

УДК 621.396

Организация адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи с учетом изменяющейся помеховой обстановки

Ковальский А. А.

Постановка задачи. Возрастающие объемы передаваемой информации при высоких требованиях к качеству обслуживания и ограниченность радиоресурса космического аппарата связи актуализируют вопросы обеспечения высокой пропускной способности земных станций спутниковой связи в условиях динамично изменяющейся помеховой обстановки. При реализации существующих технологий мультиплексирования трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи выделение радиоресурса происходит под пиковые значения интенсивности информационных потоков, без учета его статистических характеристик, что выражается в недоиспользовании радиоресурса при общем его дефиците. **Цель работы** заключается в повышении пропускной способности земных станций спутниковой связи в условиях помеховой обстановки. Для достижения цели предлагается использовать технологию адаптивного мультиплексирования трафика, которая будет учитывать его статистические характеристики в различных условиях помеховой обстановки, что позволит повысить пропускную способность земных станций спутниковой связи и выполнить требования по качеству обслуживания мультисервисного трафика. **Используемые методы.** Решение задачи организации оперативного управления мультисервисного трафика при адаптивном мультиплексировании в каналообразующей аппаратуре земных станций основано на использовании марковских моделей модулированного пуассоновского процесса и алгоритмов, применяемых в теории телетрафика с учетом специфики функционирования сетей спутниковой связи. Для исследования разработанных моделей использована методика расчета, реализованная в пакете программ математического моделирования MatLab. **Новизна.** Элементом научной новизны работы является учет ряда факторов: свойств поступающего мультисервисного трафика (нестационарность, разнородность, приоритетность в обслуживании, выполнение требований по качеству обслуживания) и наличия различных режимов функционирования спутниковых радиолиний, которые зависят от условий помеховой обстановки. **Результат.** Использование технологии адаптивного мультиплексирования в сочетании с механизмом динамического назначения приоритетов в обслуживании мультисервисного трафика позволяет заметно увеличить число каналов связи по сравнению с существующей технологией, что соответствует повышению пропускной способности земных станций спутниковой связи либо обеспечению требуемой пропускной способности в условиях помеховой обстановки. При этом стоит отметить, что повышение пропускной способности будет зависеть от требований, предъявляемых к качеству обслуживания, вида передаваемого трафика, а также выбора режима работы модемного оборудования. Так, при наиболее жестких требованиях к качеству обслуживания выигрыш составит до 40%, при менее жестких (неограниченная допустимая задержка) – предельно достижимые значения составят до 120%, что в среднем составляет порядка 80%. **Практическая значимость.** Представленное решение предлагается реализовать в виде специального программно-математического обеспечения каналообразующей аппаратуры на основе программно-модульной

Библиографическая ссылка на статью:

Ковальский А. А. Организация адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи с учетом изменяющейся помеховой обстановки // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 175–212. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/11-Kovalsky.pdf>

Reference for citation:

Kovalsky A. A. The Organization of Adaptive Multiplexing of a Traffic of Multiservice Networks in the Channeling Equipment of Land Satellite Communication System with Taking into Account the Changing Jamming Situation. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 1, pp. 175–212. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/11-Kovalsky.pdf> (in Russian).

платформы, которая должна быть интегрирована в состав автоматизированной системы управления земной станции спутниковой связи. Реализация на основе программно-модульной платформы позволит на основе анализа статистических свойств мультисервисного трафика осуществлять его оперативное управление при адаптивном мультиплексировании в условиях изменяющейся помеховой обстановки, путем назначения информационным потокам приоритетов в обслуживании.

Ключевые слова: адаптивное мультиплексирование, оперативное управление, мультисервисный трафик, земная станция спутниковой связи, помеховая обстановка.

Актуальность

Важное место в телекоммуникационной инфраструктуре занимают сети спутниковой связи (ССС). Широкое распространение спутниковой связи обусловлено такими уникальными ее свойствами, как высокая гибкость реконфигурации сетей, возможность оперативной организации связи на обширных пространствах и пересеченной местности, независимость стоимости и качества спутниковых каналов от их протяженности. В настоящее время наблюдается значительный рост объемов передаваемых информационных потоков, а также качественное изменение их структуры. Структура трафика современных мультисервисных сетей (далее – мультисервисного трафика) включает одновременно передаваемые потоки речевой и видеоинформации, изображений, данных и другой информации. Такие информационные потоки предъявляют существенно различающиеся и все более жесткие требования к качеству обслуживания. Однако ограниченность частотно-временного энергетического ресурса (далее – радиоресурса) космических аппаратов связи (КАС), необходимость учета различных режимов эксплуатации земных станций спутниковой связи (ЗССС) не позволяют достигать необходимого качества предоставляемых услуг только за счет экстенсивного наращивания орбитального ресурса и требуют принятия специальных мер для обеспечения заданной пропускной способности ССС.

Как показано в работах [1-2], высокие требования по устойчивости функционирования телекоммуникационных систем вступают в противоречие с низкой помехоустойчивостью каналов радиосвязи к внешним помеховым воздействиям. Для обеспечения высокой помехоустойчивости современных радиоканалов связи используются сигналы с различными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования с переменной скоростью, схемы применения которых адаптируются к помеховой обстановке в интересах достижения максимальной битовой скорости передачи в текущих условиях.

При существующей технологии мультиплексирования трафика в ЗССС выделение радиоресурса происходит под пиковые значения интенсивности информационного потока без учета статистических характеристик мультисервисного трафика, что выражается в недоиспользовании радиоресурса при общем его дефиците. Поэтому особую актуальность приобретает задача обеспечения высокой пропускной способности сетей спутниковой связи при передаче мультисервисного трафика за счет учета его статистических характеристик и дифференциации качества обслуживания разнородных абонентов при мультиплексировании спутниковых радиолиний.

Вопросы управления телекоммуникационными ресурсами для повышения качества обслуживания, а также эффективного распределения ограниченного радиоресурса ЗСС рассматривались в работах [3-7]. При этом важную роль для исследования вопросов повышения пропускной способности ЗСС приобретает задача мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в ЗСС с учетом его статистических свойств и приоритетов в обслуживании при ограниченном радиоресурсе КАС. Основным фактором, осложняющим решение данной задачи, являются разнородность структуры трафика, формируемого мультисервисными приложениями, а также необходимость учета колебаний пропускной способности ЗСС при изменении помеховой обстановки.

В состав каналообразующей аппаратуры (КОА) типовой ЗСС входит модемное оборудование с адаптивными режимами работы и мультиплексор с технологией временного уплотнения каналов (рис. 1). Режимы работы модемного оборудования могут выбираться адаптивно или назначаться директивно в зависимости от текущих условий обстановки. К мультиплексору подключены сети доступа, в состав которых входят оконечные устройства – источники мультисервисного трафика. Мультиплексор формирует виртуальные каналы связи, обеспечивая транспорт для передачи мультисервисного трафика, при этом конкретное число каналов зависит от режима работы модемного оборудования ЗСС.

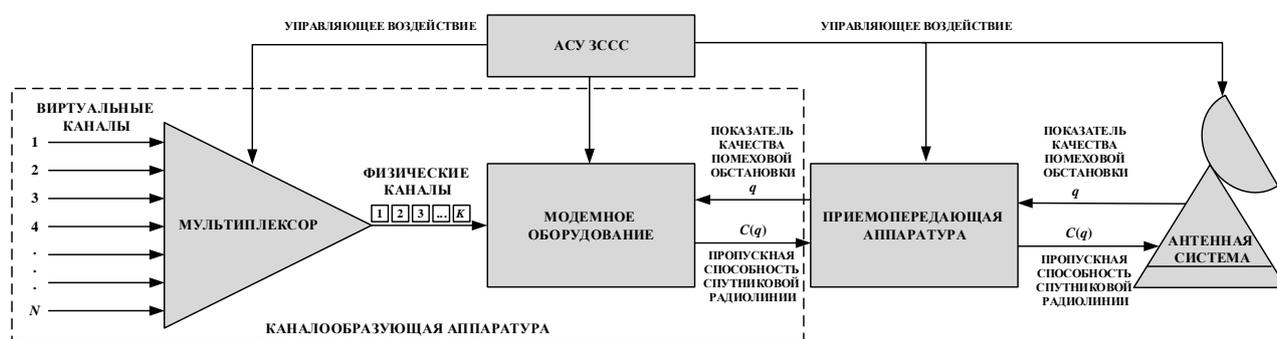


Рис. 1. Структурная схема типовой ЗСС

В работе [8] проведена классификация телекоммуникационных служб и приложений по типу информации, требованиям реального времени и требованиям для поддержки качества обслуживания, что позволило сформировать список телекоммуникационных служб и распределить их по степени важности. Данный список представлен в таблице 1.

Как показано в таблице 1, приоритеты обслуживания трафика (телекоммуникационных служб и приложений) подразделяются на несколько классов:

- класс А: трафик с поддержкой качества обслуживания, обслуживаемый с более высоким приоритетом;
- класс В: трафик без поддержки качества обслуживания, обслуживаемый с более низким приоритетом.

Таблица 1 – Классификация телекоммуникационных служб (приложений) по приоритетам в обслуживании

№ п/п	Решаемая задача	Аудио	Видео	Данные	Реальное время	Приоритет обслуживания
1	Обеспечение телеграфной, фототелеграфной и факсимильной связи	–	–	X	Низкое	B
2	Обеспечение телефонной связи	X	–	–	Высокое	A1
3	Информационный обмен технологическими данными	–	–	X	Среднее	A3
4	Электронный документооборот	–	–	X	Низкое	B
5	Передача информации в интересах банковских операций	–	–	X	Высокое	A1
6	Передача потоков телевизионного вещания	X	X	–	Высокое	A2
7	Организация каналов видеоконференцсвязи	X	X	X	Высокое	A1
8	Web-серфинг	X	X	X	Среднее	B
9	Загрузка файлов	–	–	X	Низкое	B

В пределах класса А дополнительно трафик делится на три подкласса:

- подкласс А1: трафик с самым высоким приоритетом;
- подкласс А2: трафик с переменной скоростью передачи и поддержкой передачи в реальном времени;
- подкласс А3: трафик с минимальными гарантиями качества обслуживания, но с более высоким приоритетом, чем для трафика класса В.

Подкласс А1 – наиболее требовательный, включает IP-телефонию, банковские сделки или высококачественные мультимедийные конференцсвязи. Они обрабатываются с использованием максимальной зарезервированной полосы пропускания и отличаются от других передач приоритетом. Трафик подкласса А2 имеет более высокие ограничения к потерям пакетов и задержке, но он более терпим, чем трафик подкласса А1. Этот трафик обычно требует переменной во времени полосы пропускания. Подкласс А3 предложен для приложений с ограничением на задержку пакетов, таких как Web-серфинг и непосредственные передачи файлов. Класс В не требует никаких явных гарантий качества обслуживания от канала связи. Он эквивалентен best-effort модели обслуживания – основной модели обслуживания сегодняшнего Интернета.

Согласно статистике, приведенной в работе [8], зависимость объемов передаваемого трафика телекоммуникационных служб (приложений) разных приоритетов в различных условиях (например, времени суток) представлены на рис. 2.

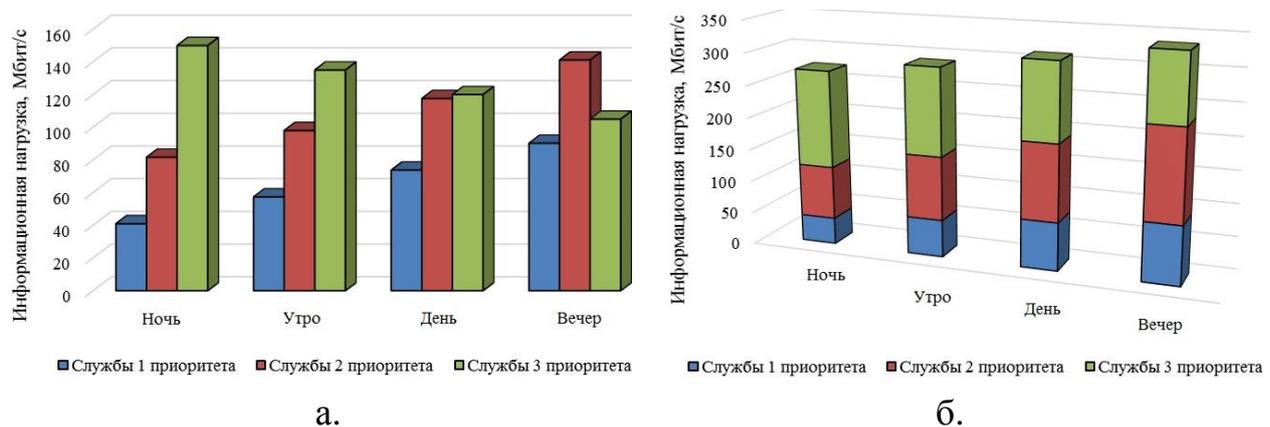


Рис. 2. Гистограммы распределения интенсивности информационной нагрузки для телекоммуникационных служб (приложений) заданных приоритетов в ЗССС в различные времена суток:

- а. – гистограмма с распределением;
- б. – гистограммы с накоплением.

Особенностью реализации протоколов DVB-S и DVB-S2 для каналов спутниковой связи является наличие режима ACM (Adaptive Coding and Modulation) для адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в зависимости от отношения сигнал/шум+помеха (ОСШП) на входе приемника. Показателем ОСШП является отношение энергии на сигнальный символ к спектральной плотности аддитивного белого гауссовского шума, значение которого соответствует суммарному уровню воздействия как естественных, так и аддитивных преднамеренных помех на канал связи. Режим ACM позволяет осуществлять гибкое регулирование параметрами кодирования и модуляции передатчика в зависимости от значения ОСШП на входе приемника при заданном уровне достоверности приема. При этом параметры кодирования и модуляции могут изменяться от кадра к кадру. Для достижения высокой спектральной эффективности в стандарте DVB-S определены различные скорости кодирования FEC (Forward Error Correction) при различных видах модуляции: QPSK, 8-PSK, 16-QAM. В стандарте DVB-S2 предусматривается большее число скоростей кодирования FEC (1/4 – 9/10) при более ёмких видах модуляции (QPSK, 8-PSK, 16-APSK и 32-APSK). Для защиты от ошибок приема сигналов в стандартах DVB-S и DVB-S2 используется перемежение данных и наложение двухуровневого кода для прямой коррекции ошибок FEC. В стандарте DVB-S в качестве внутреннего кода используется сверточное кодирование, в качестве внешнего – код Рида-Соломона. В стандарте DVB-S2 в качестве внутреннего кода используется код LDPC, в качестве внешнего – код БЧХ (код Боуза-Чоудхури-Хоквенгема). Таким образом, благодаря возможности адаптивного выбора вида модуляции и скоростей кодирования каналы могут работать в широком диапазоне значений ОСШП с показателем спектральной эффективности, близким к теоретически достижимому. Так, канал связи DVB-S2, может работать при ОСШП от -2,4 дБ до 16 дБ, при этом для этого канала доступны показатели эффективности спектра от 0,5 до 4,5 (бит/с)/Гц. Схемы адаптивного выбора вида модуляции и скорости

кодирования для DVB-S и DVB-S2 приведены в таблицах 2, 3 по данным, представленным в работах [9-13].

Таблица 2 – Параметры схемы адаптивного выбора созвездия сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования для канала DVB-S

ОСШП в полосе частот канала [дБ]	Тип сигнала	Скорость кодирования	Коэффициент эффективности спектра [(бит/с)/Гц]
2,7	QPSK $I=2$	1/2	1
4,3		2/3	1,33
5,5		3/4	1,5
6,6		5/6	1,67
7,2		7/8	1,75
8,2	8-PSK $I=3$	3/4	2,25
10,4		5/6	2,5
11,25		7/8	2,625
11,5	16-QAM $I=4$	5/6	3,33
13,2		7/8	3,5

Таблица 3 – Параметры схемы адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования для канала DVB-S2

ОСШП в полосе частот канала [дБ]	Тип сигнала	Скорость кодирования R	Коэффициент эффективности спектра [(бит/с)/Гц]
-2,35	QPSK $I=2$	1/4	0,49
-1,24		1/3	0,66
-0,3		2/5	0,79
1		1/2	1
2,23		3/5	1,19
3,1		2/3	1,32
4,03		3/4	1,49
4,68		4/5	1,59
5,18		5/6	1,65
6,2		8/9	1,77
6,42	9/10	1,79	
5,5	8-PSK $I=3$	3/5	1,78
6,62		2/3	1,98
7,91		3/4	2,23
9,35		5/6	2,48
10,69		8/9	2,65
10,98		9/10	2,68
8,97	16-APSK $I=4$	2/3	2,64
10,21		3/4	2,97
11,03		4/5	3,17
11,61		5/6	3,3
12,89		8/9	3,52
13,13	9/10	3,57	
12,73	32-APSK $I=5$	3/4	3,7
13,64		4/5	3,95
14,28		5/6	4,12
15,69		8/9	4,4
16,05		9/10	4,45

На рис. 3 приведены результаты моделирования значений показателя эффективности спектра для заданной вероятности ошибки пакета 10^{-7} для каналов DVB-S2 и DVB-S, представленные в работе [14]. При использовании модели канала с гауссовым шумом увеличение пропускной способности канала DVB-S2 составляет 20–35% в сравнении с DVB-S при тех же условиях передачи. Такое увеличение пропускной способности канала DVB-S2 соответствует улучшению условий приема на 2–2,5 дБ при той же эффективности спектра.

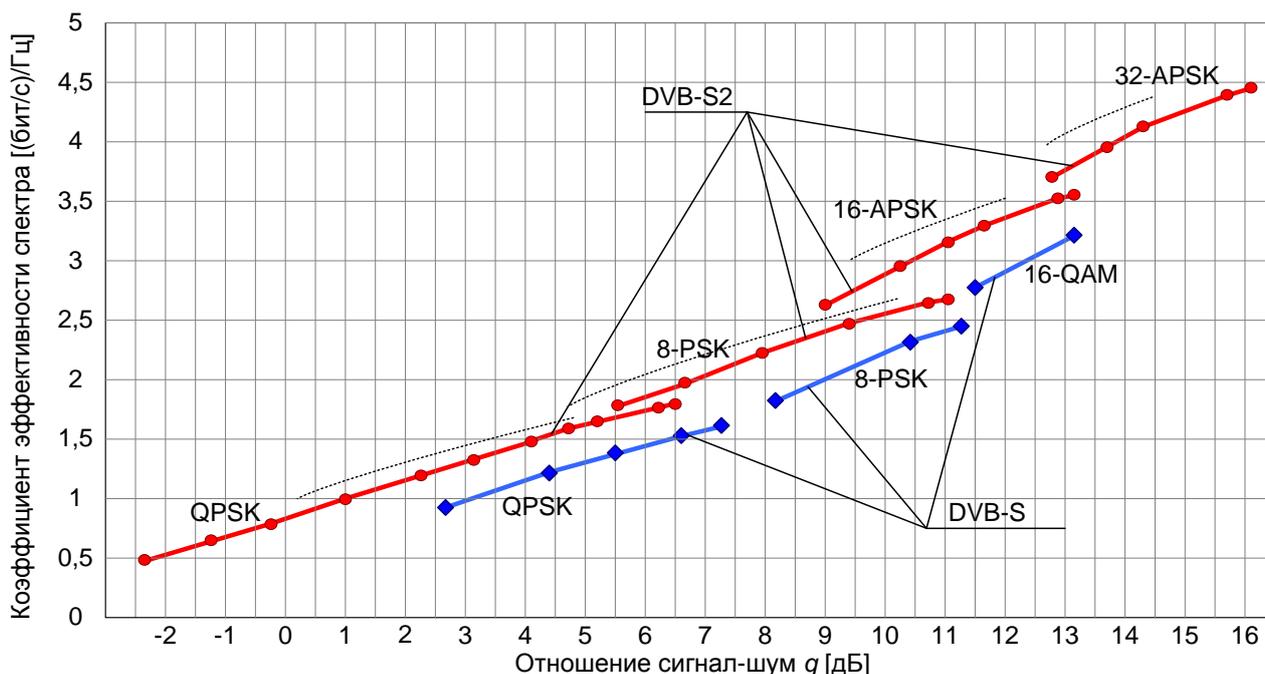


Рис. 3. Результаты моделирования значений показателя эффективности спектра для каналов DVB-S и DVB-S2

Анализ работы [15] позволил определить зависимость (рис. 4) изменения пропускной способности $C(q)$ спутниковой радиолинии типовой ЗССС от изменения показателя качества помеховой обстановки – отношение сигнал/(шум+помеха), обозначаемого q .

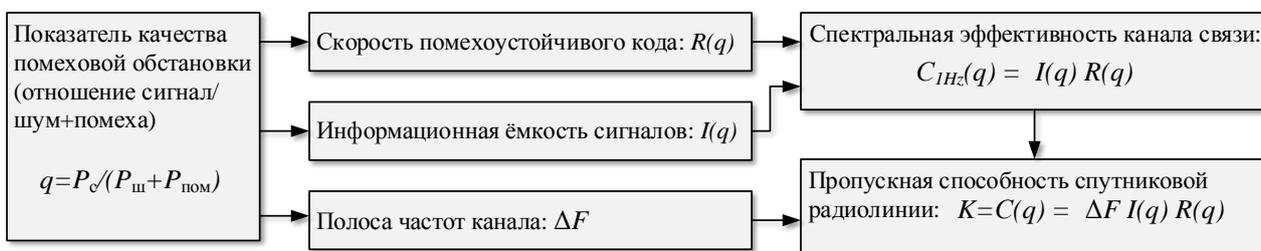


Рис. 4. Структурная схема зависимости пропускной способности канала спутниковой связи от условий помеховой обстановки

Используя расчетные соотношения, представленные на рис. 3, 4 и исходные данные представленные в таблицах 2, 3, и технические характеристики КОА

типовых ЗССС, получим зависимости количества каналов связи, организуемых ЗССС, от применения различных конфигураций модемного оборудования (вида модуляции сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования), представленный на рис. 5. Используя данные, ранее представленные на рис. 2, получим зависимости объемов передаваемого трафика телекоммуникационных служб разных приоритетов в различных условиях помеховой обстановки, представленные на рис. 5.

Анализ этих зависимостей показал, что использование помехозащищенных режимов работы модемного оборудования приводит к снижению пропускной способности ЗССС до уровня 25–35% от максимально возможной. С другой стороны, информационная нагрузка приоритетных служб и абонентов будет возрастать с усложнением помеховой обстановки. Обеспечение функционирования ССС в таких условиях приведет к необходимости отключения части каналов спутниковой связи в соответствии с их классами важности. Граничные значения режимов работы ЗССС, при которых происходит отключение каналов, приведены на рис. 5. Для компенсации этих негативных эффектов необходимо повысить пропускную способность земных станций спутниковой связи или обеспечить их заданную пропускную способность в условиях помеховой обстановки. Решению этой задачи посвящена данная работа.

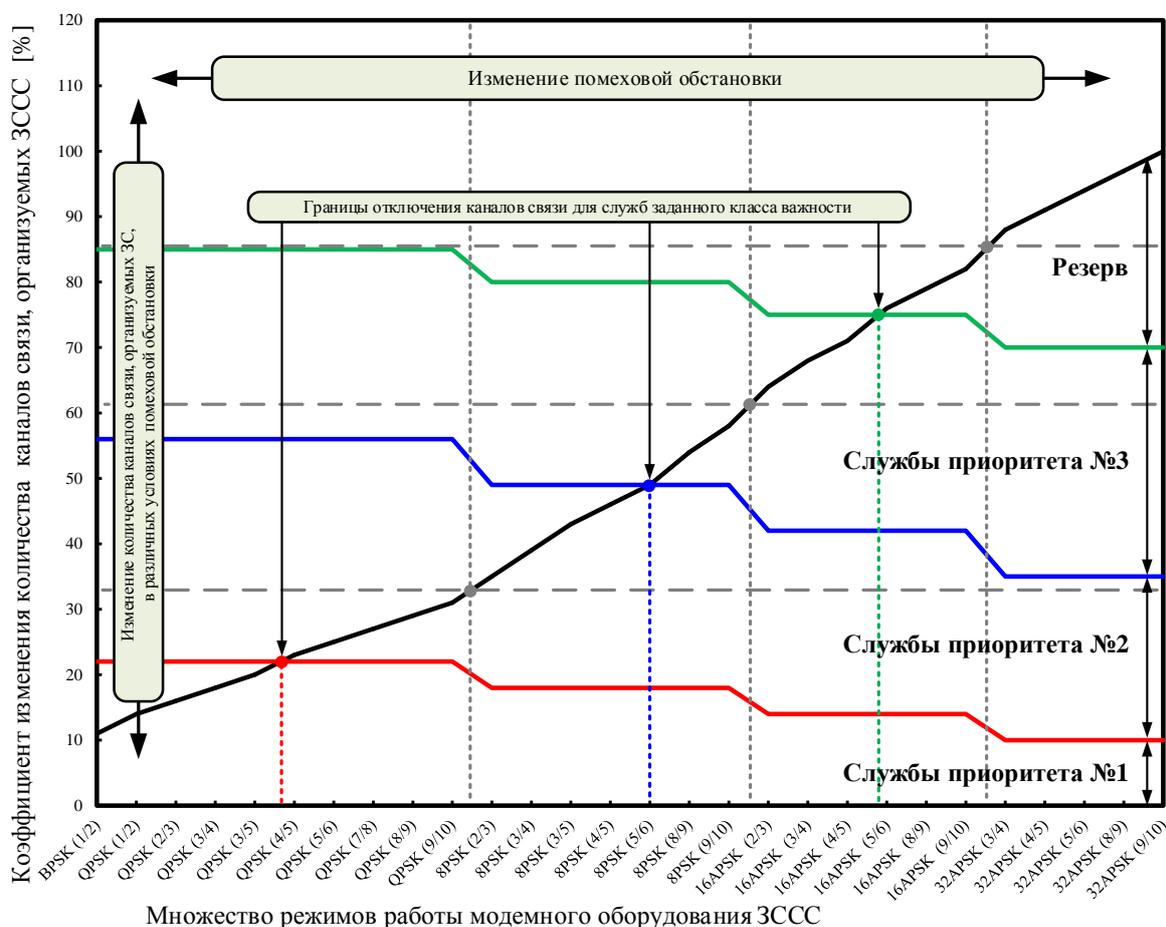
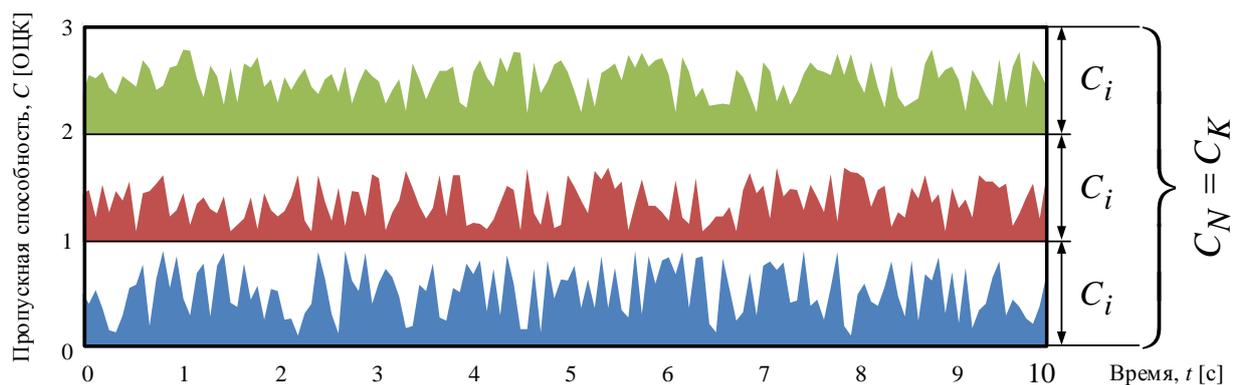
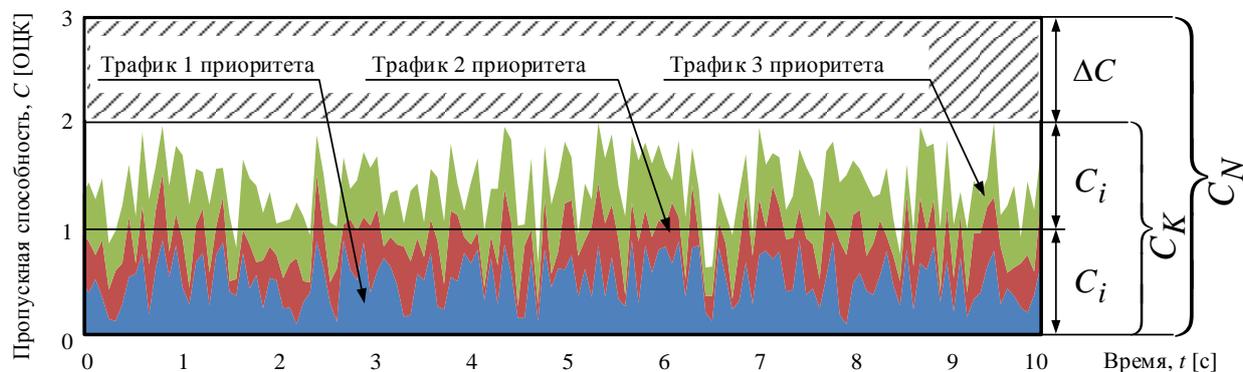


Рис. 5. График зависимости количества каналов связи, организуемых ЗССС от применения различных конфигураций модемного оборудования

Анализ статистических свойств мультисервисного трафика ССС, проведенный в работах [16-18] позволил сделать вывод, что загрузка каналов спутниковой связи в среднем не превышает 40%. Данный факт в основном связан со спецификой работы телекоммуникационных служб ССС (клиент-серверных приложений, IP-телефонии и других видов диалогового трафика). Наличие длительных временных пауз при использовании каналов различными приложениями позволяет организовать дополнительные каналы (рис. 6), однако при этом не должно ухудшаться качество передачи информации, особенно приоритетных источников.



а.



б.

Рис. 6. Сравнение пропускной способности ЗССС при различных технологиях мультиплексирования трафика:

- а. – технология временного мультиплексирования трафика;
- б. – технология адаптивного мультиплексирования трафика.

Исходя из вышеизложенного, возникает противоречие, заключающееся в наличии временных пауз в передаче трафика от отдельных источников, которые можно использовать как резерв для организации дополнительных каналов, путем адаптивного мультиплексирования, и необходимостью обеспечения требований по качеству обслуживания приоритетных абонентов.

Разрешение данного противоречия требует построения особого класса моделей и алгоритмов, которые, с одной стороны, способны учитывать

статистические свойства трафика, а именно его разнородность и нестационарность, а с другой стороны – обеспечить требуемое качество обслуживания приоритетных источников. Следует отметить, что существующие алгоритмы и технологии мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в ЗССС не в полной мере позволяют учесть его статистические характеристики и приоритетность в обслуживании.

Таким образом, подводя итог, можно сделать вывод о том, что исследования, направленные на изучение процессов при организации адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи, являются актуальными.

Постановка задачи исследования адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи

Для формальной постановки и решения задачи исследования в статье введены следующие обозначения и расчетные соотношения, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Принятые обозначения и расчетные соотношения

Обозначение	Физический смысл обозначения
A_{ou}	– множество алгоритмов оперативного управления мультисервисного трафика при организации адаптивного мультиплексирования, которые необходимо разработать для достижения цели исследования;
B	– объем памяти буфера обмена мультиплексора, выделенной для обслуживания входящего трафика;
C	– пропускная способность одного канала связи ЗССС;
$C(q)$	– зависимость пропускной способности спутниковой радиолинии от вида модуляции и скорости помехоустойчивого кодирования;
$C_{Hz}(q)$	– спектральная эффективность канала связи;
C_i	– пропускная способность i -го канала связи ЗССС;
C_K	– суммарная пропускная способность физических каналов связи: $C_K = \sum C_K$;
C_N	– суммарная пропускная способность виртуальных каналов связи: $C_N = \sum C_N$;
$I(q)$	– зависимость информационной емкости сигнала от показателя помеховой обстановки;
K	– емкость канальной группы, выраженная в количестве стандартных (физических) каналов связи, выделяемая для передачи группового потока уплотненного трафика, которая организуется на выходе мультиплексора ЗССС и зависит от режима работы спутниковой радиолинии;
M_{AM}	– множество моделей, предназначенных для исследования адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в ЗССС;
N	– количество виртуальных (логических) каналов связи, организуемых на входе мультиплексора ЗССС при подключении абонентов сети;
P_c	– мощность сигнала;
P_i	– стационарная вероятность нахождения процесса в i -м состоянии;
P_{Π}	– вероятность потери пакета при организации адаптивного мультиплексирования в КОА ЗССС;

Обозначение	Физический смысл обозначения
$P_{п1}$	– вероятность потери пакета трафика высокого приоритета в обслуживании при организации адаптивного мультиплексирования в КОА ЗССС;
$P_{п2}$	– вероятность потери пакета трафика низкого приоритета в обслуживании при организации адаптивного мультиплексирования в КОА ЗССС;
$P_{пом}$	– мощность помехи;
$P_{треб}$	– требуемая вероятность потери пакета согласно классу обслуживания мультисервисного трафика;
$P_{треб1}$	– требуемая вероятность потери пакета для трафика высокого приоритета;
$P_{треб2}$	– требуемая вероятность потери пакета для трафика низкого приоритета;
$P_{ш}$	– мощность шума;
q	– показатель помеховой обстановки: $q=P_{ш}/(P_{ш}+P_{пом})$;
q_1	– средняя длина очереди пакетов в памяти буфера мультиплексора с высоким приоритетом в обслуживании;
q_2	– средняя длина очереди пакетов в памяти буфера мультиплексора с низким приоритетом в обслуживании;
R	– ресурс мультиплексора, выделяемый для уплотнения входящего трафика: $R=K+B$;
$R(q)$	– зависимость скорости помехоустойчивого кода от показателя помеховой обстановки;
t_1	– среднее время мультиплексирования одного пакета входящего трафика с высоким приоритетом в обслуживании;
t_2	– среднее время мультиплексирования одного пакета входящего трафика с низким приоритетом в обслуживании;
T_3	– среднее время задержки пакета при организации адаптивного мультиплексирования в КОА ЗССС;
T_{31}	– среднее время задержки пакета трафика высокого приоритета при организации адаптивного мультиплексирования в КОА ЗССС;
T_{32}	– среднее время задержки пакета трафика низкого приоритета при организации адаптивного мультиплексирования в КОА ЗССС;
$T_{треб}$	– требуемое время задержки пакета согласно классу обслуживания мультисервисного трафика;
$T_{треб1}$	– требуемое время задержки пакета для трафика высокого приоритета;
$T_{треб2}$	– требуемое время задержки пакета для трафика низкого приоритета;
$V_{п}$	– объем пакета;
α	– интенсивность включения (активность) передачи данных от источников трафика (абонентов сети): $\alpha=1/\tau_a$;
β	– интенсивность выключения (умолкания) передачи данных от источников трафика (абонентов сети): $\beta=1/\tau_{п}$;
ΔF	– полоса частот;
$\Delta\rho$	– коэффициент повышения количества организуемых каналов связи: $\Delta\rho=(N-K)/K$;
ΔC	– прирост пропускной способности спутниковой радиолинии: $\Delta C=C(N-K)=\Delta\rho KC$;
η	– коэффициента активности источника трафика (абонентов сети): $\eta=\tau_a/(\tau_a+\tau_{п})$
λ_1	– интенсивность поступления пакетов трафика с высоким приоритетом в обслуживании: $\lambda_1=1/\tau_1$;
λ_2	– интенсивность поступления пакетов трафика с низким приоритетом в обслуживании: $\lambda_2=1/\tau_2$;
μ_1	– интенсивность мультиплексирования пакетов трафика с высоким приоритетом в обслуживании: $\mu_1=1/t_1$;

Обозначение	Физический смысл обозначения
μ_2	– интенсивность мультиплексирования пакетов трафика с низким приоритетом в обслуживании: $\mu_2 = 1/t_2$;
ρ	– коэффициент мультиплексирования спутниковых каналов связи;
τ_1	– средний интервал времени между последовательными поступлениями пакетов трафика с высоким приоритетом в обслуживании;
τ_2	– средний интервал времени между последовательными поступлениями пакетов трафика с низким приоритетом в обслуживании;
τ_a	– среднее время нахождения источника трафика (абонента сети) в активном состоянии;
τ_k	– среднее время кодирования пакета;
τ_n	– среднее время нахождения источника трафика (абонента сети) в пассивном состоянии;
ω_1	– среднее время задержки пакетов с высоким приоритетом обслуживания в памяти буфера мультиплексора до начала уплотнения;
ω_2	– среднее время задержки пакетов с низким приоритетом обслуживания в памяти буфера мультиплексора до начала уплотнения.

В качестве целевого показателя для оценки прироста пропускной способности ЗССС (ΔC) примем коэффициент мультиплексирования каналов связи (ρ), организуемых мультиплексором, который показывает отношение числа формируемых логических (виртуальных) каналов связи (N) к числу стандартных физических каналов мультиплексора (K), которое равно пропускной способности спутниковой радиолинии ЗССС $C(q)$. Тогда на вербальном уровне задача будет заключаться в максимизации целевого показателя путем увеличения виртуальных каналов связи (N), которые может организовать ЗССС, при заданной пропускной способности спутниковой радиолинии (K) и выполнении требований по качеству обслуживания трафика ($P_{\text{треб}}, T_{\text{треб}}$) и может быть декомпозирована в следующем виде:

- 1) формирование множества моделей (M_{AM}), для исследования адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в ЗССС;
- 2) построение множества алгоритмов оперативного управления (A_{OY}) мультисервисного трафика при организации адаптивного мультиплексирования для решения оптимизационной задачи максимизации целевого показателя при заданных ограничениях.

На формальном уровне постановка задачи исследования имеет следующий вид. Дано: пропускная способность спутниковой радиолинии ЗССС (K), которая в конечном счете зависит от показателя помеховой обстановки (q). Найти: такое значение целевого показателя (ρ), при котором будет достигнуто максимальное количество виртуальных каналов связи (N), которые может организовать ЗССС при заданных ограничениях на качество обслуживания трафика ($P_{\text{треб}}, T_{\text{треб}}$). То есть определить:

$$\rho = \frac{C_N}{C_K} = \frac{N}{K} \rightarrow \max_{\{M_{AM}, A_{OY}\}} \left| \begin{array}{l} P_n \leq P_{\text{треб}}; \\ T_3 \leq T_{\text{треб}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Разработка моделей адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей

Для достижения цели исследований необходимо решить задачу организации адаптивного мультиплексирования и оперативного управления мультисервисного трафика в КОА ЗССС. Для выполнения данной задачи необходимо провести исследования изменения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) мультисервисного трафика, а именно вероятности потери пакета ($P_{п}$) и среднего времени задержки пакета (T_3) при его мультиплексировании на предмет соответствия их требуемым значениям ($P_{треб}$, $T_{треб}$). Для этого в статье разработан ряд моделей адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей. Схематично данные модели возможно представить в виде системы массового обслуживания, изображенной на рис. 7

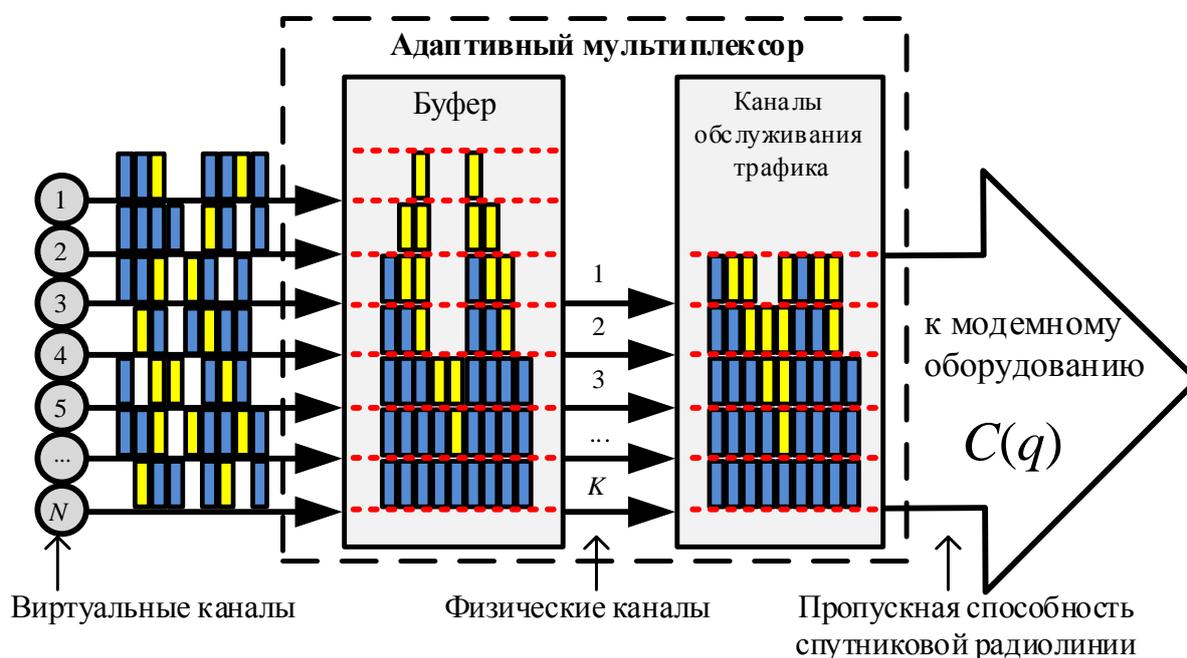


Рис. 7. Модель адаптивного мультиплексирования трафика с учетом приоритетов, представленная в виде системы массового обслуживания

Первая модель адаптивного мультиплексирования учитывает приоритеты в обслуживании поступающего мультисервисного трафика на вход мультиплексора и представляет собой случайный марковский процесс, граф состояний и переходов которого представлен на рис. 8.

Данный граф изображает процесс обслуживания двух разнородных потоков пакетов с высшим (ось x) и низшим (ось y) приоритетами. Каждое состояние процесса характеризуется двумя индексами по числу пакетов трафика соответствующего приоритета, находящихся на обслуживании в мультиплексоре, а переходы между состояниями – поступлением нового пакета, либо завершением его обслуживания. Для обслуживания пакетов мультиплексор распределяет каналный ресурс, выраженный количеством стандартных физических каналов связи (K), и равный пропускной способности

спутниковой радиолинии $C(q)$, в случае его недостатка поступающие пакеты помещаются в буфер емкостью B . В модели учитывается приоритетная дисциплина обслуживания, поэтому при переполнении буфера пакеты высшего приоритета вытесняют из буфера пакеты с низким приоритетом.

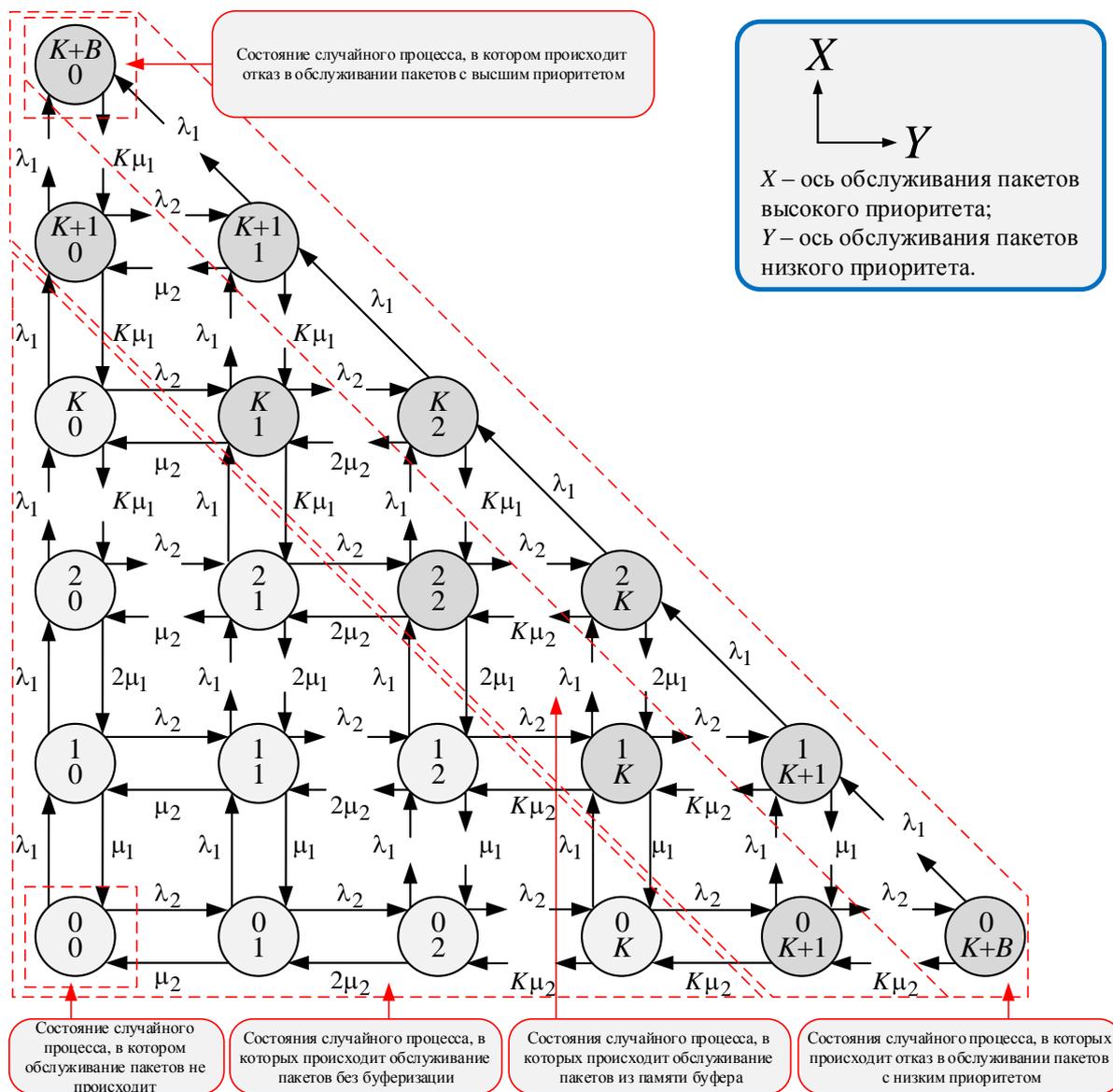


Рис. 8. Модель адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей с учетом приоритетов в обслуживании

Данный подход в построении моделей позволяет конструировать графы случайного марковского процесса различной сложности путем введения дополнительных размерностей в пространстве состояний, что соответствует учету дополнительного количества приоритетов в обслуживании. Так, для примера, на рис. 9 представлен граф случайного марковского процесса, учитывающий трехприоритетную дисциплину обслуживания – пакеты высшего, среднего и низшего приоритета. Принцип работы модели аналогичен предыдущей.

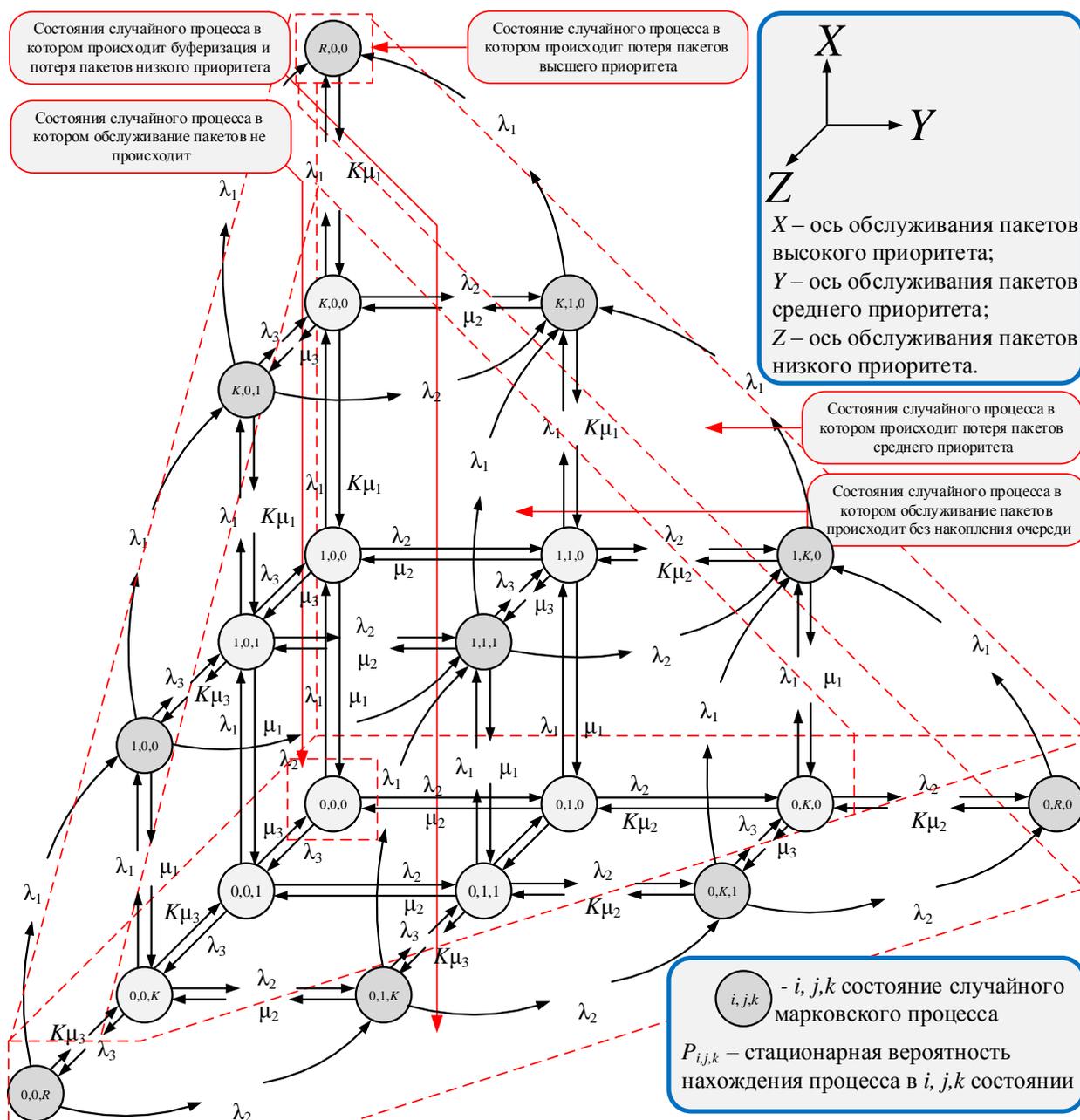


Рис. 9. Развитие модели адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей с учетом приоритетов в обслуживании

Стоит отметить, что существенным ограничением данного класса моделей является наличие допущения о том, что потоки пакетов на входе мультиплексора являются стационарными пуассоновскими потоками, что в ряде случаев не соответствует действительности. Как показывают исследования реального мультисервисного трафика, представленные в работах [19-22], его структура существенно отличается от простейшего пуассоновского потока и характеризуется нестационарностью и долговременной корреляционной зависимостью – самоподобностью.

Одним из конструктивных направлений моделирования таких потоков, в рамках которого имеется возможность получения аналитического решения, является применение марковских моделей пуассоновских процессов (ММП).

Частным случаем таких моделей являются модели прерываемых пуассоновских процессов или ON-OFF модели, одна из которых изображена на рис. 10.

Каждый источник при этом 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.

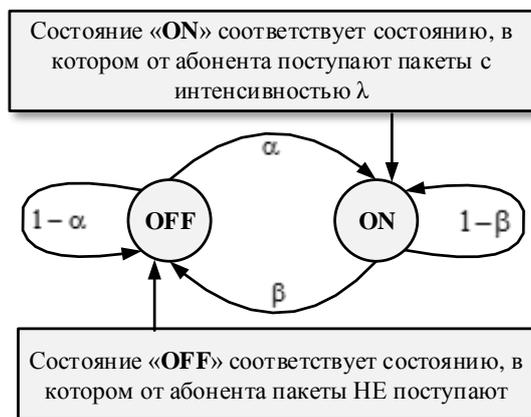


Рис. 10. Модель источника нестационарного трафика

Комбинация нескольких таких ON-OFF источников образует ММПП, интенсивность которого изменяется во времени, что позволяет учесть нестационарность реальных входных потоков. На рис. 11 показана зависимость интенсивности нескольких ON-OFF источников во времени.

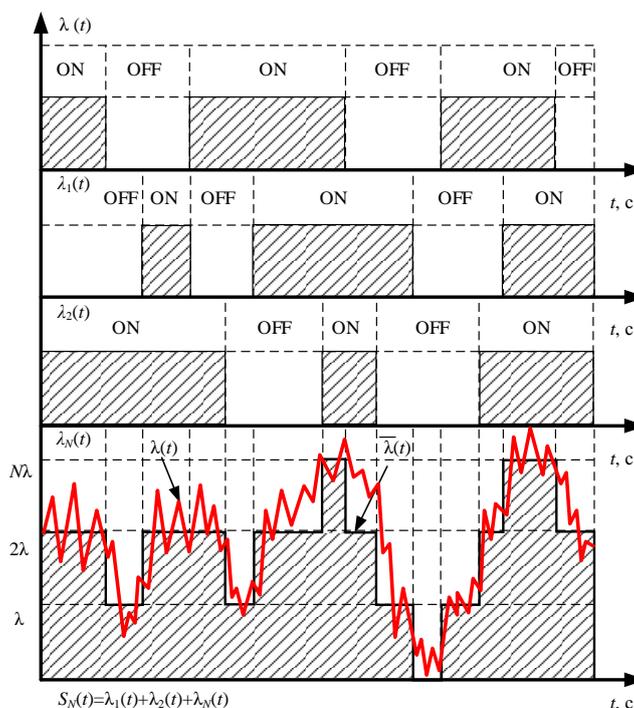


Рис. 11. Зависимость интенсивности нескольких ON-OFF источников во времени

На рис. 12 изображен граф марковской цепи, моделирующей процесс активизации группы, состоящей из N абонентов (источников мультисервисного трафика), для обслуживания которых мультиплексор предоставляет виртуальные каналы связи.

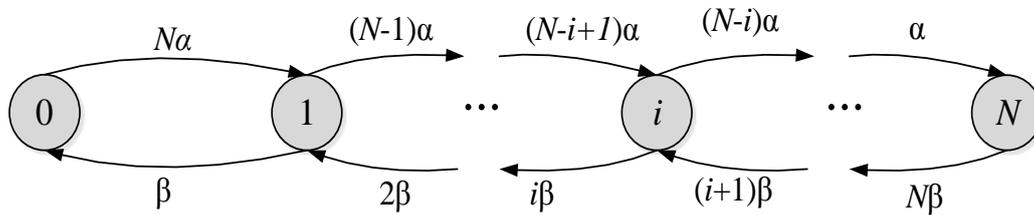


Рис. 12. Модель источника нестационарного трафика

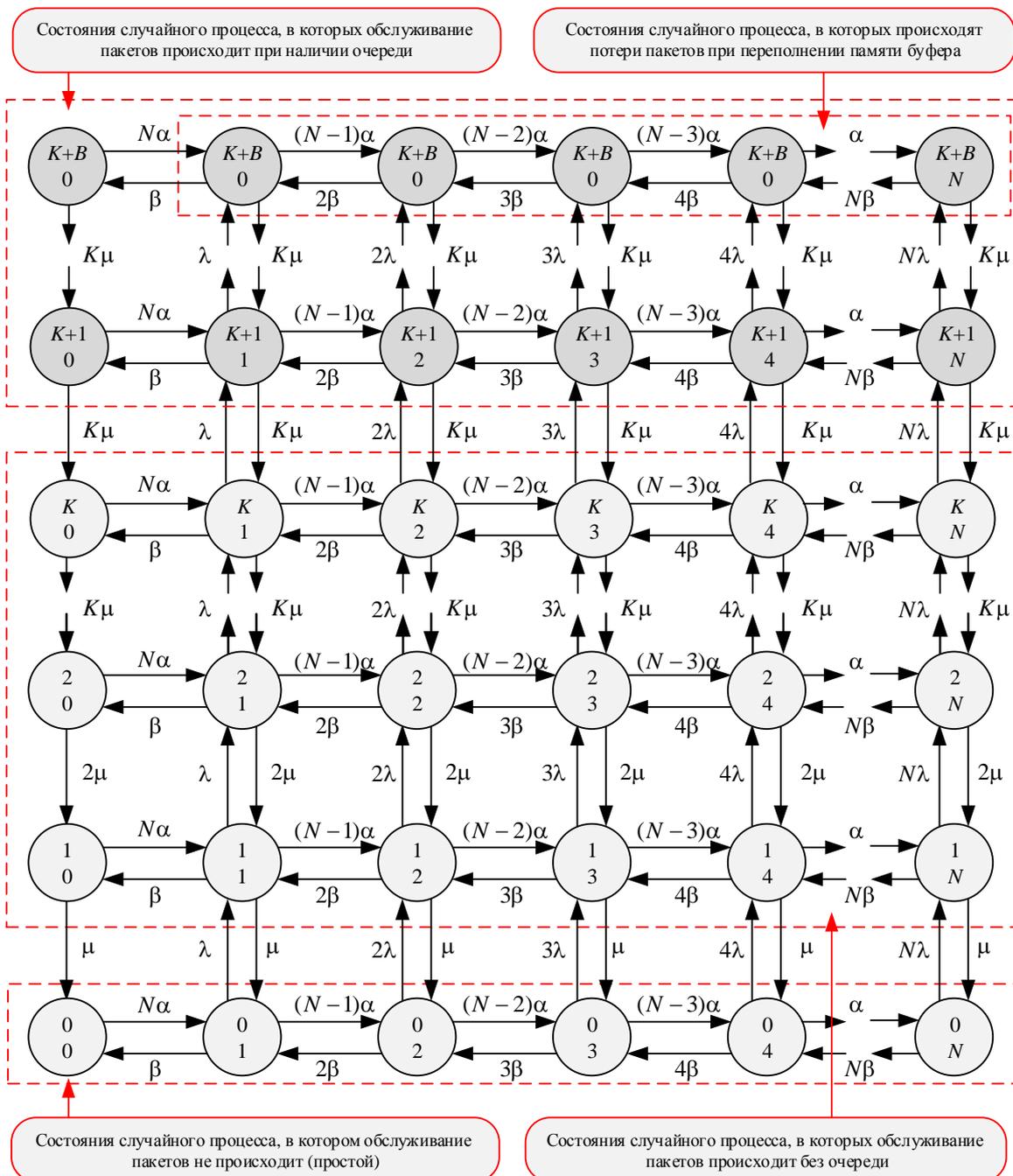


Рис. 13. Модель адаптивного мультиплексирования однородного нестационарного трафика от группового источника

Граф, изображенный на рис. 12, описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена:

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -N\alpha p_0(t) + \beta p_1(t); \\ \dot{p}_i(t) = (N-i)\alpha p_{i-1}(t) - ((N-i+1)\alpha + \\ + (N-i+1)\beta) p_i(t) + (N-i)\beta p_{i+1}(t); \\ \dot{p}_N(t) = \alpha p_{N-1}(t) - N\beta p_N(t). \end{cases} \quad (2)$$

Данный подход в моделировании мультисервисного трафика позволил разработать вторую модель адаптивного мультиплексирования, которая учитывает нестационарность трафика и представляет собой граф состояний и переходов случайного марковского процесса (см. рис. 13).

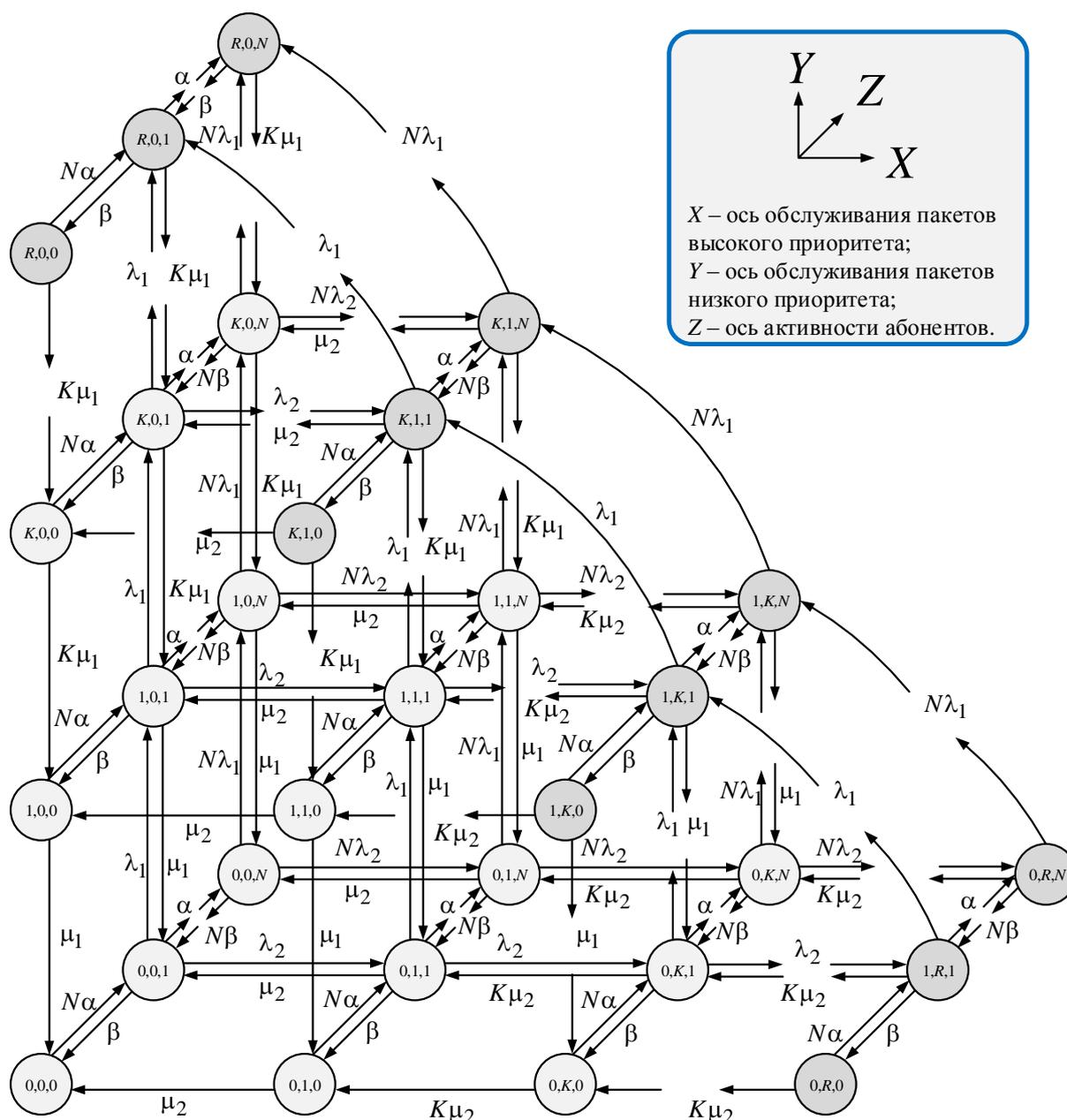


Рис. 14. Обобщенная модель адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисной сети

Модель описывает процесс обслуживания в мультиплексоре пакетов, изображенных переходами по оси y , которые поступают с изменяющейся интенсивностью от однородного группового источника, состоящего из N виртуальных каналов, создаваемых для обслуживания источников трафика (абонентов сети), представленных переходами по оси x . Состояние процесса характеризуется двумя индексами: количеством пакетов, находящихся на обслуживании в данный момент и числом активных виртуальных каналов (источников трафика или абонентов сети).

Сочетание моделей приоритетного обслуживания (рис. 8–9) и ММП в качестве модели трафика (рис. 12–13) позволяет построить обобщенную модель мультиплексирования трафика мультисервисных сетей, представленную на рис. 14. Эта модель отличается от известных учетом нестационарности входящих информационных потоков и приоритетов в их обслуживании. Приоритеты и разнородность трафика на рис. 14 учитываются по осям x и y , изменение интенсивности трафика (нестационарность) – по оси z . Каждое состояние процесса адаптивного мультиплексирования трафика в ЗССС характеризуется тремя индексами: количеством пакетов трафика высшего и низшего приоритета, находящихся на обслуживании в мультиплексоре в данный момент и числом активных виртуальных каналов (источников трафика или абонентов сети).

Методика расчета моделей адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей

Использование разработанных моделей позволяет рассчитать вероятности стационарных состояний случайного марковского процесса $(p_{i,j,k})$, моделирующего работу адаптивного мультиплексора и оценить ВВХ мультисервисного трафика $(P_{п} \leq P_{\text{треб}}, T_3 \leq T_{\text{треб}})$ при его мультиплексировании. Методика расчета указанных характеристик подробно описана в работе [23] и включает в себя 4 этапа. В качестве примера приведен расчет ВВХ трафика для модели, изображенной на рис. 14.

Этап 1. На основе системы дифференциальных уравнений (2), принимая допущение о том, что марковский случайный процесс является квазистационарным, производится переход к системе уравнений баланса переходов графа рассматриваемой модели для расчёта стационарных вероятностей состояний $(p_{i,j,k})$ случайного марковского процесса:

$$\begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_2) p_{i,j,k} = \mu_2 p_{i,j,k+1} + \mu_1 p_{i+1,j,k}, i = 0, j = 0, k = 0; \\ (\lambda_1 + \lambda_2 + j\mu_2) p_{i,j,k} = j\lambda_2 p_{i,j,k-1} + \mu_1 p_{i+1,j,k} + j\mu_2 p_{i+1,j,k}, i = 1, 1 \leq j < R, k = 0; \\ \dots \\ \sum_{k=0}^N \sum_{i=0}^R \sum_{j=0}^{R-i} p_{i,j,k} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Этап 2. Приведение системы уравнений баланса переходов (3) к системе линейных алгебраических уравнений, описывающих граф модели:

$$\begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_2) p_{000} = \mu_2 p_{010} + \mu_1 p_{100}; \\ (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) p_{010} = \lambda_2 p_{000} + \mu_1 p_{110} + 2\mu_2 p_{200}; \\ \dots \\ p_{000} + p_{100} + p_{200} + \dots + p_{R,R,N} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Этап 3. Решение системы линейных алгебраических уравнений (4) для нахождения стационарных вероятностей состояний $(p_{i,j,k})$ рассматриваемой модели:

Вводится вектор: $P = [p_z = p_{ij}, z = \overline{1, Z}]^T \Rightarrow A \times P = B$.

где A – $(Z+1)Z$ -мерная матрица интенсивностей переходов;

P – Z -мерный вектор ненулевых состояний системы массового обслуживания;

B – $(Z+1)$ -мерный вектор правых частей.

Решение матричного уравнения: $P = A' \times B$, где A' – матрица, псевдообратная матрице A , определяемая как $A' = [A^T A]^{-1} A^T$.

Этап 4. На основе полученных стационарных вероятностей состояний $(p_{i,j,k})$, и структуры графа рассматриваемой модели производится расчет вероятности потери пакета (5) и средней длины очереди пакетов трафика (6) высшего и низшего приоритетов, путем вычисления суммы стационарных вероятностей состояний соответствующих областей графа рассматриваемой модели. Далее, используя расчетные соотношения, применяемые в теории телетрафика, производится вычисление среднего времени задержки пакетов трафика соответствующих приоритетов (7)–(9).

Расчет вероятности потери (переполнения буфера адаптивного мультиплексора) пакетов трафика с высоким и низким приоритетами в обслуживании:

$$P_{n1} = \sum_{k=1}^N p_{i,j,k}, \quad i = R, \quad j = 0; \quad P_{n2} = \sum_{k=1}^N \sum_{i=0}^R p_{i,j,k}, \quad j = R - i. \quad (5)$$

Расчет средней длины очереди пакетов трафика в памяти буфера адаптивного мультиплексора с высоким и низким приоритетами в обслуживании:

$$q_1 = \sum_{k=0}^N \sum_{i=K+1}^R (i - K) \sum_{j=0}^{R-i} p_{i,j,k}; \quad q_2 = \sum_{k=0}^N \sum_{l=1}^B l \sum_{i=0}^{i=K+j} \sum_{j=K+l-i} p_{i,j,k}. \quad (6)$$

Расчет среднего времени задержки пакетов трафика с высоким и низким приоритетами в памяти буфера адаптивного мультиплексора до начала передачи:

$$\omega_1 = q_1 / [\lambda_1 (1 - P_{n1})]; \quad \omega_2 = q_2 / [\lambda_2 (1 - P_{n2})]. \quad (7)$$

Расчет среднего времени задержки с высоким и низким приоритетами при обслуживании в канале связи формируемым адаптивным мультиплексором:

$$\tau_1 = 1/\mu_1; \tau_2 = 1/\mu_2. \quad (8)$$

Расчет среднего времени задержки пакетов трафика с высоким и низким приоритетами при обслуживании в адаптивном мультиплексоре:

$$T_{31} = \omega_1 + \tau_1 = q_1/[\lambda_1(1 - P_{п1})] + 1/\mu_1; \quad (9)$$

$$T_{32} = \omega_1 + \tau_2 = q_2/[\lambda_2(1 - P_{п2})] + 1/\mu_2.$$

Использование данной методики по расчету ВВХ мультисервисного трафика на основе разработанных моделей адаптивного мультиплексирования позволяет организовать итерационный процесс по вычислению максимального значения коэффициента мультиплексирования каналов связи, организуемых мультиплексором ЗССС при заданных ограничениях на качество обслуживания мультисервисного трафика ($P_{п} \leq P_{\text{треб}}$, $T_3 \leq T_{\text{треб}}$), который производится методом численного перебора. Тогда выражение (1) примет следующий вид:

$$\rho = \frac{N}{K} \rightarrow \max \begin{cases} P_{п1} \leq P_{\text{треб}1}, P_{п2} \leq P_{\text{треб}2}; \\ T_{31} \leq T_{\text{треб}1}, T_{32} \leq T_{\text{треб}2}. \end{cases} \quad (10)$$

Для автоматизации расчетов данная методика реализована в пакете программ математического моделирования MatLab.

Разработка алгоритмов оперативного управления мультисервисного трафика при организации адаптивного мультиплексирования

Таким образом расчет ВВХ трафика ($P_{п}$, T_3) при его адаптивном мультиплексировании позволяет обоснованно управлять назначением приоритетов в обслуживании в зависимости от статистических характеристик входных потоков (λ_1 , λ_2), требуемого качества обслуживания ($P_{\text{треб}}$, $T_{\text{треб}}$) и пропускной способности спутниковой радиолинии $C(q)$. Для решения данной задачи при организации адаптивного мультиплексирования в КОА ЗССС предложен алгоритм оперативного управления потоками мультисервисного трафика при адаптивном мультиплексировании (рис. 15), который отличается от известных наличием механизма динамического назначения приоритетов при обслуживании мультисервисного трафика. Схема работы алгоритма состоит из нескольких этапов.

Этап 1. Сбор статистических данных о параметрах входных потоков, ранжирование пакетов трафика согласно приоритету в обслуживании и направлении их в буфер адаптивного мультиплексора (блоки алгоритма 4, 5, 7, 11 на рис. 15).

Этап 2. Производится проверка наличия свободного канального ресурса и ячеек памяти буфера адаптивного мультиплексора. Если в буфере мультиплексора имеются пакеты трафика низкого приоритета, то при его переполнении происходит сброс пакета и помещение на обслуживание в буфер пакетов с более высоким приоритетом (блоки алгоритма 12, 13, 14, 16, 18, 19 на рис. 15).

Этап 3. Если в буфере мультимплексора нет пакетов трафика низкого приоритета, то происходит отказ в обслуживании пакетов высшего приоритета, коррекция показателей качества обслуживания, пересчет ВВХ модели адаптивного мультимплексирования трафика мультисервисных сетей с учетом приоритетов в обслуживании (рис. 8) и перераспределение приоритетов в обслуживании до тех пор, пока необходимое качество обслуживания не будет достигнуто (блоки алгоритма 3, 6, 8, 15, 17, 20 на рис. 15).

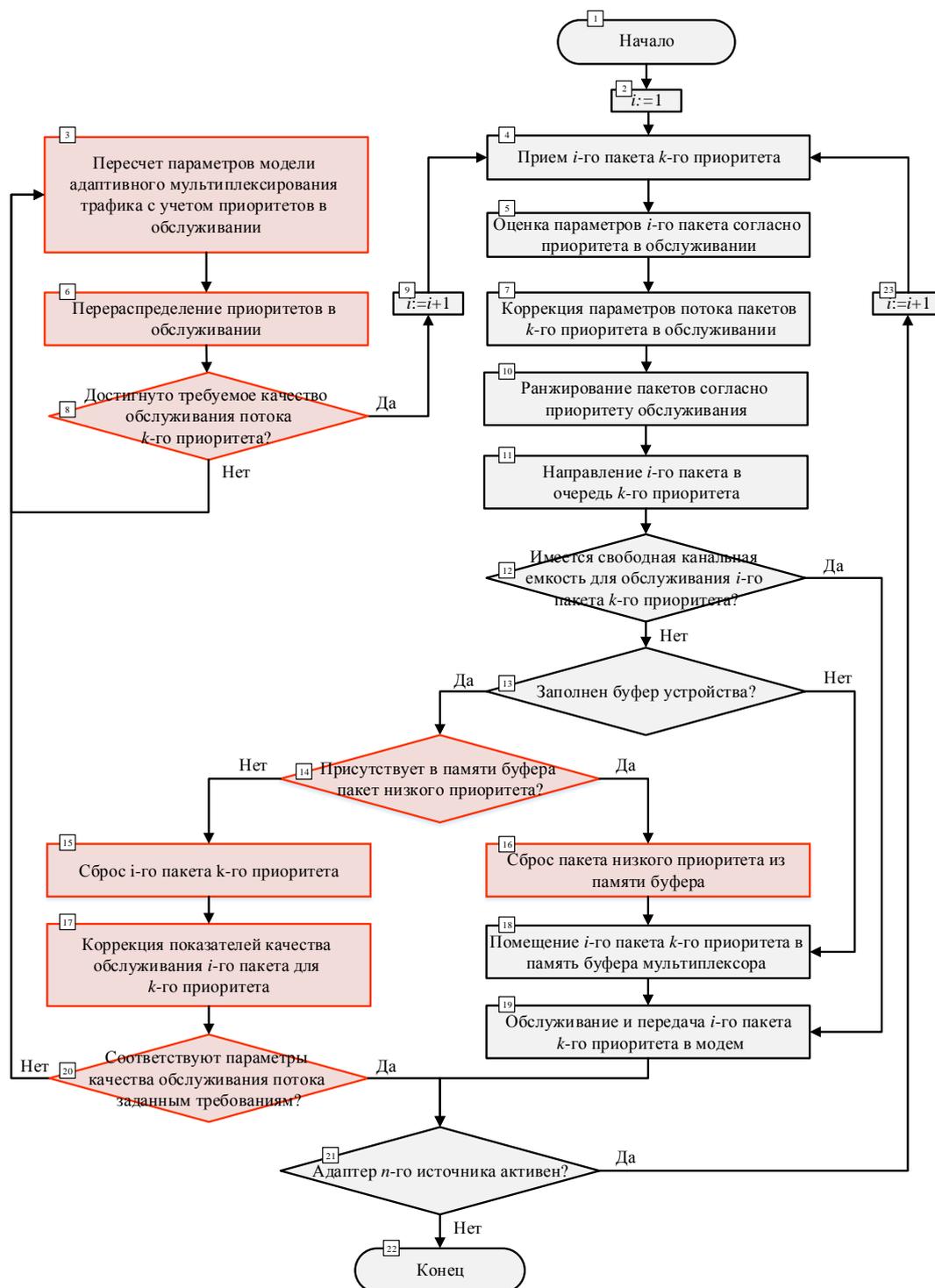


Рис. 15. Алгоритм оперативного управления потоками мультисервисного трафика при адаптивном мультимплексировании с учетом приоритетов в обслуживании

В зависимости от складывающейся помеховой обстановки, в работе предложен альтернативный (более сложный и ресурсоемкий) алгоритм оперативного управления мультисервисного трафика при адаптивном мультиплексировании, представленный на рис. 16.

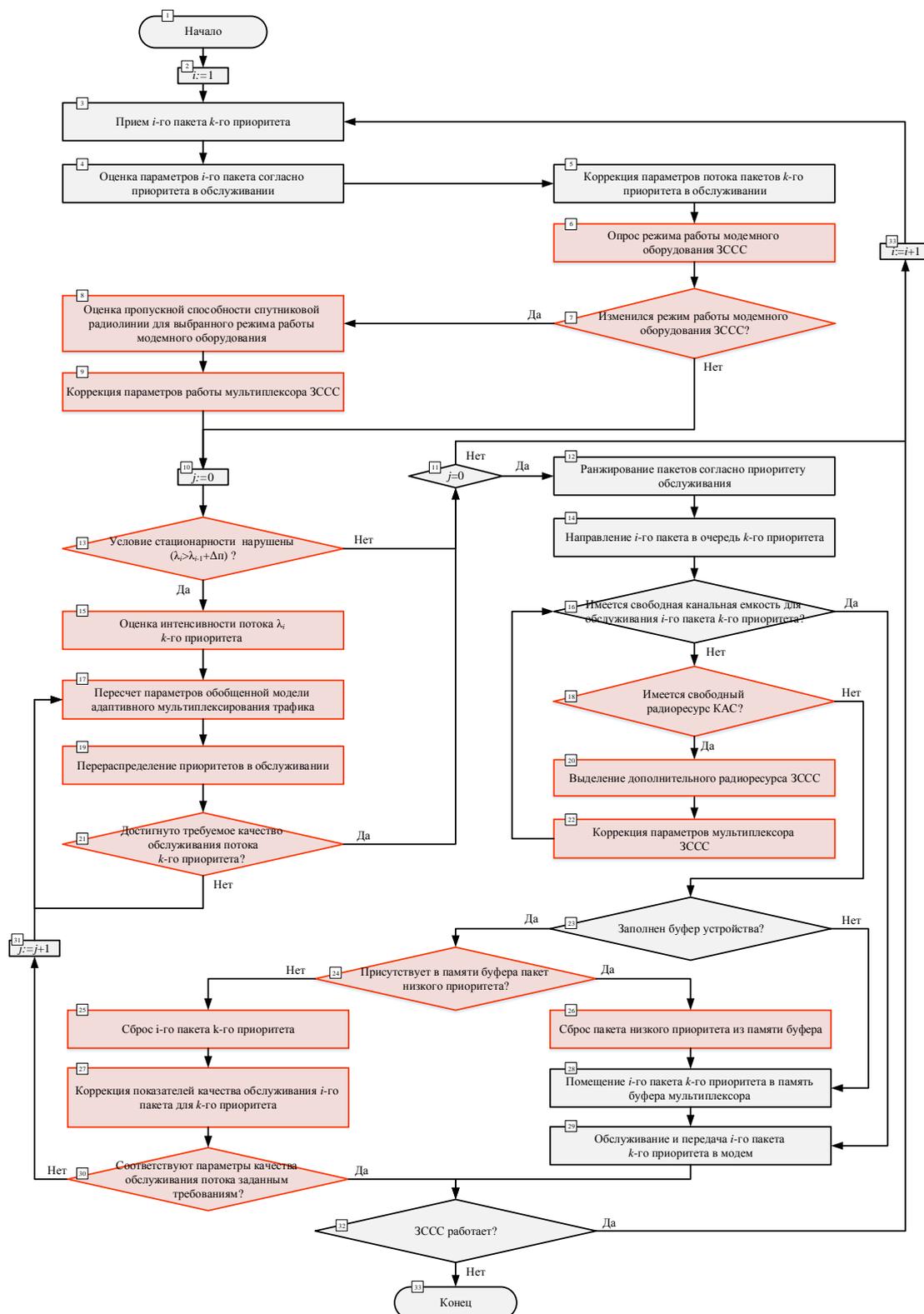


Рис. 16. Алгоритм оперативного управления мультисервисным трафиком с учетом нестационарности и изменения пропускной способности спутниковой радиолинии

Данный алгоритм в комплексе учитывает приоритетность, нестационарности, разнородность входящего мультисервисного трафика и применение в КОА ЗССС различных режимов работы модемного оборудования, в результате чего происходит изменение пропускной способности спутниковой радиолинии. Схема работы данного алгоритма предполагает нескольких этапов.

Этап 1. Сбор статистических данных о параметрах входных потоков, опрос текущей конфигурации модемного оборудования с последующей коррекцией режима работы мультиплексора для учета изменения пропускной способности спутниковой радиолинии (блоки алгоритма №№3-9 на рис. 16).

Этап 2. Проведение оценки ВВХ трафика, включая проверку на нестационарность. Если интенсивность потока не выходит за пределы допустимого, то происходит ранжирование пакетов трафика согласно приоритету в обслуживании и направлении их в буфер адаптивного мультиплексора (блоки алгоритма №№12-14 на рис. 16).

Этап 3. Производится проверка наличия свободного канального ресурса и ячеек памяти буфера адаптивного мультиплексора. Если канального ресурса мультиплексора нет и его буфер переполнен, то выполняется запрос о выделении дополнительного радиоресурса ЗССС, с последующей коррекцией параметров режима работы адаптивного мультиплексора. Если в буфере мультиплексора имеются пакеты трафика низкого приоритета, то при его переполнении происходит сброс пакета и помещение на обслуживание в буфер пакетов с более высоким приоритетом (блоки алгоритма №№16, 18, 20, 22, 23, 24, 28, 29 на рис. 16).

Этап 4. В случае изменения интенсивности потока и выхода за пределы допустимого или если в буфере мультиплексора нет пакетов трафика низкого приоритета, то происходит отказ в обслуживании пакетов высшего приоритета, коррекция показателей качества обслуживания, пересчет ВВХ обобщенной модели адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей (рис 14) и перераспределение приоритетов в обслуживании до тех пор, пока необходимое качество обслуживания не будет достигнуто (блоки алгоритма №№15, 17, 19, 21, 25, 27, 30 на рис. 16).

Исследование вероятностно-временных характеристик мультисервисного трафика при организации адаптивного мультиплексирования

Для оценки возможности реализации адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в КОА ЗССС и соответствия требованиям по качеству обслуживания проведено исследование зависимостей изменения ВВХ мультисервисного трафика при организации адаптивного мультиплексирования, результаты которых изображены на графиках рис. 17-18.

Расчеты проводились в пакете программ математического моделирования MatLab. В качестве исходных данных для моделирования использовались три вида трафика:

1. Трафик IP-телефонии, с использованием GSM-кодека, среднее время кодирования пакета $\tau_k=30$ мс, объемом пакета $V_{п}=60$ байт, со скоростью выделяемых для его обслуживания каналов связи $C=64$ кбит/с.

2. Видеопоток с применением MPEG-2 кодека, среднее время кодирования пакета $\tau_k=30$ мс, объемом пакета $V_{п}=192$ байт, со скоростью выделяемых для его обслуживания каналов связи $C=2$ Мбит/с.

3. IP-трафик передачи данных, среднее время кодирования пакета $\tau_k=30$ мс, объемом пакета $V_{п}=1,5$ Кбайт, со скоростью выделяемых для его обслуживания каналов связи $C=1$ Мбит/с.

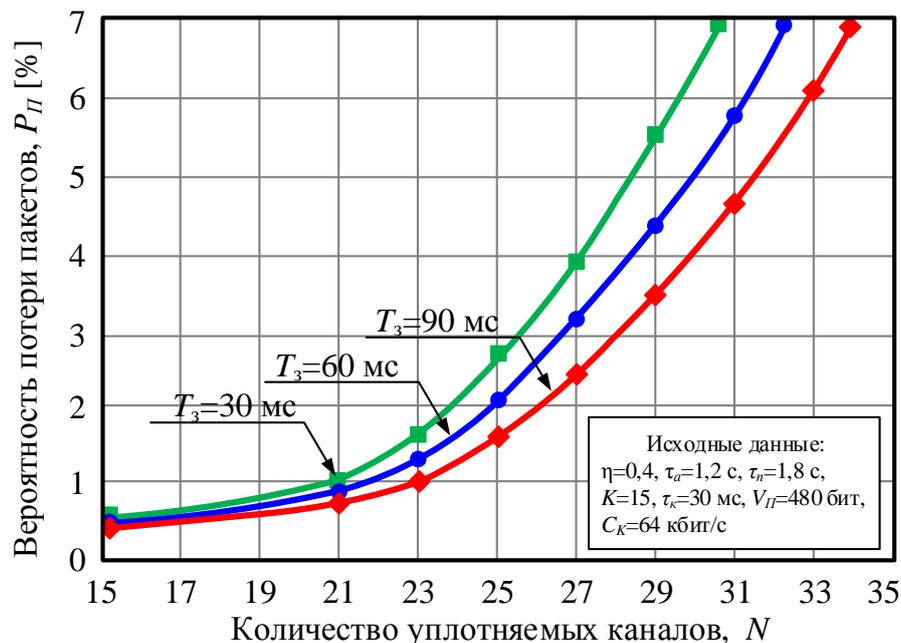


Рис. 17. Зависимость вероятности потери пакетов ($P_{п}$) от количества каналов (N) для различных значений допустимой задержки (T_3)

Анализ графиков, изображенных на рис. 17 показал, что вероятность потери пакетов ($P_{п}$) при адаптивном мультиплексировании мультисервисного трафика возрастает при увеличении количества организованных виртуальных каналов связи (N) и уменьшается при увеличении времени задержки (T_3) при обслуживании пакетов. Вероятность потери пакетов ($P_{п}$) и задержка сообщений (T_3) увеличиваются при повышении коэффициента активности источника трафика (η), что показано на графиках рис. 18.

Исходя из полученных данных возможно сделать вывод, что организация адаптивного мультиплексирования потребует нахождения оптимальных значений количества виртуальных каналов (N), емкости буфера мультиплексора (B) для заданных значений пропускной способности спутниковой радиолинии $C(q)$ и требований, предъявляемым к качеству обслуживания трафика ($P_{\text{треб}}$, $T_{\text{треб}}$).

Для оценки эффективности применения адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в КОА ЗССС и соответствия требованиям по качеству обслуживания проведено исследование

зависимостей изменения коэффициента мультиплексирования (ρ) от различных параметров мультиплексирования и свойств источников трафика (рис. 19–20).

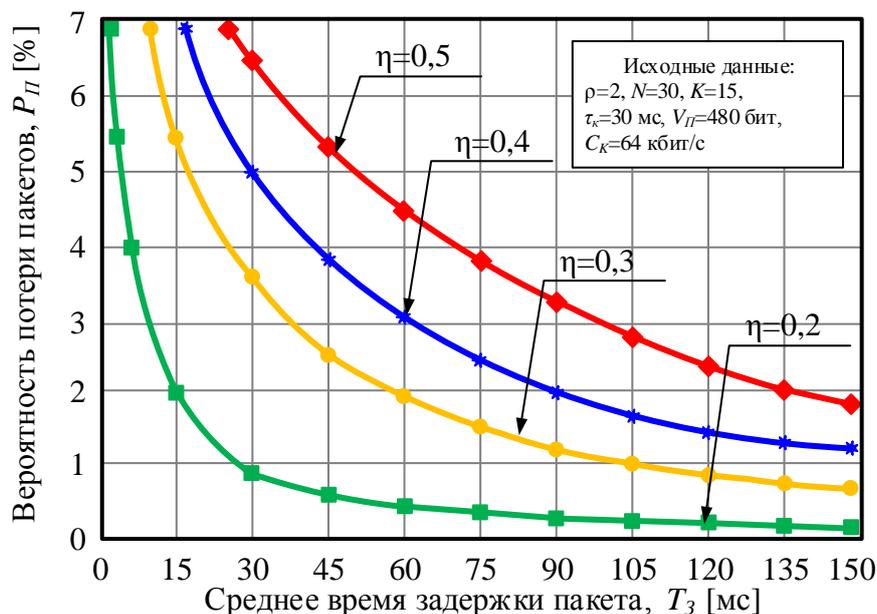


Рис. 18. Зависимость вероятности потери пакетов ($P_{л}$) от задержки (T_3) при различной активности источников трафика (η)

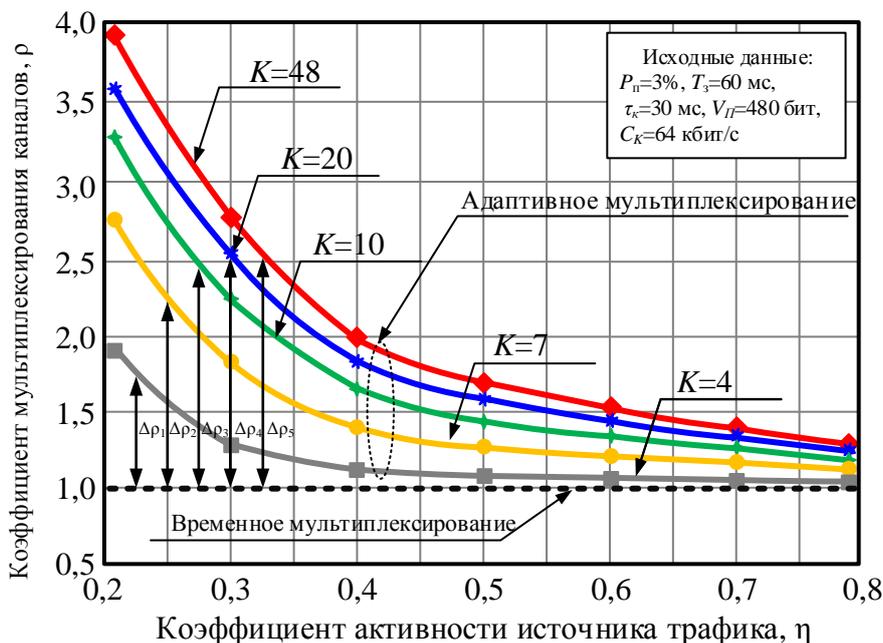


Рис. 19. Зависимость коэффициента мультиплексирования от активности источников трафика при изменении канальной емкости мультиплексора

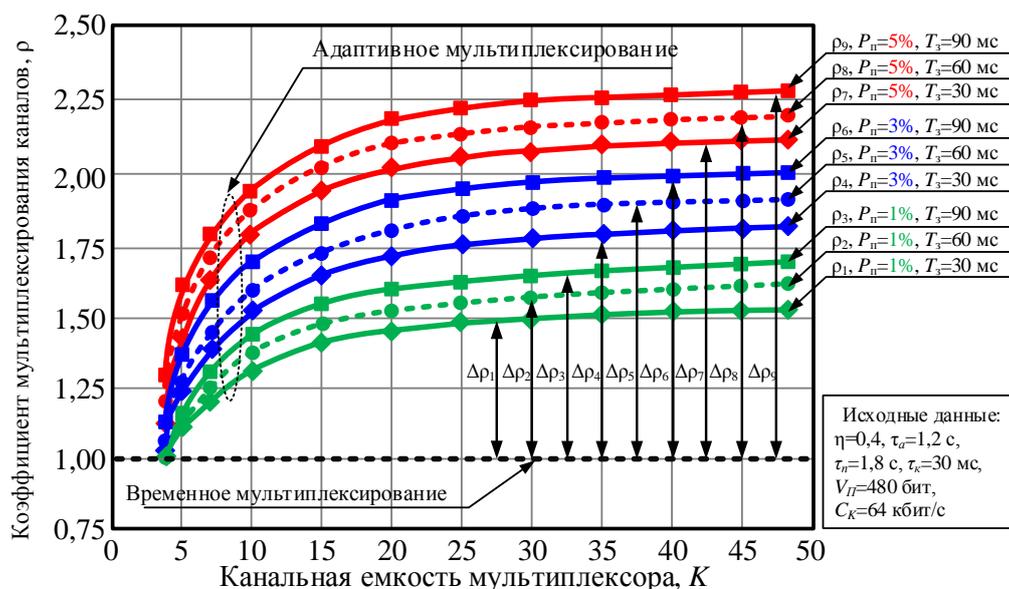
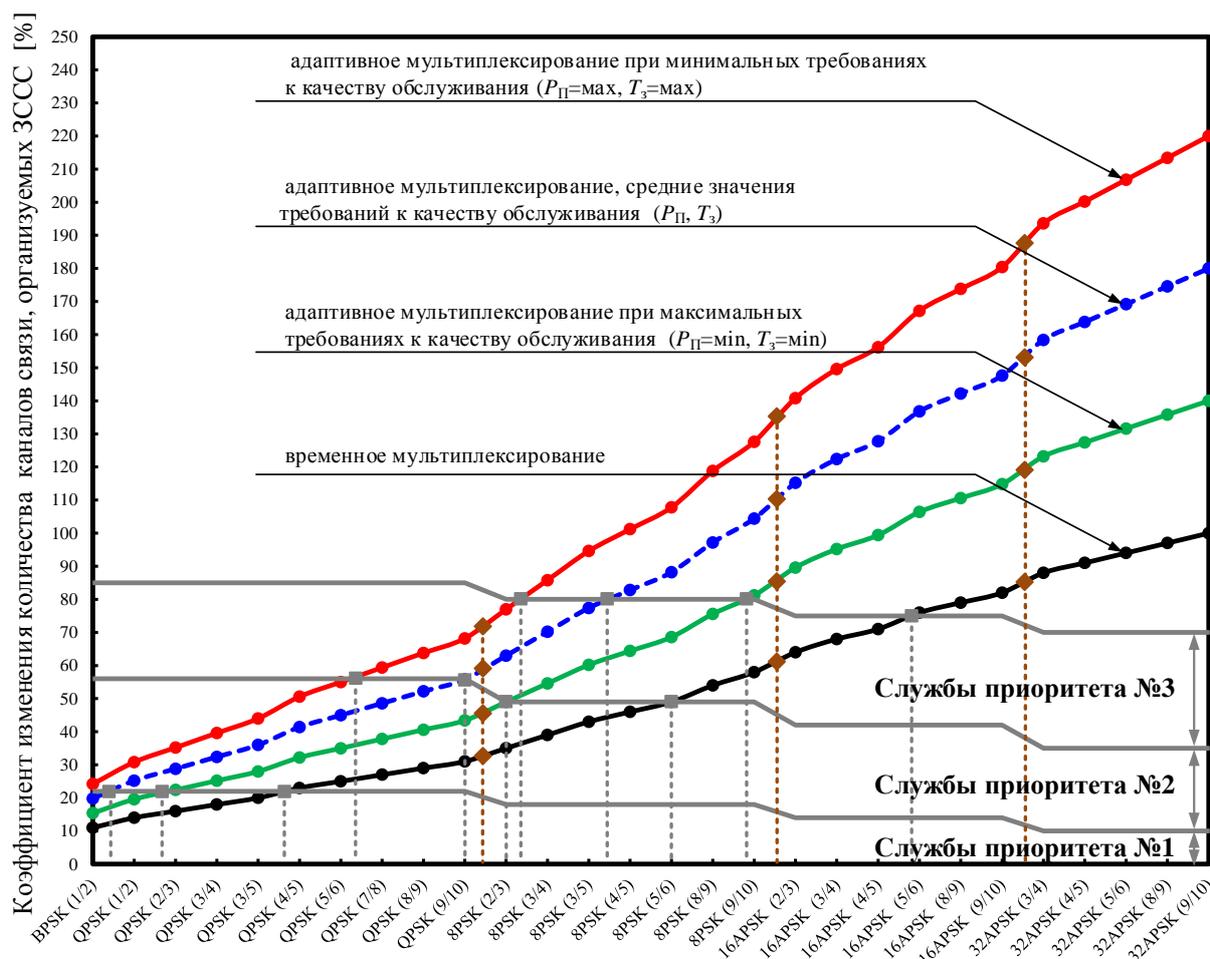


Рис. 20. Зависимость коэффициента мультиплексирования от канальной емкости мультиплексора при различных требованиях к качеству обслуживания



Множество режимов работы модемного оборудования земной станции ЕССС-3

Рис. 21. График изменения коэффициента количества каналов связи, организуемых ЗССС от применения различных конфигураций модемного оборудования

Коэффициент мультиплексирования каналов связи (ρ) организуемых мультиплексором ЗССС повышается с ростом его канальной емкости (K) и понижением активности источников трафика (η). Чем выше требования к качеству обслуживания ($P_{\text{треб}}$, $T_{\text{треб}}$), тем меньше коэффициент мультиплексирования (ρ) соответственно меньше прирост пропускной способности спутниковой радиолинии (ΔC).

Обобщая полученные зависимости, можно оценить достигаемый выигрыш в числе каналов ($\Delta\rho K$), организуемых ЗССС на основе предложенной технологии адаптивного мультиплексирования по сравнению с традиционной технологией мультиплексирования в различных условиях помеховой обстановки (рис. 21).

Технические рекомендации по организации адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре ЗССС

На основе множества полученных моделей (M_{AM}) и алгоритмов ($A_{OУ}$) сформированы технические рекомендации, направленные на совершенствование специального программно-математического обеспечения (СПМО) мультиплексора в целях организации адаптивного мультиплексирования трафика в КОА ЗССС. Данные рекомендации позволят оперативно управлять назначением приоритетов при адаптивном мультиплексировании трафика мультисервисных сетей и существенно повысить пропускную способность ЗССС. На основе СПМО мультиплексора ЗССС реализован механизм диспетчеризации мультисервисного трафика (рис. 22), который предназначен для организации оперативного управления трафиком, поступающим от разнородных источников (абонентов сети), контроля за выполнением требований к качеству обслуживания для заданного вида трафика и наличием канального ресурса мультиплексора. Данный механизм по аналогии используется для управления трафиком в сетях построенных на основе технологии АТМ [24, 25].

В рамках проводимых исследований разработан макет СПМО мультиплексора, которое должно быть интегрировано в состав автоматизированной системы управления ЗССС. СПМО мультиплексора, структура которого представлена на рис. 23, состоит из операционной системы мультиплексора с поддержкой приоритетного многозадачного планирования в масштабах реального времени, драйверов оборудования и клиентского приложения для управления мультиплексором и оперативного управления трафика.

Примеры интерфейсов основных модулей СПМО мультиплексора приведены на рис. 24–27. Представленные модули позволяют оператору ЗССС проводить комплекс операций по сбору статистики действующих каналов связи, оценки качества обслуживания, назначения приоритетов и администрирования абонентов.

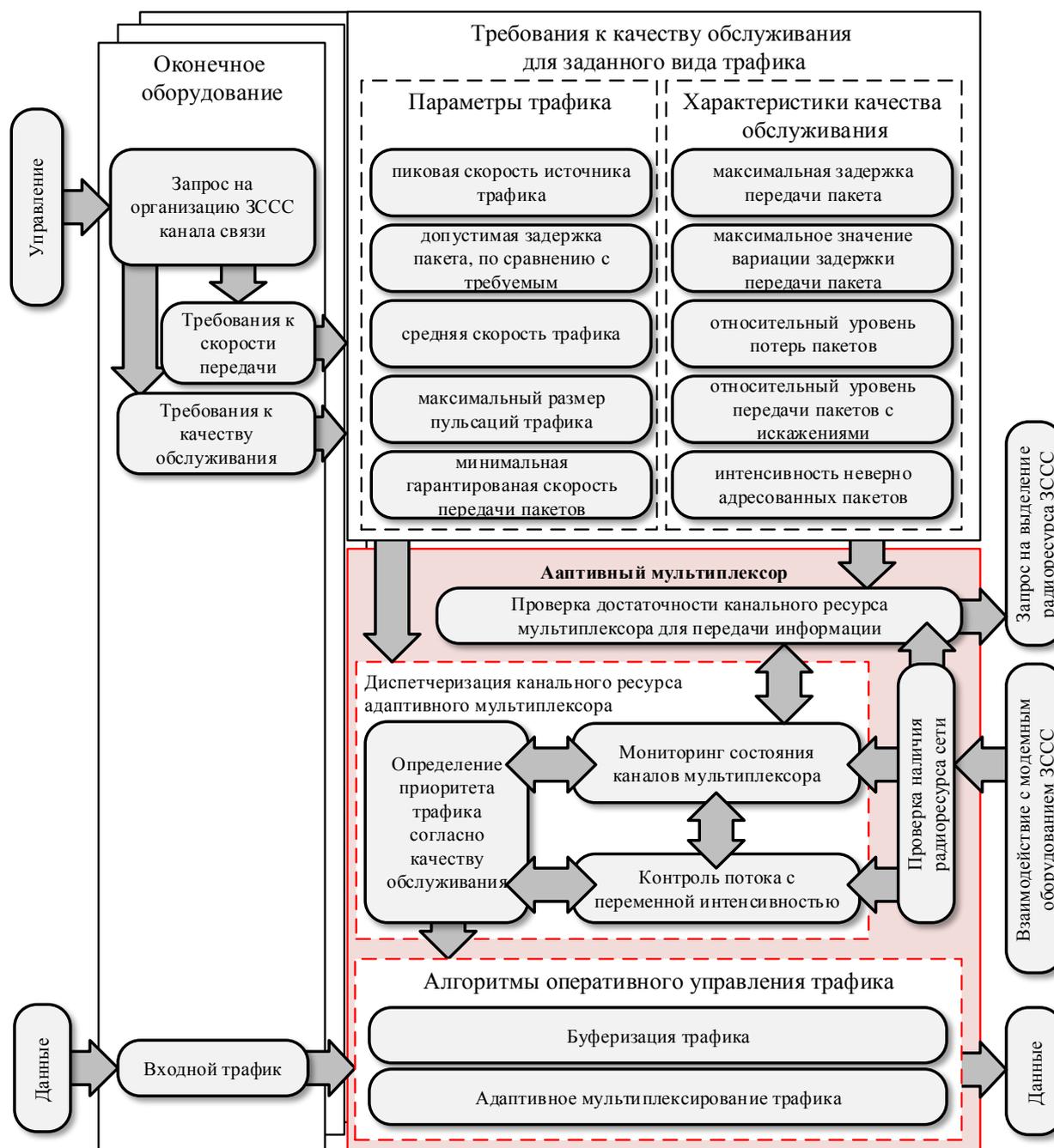


Рис. 22. Механизм диспетчеризации мультисервисного трафика, реализуемого в СПМО адаптивного мультиплексора ЗССС

Модуль оперативного управления потоков СПМО позволяет оператору ЗССС проводить управление информационными потоками путем назначения приоритетов в обслуживании в ручном и автоматическом режиме работы.

Модуль сбора статистики портов СПМО позволяет оператору ЗССС проводить статистическую оценку загрузки портов мультиплексора для определения качества обслуживания абонентов военных сетей спутниковой связи.

Модуль мониторинга потоков СПМО позволяет оператору ЗССС проводить наблюдение загрузки портов статистического мультиплексора для оперативной оценки нагрузки каналов связи в различных условиях помеховой обстановки.

Модуль действующих каналов связи СПМО позволяет оператору ЗССС проводить администрирование подключенных каналов связи, а также устанавливать необходимый коэффициент уплотнения статистического мультиплексора.



Рис. 23. Структура СПМО адаптивного мультиплексора ЗССС

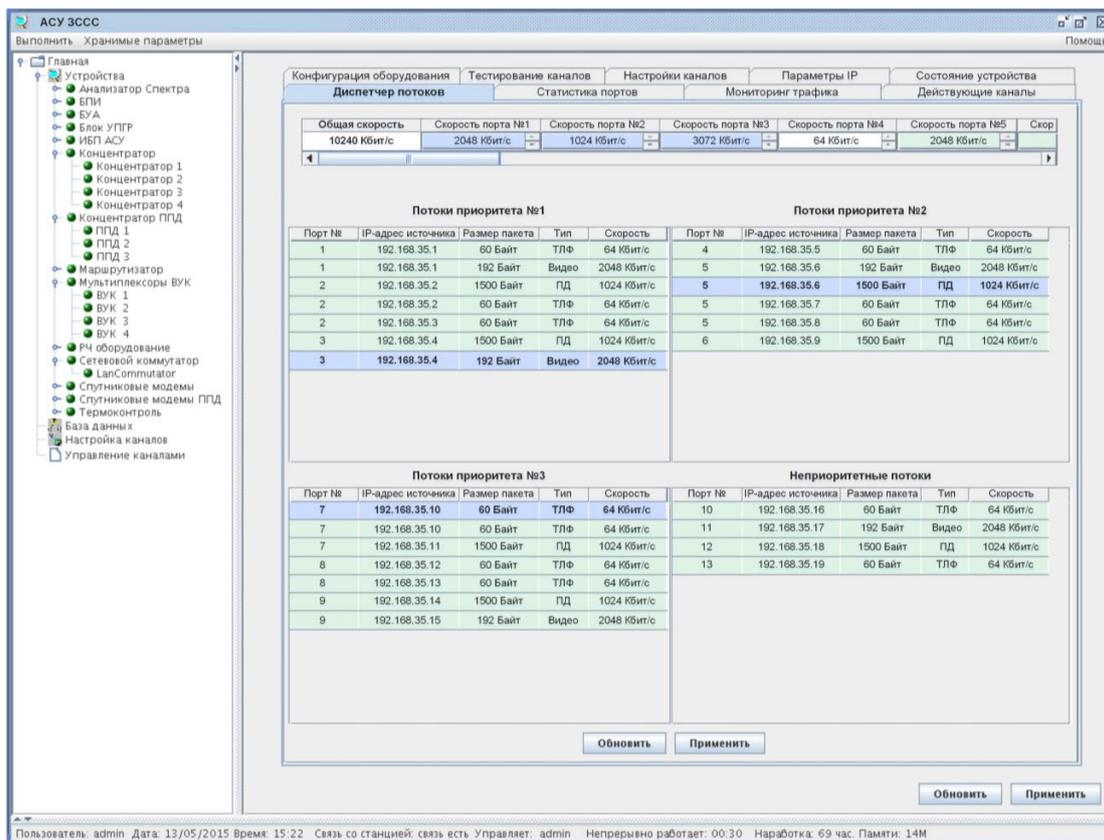


Рис. 24. Интерфейс модуля оперативного управления потоков СПМО адаптивного мультиплексора ЗССС

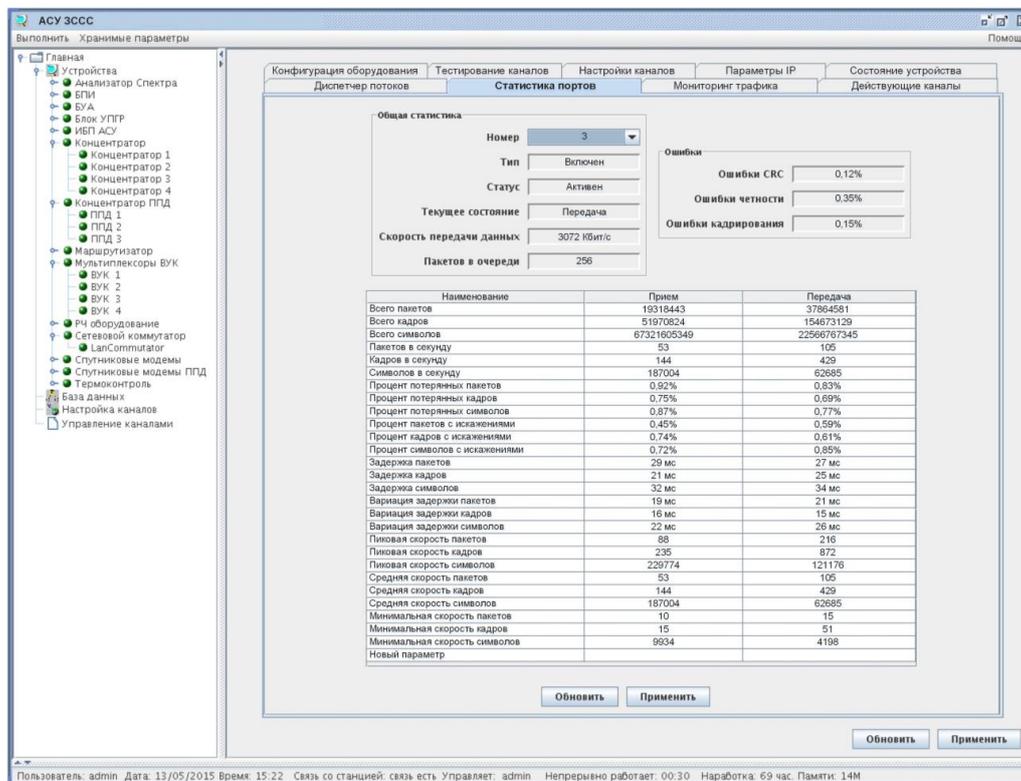


Рис. 25. Интерфейс модуля сбора статистики портов СПМО адаптивного мультиплексора ЗССС

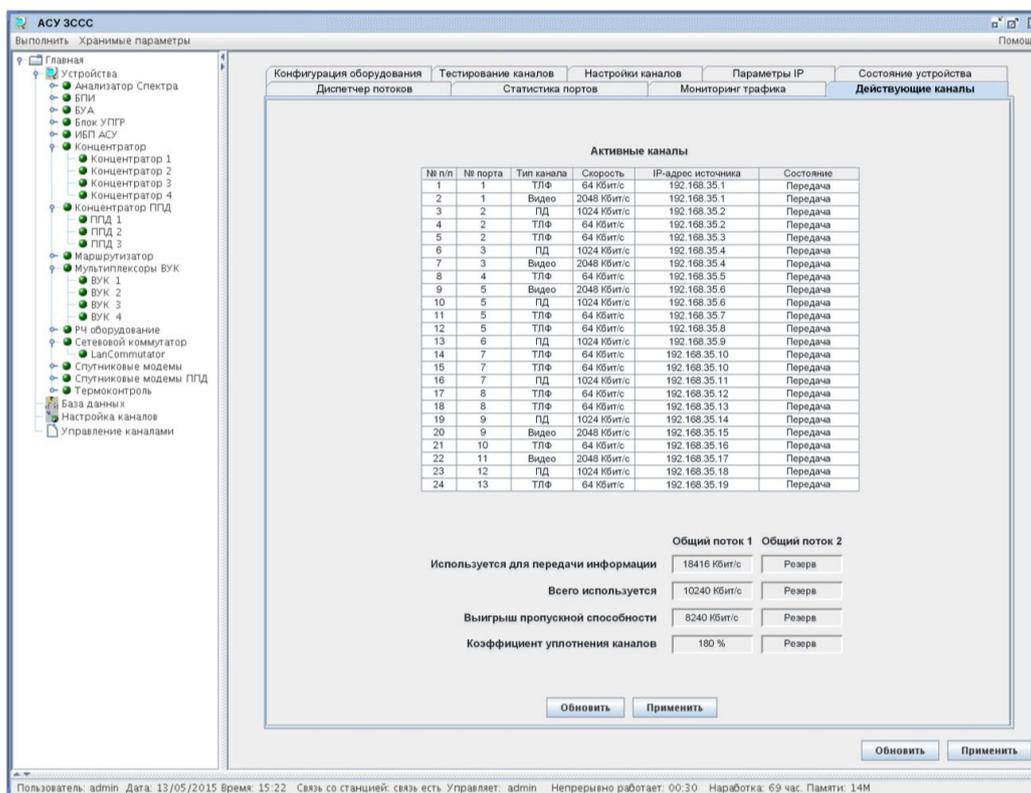


Рис. 26. Интерфейс модуля мониторинга потоков СПМО адаптивного мультиплексора ЗССС

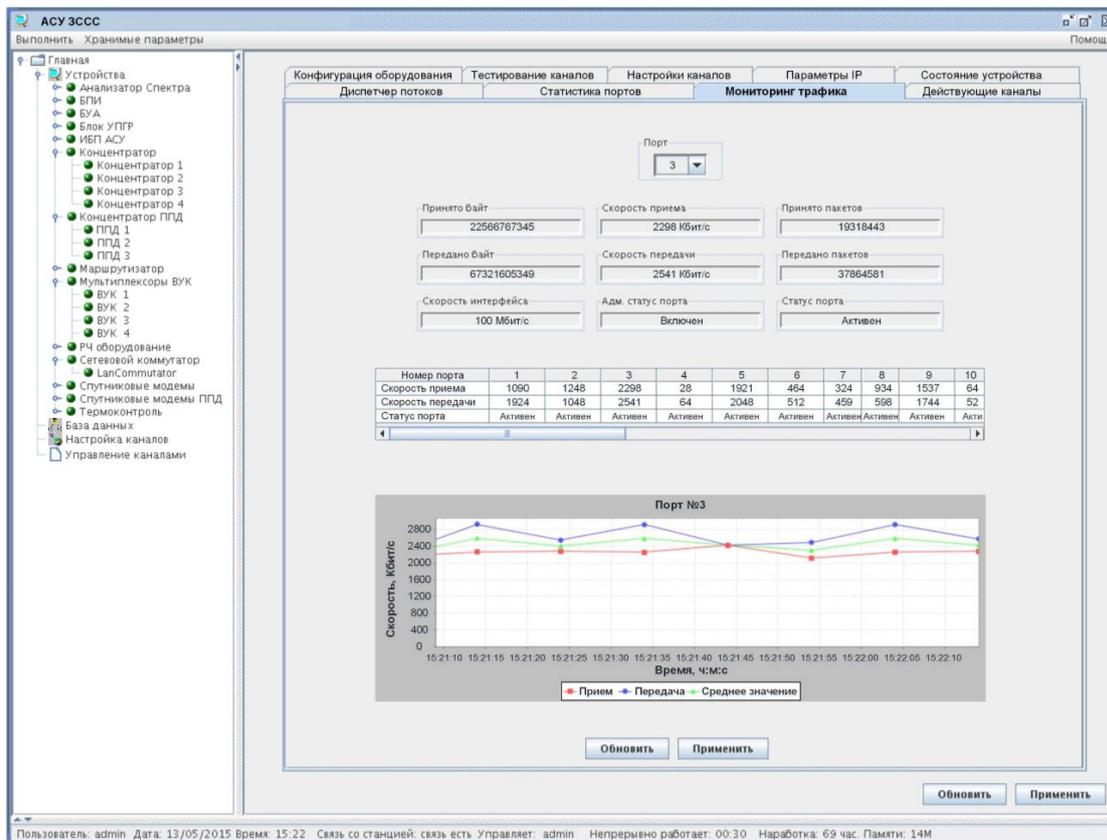


Рис. 27. Интерфейс модуля действующих каналов связи СПМО адаптивного мультиплексора ЗССС

Анализ основных свойств разработанных алгоритмов, в частности вычислительной сложности, показал целесообразность применения данных алгоритмов в составе СПМО нового парка ЗССС. Для парка ЗССС предыдущих поколений рекомендовано произвести модернизацию оборудования мультиплексора (рис. 28). Основные рассматриваемые пути модернизации – повышение производительности центрального процессора и емкости оперативной памяти мультиплексора ЗССС. Величина повышения эффективности в этом случае будет зависеть от технических характеристик КОА ЗССС.

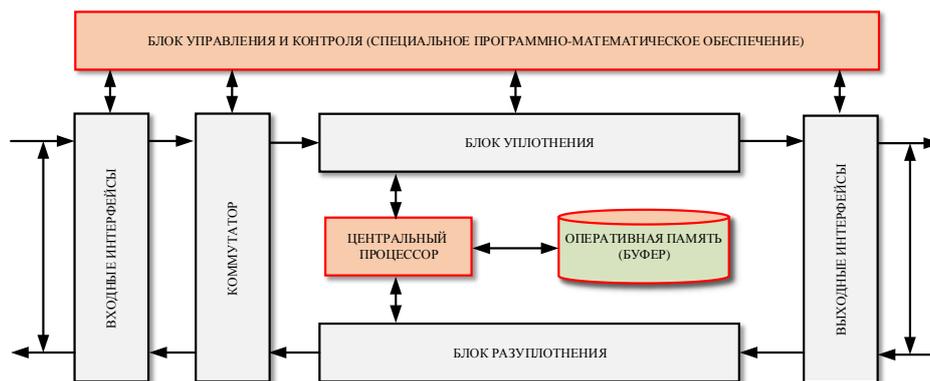


Рис. 28. Структурная схема адаптивного мультиплексора

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование технологии адаптивного мультиплексирования в сочетании с механизмом динамического назначения приоритетов в обслуживании мультисервисного трафика, при организации связи ЗССС, позволяют заметно увеличить число виртуальных каналов связи по сравнению с традиционной технологией мультиплексирования, что соответствует повышению пропускной способности ЗССС. При этом стоит отметить, что повышение пропускной способности будет зависеть от требований, предъявляемых к качеству обслуживания, структуры передаваемого трафика, а также выбора режима работы модемного оборудования. Так, при наиболее жестких требованиях к качеству обслуживания выигрыш составит до 40%, без требований (предельно достижимые значения) до 120%, что в среднем составляет порядка 80%.

Работа выполнена в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского в рамках проводимых автором диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата технических наук. Автор выражает благодарность за помощь в организации и проведении исследований кандидату технических наук доценту Е.Н. Косякову, а также признательность кандидату технических наук доценту С.И. Макаренко за методические рекомендации и помощь в оформлении работы.

Литература

1. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. № 4. 2013. С. 69-79.
2. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.
3. Новиков Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении. Информационно-управляющие системы. 2014. Т. 2. № 69. С. 79-86.
4. Новиков Е. А. Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. Т. 3. № 15. С. 62-69.
5. Зиннуров С. Х., Ковальский А. А., Кузичкин А. В. Динамическое распределение радиоресурса ретранслятора с учетом неоднородности трафика и запаздывания при управлении // Известия института инженерной физики. 2014. Т. 4. № 34. С. 51-56.
6. Кузичкин А. В., Зиннуров С. Х., Ковальский А. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Инженерная физика. 2015. №6. С. 49-57.
7. Топорков И. С., Ковальский А. А., Зиннуров С. Х. Модель и алгоритм управления процессом резервирования ресурса сети спутниковой связи при обслуживании мультисервисного нестационарного трафика // Известия института инженерной физики. 2016. Т. 1. № 39. С.37-47.
8. Шелухин О. И., Тенякшев А. М., Осин А. В. Моделирование информационных систем. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
9. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications.
10. ETSI EN 300 421. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services.
11. ETSI EN 301 210. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite.
12. ETSI TR 102 376 v. 1.1.1 (2005–02). Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB–S2).
13. ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.
14. Стандарт DVB–S2. Система цифрового ТВ вещания. // Контур–М [Электронный ресурс]. – URL: www.konturm.ru/tech.php?id=dvbs2 (дата обращения 20 марта 2017).

15. 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.

16. Макаренко С. И. Методика оценки времени задержки пакета в канале связи в условиях нестабильности входного трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 3. С. 95-96.

17. Макаренко С. И., Сидорчук В. П., Краснокутский А. В. Методика оценки времени задержки пакета в сети воздушной радио связи в условиях нестабильности входного трафика // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 6. С. 70-74.

18. Кихтенко А. В., Макаренко С. И. Методика оценки времени задержки пакета в спутниковой сети связи в условиях нестабильности входного трафика // Системы управления и информационные технологии. 2007. Т. 27. № 1.3. С. 344-348.

19. Adas A. Traffic models in broadband networks // IEEE Communication magazine. 1997. vol. 35. no. 7. pp. 82-89.

20. Muscariello L. Markov models of internet traffic and a new hierarchical MMPP model // Computer communications. 2005. vol. 28. no. 16. pp. 1835-1851.

21. Макаренко С. И., Коровин В. М., Ушанев К. В. Оператор преобразования трафика для преднамеренного повышения структурной сложности информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 77-109.

22. Макаренко С. И. Преднамеренное формирование информационного потока сложной структуры за счет внедрения в систему связи дополнительного имитационного трафика // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 3 (4). С. 7-13.

23. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б. С. Цыбакова. М.: Мир, 1979. – 600 с.

24. Макаренко С. И., Бородинов Р. В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. Т. 1. № 73. С. 65-79.

25. Новиков Е. А., Макаренко С. И. Оперативное управление ресурсом АТМ-коммутатора при обеспечении заданного качества обслуживания нестационарных информационных потоков. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. Т. 1. № 9. С. 43-52.

Reference

1. Mikhailov R. L., Makarenko S. I. Estimating Communication Network Stability under the Conditions of Destabilizing Factors Affecting it. *Radio and telecommunication systems*, 2013, no. 4, pp. 69-79 (in Russian).

2. Makarenko S. I. Adaptive control by speeds of logical connections in the channel of a radio communication of multiple access. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

3. Novikov E. A. Operational distribution of a radio resource of the relay station satellite at a non-stationary input flow of messages taking into account delay

in management. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, vol. 2, no. 69, pp. 79-86 (in Russian).

4. Novikov E. A. Assessment of bandwidth of the relay station satellite at reservation of a radio resource with anticipation. *Radio engineering and telecommunication systems*, 2014, vol. 3, no. 15, pp.62-69 (in Russian).

5. Zinnurov S. Kh., Kovalsky A. A., Kuzichkin A. V. Runtime allocation of a radio resource of a repeater taking into account heterogeneity of a traffic and delay at management. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2014, vol. 4, no. 34, pp. 51-56 (in Russian).

6. Kuzichkin A. V., Zinnurov S. Kh., Kovalsky A. A. Operational distribution of a radio resource of the relay station satellite at a non-stationary input flow of messages taking into account delay in management. *Inzhenernaya fizika*, 2015, no. 6, pp. 49-57 (in Russian).

7. Toporkov I. S., Kovalsky A. A., Zinnurov S. Kh. Model and the control algorithm process of reservation of a resource of a communication satellite network at service of a multiservice non-stationary traffic. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2016, vol. 1, no. 39, pp. 37-47 (in Russian).

8. 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).

9. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications.

10. ETSI EN 300 421. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services.

11. ETSI EN 301 210. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite.

12. ETSI TR 102 376 v. 1.1.1 (2005-02). Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).

13. ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.

14. DVB-S2 standard. System of digital TV broadcasting. *Kontur-M* [Electronic resource]. Available at: www.konturm.ru/tech.php?id=dvbs2 (accessed 3 Mach 2017)

15. Makarenko S. I., Mikhailov R. L., Novikov E. A. The research of data link layer and network layer parameters of communication channel in the conditons of dynamic vary of the signal and noise situation. *Journal of radio electronics*, 2014, no. 10. p. 2. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf> (accessed 03 Mach 2017) (in Russian).

16. Makarenko S. I. Technique of an estimation of time of a delay of a package in the channel of communication. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2007. vol. 5. no. 3. pp. 95-96 (in Russian).

17. Makarenko S. I., Sidorchuk V. P., Krasnokutsky A. V. Metodika otsenki vremeni zaderzhki paketa v seti vozduшной radio svyazi v usloviakh nestabil'nosti vkhodnogo trafika [Methodika of a packet delay time estimate in network air radio of communication in the conditions of instability of an input traffic]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2007, vol. 10, no. 6, pp. 70-74 (in Russian).

18. Kikhtenko A. V., Makarenko S. I. Metodika otsenki vremeni zaderzhki paketa v sputnikovoi seti svyazi v usloviakh nestabil'nosti vkhodnogo trafika [Packet delay time estimate technique in a satellite communication network in the conditions of instability of an input traffic]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2007, vol. 27, no. 1.3, pp. 344-348 (in Russian).

19. Adas A. Traffic models in broadband networks. *IEEE Communication magazine*, 1997, vol. 35, no. 7, pp. 82-89.

20. Muscariello L. Markov models of internet traffic and a new hierarchical MMPP model. *Computer communications*, 2005, vol. 28, no. 16, pp. 1835-1851.

21. Makarenko S. I., Korovin V. M., Ushanev K. V. The Traffic Transformation Operator for Deliberate Increase of the Structural Complexity of the Information Stream. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 4, pp. 77-109. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-04/04-Makarenko.pdf> (in Russian).

22. Makarenko S. I. Premeditated formation of the traffic of difficult structure due to implementation in the communication system of additional imitative traffic. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 7-13 (in Russian).

23. Kleinrock L. *Queueing Systems: Volume II – Computer Applications*. New York: Wiley Interscience, 1975, 576 p.

24. Makarenko S. I., Borodinov R. V. Analiz tekhnologii obespecheniia kachestva obsluzhivaniia v mul'tiservisnykh ATM setiakh [The analysis of technologies of quality assurance of service in multiservice ATM networks]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2012, vol. 73, no. 1, pp. 65-79 (in Russian).

25. Novikov E. A., Makarenko S. I. Operational management of a resource of ATM switch when ensuring the set service quality of non-stationary information flows. *Radio and telecommunication systems*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 43-52 (in Russian).

Статья поступила 31 марта 2017 г.

Информация об авторе

Ковальский Александр Александрович – кандидат технических наук. Старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского). Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: инфокоммуникационные системы. E-mail: sake636@mail.ru
Адрес: 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

The Organization of Adaptive Multiplexing of a Traffic of Multiservice Networks in the Channeling Equipment of Land Satellite Communication System with Taking into Account the Changing Jamming Situation

A. A. Kovalsky

Relevance. The increasing volumes of the transmitted data at high quality requirements of service and limitation of a radio resource of the spacecraft of communication do urgent questions of ensuring high bandwidth of land satellite communication system in the conditions of dynamically changing jamming situation. At implementation of the existing technologies of multiplexing of a traffic in the channeling equipment of land satellite communication system selection of a radio resource happens under peak values of intensity of information flows, without its statistical characteristics that is expressed in underexploitation of a radio resource at its general deficit. **The paper purpose** is consists in capacity growth of land satellite communication system in the conditions of an jamming situation. For achievement of the goal it is offered to use technology of adaptive multiplexing of a traffic which will consider its statistical characteristics, in different conditions of an jamming situation. It will allow to increase bandwidth of land satellite communication system and to fulfill quality requirements of service of a multiservice traffic. **The used methods.** The solution of a task of the organization of operational management of a multiservice traffic at adaptive multiplexing in the channeling equipment of land satellite communication system is based on use of Markov models of the modulated Poisson process and algorithms applied in the teletraffic theory taking into account specifics of functioning of communication satellite networks. For a research of the developed models the calculation procedure realized in the software package of mathematical modeling of MatLab is used. **Novelty.** Elements of scientific novelty of work are the accounting of a number of factors: properties of the arriving multiservice traffic, such, as, not stationarity, heterogeneity, priority in service, fulfillment of requirements on service quality and existence of the different modes of functioning of satellite radio lines which depend on conditions of an jamming situation. **Result.** Use of technology of adaptive multiplexing in combination with the mechanism of dynamic purpose of priorities in service of a multiservice traffic allows to increase considerably number of communication links in comparison with the existing technology that corresponds to capacity growth of land satellite communication system or ensuring required bandwidth in the conditions of an jamming situation. At the same time it is worth canceling that capacity growth will depend on requirements imposed to service quality, a type of the transferred traffic, and also the choice of an operation mode of the modem equipment. So, at the most strict requirements to service quality the prize will make up to 40%, at less tough (an unlimited admissible delay) extremely achievable values will make up to 120% that averages about 80%. **Practical significance.** The submitted decision is offered to be realized in the form of special program software of the channeling equipment on the basis of a program and modular platform which has to be integrated into structure of an automated control system of the terrestrial station of satellite communication. Implementation on the basis of a program and modular platform will allow to exercise on the basis of the analysis of statistical properties of a multiservice traffic its operational management at adaptive multiplexing in the conditions of the changing jamming situation, by assignment to information flows of priorities in service.

Keywords: adaptive multiplexing, operational management, multiservice traffic land satellite communication system, jamming situation.

Information about Author

Aleksander Aleksandrovich Kovalsky – Ph.D. of Engineering Science. Senior researcher of military institute. Mozhaysky Military Space Academy. Field of research: infocommunication systems. E-mail: sake636@mail.ru

Address: Russia, 197198, Saint Petersburg, Zhdanovskaya St., 13.