющие системы. 2007. № 2. С. 39-49.
13. Хомоненко А. Д. Численные методы анализа систем и сетей массового обслуживания. – М.: МО СССР, 1991. – 197 с.
14. Рыжиков Ю. И. Полный расчет системы обслуживания с распределениями Кокса // Информационно-управляющие системы. 2006. № 2 С. 38-46.

15. Садовникова Н. А. Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: МФПУ «Синергия», 2016. – 152 с.
16. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. / Пер. И. И. Грушко; ред. В. И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
17. Abaev P. O., Khachko A. V., Beschastny V. A. Queuing Model for SIP Server Hysteretic Overload Control with K-state MMPP Bursty Traffic. *6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. Saint-Petersburg, 2014, pp. 495-500.
18. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
19. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
20. Новиков Е. А., Макаренко С. И. Оперативное управление ресурсом АТМ-коммутатора при обеспечении заданного качества обслуживания нестационарных информационных потоков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 1 (9). С.43-52.
21. Уткин Д. Р., Новиков Е. А., Митряев Г. А. Модель прогнозирования пользовательской нагрузки в обратном канале сети спутниковой связи на основе вейвлет-преобразования // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды II межвузовской научно-практической конференции. – СПб.: ВАС, 2017. – С.140-143.
22. Цветков К. Ю., Уткин Д. Р. Процесс технологического управления в сети спутниковой связи при формировании запроса резервирования ресурса обратного канала с учетом прогноза интенсивности поступления пользовательской нагрузки // Информация и космос. 2017. № 3 (7). С.11-17.

References

1. The federal law of the Russian Federation of July 7, 2003 no. 126-FZ «About telecommunications». *Sobranie zakonodatel'stva Rossiiskoi Federatsii*, 14 July 2003, no. 28, art. 2 (in Russian).
2. Ilyukhin A. A., Dubrovin A. G. Optimizatsiia struktury superfreima dlia zaprosnykh kanalov v sputnikovykh setiakh standarta DVB-RCS [Optimization of the structure of a superframe for request channels in satellite networks DVB-RCS]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2009, no. 2(52), pp. 68-73 (in Russian).
3. ETSI EN 301 459. Satellite Earth Stations and Systems (SES); Harmonized EN for Satellite Interactive Terminals (SIT) and Satellite User Terminals (SUT) transmitting towards satellites in geostationary orbit in the 29,5 to 30,0 GHz frequency bands covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive. 2007.
4. ETSI EN 301 790. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems. 2009.
5. Novikov E. A. Operative Distribution of Satellite Repeater Radio Resource in Terms of Non-Stationary Ingress Flow with Account of Time Lagged Control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, vol. 69, no. 2, pp. 79-86 (in Russian).

6. Ermisen A. G. *Teoreticheskie osnovy postroeniia sistem voennoi sviazi v ob'edineniakh i soedineniakh. Chast' 1. Metodologicheskie osnovy postroeniia organizatsionno-tekhnicheskikh sistem voennoi sviazi* [Theoretical basis for the development of military communication systems in associations and connections. Part 1. Methodological bases of construction of organizational and technical systems of military communication]. Saint-Petersburg, VAS Publ., 2005. 740 p. (in Russian).

7. Moskvitin V. D. *Ot vzaimouviazannoi seti sviazi k Edinoi seti elektrosviazi Rossii* [From the interconnected communication network to a single telecommunication network of Russia]. *Vestnik sviazi*, 2003, no. 8, pp. 33-48 (in Russian).

8. Grebeshkov A. Y. *Standarty i tekhnologii upravleniia setiami sviazi* [Standards and technologies of communication of networks management]. Moscow, Eco-Trends Publ., 2003. 288 p. (in Russian).

9. Zasetskii A. V., Ivanov A. B., Postnikov S. D., Sokolov I. V. *Kontrol' kachestva v telekommunikatsiiakh i sviazi. Chast' 2* [Quality control in telecommunications and communications. Part 2]. Moscow, Cyrus Systems Publ., 2001. 336 p. (in Russian).

10. Shelukhin O. I. *Mul'tifraktaly. Infokommunikatsionnye prilozheniia* [Multifractals. Infocommunication applications]. Moscow, Hot line – Telecom Publ., 2011. 576 p. (in Russian).

11. Azarov G. I. *Teoreticheskie osnovy analiza operativnosti peredachi informatsii v sistemakh upravleniia i sviazi* [Theoretical bases of analysis of information transfer efficiency in control and communication systems]. Moscow, Academy of state fire service of EMERCOM of Russia Publ., 2012. 62 p. (in Russian).

12. Ryzhikov Y. I. *Raschet sistem obsluzhivaniia s gruppovym postupleniem zaiavok* [Calculation of queueing systems with batch arrival of request]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2007, no. 2, pp. 39-49 (in Russian).

13. Khomonenko A. D. *Chislennye metody analiza sistem i setei massovogo obsluzhivaniia* [Numerical methods for analysis of systems and queueing networks]. Moscow, USSR Ministry of Defense Publ., 1991. 197 p. (in Russian).

14. Ryzhikov Y. I. *Raschet sistem obsluzhivaniia s gruppovym postupleniem zaiavok* [The full calculation of the system service Coks distributions]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 2, pp. 38-46 (in Russian).

15. Sadovnikova N. A. *Analiz vremennykh riadov i prognozirovanie*. Time series analysis and forecasting. Moscow, MFPU «Synergy» Publ., 2016. 152 p. (in Russian).

16. Kleinrock L. *Teoriia massovogo obsluzhivaniia* [Queueing systems]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1979. 432 p. (in Russian).

17. Abaev P. O., Khachko A. V., Beschastny V. A. *Queueing Model for SIP Server Hysteretic Overload Control with K-state MMPP Bursty Traffic. 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. Saint-Petersburg, 2014, pp. 495-500.

18. Aliyev T. I. *Osnovy modelirovaniia diskretnykh sistem* [Bases of modeling of discrete systems]. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO Publ., 2009. 363 p. (in Russian).
19. Wadzinski R. N. *Spravochnik po veroiatnostnym raspredeleniiam* [The reference probability distributions]. Saint-Petersburg, Science Publ., 2001. 295 p. (in Russian).
20. Novikov E. A., Makarenko S. I. Increasing to frequency efficiency to network satellite relationship data communication. *Radio and telecommunication systems*, 2013, no. 1 (9), pp. 43-52 (in Russian).
21. Utkin D. R., Novikov E. A., Mitryayev G. A. Model' prognozirovaniia pol'zovatel'skoi nagruzki v obratnom kanale seti sputnikovoi svyazi na osnove veivlet-preobrazovaniia [The model for predicting user load in the reverse channel of the satellite communication network based on wavelet transform]. *Problemy tekhnicheskogo obespecheniia voisk v sovremennykh usloviakh. Trudy II mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Problems of technical support of troops in modern conditions. II Interuniversity scientific-practical conference]. Saint-Petersburg, 2017, pp. 140-143 (in Russian).
22. Tsvetkov K. Y., Utkin D. R. Process of technological control in satellite network when forming the request of reservation of the resource of feedback channel on the basis of the forecast of userload arrival intensity. *Informatsiia i kosmos*. 2017, vol. 7, no. 3, pp. 11-17 (in Russian).

Статья поступила 13 марта 2018 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: системный анализ сложных организационно-технических систем; разработка математического обеспечения автоматизированных систем управления связью; теория телетрафика; оптимальное управление. E-mail: novikov.evg.alex@yandex.ru

Уткин Дмитрий Романович – кандидат технических наук. Инженер кафедры систем и средств РЭБ космического назначения. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: эффективность сетей связи специального назначения; программно-технические комплексы автоматизированных систем управления специального назначения. E-mail: utyan@mail.ru

Шадрин Александр Геннадьевич – кандидат технических наук. Преподаватель кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: прием и обработка сигналов в условиях помех; системы управления связью. E-mail: ag_shadrin@mail.ru

Квасов Михаил Николаевич – адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени

А.Ф. Можайского. Область научных интересов: производительность транспортных телекоммуникационных сетей; теория телетрафика; оптимальное управление. E-mail: kvasov_mn@mail.ru

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

Assessment of Timeliness for a Transmission Process of Multi-Service Traffic in a Satellite Communication Network of Special Purpose

E. A. Novikov, D. R. Utkin, A. G. Shadrin, M. N. Kvasov

Problem statement. Increasing the intensity of the user load on earth stations of special purpose satellite communication networks results in the issues of ensuring communication requirements, in particular, the timeliness of communication. Efficiency of the known ways of ensuring of the timeliness of communication in special purpose satellite communication networks with a reverse satellite channel is low, because of the request mechanisms. These mechanisms are based on introducing redundancy in the amount of the requested satellite relay resource. The unreasonable redundancy of the generated resource request leads to failure of the requirements to the quality of servicing of multi-service traffic, that adversely affects the timeliness of communication. **The purpose of the this work** is to ensure the requirements for the timeliness of communication in a special purpose satellite communication network with a reverse satellite channel while the multi-service traffic is transmitted. **Methods.** It is proposed to apply a modification of the method of predicting the intensity of the user load based on using the mechanisms of direct and inverse discrete wavelet transform in order to improve the quality of the forecast of the intensity of multi-service traffic. **Novelty.** The elements of novelty of the presented solution are the consideration of long-term correlations typical for non-stationary multi-service traffic with self-similarity properties, and the possibility of determining the scaling limit in the implementation of a direct discrete wavelet transform. **Results.** The developed model forecasts the intensity of user load in a special-purpose satellite communication network, taking into account features of processing and transmission of a multi-service traffic. As the example of demonstration of the possibilities of discrete wavelet transform for processing the analyzed time series the process of the calculation the timeliness of communication in satellite communication network using the proposed model is shown. **Practical relevance.** The presented solution is proposed to be implemented as a part of the software for switching equipment of networks with the organization of the reverse satellite channel of DVB-RCS standard. The use of the wavelet transformation to build a forecast of user load intensity forecast allows to increase the timeliness of communication in a special-purpose satellite communication network up to 48% in comparison with the standard mechanisms and to use the allocated capacity resource in the reverse channels of a special-purpose satellite communication networks effectively.

Keywords: satellite communication network, reverse satellite channel, communication requirements, multi-service traffic, wavelet transform.

Information about Authors

Novikov Evgeny Aleksandrovich – Dr. habil. of Engineering Sciences. Docent. Associate Professor at the Department of networks and communication systems of the space sector. The Mozhaisky Space Military Academy. Field of research: system analysis of complex organizational and technical systems; development of

mathematical support of automated communication control systems; teletraffic theory; optimal control. E-mail: novikov.evg.al@gmail.ru

Utkin Dmitry Romanovich – Ph. D. of Engineering Sciences. Research Assistant at the Department of systems and electronic warfare systems for space applications. The Mozhaisky Space Military Academy. Field of research: the efficiency of communication networks for specific applications; software and hardware complexes of automated control systems of special purpose. E-mail: utyan@mail.ru

Shadrin Alexander Gennadievich – Ph. D. of Engineering Sciences. Lecturer at the Department of networks and communication systems of the space sector. The Mozhaisky Space Military Academy. Field of research: the reception and processing of signals in the presence of noise; systems for communication control. E-mail: ag_shadrin@mail.ru

Kvasov Mikhail Nikolaevich – M.S. Postgraduate at the Department of networks and communication systems of space complexes. Field of research: productivity of transport telecommunication networks; teletraffic theory; optimal control. E-mail: kvasov_mn@mail.ru

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