

УДК 621.391

Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи

Часть 1. Модели и методика повышения пропускной способности объединенной сети связи на основе использования Mesh-технологий

Иванов М. С., Аганесов А. В., Макаренко С. И.

Постановка задачи: как показывает опыт ведения боевых действий, Воздушно-космические силы применяются не только для решения задач специальных военных операций на прилегающих территориях к Российской Федерации, но и для отстаивания интересов России за ее пределами, где не всегда возможно организовать оперативное глобальное управление. Обеспечение глобальности управления достигается за счет сопряжения сети воздушной радиосвязи (СВРС) управления авиации и спутниковой сети связи (ССС), обеспечивающей глобальное покрытие на всей территории Земли. Вместе с тем, практическая реализация такого сопряжения не может быть достигнута простой установкой средств радиосвязи СВРС и СССР в состав авиационных комплексов связи, это связано с решением ряда дополнительных технологических задач, таких как: согласование скоростей обмена данными, разработка протоколов совместного функционирования СВРС и СССР, разработка протоколов маршрутизации и ретрансляции сообщений, а также выполнение требований по совместной работе сегментов воздушной и космической радиосвязи. **Цель работы:** повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи (ОВКСС) за счет разработки моделей и методики децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков в сетях воздушной и космической радиосвязи. При достижении цели работы **использовался математический аппарат** теории вероятности, теории графов, теории систем массового обслуживания. **Новизна.** К элементам новизны, представленных моделей, относится рассмотрение многоуровневой сети связи, ядром которой является СССР, а нижний уровень образован СВРС, а также учет специфики Mesh-технологии в СВРС для модели с децентрализованным распределением информационных потоков. Новизной методики, отличающей ее от аналогичных работ, является совместный учет специфики как воздушных сетей радиосвязи, так и космического сегмента, а также использование метода Ньютона для получения решения. **Результат.** Проведенное исследование показывает, что балансировка нагрузки целесообразна и возможна для ОВКСС с низким уровнем связности сетей воздушного сегмента. При этом расчетное значение доли передаваемого через космический сегмент трафика прямо пропорциональна задержке передачи – чем выше доля спутникового трафика, тем выше средняя задержка передачи сообщений. **Практическая значимость:** применение разработанной методики позволяет обосновать доли информационных потоков, ретранслируемых через воздушный и космический сегменты ОВКСС с целью балансировки нагрузки, а также обеспечения высокой пропускной способности и требуемого уровня своевременности передачи сообщений.

Ключевые слова: сеть воздушной радиосвязи, спутниковая сеть связи, организация связи, военная авиация, управление летательными аппаратами.

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов М. С., Аганесов А. В., Макаренко С. И. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 1. Модели и методика повышения пропускной способности объединенной сети связи на основе использования Mesh-технологий // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 183-259. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-183-259

Reference for citation:

Ivanov M. S., Aganesov A. V., Makarenko S. I. Bandwidth increasing the of a united aerospace communications network. Part 1. Models and method of bandwidth increasing of the united network with used Mesh-technologies. Systems of Control, Communication and Security, 2022, no. 3, pp. 183-259 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-183-259

Введение

Сложная военно-политическая обстановка в мире, существенно увеличивает вероятность применения Воздушно-космических Сил (ВКС) в различных точках Земли, в которых Российская Федерация (РФ) имеет свои интересы. Одним из примеров такого применения ВКС является задействование оперативно-тактической и стратегической авиации в операции против террористических военизированных формирований по просьбе правительства Сирии. В связи с этим актуальной военно-прикладной задачей является обеспечение глобального поля управления авиацией, в том числе, и за пределами РФ. Обеспечение глобальности управления можно достичь только за счет сопряжения сети воздушной радиосвязи (СВРС) управления авиации и спутниковой сети связи (ССС), обеспечивающей глобальное покрытие на всей территории Земли. Такое сопряжение предусмотрено перспективной концепцией построения военных систем связи и позволит создать единую воздушно-космическую сеть связи глобального управления авиацией в масштабах Земли. Вместе с тем, практическая реализация сопряжения не может быть достигнута простой установкой средств радиосвязи СВРС и СССР в состав авиационных комплексов связи, это связано с решением ряда дополнительных технологических задач.

К таким, задачам относится согласование скоростей обмена данными, разработка протоколов совместного функционирования СВРС и СССР, разработка протоколов маршрутизации и ретрансляции сообщений в объединённой воздушно-космической сети связи (ОВКСС) и другие задачи. Кроме того, опыт применения авиации ВКС РФ в Сирии показал, что авиацию, помимо нанесения ударов по наземным целям, широко применяют для разведки наземных целей, целеуказания для применения высокоточного оружия (ВТО) морского базирования, а также контроля результатов ударов ВТО. Эти задачи требуют передачи по ОВКСС больших объемов разведывательной информации (изображения и видео в радиолокационном и оптическом диапазоне), а также интенсивного информационного обмена между абонентами ВКС, Военно-морского флота (ВМФ) и пунктами управления операцией на территории Сирии и на территории РФ. При этом пропускной способности существующей сети связи, для передачи больших объемов информации, зачастую оказывается недостаточной, что приводит к высоким задержкам в передаче и потери оперативной ценности информации. Это делает актуальным проведение исследований в направлении повышения пропускной способности в ОВКСС.

1. Постановка задачи развития научно-методического аппарата повышения пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи

1.1. Анализ технических и протокольных решений по ретрансляции информационных потоков в сетях воздушной радиосвязи

В настоящее время в соответствии с перспективной концепцией построения систем связи специального назначения предполагается переход к многоэшелонированному принципу построения объединенных систем связи Во-

оруженных сил (ВС). При этом при построении систем связи предполагается в максимальной степени задействовать коммерческие и открытые стандарты и протоколы.

Как показал анализ современных технологических решений по построению систем связи [1-8] в основу наземных (полевых) систем связи, а также воздушных сетей радиосвязи будут положены радиосети, реализованные на основе протоколов случайного множественного доступа и объединяемые в единое информационное пространство за счет абонентов, находящихся в зоне действия смежных радиосетей и будет иметь вид, представленный на рис. 1.

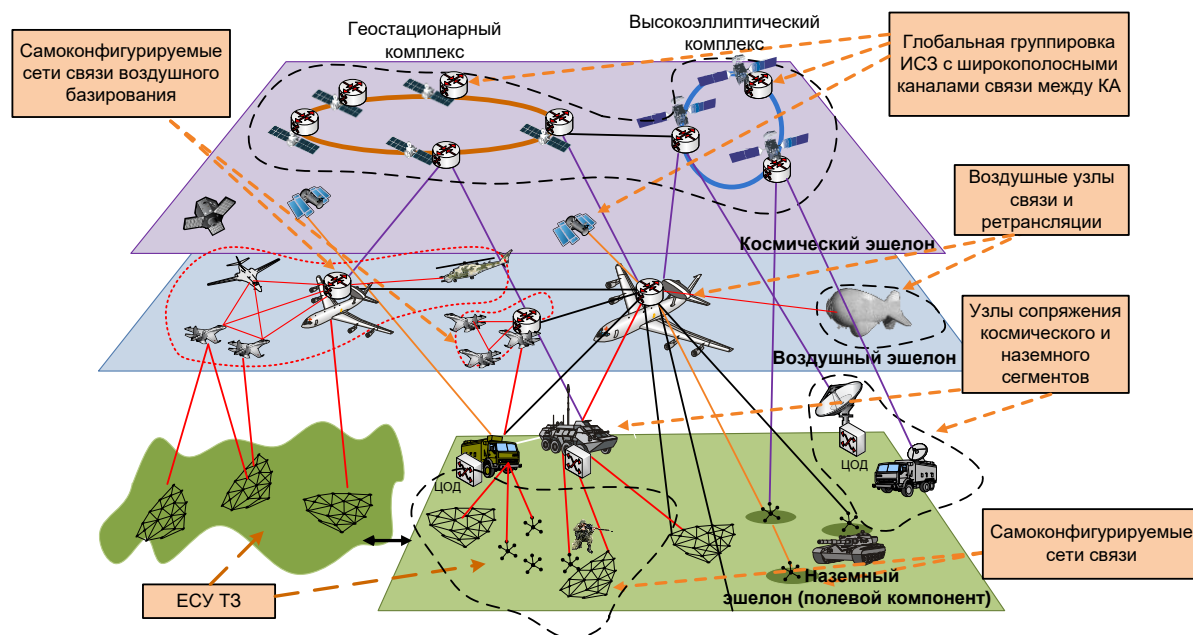


Рис. 1. Общая схема взаимодействия наземного, воздушного и космического эшелонов объединенной системы связи для ВС РФ

Необходимость в ретрансляции сообщений между отдельными сетями, потребует создания новых технологических решений по обеспечению ретрансляции информационных потоков, и как следствие увеличит информационную нагрузку на сети за счет транзитного трафика. Для обеспечения заданного качества обслуживания пользовательского трафика в объединенной сети связи требуется выработать единые протоколы ретрансляции информационных потоков с учетом дополнительной нагрузки создаваемой транзитными соединениями. Данная задача особенно актуальна для СВРС в УКВ диапазоне, стыкуемых через ССС. Актуальность обусловлена тем, что именно на СВРС, в условиях проведения военной операции, планируется возложить информационное обеспечение авиации и ретрансляцию информационных потоков от подразделений сухопутных войск, и от развертываемых в районе операции разведывательных сетей на основе беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Кроме того, как показано в работах [9-14], СВРС доступны наземным и авиационным средствам радиоэлектронного подавления, что существенно затрудняет ретрансляцию информационных потоков.

Анализ современных и перспективных технических решений в работах [15-23] показал, что в основу воздушного эшелона будут положены системы обмена данными (СОД) в интересах которых, за счет перспективных средств и комплексов связи, будут развернуты отдельные СВРС обеспечивающие высокоскоростной цифровой информационный обмен. СОД будут обладать высокой совместимостью с наземными средствами радиосвязи и обеспечивать бесшовную ретрансляцию информационных потоков. В табл. 1 приведены основные характеристики существующих и разрабатываемых систем обмена данными, по материалам из [17]. В настоящее время получила широкое применение СОД на базе ТКС-2 (ТКС-2М), однако наибольшей эффективностью обладает «Объединенная система связи, обмена данными, навигации и опознавания» (ОСНОД), которая в настоящее время планируется к использованию в перспективных СВРС.

Таблица 1 – Характеристики систем обмена данными

№	Характеристики	ТКС-2 (ТКС-2М)	ОСНОД
1	Назначение	Типовой комплекс связи для обмена телекодовой информацией	Объединенная система связи, обмена данными, навигации и опознавания
2	Виды сетей обмена данными	СОД между самолетами, между пунктами управления (ПУ) и самолетами	Сеть обмена всеми видами информации между авиационными комплексами (АК), между АК и ПУ, между ПУ
3	Возможность закрытия	Есть	Есть
4	Количество абонентов	20	1800
5	Объем сообщения, бит	1024	1024, 2048
6	Возможность автоматической ретрансляции сообщений	Есть	Есть
7	Диапазон частот	ДКМВ, МВ-ДМВ	ДМВ

* ТКС-2М отличается от ТКС-2 циклограммой работы и составом передаваемой информации.

Технической основой перспективных СОД воздушного эшелона станут, комплексы связи С-103, С-107, С-111, которые не только обеспечат летательные аппараты оперативно-тактической, стратегической и армейской авиации высокоскоростной цифровой связью, но и будут использоваться совместно с наземными подразделениями сухопутных войск.

ТТХ перспективного комплекса связи, значимые для решения задач ретрансляции информационных потоков представлены в табл. 2 по данным работ [7, 17, 24]. Как показывает анализ данных табл. 2, в состав комплекса авиационной связи включена станция спутниковой связи, которая позволит организовать сопряжение СОД через ССС.

Таблица 2 – Некоторые тактико-технические характеристики (ТТХ)
перспективного комплекса связи

№	Характеристика	Значение
1	Скорости передачи данных, кбит/с: – ДКМВ – МВ-ДМВ – ОСНОД (эффект.) – СМВ – спутниковая линия связи ЕССС-2 (ЕССС-3) ДМВ-2	до 2,4 до 16 до 40 (100) до 34 400 до 2,4 (до 2048)
2	Количество одновременно обслуживаемых сетей	до 38
4	Направлений связи: – ДКМВ – МВ-ДМВ – ОСНОД (эффект.) – СМВ – спутниковая линия связи ЕССС-2 (ЕССС-3) ДМВ-2	1 2 1 1 1
5	Дальность связи, км: – в направлении «земля-борт» для ДКМВ – в направлении «земля-борт» для МВ-ДМВ, ОСНОД – в направлении «борт-борт» для МВ-ДМВ, ОСНОД	1500 350 500

Таблица 3 – Допустимые значения параметров качества обслуживания
при передаче мультимедийного трафика [27, 28]

Тип сервиса	Параметры качества обслуживания				
	Время установления соединения, с	Вероятность разрыва соединения	Задержка, мс	Джиттер, мс	Вероятность потери данных
IP-телефония	0,5-1	10^{-3}	25-500	100-150	10^{-3}
Видеоконференция	0,5-1	10^{-3}	30	30-100	10^{-3}
Цифровое видео по запросу	0,5-1	10^{-3}	30	30-100	10^{-3}
Передача данных	0,5-1	10^{-6}	50-1000	-	10^{-6}
Телевизионное вещание	0,5-1	10^{-8}	1000	-	10^{-8}

Концепцией построения систем связи специального назначения предполагается, что ССС будет использовать режим коммутации пакетов с их обработкой на борту [25, 26], при этом спутники-ретрансляторы (СР) будут использоваться для иерархического «роуминга» информационных потоков, передающихся между различными воздушными и наземными радиосетями, имеющих различную войсковую и ведомственную принадлежность или не имеющих прямой электромагнитной доступности, но оснащенные средствами спутниковой связи «Багет-К», «Ливень», «Легенда» и др. со скоростями до 2,4 кбит/с (а при переходе к ЕССС-3 – до 2 Мбит/с) [7]. При этом в составе ССС для организации такого «роуминга» предполагается использовать каналы и частотные диапазоны, отводимые под функционирование подвижных ССС, а организацию доступа абонентов воздушных и наземных полевых сетей к СР производить по протоколу случайного множественного доступа S-Aloha.

Вышеуказанные факторы определяют актуальность разработки технологических способов ретрансляции трафика СВРС через ССС, как составной части более общей задачи, а именно: разработки научно-методического аппарата решения задачи маршрутизации в объединенных воздушно-космических сетях связи с заданным качеством обслуживания.

Таблица 4 – Требования к качеству услуг, предоставляемых мультисервисными сетями связи [27, 28]

Тип данных	Название услуги	Требуемая скорость передачи	Параметры качества услуги	Джиттер
			Задержка, мс	
Аудио	Телефония	4-64 кбит/с	<150 мс (отличное QoS); <400 мс (допустимое QoS)	<1 мс
	Передача голоса	4-32 кбит/с	<1 с (для воспроизведения); <2 с (для записи)	<1 мс
	Звуковое вещание	16-128 кбит/с	<10 с	<<1 мс
Видео	Видеоконференция	>384 кбит/с	<150 мс (отличное QoS); <400 мс (допустимое QoS)	
Данные	Просмотр WEB-страниц	≈ 10 кБ	<2 с/стр. (отличное QoS); <4 с/стр. (допустимое QoS)	-
	Передача файлов	10 кБ – 10 МБ	<15 с (отличное QoS); <60 с (допустимое QoS)	-
	Передача изображений	100 кБ	<15 с (отличное QoS); <60 с (допустимое QoS)	-
	Доступ к электронной почте	<10 кБ	<2 с (отличное QoS); <4 с (допустимое QoS)	-
	Факс	≈ 10 кБ	<30 с/стр.	-

Порядок ретрансляции сообщений СОД по СВРС определяется алгоритмом многостанционного доступа (АМСД) к разделяемой среде передачи (базовая частота работы радиостанций абонентов СОД). В случае СВРС разделяемой средой является общий канал множественного доступа (КМД). В настоящее время в современных СОД при доступе к КМД используются следующие АМСД [24, 29, 30]:

- АМСД «запрос-ответ», в соответствии с которым передача сообщений абонентам осуществляется только в ответ на полученный запрос;
- АМСД «по расписанию», отличающегося тем, что каждый абонент передает сообщения в назначенное время относительно начала сеанса передачи;
- АМСД «работа по сеансам», по которому каждый абонент сети передает сообщение в заданный расписанием связи момент времени;
- Алгоритм случайного многостанционного доступа (АСМСД), представляет возможность передавать сообщения в любой свободный момент времени на основе случайного обращения абонентов к КМД.

Каждому вышеприведенному АМСД соответствует своя модель на базе которой ведется исследования СВРС, построенной на данном типе АМСД. Од-

нако исследования [29-31] показали, что эффективность различных АМСД по критерию максимизации вероятностно-временных характеристик (ВВХ) доставки сообщения существенно отличается.

На рис. 2-4 приведены результаты моделирования информационного обеспечения АК с ПУ в единой СВРС с различными АМСД. По оси абсцисс отложено время доставки информации, а по оси ординат – вероятность того, что время доставки примет данное или менее значение.

Моделирование проводилось со следующими ограничениями:

- пропускная способность СВРС: 1,2 кбит/с (соответствует аппаратуре передачи данных (АПД) ТКС-2), 4,8 кбит/с (для АПД ТКС-2М);
- количество АК в СВРС: $N_{AK} = 4, 12$.

Анализ результатов моделирования по применению вышеуказанных АМСД в СВРС позволяет сделать следующие выводы.

Использование АМСД «запрос-ответ» не позволяет в полной мере удовлетворить потребности системы связи по управлению АК. Так при управлении 12 АК и выполнения требований по передаче сообщения объемом 1024 бит длительность цикла сеансов связи может достигать 24 с, при этом потребуется организация трех функционально независимых подсетей ВРС (по 4 АК в каждой) и как следствие дополнительному расходу канальных ресурсов. А требования по передаче коротких сообщений первой категории срочности (объемом 256 бит) не выполняются даже на скорости 4,8 кбит/с, что представлено на рис. 2.

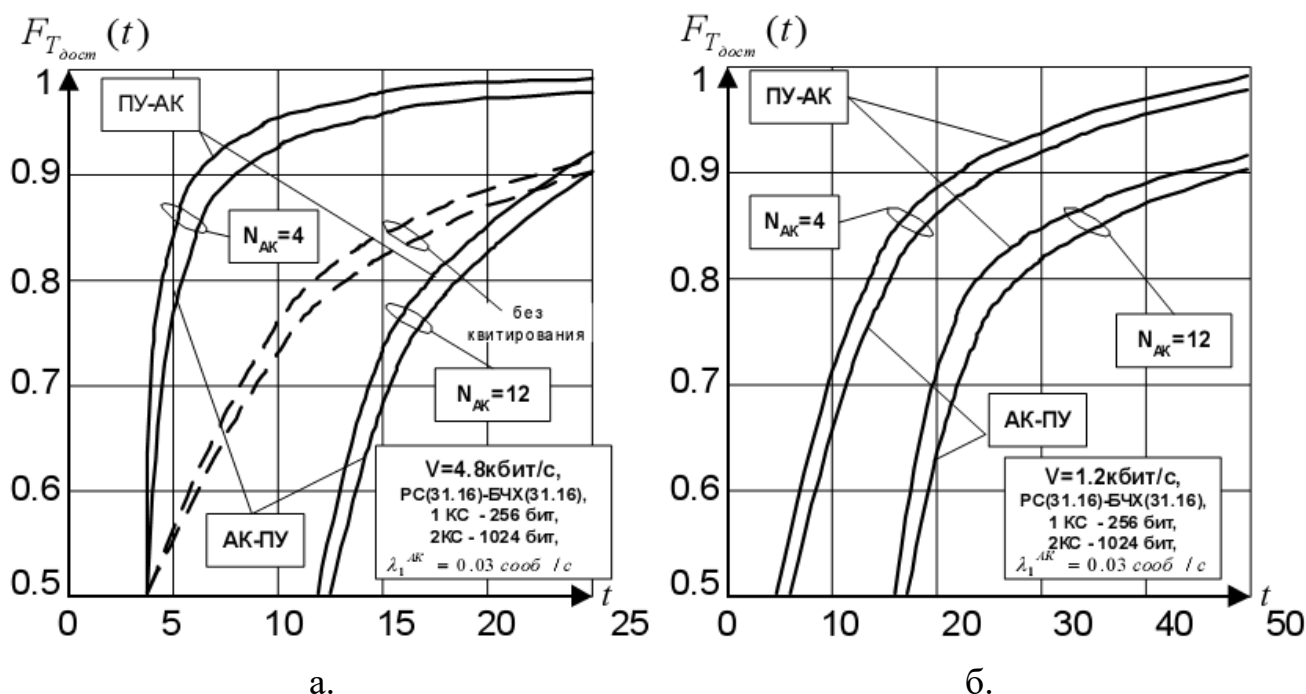


Рис. 2. ВВХ процесса доставки при АМСД «запрос-ответ»

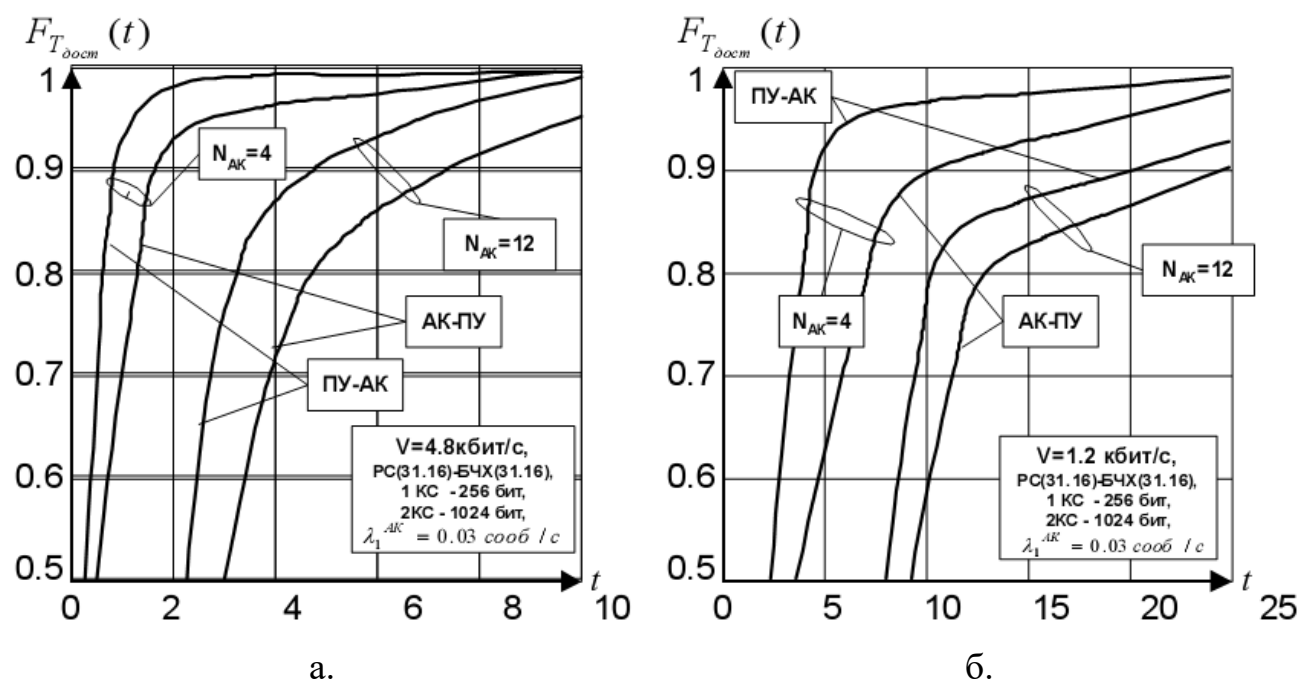


Рис. 3. BBX процесса доставки при АМСД с временным разделением КМД (АМСД «по расписанию» и «работа по сеансам»)

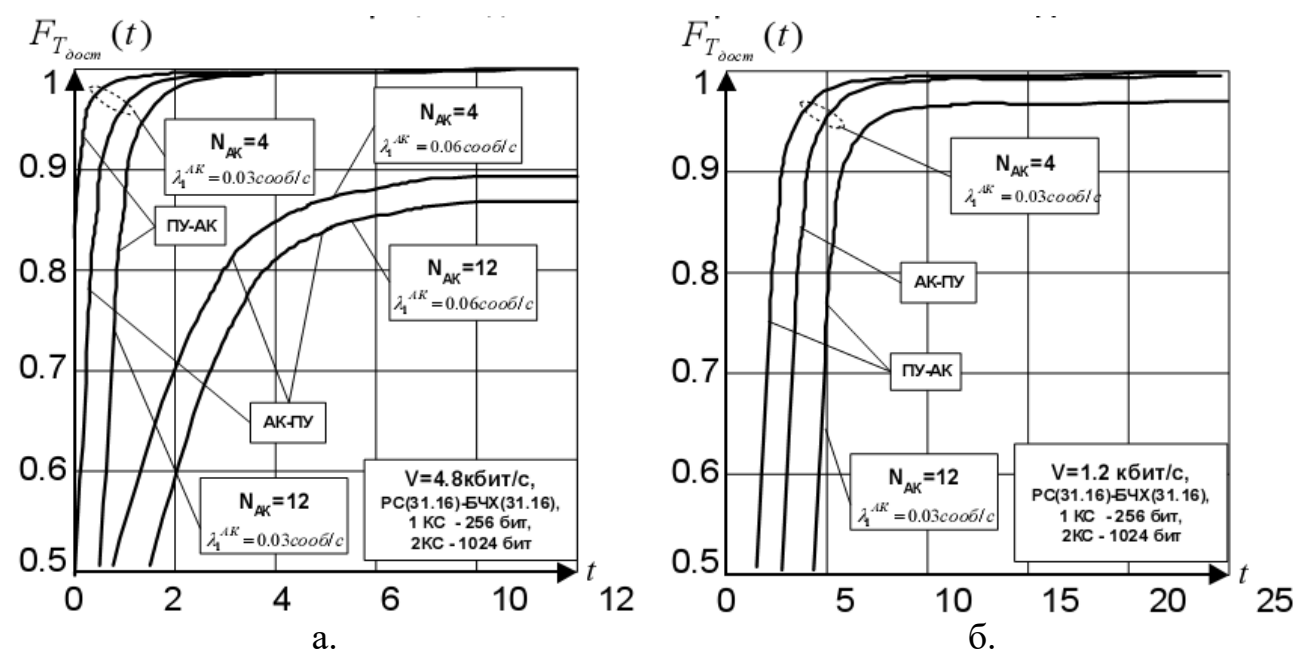


Рис. 4. BBX процесса доставки при АСМСД

Использование АМСД с временным разделением (АМСД «по расписанию» и «работа по сеансам») позволяет приблизиться к выполнению BBX доставки сообщений в СВРС для сообщений первой категории срочности (объемом 256 бит) при управлении 12 АК, представлено на рис. 3. В работе [32] указывается, что цикл обмена с 1 АК составляет 0,5 с, а с группой из 12 АК – до 12 с, на скорости 4,8 кбит/с. Целесообразное применение данного АМСД связывается с перспективами реализацией в ТКС-2М скорости передачи 16 кбит/с, только в этом случае данный АМСД в некоторой мере будет удовлетворять требованиям по BBX передачи сообщений.

Использование АСМСД, как показано на рис. 4, позволяет выполнить требования ВВХ передачи сообщений объемом до 1024 бита на скорости 4,8 кбит/с (стандартная скорость АПД ТКС-2М) при одновременном управлении 12 АК. К достоинствам данного АМСД следует отнести высокую пропускную способность и инвариантность к количеству абонентов. Основным недостатком АСМСД является высокая чувствительность алгоритма к росту интенсивности входного трафика. Несмотря на указанный недостаток именно АМСД является наиболее перспективным для применения в СВРС.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в перспективе обмен сообщениями в СВРС будет базироваться на АСМСД. Применение же других АМСД обусловлено устаревшей АПД находящейся на наземных терминалах и АК. То есть, модель СВРС должна соответствовать КМД АСМСД как наиболее перспективному из применяемых в настоящее время (с учетом того, что с развитием СОД он вытеснит применение остальных АМСД). Фактически АСМСД соответствует протоколу случайного множественного доступа с предотвращением коллизий – CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance). Следовательно, СВРС целесообразно будет представить в виде КМД со случайным доступом на основе CSMA/CA, а базовой моделью, используемой для оценки – модель системы массового обслуживания (СМО) «Ненастойчивого множественного доступа с проверкой несущей» [31].

1.2. Анализ вариантов технологических решений по сопряжению отдельных сетей воздушной радиосвязи через сеть спутниковой связи

В настоящее время СВРС могут быть сопряжены через ССС за счет использования средств спутниковой связи «Багет-К», «4РТ-С», «Кулон-В», представлены в табл. 5 [7].

Станция «Кулон-В» является первой самолетной станцией, использующей до десяти помехозащищенных каналов. Выполняет функции микроузловой земной станции (ЗС) космической связи, работающей в оперативно-тактических специальных сетях связи. Станция позволяет организовать круглосуточную непрерывную связь на всей территории Северного полушария Земли [7].

Станция «Багет-К» предназначена для обеспечения в режиме реального времени самолетов Военно-воздушных сил и ВМФ дальней помехозащищенной, засекреченной телефонной и телекодовой радиосвязью с наземными и корабельными пунктами управления через СР на стационарных и эллиптических орбитах Единой системы спутниковой связи (ЕССС). Устанавливается на самолетах типа Ту-160 [7].

Станция «4РТ-С» обеспечивает прием и передачу телекодовой и телеграфной информации через СР на высокой эллиптической орбите ЕССС [7].

Средство спутниковой связи «Кулон-В» в рамках ЕССС-2 способно организовывать каналы до 2,4-9,6 кбит/с, в ЕССС-3 скорость мобильных авиационных абонентов увеличена до 2 Мбит/с. Это позволит организовать полноценную маршрутизацию информационных потоков отдельных СВРС через ССС.

Рассмотрим современные подходы к организации маршрутизации и ее особенности, применительно к ССС.

Таблица 5 – Некоторые ТТХ авиационных средств спутниковой связи [7]

	Кулон-В	Багет-К	4РТ-С
Диапазон частот, ГГц	4/6	0,3/0,4	4/6
Дальность связи, км	до 17 000	до 17 000	до 17 000
Количество каналов связи:			
– телефонные	8×1,2 кбит/с	2×1,2 кбит/с	-
– телеграфные	6×0,25 кбит/с	2×0,25 кбит/с	-

При решении задач маршрутизации в ССС помимо стандартных показателей качества каналов связи необходимо учитывать дополнительные особенности, которые существенно усложняют процедуры маршрутизации, разработанные для наземных сетей. Эти особенности связаны со способами излучения, распространения и приема радиосигналов, а также небольшим временем «жизни» топологии каналов связи негеостационарных ССС, особенно низкоорбитальных сетей, вследствие высокой скорости движения СР (под временем «жизни» топологии понимается интервал времени сохранения неизменной топологии сети связи). В зависимости от целевого назначения ССС на СР, при межспутниковой ретрансляции могут использоваться ненаправленные, слабо- или высоконаправленные антенные системы. Излученный ретранслятором радиосигнал при использовании ненаправленных или слабонаправленных антенн может поступить на входы приемников нескольких СР-соседей, которые находятся в зоне радиовидимости. Зона радиовидимости ретрансляторов определяется направленными свойствами бортовых приемо-передающих антенно-фидерных систем, мощностью передатчиков, диапазоном используемых частот, высотой орбит и др., например, при малой высоте орбит из-за кривизны поверхности Земли зона радиовидимости меньше, чем при большей высоте орбит. Так, при высоте орбит от 800 до 1400 км время «жизни» топологии составляет примерно от 3 до 10 минут [33].

В перспективных проектах, рассматриваются интегрированные сети связи, которые представляют собой объединение спутниковых и наземных сетей связи [34]. Спутниковый сегмент представляет собой объединенную сеть геостационарных, высокоэллиптических, средне- или низкоорбитальных сетей спутников-ретрансляторов. Возможные маршруты информационных потоков в таких системах включают в себя [33, 35-38]:

- межспутниковые каналы связи (между низкоорбитальными спутниками, между низко- и высокоорбитальными ретрансляторами, между высокоорбитальными ретрансляторами);
- каналы связи СР – земная станция;
- каналы связи наземных сетей.

Очевидно, что алгоритмы маршрутизации, которые должны использоваться в различных сегментах этих сетей, будут различными. С целью упрощения программно-аппаратных средств, в таких интегрированных сетях целесо-

образно использовать одну универсальную схему выбора маршрута. В этом случае во всех сегментах сети будут измеряться и рассчитываться одни и те же показатели, на базе которых и определяются оптимальные в выбранной метрике маршруты. Однако в настоящее время различные сегменты интегрированных сетей проектируются и изготавливаются различными производителями, что, с учетом указанных выше особенностей маршрутизации в ССС, придает задаче маршрутизации в интегрированных наземно-космических сетях связи особую актуальность.

Изменения топологии и характеристик трафика в ССС хотя и носят высокодинамичный характер, но в большей своей части являются предсказуемыми. В частности [33, 35-38]:

- зоны радиовидимости и топология орбитальной сети связи вполне детерминированы, так как ретрансляторы движутся по орбитам с постоянными и практически неизменными баллистическими параметрами. Поэтому местоположение СР и зон радиовидимости с другими ретрансляторами орбитальной группировки может быть рассчитана заранее;
- орбитальные группировки для ССС коммерческого применения, как правило, в пространстве представляют собой регулярную структуру. Например, ССС Iridium представляет собой развертку цилиндра с детерминированной решетчатой структурой;
- моменты появления трафика в линиях связи «вверх» для каждого СР вполне предсказуемы, так как заранее известны моменты появления каждого СР над каждым географическим районом Земли;
- над полюсами в орбитальной группировке ССС возникают большие скопления (пучности) ретрансляторов. В этом случае в зоне радиовидимости каждого СР может находиться более десятка ретрансляторов других орбит и др.

Учет всех этих особенностей позволяет существенно снизить сложность решения задачи маршрутизации и разработать в достаточной степени эффективные алгоритмы маршрутизации в ССС [33, 35-41].

В настоящее время разработаны два базовых алгоритма маршрутизации учитывающие особенности изменения топологии ССС [33]:

- DT-DVTR (Discrete Time Dynamic Virtual Topology Routing);
- VN (Virtual Node).

Алгоритм DT-DVTR основывается на периодичности и регулярности изменений топологии орбитальной группировки. Длительность одного витка вокруг Земли для каждого космического аппарата (КА) разбивается на интервалы стационарности, на которых топология ССС неизменна. На каждом интервале задача маршрутизации решается одним из известных методов с разработкой соответствующих таблиц маршрутизации, набор которых для всех возможных интервалов стационарности хранится на борту каждого КА [33].

Алгоритм VN использует понятие виртуальной топологии ССС, которая представляет собой суперпозицию виртуальных узлов и физической (реальной)

топологии орбитальной группировки. Околоземное пространство разбито на ряд соприкасающихся областей. В течение определенного периода времени каждому виртуальному узлу сопоставлен определенный физический спутник, находящийся в одной из этих областей. Во время пребывания КА в этой области виртуальная топология ССС считается неизменной. Как только спутник покидает эту область, данному виртуальному узлу ставится в соответствие другой спутник, который входит в эту область и которому передается вся информация, необходимая для работы данного виртуального узла. Таким образом, в данном случае расчет маршрутов ведется в виртуальной топологии ССС [33].

В перспективных проектах ССС предполагается применение технологии Asynchronous Transfer Mode (ATM) – асинхронного режима передачи. Для маршрутизации в них разработана ATM-версия алгоритма DT-DVTR. В этом случае каждая пара соседних КА сгруппирована в виртуальный путь VPC (Virtual Path Connection) и бортовой процессор КА при расчете маршрутов работает, исходя из меток этого VPC [33].

Таким образом, в целом схема сопряжения СВРС через ССС будет иметь вид, представленный на рис. 5.

Как показано на рисунке, ССС предоставляет отдельным СВРС услуги глобальной транспортной сети, с помощью которой они сопрягаются между собой, а также с наземной системой управления. ССС представляет собой два сегмента – СР на высокоэллиптической орбите, решающие задачи обеспечения связью в приполярных районах и СР на геостационарной орбите, обеспечивающие связью районы Земли от 60° северной широты и южнее. Подключение отдельных СВРС к ССС в рамках одного ствола СР ведется с помощью протокола случайного множественного доступа S-Aloha. Информационный обмен по межспутниковым радиолиниям, а также по каналам СР-шлюзовая станция ведется по стандарту DVB-S/S2.

В дальнейшем предлагается исследовать функционирование протоколов ретрансляции информационных потоков в ОВКСС на основе централизованного (обмен СВРС между собой ведется через ССС) и децентрализованного принципа (обмен СВРС между собой ведется через ССС и смежные СВРС объединенные на основе Mesh-технологий). На основании проведенного исследования выбрать рациональный способ ретрансляции информационных потоков, а также предложить варианты технической реализации рационального способа в виде математического обеспечения маршрутизаторов воздушного эшелона связи.

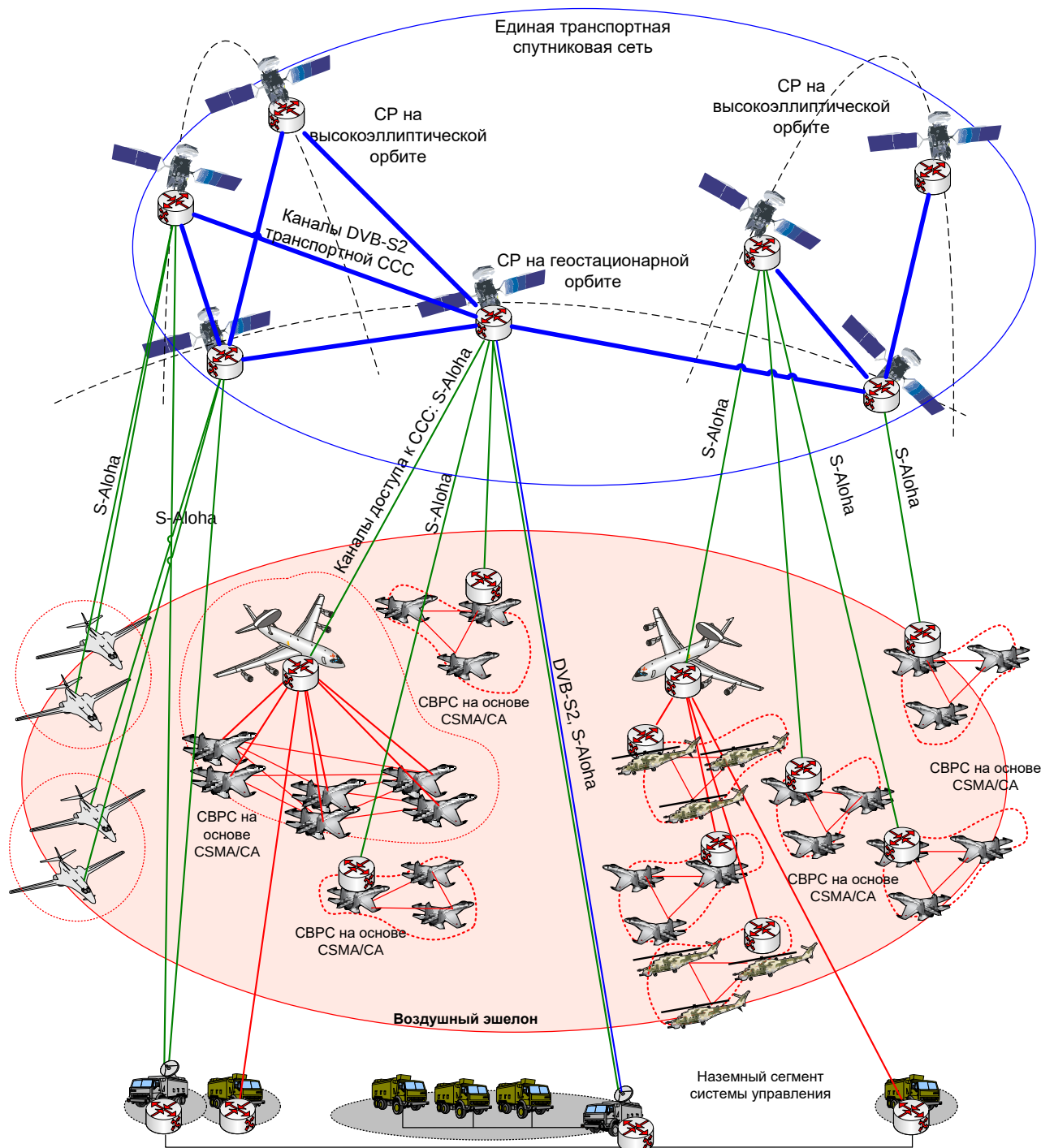


Рис. 5. Схема сопряжения СВРС через CCC

1.2. Анализ научно-методического аппарата повышения пропускной способности сетей воздушной и спутниковой связи

Вопросы совершенствования системы связи для управления авиацией являются актуальными. Проблематике совершенствования систем связи управления авиацией посвящены работы: Федосова Е.А. [17], Киткаева С.В. [42], Коновалова О.А., Буслаева А.И., Маликова С.В. [8], Войткевича К.Л. [20-23, 43, 44-47], Сулима А.А. [20, 43], Белоусова Е.А. [21, 22, 47].

В открытой литературе вопросы организации СВРС и управления ее ресурсами в интересах информационного обеспечения действий авиации исследовались в работах: Дмитриева А.Н. [29, 30, 48-50], Мотина О.В. [29, 30, 51], Максимова А.В. [29, 30, 50], Блакитного О.А. [48], Макаренко С.И. [11, 52-54], Гимбицкого В.А. [55-60], Сныткина И.И. [55-57], Калинина В.И. [61-63], Гоцуцова С.Ю. [64], Калимулиной Э.Ю. [65], Морозова А.Н. [66], Прохорова А.В. [67-69], Колядова Д.В. [67, 68], Бондаря Д.С. [69], Войткевича К.Л. [20-23, 44-47], Сулима А.А. [20, 43], Белоусова Е.А. [21, 22, 47], Брянцева В.Ф. [21, 22, 47], Кейстовича А.В. [21, 22], Сайфетдинова Х.И. [21, 22, 47].

В работах Гоцуцова С.Ю. [64] Калимулиной Э.Ю. [65] и Морозова А.Н. [66] рассматривались различные аспекты маршрутизации трафика УВД в СВРС на основе гражданских средств связи, с учетом фактора надежности каналов. В работах Прохорова А.В. [67-69], Колядова Д.В. [67, 68], Бондаря Д.С. [69] рассмотрены вопросы обслуживания трафика критичного к задержкам в СВРС УВД. Однако данные работы в основном касались принципов УВД гражданской авиации и не учитывали особенностей управления боевой авиацией. В частности, в данных работах не учитывались возможности быстрого возрастания объема передаваемых данных при дополнительном информационном обеспечении АК, на этапах атаки цели и ведения воздушного боя, не учитывались возможности организации сопряжения отдельных СВРС через ССС.

Наиболее фундаментальным исследованием в области маршрутизации и ретрансляции трафика в авиационных СВРС является диссертационная работа Войткевича К.Л. [44]. В данной работе фактически описаны основополагающие подходы к ретрансляции трафика в СВРС управления авиацией, рассмотрена применимость различных алгоритмов поиска путей в интересах задачи маршрутизации и ретрансляции трафика в объединенных наземно-воздушных сетях. Основные направления совершенствования СВРС представленные в работе Войткевича К.Л. [44] в дальнейшем получили развитие в работах: Алехина С.В. [45], Сулима А.А. [20, 43], Зац П.А. [43], Белоусова Е.А. [21, 22, 47], Брянцева В.Ф. [21, 22, 47], Кейстовича А.В. [21, 22], Сайфетдинова Х.И. [21, 22, 47]. В них были рассмотрены различные аспекты повышения эффективности ретрансляции информационных потоков в СВРС, а также вопросы совершенствования оборудования авиационной связи гражданского и двойного назначения, в том числе за счет создания программно конфигурируемых сетей и радиостанций.

Особенности построения СВРС для управления именно боевой авиацией рассмотрены в работах: Дмитриева А.Н. [29, 30, 48-50], Мотина О.В. [29, 30, 51], Максимова А.В. [29, 30, 48, 50], Блакитного О.А. [48], Макаренко С.И. [32, 52-54], Гимбицкого В.А. [55-60], Сныткина И.И. [55-57]. В частности, в работах Дмитриева А.Н., Мотина О.В., Максимова А.В., Блакитного О.А. [29, 30, 48-51] рассмотрены вопросы оценки организации СВРС на основе различных АМСД, а также эффективности информационного обмена в них. В работах Гимбицкого В.А. и Сныткина И.И. [55-60] рассмотрены вопросы построения эффективной системы связи управления авиацией региона на основе иерархических СВРС, а также порядок ретрансляции информационных потоков в них, при

управлении массированными действиями разнородной группировки авиации. В работах Бачевского С. В., Дворникова С. В., Дворникова С. С., Царелунго А. Б. [97], Макаренко С.И. [32, 52-54] рассмотрены вопросы эффективного управления ресурсами СВРС для достижения заданной пропускной способности, в интересах информационного обеспечения истребительной авиации.

В работах Скороварова А.С. [70], Борисова В.И., Зинчука В.М., Лимарева А.Е. [14], Семисошенко М.А. [71], Макаренко С.И. [13, 72, 73], Иванова М.С., Попова С.А. [13], Владимирова В.И. [74], Бабусенко С.И. [75, 76], Дворникова С. В., Иванова Р. В., Попова Е.А., Погорелова А.А., Морозова Е.В. [98, 100-102], Самойленко Д. В., Финько О. А. [99], Балюка А. А., Крупенина А. В., Махова Д. С., Финько О. А., Самойленко Д. В., Еремеева М. А. [103-107] рассмотрены различные аспекты обеспечения помехо- и имитозащиты СВРС и их функционирования в условиях воздействия различных видов преднамеренных помех.

В работах Калинина В.И. [61-63], Шорина О.А. [77] рассматриваются особенности управления ресурсами СВРС при обеспечении заданного качества обслуживания для высококомобильных абонентов.

Вместе с тем, в вышеуказанных работах [13, 70-76] не рассматриваются возможности ретрансляции части информационного трафика через ССС, а также не учитываются возможности ретрансляции транзитных потоков через СВРС. В работах по помехозащищенности СВРС Скороварова А.С., Борисова В.И., Зинчука В.М., Лимарева А.Е., Семисошенко М.А., Макаренко С.И., Иванова М.С., Попова С.А. [13, 14, 70, 71] рассматриваются только параметры физического уровня, не рассматриваются эффекты от снижения пропускной способности СВРС как результата воздействия преднамеренных помех. В работах Владимирова В.И., Бабусенко С.И., Макаренко С.И. [9-12, 74-76] подробно рассмотрены эффекты от воздействия преднамеренных помех на сетевом уровне и их влияние на ретрансляцию информационных потоков, но при этом в показателях СВРС не учитывалась связность СВРС, а также дополнительная транзитная нагрузка.

Различные аспекты построения сетевых информационных систем на основе ССС представлены в работах Камнева В.Е., Черкасова В.В., Чечина Г.В. [33], Мальцева Г.Н. [40], Адагурова С.Е., Пастухова А.С. [78, 79], Дарнопых В.В. [41], Пантенкова Д. Г., Ломакина А.А., Великоиваненко В. И. [93, 94], Михайлова Р. Л. [95, 96]. Однако в данных работах не рассматривались особенности построения многоуровневых систем связи с использованием ССС, а также вопросы ретрансляции трафика в подобных системах. Имеются работы Аболица А.И. [34], Chen C. [35, 36], Ekici E. [35, 36, 38], Akyildiz I.F. [36, 38], Durressi A., Dash D., Anderson B.L., Kannan R., Kota S., Jain R. [37], Цветкова К.Ю., Родионова А.В., Акмолова А.Ф. [80-83] в которых рассматривается построение сложных многоуровневых систем связи на основе ССС. Как правило, основой таких сложных систем является объединение орбитальных группировок СР на различных высотах и их комплексирование с наземными сетями связи. Вопросы маршрутизации и ретрансляции трафика в таких сложных многоуровневых системах исследовались в работах Chen C. [35, 36], Ekici E. [35, 36, 38],

Akyildiz I.F. [36, 38], Durresi A., Dash D., Anderson B.L., Kannan R., Kota S., Jain R. [37], Цветкова К.Ю., Радионова А.В., Акмолова А.Ф. [80-83]. Однако в этих работах по маршрутизации информационного трафика в многоуровневых системах связи на основе ССС [33, 34, 39-41, 78, 79] не учитывается нестационарность информационного трафика в СВРС военного назначения, высокая динамическая реконфигурация авиационных сетей [84], а также возможности ретрансляции части транзитных потоков отдельных СВРС через смежные сети воздушного эшелона.

Таким образом, проведенный анализ ранее опубликованных работ в исследуемой предметной области позволил сформулировать **противоречие в науке** – между необходимостью обеспечения высокой пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи для передачи больших объемов информации и невозможностью, на основе современного уровня развития научно-методического аппарата, обеспечить технологические решения по сопряжению воздушного и космического сегментов воздушно-космической сети связи, а также высокоскоростную ретрансляцию информационных потоков в ней.

1.3. Постановка научной задачи развития научно-методического аппарата повышения пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи

Для разрешения сформулированного противоречия в науке и достижения **цели научного исследования** – повышения пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи, необходимо решить **научную задачу** – развитие научно-методического аппарата повышения пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи на основе использования Mesh-технологий.

Тогда в качестве объекта исследования выступит – объединенная воздушно-космическая сеть связи, а предмета исследования – пропускная способность объединенной воздушно-космической сети связи по **показателю количества одновременно обслуживаемых абонентов**.

Для формализации научной задачи вводятся следующие обозначения:

N – количество СВРС в ОВКСС;

M_n – количество абонентов n -й СВРС;

C_n – пропускная способность n -й СВРС в составе ОВКСС;

$C_{ССС}$ – пропускная способность ССС в составе ОВКСС;

C_e – эффективная пропускная способность ОВКСС;

$\lambda_{n,m}$ – интенсивность трафика от m -го абонента в n -й СВРС;

$k_{вн\ n}=0...1$ – коэффициент внешнего трафика отправляемого из n -й СВРС;

$k_{вн\ СССР}=0...1$ – коэффициент внешнего трафика, передаваемого в ОВКСС через ССС;

$T_{зад\ ИНС}$ – задержка передачи пакета по ИНС в ОВКСС;

$T_{зад\ треб}$ – требуемое значение своевременности передачи сообщения в ОВКСС.

В общей вербальной форме, постановка научной задачи может быть сформулирована так – повышение пропускной способности ОВКСС (C_e), путем совместного нахождения:

а) рационального принципа ретрансляции в ОВКСС, который представляет собой оператор A , который осуществляет преобразование множества информационных потоков $\lambda_{n,m}$ от M_n количества абонентов n -ого количества СВРС, с учетом пропускных способностей каждой из n СВРС (C_n) и ССС (C_{CCC}), а также доли внешнего трафика в каждой СВРС ($k_{вн\ n}$),

б) рационального выбора коэффициента ($k_{вн\ CCC}$) распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной сети при выбранном принципе ретрансляции, с учетом того, что время задержки сообщений при их передаче по ИНС не превысит заданные требования по своевременности $T_{зад\ ИНС} \leq T_{зад}^{треб}$.

В формальном виде данную научную задачу можно записать:

– выбор рационального принципа ретрансляции A_i (где $i=1$ – иерархический принцип, $i=2$ – децентрализованный):

$$\begin{aligned} A_1: (n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\ n}\}, C_{CCC}) &\rightarrow C_{e\ 1}, \\ A_2: (n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\ n}\}, C_{CCC}) &\rightarrow C_{e\ 2}, \\ A = A_i \mid C_{e\ i} = \max(C_{e\ 1}, C_{e\ 2}). \end{aligned}$$

– выбор рационального значения ($k_{вн\ CCC}$) коэффициента распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной сети при выбранном принципе ретрансляции A :

$$\begin{aligned} k_{вн\ CCC} = \arg A(k_{вн\ CCC}, n, \{C_n\}, \{M_n\}, \{\lambda_{n,m}\}, \{k_{вн\ n}\}, C_{CCC}) \\ \mid T_{зад\ ИНС} \leq T_{зад}^{треб}. \end{aligned}$$

Для решения общей научной задачи в интересах достижения поставленной цели, она была декомпозирована на частные научные задачи:

1) разработка модели объединенной воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков;

2) разработка модели объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;

3) разработка методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной воздушно-космической сети связи.

К основным рамкам исследования относится следующее.

1. Оперативно тактический фон – операция сухопутных войск с поддержкой фронтовой авиации.

2. Уровень военного управления – тактическое звено управления.

3. Обеспечение военного управления – через воздушные сети связи, сопрягаемые за счет шлюзовых узлов на АК, сеть которых развернута в зоне операции. Шлюзовые узлы на АК образуют самостоятельные сети воздушной ра-

диосвязи, а также применяются для сопряжения отдельных сетей воздушной радиосвязи управления фронтовой авиацией. Шлюзовые узлы на АК имеют технические средства сопряжения с ССС космического сегмента ОАЦСС.

4. Сеть воздушной радиосвязи – перспективная сеть пакетной цифровой передачи данных в соответствии с проектом воздушного эшелона ОАЦСС на основе канала множественного доступа, функционирующего по протоколу CSMA/CA.

5. Сеть спутниковой связи – перспективная сеть пакетной цифровой передачи данных в соответствии с проектом космического эшелона ОАЦСС на основе КМД, функционирующего по протоколу S-Aloha.

6. Объединенная воздушно-космическая сеть связи – определяется решениями по сопряжению воздушного и космического эшелонов ОАЦСС.

7. Протокольные решения по ретрансляции информационных потоков – Mesh-технологии.

8. Рассматриваемые топологические решения для сетей – определяются решениями по сопряжению сетей связи воздушного и космического эшелонов ОАЦСС.

9. Принципы сопряжения отдельных сетей воздушной радиосвязи:

а) иерархический, через сеть спутниковой связи;

б) децентрализованный, через сеть спутниковой связи и с использованием Mesh-технологии ретрансляции через смежные сети воздушной радиосвязи.

К основным допущениям при разработке моделей и методики относится следующее:

1. Все абоненты СВРС находятся в пределах прямой видимости, скрытые абоненты отсутствуют.

2. Все абоненты внутри СВРС, а также отдельные СВРС в составе ОВКСС статистически одинаковы, доминирующие источники – отсутствуют.

3. Информационная нагрузка в каналах представляет собой независимый процесс. Источники информационной нагрузки (СВРС и абоненты в них) образуют суммарный независимый процесс, который является Пуассоновским.

4. В сетях ССС и СВРС ведется квитирование успешной доставки при этом полагается, что квитанции прибывают надежно и без потерь.

5. Каналы множественного доступа ССС и СВРС являются бесшумными.

6. Результаты модели получены в приближении, что нагрузка сети стремится к нулю.

Основные ограничения, при проведении исследования, обусловлены ТТХ современных и перспективных средств радиосвязи в воздушном и космическом эшелонах ОАЦСС, а также перспективными проектами по модернизации и построению ОАЦСС. К средствам радиосвязи в воздушном и космическом эшелонах ОАЦСС, на основе которых формировались ограничения относятся.

1. Современные средства авиационной радиосвязи: Р-833 «Бекас», Р-997, Р-999, Прима-МВ, а также комплексы связи С-103 и С-111.

2. Современные средства спутниковой радиосвязи: «Кулон-В», «Багет-К», «4РТ-С».

3. Перспективные средства авиационной радиосвязи создание которых предусмотрено проектом развития воздушного эшелона ОАЦСС – радиостанции со случайным множественным доступом абонентов и пропускной способностью канала до 34 Мбит/с.

4. Перспективные средства спутниковой радиосвязи реализация которых предусмотрена в рамках создания единой системы спутниковой связи 3-го поколения ЕССС-3 – радиостанции со случайным множественным доступом абонентов по протоколу S-Aloha и пропускной способностью канала до 2 Мбит/с.

Статья продолжает и развивает цикл предыдущих работ авторов [9-12], посвященных тематике повышения пропускной способности и скорости передачи данных в сетях связи управления ЛА военной авиации.

2. Модели и методика повышения пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи

Разрешение актуальной научной задачи развития научно-методического аппарата повышения пропускной способности, объединенной ВКСС на основе использования Mesh-технологий, в интересах достижения цели исследования – повышения пропускной способности ОВКСС, ведется путем ее декомпозиции на частные научные задачи. А именно:

- разработка модели объединенной воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков;
- разработка модели объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий;
- разработка методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной воздушно-космической сети связи.

Общая схема проведения исследования в интересах достижения цели научной работы, основные полученные результаты и взаимосвязь между ними представлены на рис. 6.

2.1. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA

Как показал анализ современных технологических решений по построению систем связи, в основу современной сети связи будут положены принципы бесшовного взаимодействия отдельных эшелонов объединенной сети связи ВС.

Ретрансляция сообщений между отдельными сетями, потребует создания новых технологических решений по обеспечению ретрансляции информационных потоков, и как следствие увеличит информационную нагрузку на сети за счет транзитного трафика.

Для обеспечения заданного качества обслуживания пользовательского трафика в объединенной сети связи требуется выработать единые протоколы ретрансляции информационных потоков с учетом дополнительной нагрузки создаваемой транзитными соединениями. Данная задача особенно актуальна для СВРС в УКВ диапазоне, так как именно на них, в условиях проведения военной

операции, планируется возложить информационное обеспечение авиации и ретрансляцию информационных потоков от подразделений сухопутных войск, и от развертываемых в районе операции разведывательных сетей на основе БЛА. Кроме того, как показано в работах [9-14] СВРС доступны наземным и авиационным средствам радиоэлектронного подавления, что существенно затрудняет ретрансляцию информационных потоков.

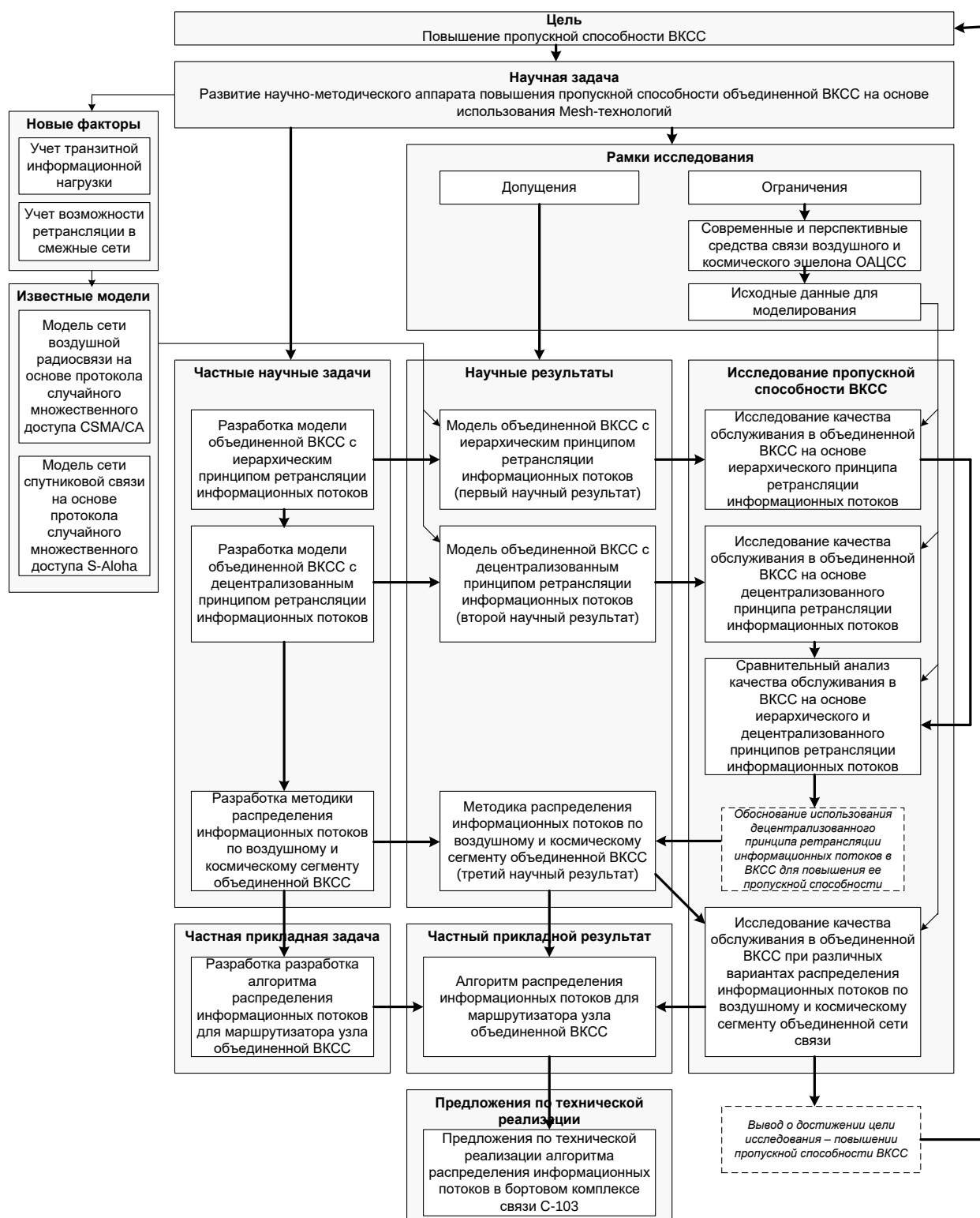


Рис. 6. Общая схема проведения исследования в интересах достижения цели научной работы

Вышеуказанные факторы определяют актуальность разработки модели СВРС, с учетом нагрузки транзитных соединений, как составной части более общей задачи, а именно: разработки научно-методического аппарата решения задачи маршрутизации в воздушно-космических сетях связи с заданным качеством обслуживания.

В данном подразделе представлена частная задача: разработка модели СВРС с учетом нагрузки транзитных соединений, решение которой состоит из двух этапов:

- на первом этапе необходимо провести анализ технических и протокольных решений по ретрансляции информационных потоков в СВРС;
- вторым этапом следует разработка модели СВРС с учетом нагрузки транзитных соединений.

Анализ, проведенный выше, позволил сделать вывод о том, что в перспективе обмен сообщениями в СВРС воздушного эшелона будет базироваться на АСМСД. Применение же других АМСД обусловлено устаревшей АПД находящейся на наземных терминалах и АК. То есть, модель СВРС должна соответствовать КМД АСМСД как наиболее перспективному из применяемых в настоящее время (с учетом того, что с развитием СОД он вытеснит применение остальных АМСД). Фактически АСМСД соответствует протоколу случайного множественного доступа с предотвращением коллизий – CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance). Следовательно, СВРС целесообразно будет представить в виде КМД со случайным доступом на основе CSMA/CA, а в качестве базовой модели, для оценки качества обслуживания можно использовать модель СМО «Ненастойчивого множественного доступа с проверкой несущей».

Таким образом, проведем моделирование СВРС на основе АСМСД взяв за основу модель «Ненастойчивого множественного доступа с проверкой несущей (МДПН)» из работы [31] и описание алгоритма CSMA/CA, ранее представленное в работе [85].

Алгоритм работы пользователя (терминала) в модели представляет собой следующую последовательность действий:

- если канал свободен, то терминал передает пакет;
- если канал занят, то терминал откладывает свою передачу на более позднее время, в соответствии с распределением задержки повторной передачи. Когда наступает это время, терминал вновь проверяет канал и повторяет описанный алгоритм.

Общая схема функционирования алгоритма CSMA/CA приведен на рис. 7 [85].

Исходными данными для построения модели являются:

M – количество пользователей (терминалов) совместно использующих спутниковый канал;

P_{win} – длина пакета, выраженная через время передачи пакета (длина окна);

$$S = \sum_{m=1}^M S_m - \text{среднее количество успешных передач на окно, приходящееся}$$

```
graph TD
    Start([Начало]) --> Step1[Имеется пакет ожидающий передачи]
    Step1 --> Step2[Доступ к каналу связи]
    Step2 --> Decision1{Передает ли другой абонент}
    Decision1 -- Да --> Decision2{Передача другого абонента закончилась}
    Decision1 -- Нет --> Decision3{Прошло время тайм-слота передачи}
    Decision2 -- Да --> Step4[Ожидание всего времени тайм-слот передачи]
    Decision2 -- Нет --> Step3[Ожидание тайм-слота текущей передачи]
    Decision3 -- Да --> Step4
    Decision3 -- Нет --> Step5[Начало передачи сообщения]
    Step4 --> Step5
    Step5 --> Decision4{Обнаружена коллизия?}
    Decision4 -- Да --> Decision1
    Decision4 -- Нет --> Decision5{Окончена передача?}
    Decision5 -- Да --> Step6[Пакет передан успешно]
    Decision5 -- Нет --> Step7[Продолжение передачи сообщения]
    Step7 --> Decision4
    Step6 --> End([Конец])
    Step8[Послать данные jam signal «пробки»] --> Step9[Увеличить счетчик попыток]
    Step9 --> Decision6{Количество попыток больше K}
    Decision6 -- Да --> Step10[Передача не удалась из-за высокого количества коллизий]
    Decision6 -- Нет --> Step11[Вычислить случайное время задержки]
    Step11 --> Step2
    Step10 --> End
```

$$G = \sum_{m=1}^M G_m = 1 \text{ — средний трафик в канале, определяемый как число попы-}$$

G/S – среднее число необходимых попыток передач пакета, пока не произойдет его успешная передача;

a – максимальное время распространения в одну сторону, нормированное ко времени окна;

K – задержка повторной передачи в количестве окон, равномерно распределенная со средним значением K единиц на окно;

β – нормированное время до получения квитанции. Предполагается, что заблокированный пакет или потерпевший наложение пакет задерживается на время до получения квитанции;

D_{mes} – длина пакета в битах;

C – пропускная способность канала в бит/с;

C_e – эффективная пропускная способность канала в бит/с;

T_m – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени) в секундах;

t – время жизни пакета на момент поступления в передающий терминал;

T_a – время задержки пакета в канале в секундах;

λ – интенсивность информационного потока в бит/с поступающий в терминал СВРС;

Λ_1 – общая интенсивность трафика в одной СВРС;

k_{vn} – коэффициент определяющий долю трафика СВРС отправляемого в другие смежные сети;

k_{kv} – коэффициент определяющий долю трафика в СВРС приходящегося на квитанции об успешной доставке информационных пакетов. Фактически значение k_{kv} показывает, что на каждые $1/k_{kv}$ пакетов информационного трафика, приходится один пакет квитанции об успешной доставке.

Ограничения модели: канал является бесшумным; все терминалы находятся в пределах прямой видимости; полагается, что квитанции прибывают надежно. Результаты модели получены в приближении, что нагрузка сети стремится к нулю.

Допущения модели: все терминалы статистически одинаковы, доминирующие источники отсутствуют; трафик в канале представляет собой независимый процесс; источники образуют суммарный независимый процесс который является Пуассоновским; нагрузка сети стремится к нулю.

Среднее число успешных передач за окно длиной P_{win} определяется как [31]:

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}}. \quad (1)$$

Средняя задержка пакета, выраженная в количестве окон [64]:

$$T = \left(\frac{G}{S} - 1 \right) (2a + 1 + \beta + K) + 1 + a. \quad (2)$$

Выразим параметры модели через абсолютные величины. Параметр a в (1) и (2) зависит от радиуса радиосети (максимальное расстояние между самыми удаленными терминалами сети) [31]:

$$a = \frac{d_{\max} / c}{P_{win}} = \frac{d_{\max} C}{c D_{mes}}, \quad (3)$$

где $c=300\,000$ км/с – скорость распространения электромагнитных волн; d_{max} – максимальное расстояние между самыми удаленными терминалами СВРС в км.

Получим зависимости для C_e и T_a от λ_m , C . Длина окна явным образом зависит от длины сообщения и пропускной способности канала:

$$P_{win} = \frac{D_{mes}}{C}. \quad (4)$$

Интенсивность поступления пакетов в терминал эквивалентна количеству порождаемых этим терминалом пакетов, длиной D_{mes} бит, за время длительности окна. То есть:

$$G_m = \frac{\lambda P_{win}}{D_{mes}},$$

откуда следует

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{D_{mes}}{C / D_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{M \lambda}{C} = \frac{\Lambda_1}{C}. \quad (5)$$

Учтем в составе поступающего в СВРС трафика дополнительный транзитный трафик, доля которого определяется коэффициентом k_{vn} . В этом случае общий трафик в СВРС будет:

$$\Lambda_1 (1 + k_{vn}).$$

В случае, когда в СВРС дополнительно используется квитирование успешных передач пакетов, и доля трафика квитанций составляет k_{kv} ($k_{kv}=0\dots 1$) от информационного трафика, то общий трафик в СВРС будет:

$$\Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv}), \quad (6)$$

тогда

$$G = \frac{\Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv})}{C}. \quad (7)$$

Эффективная пропускная способность канала определяется, как количество успешных передач сообщений длиной D_{mes} бит, за время P_{win} и равна:

$$C_e = S \frac{D_{mes}}{P_{win}} = S \frac{D_{mes}}{D_{mes} / C} = SC. \quad (8)$$

Подставляя (1), (3), (5) в (8), с учетом (6) получим выражение для определения среднего количества успешных передач на окно. Учитывая, что S – нормированная величина и выражая эффективную скорость канала через C_e получим:

$$C_e = SC = C \frac{\frac{1}{C} \Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv}) e^{-\frac{d_{max}}{cD_{mes}} \Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv})}}{\frac{\Lambda_1}{C} \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right) (1 + k_{vn})(1 + k_{kv}) + e^{-\frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \frac{1}{C} \Lambda_1 (1 + k_{vn})(1 + k_{kv})}} =$$

$$= \frac{\Lambda_1 C (1+k_{vn}) (1+k_{kv}) e^{-\frac{d_{\max} \Lambda_1 (1+k_{vn}) (1+k_{kv})}{cD_{mes}}}}{\Lambda_1 \left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \right) (1+k_{vn}) (1+k_{kv}) + C e^{-\frac{d_{\max} \Lambda_1 (1+k_{vn}) (1+k_{kv})}{cD_{mes}}}}. \quad (9)$$

Определим время задержки в секундах из выражения (2). Параметр β , отвечающий за доставку квитанции не зависит от параметров канала в модели, рассмотренной в [31], что определяется введенными в модель ограничениями. Если из [31] убрать ограничения, что квитанции доставляются надежно по отдельному каналу и без затрат, получим: квитанции доставляются по тому же каналу. В этом случае из (2) с учетом выражения (6) получим β , как задержку пакета квитанции, который не требует квитанции успешного приема:

$$\beta = \left(\frac{S}{G} - 1 \right) (2a + 1 + K) + 1 + a. \quad (10)$$

Тогда выражение для времени задержки, выраженной в секундах будет определяться из (2) и (10):

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{G}{S} - 1 \right) \left(\frac{G}{S} (2a + K + 1) + 1 + a \right) \right] = \\ &= \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda_1 (1+k_{vn}) (1+k_{kv})}{SC} - 1 \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{\Lambda_1 (1+k_{vn}) (1+k_{kv})}{SC} (2a + K + 1) + 1 + a \right) + 1 + a \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где: G определяется выражением (7), a выражением (3), а S определяется равенством:

$$S = \frac{\Lambda_1 (1+k_{vn}) (1+k_{kv}) e^{-\frac{d_{\max} \Lambda_1 (1+k_{vn}) (1+k_{kv})}{cD_{mes}}}}{\Lambda_1 \left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \right) (1+k_{vn}) (1+k_{kv}) + C e^{-\frac{d_{\max} \Lambda_1 (1+k_{vn}) (1+k_{kv})}{cD_{mes}}}}. \quad (12)$$

В случае если квитирование в СВРС не применяется, то выражение (11), будет иметь вид:

$$T = \left(\frac{\Lambda_1 (1+k_{vn})}{S} - 1 \right) (2a + 1 + K) + 1 + a,$$

с учетом того, что в выражении (12) для S значение $k_{kv}=0$.

Отметим, что для систем реального времени накладывается ограничение на максимальное время доставки пакета по сети – T_m . Для выражения (12) K является варьируемым параметром, однако необходимо наложение условия, при котором передача заявки имеет смысл. При превышении времени нахождения в сети t максимально допустимого порога T_m передача заявки теряет смысл. Поэтому на K накладывается ограничение:

$$K \leq \frac{T_m - t}{P_{win}}.$$

Учитывая (4) получим критерий соответствия доставки пакетов трафика условиям, представленным в таб. 3 и 4:

$$K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}}. \quad (13)$$

Таким образом, получим выражения для эффективной пропускной способности и задержки передачи трафика в СВРС с АСМСД по протоколу CSMA/CA.

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \frac{\Lambda_1 (1 + k_{vn}) (1 + k_{kv}) e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \Lambda_1 (1 + k_{vn}) (1 + k_{kv})}}{\Lambda_1 \left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \right) (1 + k_{vn}) (1 + k_{kv}) + C e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \Lambda_1 (1 + k_{vn}) (1 + k_{kv})}} \\ C_e = CS \\ T_a = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{G}{S} - 1 \right) \left(\frac{G}{S} (2a + K + 1) + 1 + a \right) \right] \\ a = \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \\ K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}} \end{array} \right. \quad (14)$$

Система (14) описывает поведение СВРС образованной КМД с АСМСД по протоколу CSMA/CA, в котором надежность передачи пакетов обеспечивается квитанциями об успешном приеме, передающимися по этому же каналу.

В дальнейшем полученные в данном подразделе выражения для качества обслуживания спутниковой сети связи будут использованы в составе моделей ОВКСС с иерархическим и децентрализованным принципами ретрансляции информационных потоков.

2.2. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha

Модель «Синхронная АЛОНА» предложенная в работе [31] используется для описания абонентского канала СВРС с доступом в магистральную ССС по протоколу S-Aloha.

Алгоритм работы абонента ССС в модели представляет собой следующую последовательность действий:

- если канал свободен, то абонент передает пакет;
- передавая пакет, абонент прослушивает канал, если произошло наложение передачи на передачу другим абонентом, то передача откладывается, если при передаче пакета наложения не произошло, то пакет считается успешно переданным;
- если канал занят, то абонент откладывает свою передачу на более позднее время, в соответствии с распределением задержки повторной

передачи. Когда наступает это время, абонент вновь проверяет канал и повторяет описанный алгоритм.

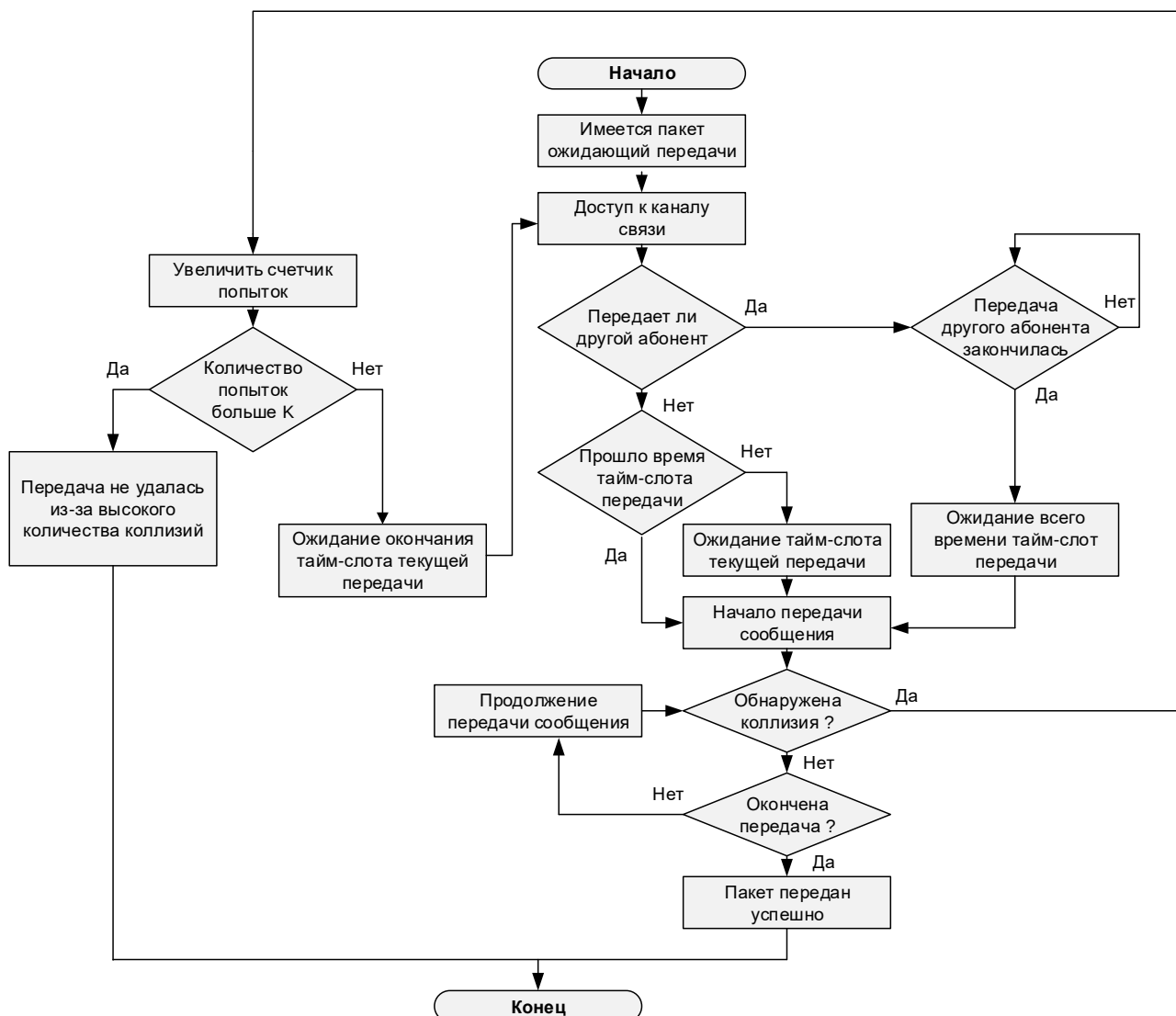


Рис. 8. Общая схема функционирования алгоритма S-Aloha

Исходными данными для построения модели являются:

M – количество СВРС (абонентов ССС) совместно использующих спутниковый канал;

P_{win} – длинна пакета выраженная через время передачи пакета (длина окна);

S_m – вероятность, что передача m -го абонента прошла успешно, нормированная к длине окна;

G_m – вероятность, что m -ый абонент передает пакет в каком либо окне.

Результаты модели получены в приближении, что нагрузка сети стремится к нулю.

Доля трафика m -ого абонента, ведущего успешную передачу равна вероятности того что, когда он передавал – другие абоненты бездействовали. Для абонентов, совместно использующих спутниковый канал будет действительна

система уравнений, определяющая наборы скоростей источников, которые канал может обслужить:

$$S_m = G_m \prod_{i \neq m} (1 - G_i), \quad m = 1..M. \quad (15)$$

Обозначим:

$$g = \prod_{i=1}^M (1 - G_i), \quad (16)$$

тогда:

$$\prod_{i \neq 1} (1 - G_i) = \frac{g}{1 - G_m}. \quad (17)$$

В этом случае уравнение (15) можно записать в виде:

$$S_m = \frac{G_m}{1 - G_m} g, \quad (18)$$

для всех $m = 1..M$.

Отметим необходимое условие достижения максимальной скорости передачи для системы «Синхронная ALOHA»:

$$G = \sum_{m=1}^M G_m = 1 \quad (19)$$

где G – средний трафик в канале определяемый как число попыток передач пакетов за время окна P_{win} . Несмотря на то, что G_m представляет собой вероятность передачи пакета, сумма G может превышать 1, в силу независимости порождения пакетов абонентами ССС. По сути, параметр G представляет собой предлагаемый к передаче трафик от всех абонентов ССС, выраженный в пакетах и нормированный к длине окна.

Введем переменные:

$$S = \sum_{m=1}^M S_m \text{ – среднее количество успешных передач на окно, приходящих}$$

на всех абонентов;

R – число окон, которые можно вложить в одно время распространения до СР и обратно;

K – количество окон, в течение которых пользователь пытается передать пакет, если первая передача завершилась наложением пакета;

$1/K$ – вероятность выбора окна для повторной передачи;

T – среднее время, за которое пакет будет успешно принят, выраженная в числе окон;

S/G – вероятность успешной передачи;

G/S – среднее число необходимых попыток передач пакета, пока не произойдет его успешная передача;

q – вероятность того, что новый пакет успешно передан;

q_t – вероятность того, что ранее блокированный пакет успешно передан.

Результаты будут получены при следующих предположениях: трафик в канале представляет собой независимый процесс (подтверждается результатами

математического моделирования, полученными в [31]); источники образуют суммарный независимый процесс, который является Пуассоновским.

Приняв во внимание влияние на канал пакетов не переданных в результате наложений и учитывая, что пакеты, испытавшие наложение, передаются в соответствии с выбранным параметром K получим [31]:

$$S = G \frac{q_t}{q_t + 1 - q},$$

где [31]:

$$q = \left(e^{-\frac{G}{K}} + \frac{G}{K} e^{-G} \right)^K e^{-S} \text{ и } q_t = \left(\frac{e^{-\frac{G}{K}} - e^{-G}}{1 - e^{-G}} \right) \left(e^{-\frac{G}{K}} + \frac{G}{K} e^{-G} \right)^{K-1} e^{-S}. \quad (20)$$

Система (20) должна быть решена для получения явного выражения для S через G и K . Однако она не имеет явного решения. В [31] рассматриваются различные приближения для решения данной системы. Одним из них является приближение для K [31]:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{S}{G} = \lim_{K \rightarrow \infty} q = \lim_{K \rightarrow \infty} q_t = e^{-G}. \quad (21)$$

Причем путем математического моделирования доказывается [86], что уже при $K \geq 15$ можно рассматривать приближение (21).

Средняя задержка пакета T , выраженная в числе окон, определяется равенством [31]:

$$T = R + 1 + \frac{1 - q}{q_t} \left(R + 1 + \frac{K - 1}{2} \right). \quad (22)$$

Воспользовавшись формулой Литла получим значение среднего числа пакетов в системе N [31]:

$$N = ST = G \left(R + 1 + \frac{K - 1}{2} \right) + S \left(\frac{K - 1}{2} \right). \quad (23)$$

Необходимо отметить, что в [31, 86] рассматриваются условия устойчивости спутникового канала и приводятся модели управления для сохранения его устойчивости. В общем случае условие устойчивости канала выглядит как ограничение на входную скорость, которая не должна превышать выходную скорость системы:

$$S \leq \left[S_{\text{output}} = (1 - p)^n (M - n) \sigma (1 - \sigma)^{M-n-1} + np(1 - p)^{n-1} (1 - \sigma)^{M-n} \right] \quad (24)$$

где $p = (R + (K + 1)/2)^{-1}$ – вероятность передачи задолженного пакета (при равномерном распределении); n – количество абонентов, имеющих пакет для передачи, и готовых его передавать; σ – вероятность порождения новых пакетов.

Однако рассмотрение управления каналом в условиях его неустойчивости выходит за рамки работы и здесь рассматриваться не будет.

Изменим изложенную выше модель для получения явных характеристик вместо вероятностных. Введем новые переменные:

D_{mes} – длина пакета в битах;

C – пропускная способность канала в бит/с;

C_e – эффективная пропускная способность канала в бит/с;

T_m – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени) в секундах;

t – время жизни пакета на момент поступления в передающий терминал, в секундах;

$T_{\text{зад ССС}}$ – время задержки пакета в канале в секундах;

λ_m – интенсивность информационного потока в бит/с поступающий в m -ному абоненту ССС из его СВРС.

Получим зависимости для C_e и T_a от параметров λ_m и C . Длина окна явным образом зависит от длины сообщения и пропускной способности канала:

$$P_{\text{win}} = \frac{D_{\text{mes}}}{C}. \quad (25)$$

Интенсивность поступления пакетов в терминал эквивалентна количеству порождаемых этим терминалом пакетов, длиной D_{mes} бит, за время длительности окна. То есть:

$$G_m = \frac{\lambda_m P_{\text{win}}}{D_{\text{mes}}},$$

откуда следует:

$$G = \frac{P_{\text{win}}}{D_{\text{mes}}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{D_{\text{mes}}}{C / D_{\text{mes}}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m. \quad (26)$$

Эффективная пропускная способность канала определяется как количество успешных передач сообщений длиной D_{mes} бит, за время P_{win} и равно:

$$C_e = S \frac{D_{\text{mes}}}{P_{\text{win}}} = S \frac{D_{\text{mes}}}{D_{\text{mes}} / C} = SC. \quad (27)$$

Подставляя (26) и (27) в (20) получим выражение для определения среднего количества успешных передач на окно. Учитывая, что S – нормированная величина и выражая скорость канала через C_e (27) получим:

$$C_e = SC = CG \frac{q_t}{q_t + 1 - q} = C \frac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \sum_{m=1}^M \lambda_m. \quad (28)$$

Отметим, что для систем реального времени накладывается ограничение на максимальное время доставки пакета по сети – T_m . Для данной модели K является варьируемым параметром, однако необходимо наложение условия, при котором передача заявки имеет смысл. При превышении времени нахождения в сети t максимально допустимого порога T_m передача заявки теряет смысл. Поэтому на K накладывается ограничение:

$$K \leq \frac{T_m - t}{P_{\text{win}}},$$

подставляя (25) получим:

$$K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{\text{mes}}}. \quad (29)$$

Получим систему уравнений, определенных для всех K , для которых выполняется (29):

$$\begin{cases} C_e = \frac{q_t}{(q_t + 1 - q)} \sum_{m=1}^M \lambda_m \\ q = \left(e^{-\frac{1}{KC} \sum_{m=1}^M \lambda_m} + \frac{\sum_{m=1}^M \lambda_m}{KC} e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m} \right)^K e^{-\frac{C_e}{C}} \\ q_t = \left(\frac{e^{-\frac{1}{KC} \sum_{m=1}^M \lambda_m} - e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m}}{1 - e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m}} \right) \left(e^{-\frac{1}{KC} \sum_{m=1}^M \lambda_m} + \frac{\sum_{m=1}^M \lambda_m}{KC} e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m} \right)^{K-1} e^{-\frac{C_e}{C}} \end{cases} \quad (30)$$

Учитывая приближение (21) можно упростить выражение для C_e :

$$\begin{cases} C_e = e^{-\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m} \left(\sum_{m=1}^M \lambda_m \right) \\ 15 \leq K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{mes}} \end{cases} \quad (31)$$

Однако приближение (21) не учитывает влияние параметра K в явном виде, и как следствие выражение (31) не зависит от K . В [8] предложено приближение, явно учитывающее данный параметр:

$$q_t \approx \frac{K-1}{K} e^{-G}. \quad (32)$$

В этом случае из (20) и (21), для q , получим:

$$S = G \frac{(K-1)e^{-G}}{2K-1+Ke^{-G}}. \quad (33)$$

Окончательно имеем систему трех уравнений, которая определена при условии (29):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_e = \frac{(K-1)e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)}}{K - e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)}} \left(\sum_{m=1}^M \lambda_m \right) \\ q = e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)} \\ q_t = \frac{K-1}{K} e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)} \end{array} \right. . \quad (34)$$

Математическое моделирование подтвердило [31] факт сходимости результатов для $S(G, K)$ для $K \geq 15$.

Определим задержку сообщений при передаче T . Так как T зависит от R (см. (22)), определим R через характеристики канала:

$$R = \frac{2d_{sot}/c}{P_{win}} = \frac{2d_{sot}C}{cD_{mes}}, \quad (35)$$

где $c=300\,000$ км/с – скорость распространения электромагнитных волн; d_{sot} – дальность от терминала до спутника в километрах. При этом, в работе [31] используется приближение: дальность от терминала до спутника равна высоте полета спутникового ретранслятора, что для летательных аппаратов с большой высотой полета, особенно при нахождении спутника у линии горизонта приводит к существенным погрешностям вычислений.

Тогда задержка, выраженная в секундах, будет равна (из формулы (22)):

$$T_{зад\ CCC} = \frac{D_{mes}}{C} \left(\frac{2d_{sot}C}{cD_{mes}} + 1 + \frac{K \left(1 - e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)} \right)}{(K-1)e^{-\frac{1}{C}\left(\sum_{m=1}^M \lambda_m\right)}} \left(\frac{2d_{sot}C}{cD_{mes}} + \frac{K-1}{2} + 1 \right) \right). \quad (36)$$

Параметр K определяется условием (29), а q и q_t можно получить из (34). Отметим, что спутниковый канал не нуждается в обратных квитанциях о правильном приеме сообщения, так как терминал может сам прослушать свою передачу спустя время R , и сделать вывод о ее успешности.

Таким образом, получены количественные характеристики качества обслуживания спутникового канала с коммутацией пакетов – T_a и C_e в зависимости не от вероятностных характеристик, а от технических характеристик канала связи и абонентов, представляющих собой отдельные СВРС.

Данная модель в дальнейшем будет использоваться для расчета ОВКСС и обоснования ее структуры при использовании в качестве канала доступа к ССС канала множественного доступа на основе протокола S-Aloha.

2.3. Модель объединенной воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков

Следующим этапом данной научной работы будет разработка модели объединенной ВКСС, построенной на основе **иерархического** принципа ретрансляции информационных потоков. Схема такой ОВКСС представлена на рис. 9. Данная сеть предназначена для ретрансляции команд управления АК, а также их информационного обеспечения в условиях отсутствия наземной инфраструктуры связи.

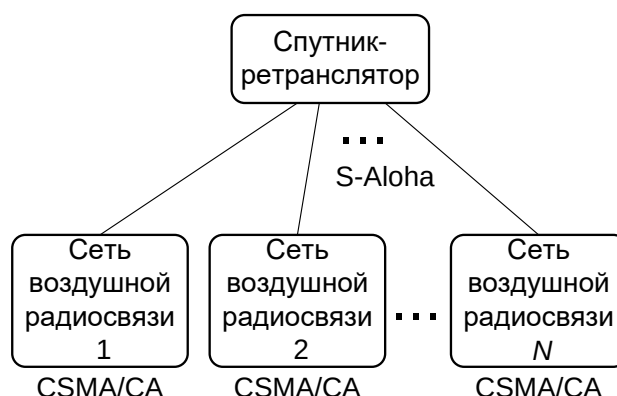


Рис. 9. Объединенная воздушно-космическая сеть связи на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

В основу модели ОВКСС были положены полученные ранее результаты, в которых рассматриваются модель СВРС на основе протокола CSMA/CA и модель отдельной ССС на основе протокола S-Aloha.

Для формализации процесса информационного обмена в ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции введем следующие обозначения:

M_n – количество абонентов n -й СВРС;

C_n – пропускная способность КМД n -й СВРС, [бит/с];

$C_{ССС}$ – пропускная способность КМД ССС, [бит/с];

S_n – относительная пропускная способность КМД n -й СВРС, нормированная к C_n ;

$S_{ССС}$ – относительная пропускная способность КМД ССС, нормированная к $C_{ССС}$;

C_{en} – эффективная пропускная способность КМД n -й СВРС, [бит/с];

$C_{eССС}$ – эффективная пропускная способность КМД ССС, [бит/с];

$C_{eИНС}$ – эффективная пропускная способность информационного направления связи (ИНС), [бит/с];

$D_{mes\ n}$ – объем пакета в n -й СВРС, [бит];

$D_{mes\ СССР}$ – объем пакета в ССС, [бит];

$d_{max\ n}$ – радиус сети n -й СВРС, [км];

d_{sot} – расстояние до спутника-ретранслятора (СР) образующего ССС, [км].

Для низкоорбитальных ССС $d_{sot}=500..1500$ км, для геостационарных ССС $d_{sot}=40000$ км, для высокоэллиптических ССС $d_{sot}>40000$ км;

c – скорость распространения электромагнитных волн, [км/с];

K_n – настойчивость протокола множественного доступа n -й СВРС. Определяется как число попыток передачи пакета в случае, если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

$K_{ССС}$ – настойчивость протокола множественного доступа S-Aloha, используемого в ССС;

$\lambda_{m,n}$ – интенсивность трафика, поступающего от m -го абонента n -й СВРС, [бит/с];

$k_{вн\ n}=0\dots 1$ – коэффициент внешнего трафика n -й СВРС. Определяется как доля трафика СВРС, передаваемого через ССС;

$k_{вн\ n,j}=0\dots 1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n -й СВРС в j -ю СВРС через ССС;

$k_{кв}=0\dots 1$ – коэффициент дополнительного трафика квитанций. Определяется как доля от основного трафика содержащая квитанции об успешном приеме пакета. Значение $k_{кв}=0,1$ соответствует случаю, когда на 10 пакетов основного трафика отправляется 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

Λ_n – интенсивность трафика в n -й СВРС без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в СВРС, [бит/с];

$\Lambda_{ССС}$ – общая интенсивность трафика в ССС, с учетом трафика квитанций об успешной доставке, [бит/с];

$\Lambda_{СВРС\ n}$ – общая интенсивность трафика в n -й СВРС, с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке, [бит/с];

$T_{зад\ n}$ – задержка передачи пакета по n -й СВРС, [с];

$T_{зад\ ССС}$ – задержка передачи пакета по ССС, [с];

$T_{зад\ ИНС}$ – задержка передачи пакета по ИНС, [с].

Рамки исследования: протокол связи в СВРС – CSMA/CA; протокол связи в ССС – S-Aloha; все СВРС соединены через ССС по принципу «звезды», причем каждая СВРС доступна из другой сети за один шаг ретрансляции через ССС; трафик представляет собой простейший пуассоновский поток событий, состоящих в поступлении отдельных пакетов.

Целью разработки модели является оценка временного параметра задержки передачи пакетов и пропускной способности ОВКСС, использующей иерархический принцип ретрансляции информационных потоков.

Для получения начальных условий для расчета временных параметров ОВКСС и пропускных способностей информационных направлений связи сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных сегментах сети.

В каждой n -й СВРС от абонентов в сеть поступает поток с интенсивностью:

$$\Lambda_n = \sum_{m=1}^{M_n} \lambda_m. \quad (37)$$

Из n -й СВРС в другие СВРС через ССС отправляется поток с интенсивностью, определяемой коэффициентом $k_{вн\ n}$:

$$k_{вн\ n} \Lambda_n, \quad (38)$$

где $k_{\text{вн } n} = \sum_{j=1}^N k_{\text{вн } n, j}$, при этом в данной сумме $k_{\text{вн } n, n} = 0$.

Также в n -ю СВРС из других j -ых СВРС через ССС отправляется поток внешнего трафика, равный:

$$\sum_{j=1}^N k_{\text{вн } j, n} \Lambda_j, \quad (39)$$

при этом в данной сумме $k_{\text{вн } n, n} = 0$.

Таким образом, интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной n -й сети СВРС, будет:

$$\Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N k_{\text{вн } j, n} \Lambda_j. \quad (40)$$

Рассмотрим трафик, поступающий в ССС. Интенсивность данного трафика с учетом, того, что при иерархической системе обмена информацией все межсетевые соединения «СВРС-СВРС» идут через ССС, будет равно:

$$\sum_{n=1}^N k_{\text{вн } n} \Lambda_n. \quad (41)$$

Общая схема распределений интенсивности информационного трафика, циркулирующего в ОВКСС без учета квитирования, представлена на рис. 10.

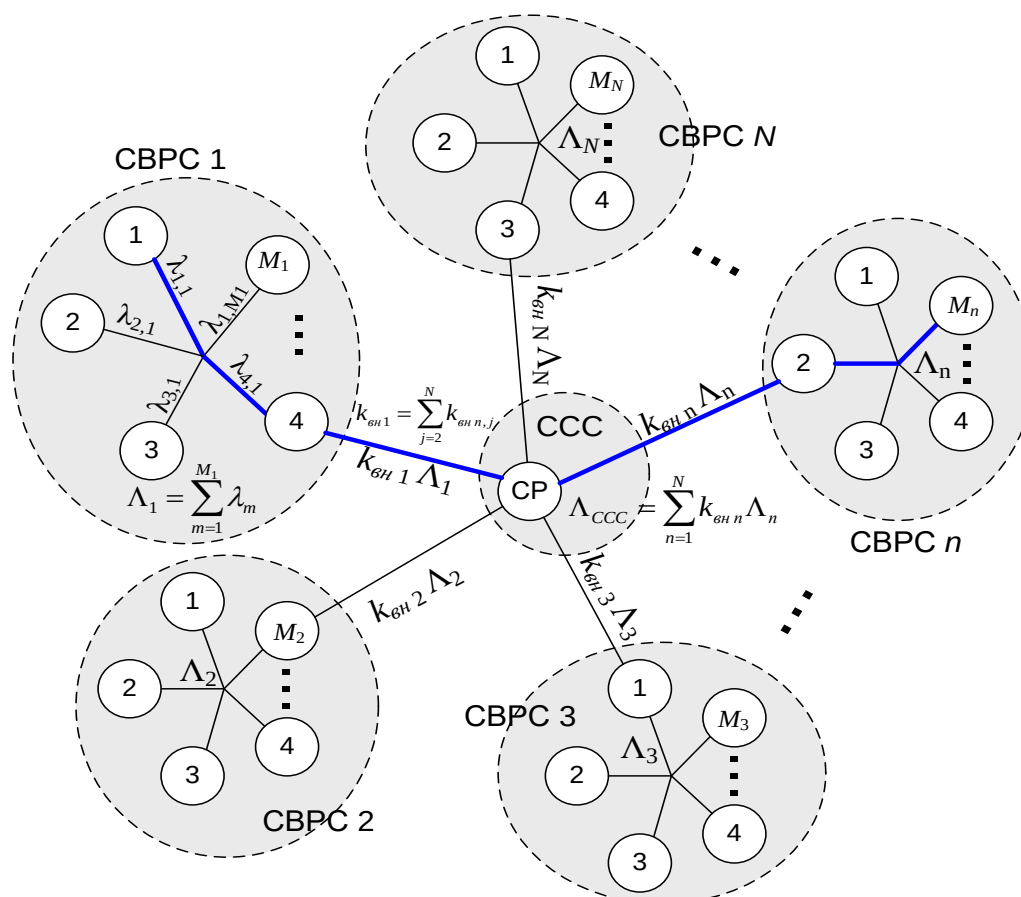


Рис. 10. Общая схема распределения интенсивностей информационного трафика, циркулирующего в ОВКСС без учета квитирования

Если учесть, что на каждые v пакетов в ОВКСС отправляется 1 пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов, то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет равен $k_{кв}=1/v$. С учетом этого выражения (40) и (41) примут окончательный вид:

– интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной n -й СВРС:

$$\Lambda_{CBPC\ n} = (1 + k_{кв}) \left(\Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N k_{вн\ j, n} \Lambda_j \right), \quad (42)$$

– интенсивность трафика в CCC:

$$\Lambda_{CCC} = (1 + k_{кв}) \sum_{n=1}^N k_{вн\ n} \Lambda_n. \quad (43)$$

Рассмотрим время передачи сообщений в такой сети. Общий вид ИНС в иерархической ОВКСС представлен на рис. 11.

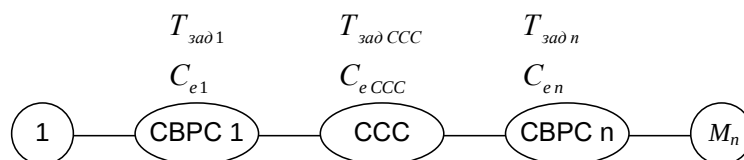


Рис. 11. Общая схема ИНС в ОВКСС

В ИНС, представленной на рис. 11, время задержки передачи пакета между абонентами n -й и j -й СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

$$T_{\text{зад ИНС}} = T_{\text{зад } n} + T_{\text{зад CCC}} + T_{\text{зад } j}.$$

При этом как показано ранее время задержки пакета при передаче по всем отдельным звеньям с учетом выражений (42) и (43) будет определяться как:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$T_{\text{зад } n} = \frac{D_{\text{mes } n}}{C_n} \left[\left(\frac{\Lambda_{CBPC\ n}}{S_n C_n} - 1 \right) \times \left(\frac{\Lambda_{CBPC\ n}}{S_n C_n} (2a_n + K_n + 1) + 1 + a_n \right) + 1 + a_n \right],$$

где:

$$S_n = \frac{\Lambda_{CBPC\ n} e^{-\frac{d_{\text{max } n}}{cD_{\text{mes } n}} \Lambda_{CBPC\ n}}}{\Lambda_{CBPC\ n} (1 + 2a_n) + C_n e^{-\frac{d_{\text{max } n}}{cD_{\text{mes } n}} \Lambda_{CBPC\ n}}}, \quad a_n = \frac{d_{\text{max } n} C_n}{cD_{\text{mes } n}}, \quad K_n \leq \frac{C_n (T_m - t)}{D_{\text{mes } n}}.$$

2) для CCC на основе протокола S-Aloha:

$$T_{\text{зад CCC}} = \frac{D_{\text{mes CCC}}}{C_{\text{CCC}}} \left(\frac{2d_{\text{tot } CCC}}{cD_{\text{mes CCC}}} + 1 + \frac{K_{\text{CCC}} \left(1 - e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}} \right)}{(K_{\text{CCC}} - 1) e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}}} \left(\frac{2d_{\text{tot } CCC}}{cD_{\text{mes CCC}}} + \frac{K_{\text{CCC}} - 1}{2} + 1 \right) \right).$$

Пропускная способность ИНС в ОВКСС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью отдельного звена ИНС:

$$C_{e \text{ ИНС}} = \min\{C_{en}, C_{e \text{ CCC}}, C_{ej}\},$$

при этом, как показано в ранее, эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений (42) и (43) будут определяться как:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$C_{en} = S_n C_n,$$

где показатели S_n , C_n определяются также, как и в выражении для времени задержки передачи пакета.

2) для CCC на основе протокола S-Aloha:

$$C_{e \text{ CCC}} = \frac{\Lambda_{\text{CCC}} (K_{\text{CCC}} - 1) e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}}}{K_{\text{CCC}} + e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}}}.$$

Параметры $T_{\text{зад}} \text{ ИНС}$ и $C_{e \text{ ИНС}}$ формируют показатели качества обслуживания ОВКСС.

Для численной оценки показателей качества функционирования ОВКСС проведем предварительное упрощение модели ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков. Дополнительно введем следующие допущения:

- информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС, имеет равную интенсивность Λ_1 ;
- все СВРС имеют одинаковые параметры объема пакета, радиуса сети, настойчивости протокола CSMA/CA, равные соответственно – D_{mes} , d_{max} , K ;
- коэффициент внешнего трафика у всех СВРС одинаков и равен $k_{\text{вн}}$, причем внешний трафик равномерно распределен по СВРС и коэффициенты трафика по всем межсетевым направлениям $\text{СВРС}_i \rightarrow \text{СВРС}_j$ имеют равные значения: $k_{\text{вн } i,j} = k_{\text{вн}} / (N-1)$.

В результате данных упрощений схема аналитических вычислений для модели ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков примет вид, представленный на рис. 12.

Во второй части данной научной работы представлены результаты исследования возможностей по обслуживанию абонентов для ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков. Как показали результаты моделирования, ввиду того, что пропускная способность спутникового сегмента ОВКСС существенно ниже пропускной способности СВРС, то общая пропускная способность системы определяется пропускной способностью именно CCC сегмента. Такой же вывод можно сделать и о времени задержки передачи сообщений в ИНС – именно спутниковый сегмент ОВКСС определяет задержку передачи по ИНС.

Наиболее существенным фактором, определяющим QoS в ОВКСС является коэффициент внешнего трафика $k_{\text{вн}}$. По мере роста доли трафика, ретранслируемого в другие СВРС, нагрузка на CCC увеличивается. С учетом того, что

именно ССС является звеном в ИНС с наименьшей пропускной способностью, это приводит к резкому увеличению времени передачи сообщений по ИНС в ОВКСС. В результате, значения ОВКСС не позволяет обслужить мультимедийный трафик (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном времени), так как требуемое время задержки при его передаче не должно превышать 0,5-0,6 с.

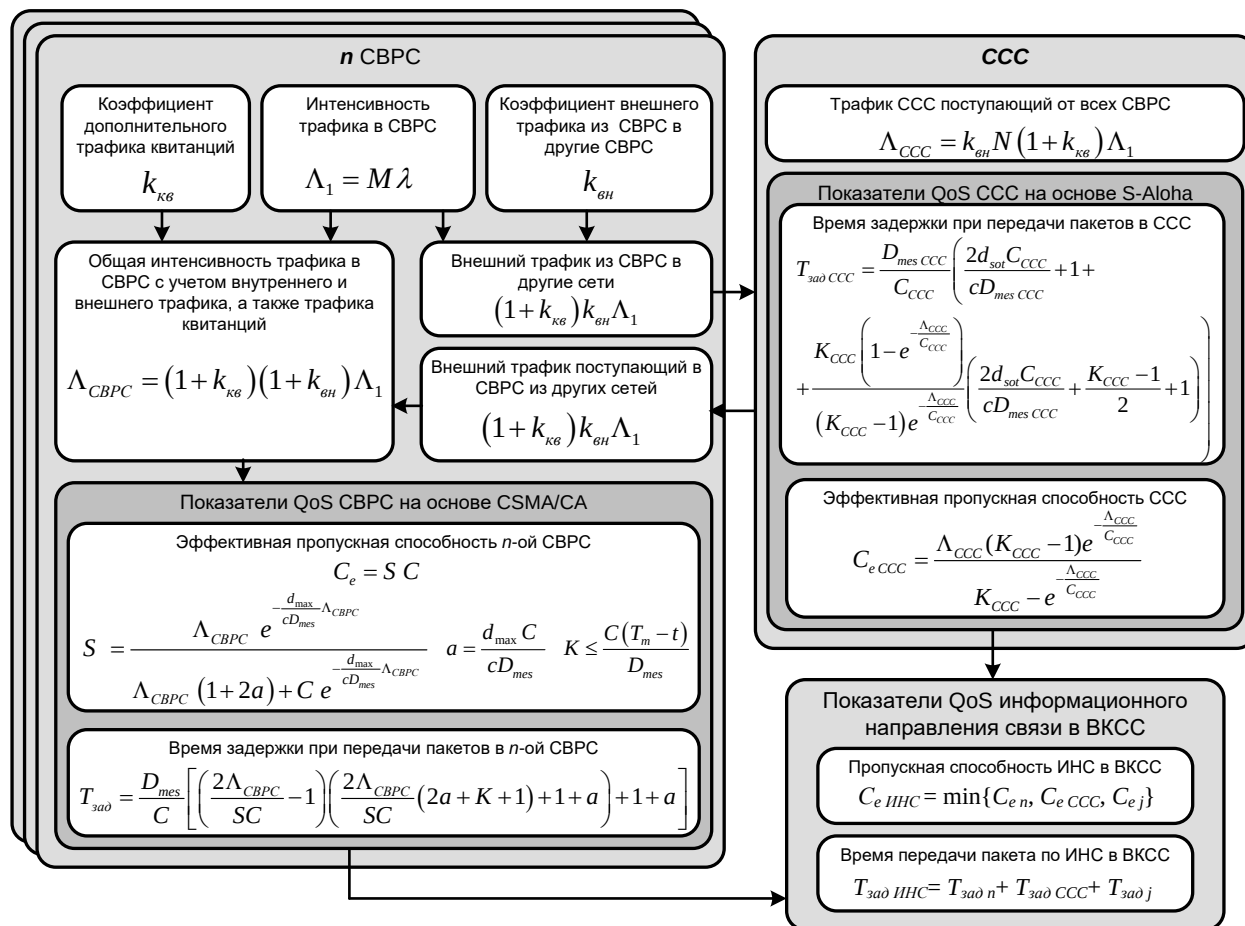


Рис. 12. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ОВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

Решение задачи обеспечения QoS мультимедийного трафика в ОВКСС может осуществляться двумя способами:

- 1) расширение пропускной способности каналов связи, что потребует изменения регламента распределения частот авиационной радиосвязи, а также разработки новых средств авиационной связи с новыми информационно-ёмкими созвездиями сигналов и адаптивными схемами сигнально-кодовых конструкций;
- 2) разработкой рациональной структуры ретрансляции трафика в ОВКСС, что потребует изменения только программного обеспечения средств авиационной связи.

Второй способ обеспечения QoS трафика в ОВКСС является экономически более целесообразным, и может быть реализован за счет внедрения в СВРС Mesh-технологий децентрализованного обмена. Данные технологии могут быть реализованы в качестве дополнительного программного обеспечения средств

авиационной связи в условиях перехода последних к технологии «программного радио» [47].

Предложенная модель ОВКСС позволяет исследовать качество обслуживания абонентов в данной сети, а также оценить предельные возможности ОВКСС по количеству обслуживаемых абонентов и подсетей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности каналов. К элементам новизны, представленной модели, относится рассмотрение многоуровневой сети связи, ядром которой является ССС, а нижний уровень образован СВРС. Это отличает ее от известных моделей многоуровневых сетей связи на основе ССС, представленных в работах [35-38, 81, 87, 88], так как представленная модель учитывает специфику протоколов информационного обмена в СВРС при управлении авиацией.

Результаты моделирования, на основе представленной модели, позволяют сделать вывод о низкой пропускной способности ОВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков, а также о необходимости разработки ОВКСС на основе децентрализованных принципов. Таким образом, в дальнейшем планируется развитие представленной модели за счет учета возможностей межсетевого обмена в СВРС при внедрении в них Mesh-технологий.

2.4. Модель объединённой воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

Анализ развития систем авиационной связи [7, 8] показал, что предлагаемые к использованию в настоящее время технологические решения по созданию ОВКСС основаны на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков. Вместе с тем, в соответствии с перспективными планами развития систем авиационной связи [13, 89-91] предусматривается внедрение Mesh-технологий, которые позволят ретранслировать часть информационных потоков между СВРС в случае, если у этих сетей имеются общие абоненты (рис. 13). На следующем этапе данной научной работы рассмотрен вопрос создания модели объединенной ВКСС, построенной на основе Mesh-технологии ретрансляции информационных потоков. Схема такой ОВКСС представлена на рис. 13. Данная сеть предназначена для ретрансляции команд управления АК, а также их информационного обеспечения в условиях отсутствия наземной инфраструктуры связи. В основу модели ОВКСС были положены ранее проведенные исследования, в которых рассматриваются модель СВРС на основе протокола CSMA/CA и модель отдельной ССС на основе протокола S-Aloha.

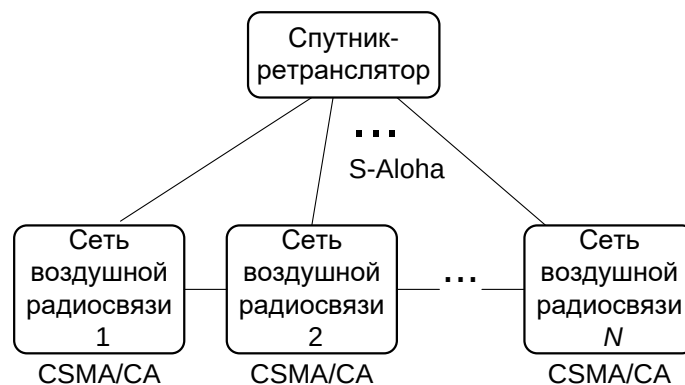


Рис. 13. Объединенная воздушно-космическая сеть связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

Для формализации процесса информационного обмена в ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции введем следующие обозначения:

M_n – количество абонентов n -й СВРС;

C_n – пропускная способность КМД n -й СВРС [бит/с];

C_{CCC} – пропускная способность КМД CCC [бит/с];

S_n – относительная пропускная способность КМД n -й СВРС, нормированная к C_n ;

S_{CCC} – относительная пропускная способность КМД CCC нормированная к C_{CCC} ;

C_{en} – эффективная пропускная способность КМД n -й СВРС [бит/с];

C_{eCCC} – эффективная пропускная способность КМД CCC [бит/с];

$C_{eИНС}$ – эффективная пропускная способность ИНС [бит/с];

$D_{mes\ n}$ – объем пакета в n -й СВРС [бит];

$D_{mes\ CCC}$ – объем пакета в CCC [бит];

$d_{max\ n}$ – максимальный радиус сети n -й СВРС [км];

d_{sot} – расстояние до СР, образующего CCC [км]. Для низкоорбитальных CCC $d_{sot}=500..1500$ км, для геостационарных CCC $d_{sot}=40000$ км, для высокоэллиптических CCC $d_{sot}>40000$ км;

c – скорость распространения электромагнитных волн [км/с];

K_n – настойчивость протокола множественного доступа n -й СВРС, определяемая как число попыток передачи пакета, в случае, если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

K_{CCC} – настойчивость протокола множественного доступа S-Aloha, используемого в CCC;

λ_m – интенсивность трафика, поступающего от m -го абонента в n -й СВРС [бит/с];

$k_{вн\ n}=0...1$ – коэффициент внешнего трафика n -й СВРС, определяется как доля трафика СВРС передаваемого как через CCC, так и через смежные СВРС, объединенные по Mesh-технологии;

$k_{вн\ n,j}=0...1$ – коэффициент внешнего трафика, направляемого из n -й СВРС в j -ю СВРС как через CCC так и через смежные СВРС объединенные по Mesh-технологии;

$k_{\text{вн CCC } n}=0\ldots 1$ – коэффициент определяющий долю внешнего трафика n -й СВРС, передаваемого только через CCC;

$k_{\text{вн CCC } n,j}=0\ldots 1$ – коэффициент, определяющий долю внешнего трафика из n -й СВРС в j -ю СВРС, передаваемого только через CCC;

$k_{\text{кв}}=0\ldots 1$ – коэффициент дополнительного трафика квитанций, определяется как доля от основного трафика содержащая квитанцию об успешном приеме пакета. Значение $k_{\text{кв}}=0,1$ соответствует случаю, когда на 10 пакетов основного трафика отправляется 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

z_n – количество исходящих Mesh-каналов из n -й СВРС в смежные СВРС;

$k_{\text{св } n}=0\ldots 1$ – коэффициент связности n -й СВРС со смежными СВРС, с которыми имеются Mesh-каналы;

$k_{\text{св}}=0\ldots 1$ – среднесетевой коэффициент связности СВРС со смежными СВРС по Mesh-каналам;

R – среднесетевое количество ретрансляций через СВРС, объединенных на основе Mesh-технологий, при доставке пакета из СВРС-источника в СВРС-получатель;

Λ_n – интенсивность трафика в n -й СВРС без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в СВРС [бит/с];

Λ_{CCC} – общая интенсивность трафика в CCC с учетом трафика квитанций об успешной доставке [бит/с];

$\Lambda_{\text{СВРС } n}$ – общая интенсивность трафика в n -й СВРС с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке [бит/с];

$T_{\text{зад } n}$ – задержка передачи пакета по n -й СВРС [с];

$T_{\text{зад CCC}}$ – задержка передачи пакета по CCC [с];

$T_{\text{зад ИНС}}$ – задержка передачи пакета по ИНС [с].

T_m – максимально допустимая задержка передачи пакета по СВРС [с].

Рамки исследования: протокол связи в СВРС – CSMA/CA; протокол связи в CCC – S-Aloha; все СВРС соединены через CCC по принципу «звезды», причем каждая СВРС доступна из другой сети за один шаг ретрансляции через CCC; все СВРС соединены между собой в соответствии с количеством исходящих Mesh-каналов; трафик представляет собой простейший пуассоновский поток событий, состоящих в поступлении отдельных пакетов.

Целью разработки модели является оценка временных параметров задержки передачи сообщений и пропускной способности ИНС в ОВКСС, использующей децентрализованный принцип ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологии.

Для получения начальных условий с целью расчета временных параметров ОВКСС и пропускных способностей ИНС сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных сегментах сети.

В произвольной n -й СВРС от абонентов в сеть поступает поток с интенсивностью, пропорциональной интенсивности отдельных абонентов λ_m и их количеству M_n :

$$\Lambda_n = \sum_{m=1}^{M_n} \lambda_m \quad (44)$$

Из n -й сети СВРС в другие j -е СВРС как через ССС, так и через смежные СВРС отправляется суммарный поток с интенсивностью, определяемой коэффициентом $k_{\text{вн } n}$:

$$k_{\text{вн } n} \Lambda_n, \quad (45)$$

где $k_{\text{вн } n} = \sum_{j=1}^N k_{\text{вн } n, j}$, $k_{\text{вн } n, j}$ – коэффициент трафика, направляемого из n -й СВРС в j -ю СВРС, при этом $k_{\text{вн } n, n} = 0$.

Данный трафик делится на отправляемый через ССС, доля которого во внешнем трафике определяется коэффициентом $k_{\text{вн ССС } n}$ и составляет значение

$$k_{\text{вн } n} (k_{\text{вн ССС } n}) \Lambda_n, \quad (46)$$

и трафик, отправляемый через смежные СВРС по Mesh-каналам, значение которого равно

$$k_{\text{вн } n} (1 - k_{\text{вн ССС } n}) \Lambda_n. \quad (47)$$

Если учесть, что на каждые v пакетов в ОВКСС отправляется 1 пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов, то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет равен $k_{\text{кв}} = 1/v$. С учетом этого выражения (46) и (47) примут окончательный вид:

– трафик из СВРС в смежные воздушные сети, отправляемый по Mesh-каналам:

$$k_{\text{вн } n} (k_{\text{вн ССС } n}) (1 + k_{\text{кв}}) \Lambda_n; \quad (48)$$

– трафик из СВРС в другие СВРС, отправляемый через ССС:

$$k_{\text{вн } n} (1 - k_{\text{вн ССС } n}) (1 + k_{\text{кв}}) \Lambda_n; \quad (49)$$

где: $k_{\text{вн ССС } n} = \sum_{j=1}^N k_{\text{вн ССС } n, j}$.

На основе выражения (48) можно определить суммарный трафик, поступающий в ССС от N СВРС:

$$\Lambda_{\text{ССС}} = (1 + k_{\text{кв}}) \sum_{n=1}^N k_{\text{вн } n} \cdot k_{\text{вн ССС } n} \cdot \Lambda_n, \quad (50)$$

а из выражения (49) – суммарный внешний трафик, ретранслируемый между всеми СВРС объединенными по Mesh-технологии (без учета количества повторных ретрансляций):

$$(1 + k_{\text{кв}}) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{\text{вн } i, j} (1 - k_{\text{вн ССС } i, j}) \Lambda_i \right), \quad (51)$$

где:

$$k_{\text{вн } i} = \sum_{j=1}^N k_{\text{вн } i, j}, \quad k_{\text{вн ССС } i} = \sum_{j=1}^N k_{\text{вн ССС } i, j}.$$

Рассмотрим более подробно применения Mesh-технологии и ретрансляцию трафика между СВРС в воздушном сегменте ОВКСС.

Введем коэффициент связности для каждой СВРС как отношение исходящих из конкретной n -й СВРС Mesh-каналов в смежные воздушные сети z_n к максимально возможному их числу при полносвязной топологии ($N-1$):

$$k_{\text{св } n} = \frac{z_n}{N-1}. \quad (52)$$

В этом случае среднесетевой коэффициент связности $k_{\text{св}}$ воздушного сегмента ОВКСС, представляющего собой объединение СВРС на основе Mesh-технологий, будет равен:

$$k_{\text{св}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_{\text{св } i} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N z_i. \quad (53)$$

Введем допущение, что функция $R(k_{\text{св}})$, определяющая зависимость количества ретрансляций (хопов), обратно пропорциональна связности сети:

$$R=1/k_{\text{св}}. \quad (54)$$

Такое допущение носит дискуссионный характер и обусловлено необходимостью подбора функции, удовлетворяющей следующим условиям. В случае несвязной сети достичь узла назначения невозможно, т.е. $R(k_{\text{св}}=0)=\infty$, а в случае полносвязной сети любой узел достигается за один шаг: $R(k_{\text{св}}=1)=1$.

С учетом допущения (54) можно оценить среднесетевое количество ретрансляций R , которое необходимо произвести в воздушном сегменте СВРС с учетом его коэффициента связности $k_{\text{св}}$ (53):

$$R = \begin{cases} \infty, & \text{при } k_{\text{св}} < \frac{1}{N-1} \\ \frac{1}{k_{\text{св}}}, & \text{при } k_{\text{св}} \geq \frac{1}{N-1} \end{cases}. \quad (55)$$

Условие $k_{\text{св}} < 1/(N-1)$ в данном выражении определяет минимальный уровень связей ($N-1$) между СВРС, после которого воздушный сегмент ОВКСС будет распадаться на несвязанные кластера, и отдельные группы узлов окажутся недоступными (что соответствует значению $R=\infty$).

Значение среднесетевого количества ретрансляций R определяет рост уровня транзитного трафика в воздушном сегменте ОВКСС, проходящего через отдельные СВРС. Причем с увеличением длины пути R пропорционально растет нагрузка и в воздушном сегменте ОВКСС. В связи с этим, из выражения (50) получим суммарный внешний трафик, ретранслируемый между всеми СВРС, объединенными по Mesh-технологии, с учетом количества ретрансляций R :

$$R(1+k_{\text{св}}) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{\text{вн } i,j} (1-k_{\text{вн CCC } i,j}) \Lambda_i \right). \quad (56)$$

При этом средняя доля транзитного трафика (56), приходящаяся на конкретную СВРС, определяется:

$$\frac{R(1+k_{\text{KB}})}{N} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{\text{BH } i,j} (1 - k_{\text{BH CCC } i,j}) \Lambda_i \right). \quad (57)$$

Выражения (48), (49) и (57) позволяют определить общую интенсивность трафика в произвольной n -й СВРС с учетом внутреннего и внешнего (от ССС и смежных СВРС) трафика:

$$\Lambda_{\text{СВРС } n} = (1 + k_{\text{KB}}) \times \left(\Lambda_n + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{\text{BH } i,j} (1 - k_{\text{BH CCC } i,j}) \Lambda_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N (k_{\text{BH } j,n} \cdot k_{\text{BH CCC } j,n} \cdot \Lambda_j) \right). \quad (58)$$

Выражения (50) и (58) позволяют определить интенсивность трафика, циркулирующего в ССС и в отдельной СВРС, и являются исходными для расчета пропускной способности и времени задержки передачи пакетов в ИНС ОВКСС.

Рассмотрим передачу сообщений в децентрализованной ОВКСС (рис. 13). В такой сети для соединения абонентов возможно построить 2-а вида ИНС:

- 1) через ССС, так как представлено в ранее;
- 2) через СВРС, соединенных на основе Mesh-технологий, когда ретрансляция происходит через абонентов, принадлежащих разным сетям, но находящихся в зоне радиовидимости друг друга (рис. 14).

В ИНС, представленной на рис. 14, время задержки передачи пакета между абонентами n -й и j -й СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

– при передаче через ССС:

$$T_{\text{зад ИНС}} = T_{\text{зад } n} + T_{\text{зад ССС}} + T_{\text{зад } j}; \quad (59)$$

– при передаче через СВРС соединенные по Mesh-технологии:

$$T_{\text{зад ИНС}} = \sum_{i \in R} T_{\text{зад } i}. \quad (60)$$

Время задержки пакета при передаче по отдельным звеньям ИНС с учетом выражений для интенсивности трафика $\Lambda_{\text{ССС}}$ (50) и $\Lambda_{\text{СВРС } n}$ (58) будет определяться следующим образом:

- 1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$T_{\text{зад } n} = \frac{D_{\text{mes } n}}{C_n} \left[\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС } n}}{S_n C_n} - 1 \right) \times \left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС } n}}{S_n C_n} (2a_n + K_n + 1) + 1 + a_n \right) + 1 + a_n \right], \quad (61)$$

где:

$$S_n = \frac{\Lambda_{\text{СВРС } n} e^{-\frac{d_{\text{max } n}}{cD_{\text{mes } n}} \Lambda_{\text{СВРС } n}}}{\Lambda_{\text{СВРС } n} (1 + 2a_n) + C_n e^{-\frac{d_{\text{max } n}}{cD_{\text{mes } n}} \Lambda_{\text{СВРС } n}}}, \quad a_n = \frac{d_{\text{max } n} C_n}{cD_{\text{mes } n}}, \quad K_n \leq \frac{C_n (T_m - t)}{D_{\text{mes } n}}.$$

- 2) для ССС на основе протокола S-Aloha:

$$T_{\text{зад CCC}} = \frac{D_{\text{mes CCC}}}{C_{\text{CCC}}} \left(\frac{2d_{\text{tot}} C_{\text{CCC}}}{cD_{\text{mes CCC}}} + 1 + \frac{K_{\text{CCC}} \left(1 - e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}} \right)}{(K_{\text{CCC}} - 1) e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}}} \left(\frac{2d_{\text{tot}} C_{\text{CCC}}}{cD_{\text{mes CCC}}} + \frac{K_{\text{CCC}} - 1}{2} + 1 \right) \right). \quad (62)$$

Пропускная способность ИНС в ОВКСС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью отдельного звена ИНС:

– при передаче через CCC:

$$C_{\text{е ИНС}} = \min\{C_{\text{е } n}, C_{\text{е CCC}}, C_{\text{е } j}\};$$

– при передаче через СВРС, соединенные по Mesh-технологии:

$$C_{\text{е ИНС}} = \min\{C_{\text{е } i}\}, i=n \dots j.$$

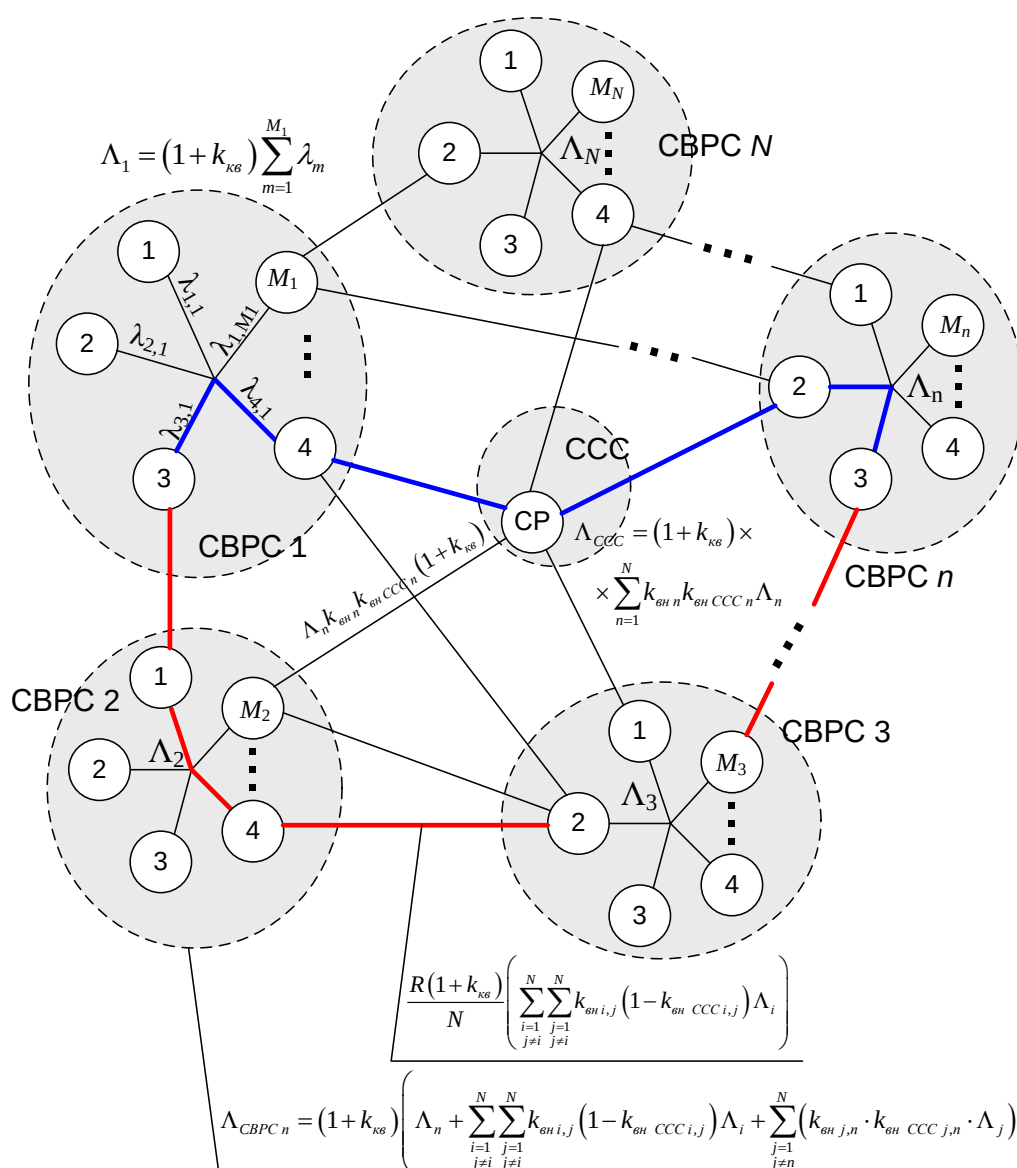


Рис. 13. Объединенная воздушно-космическая сеть связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

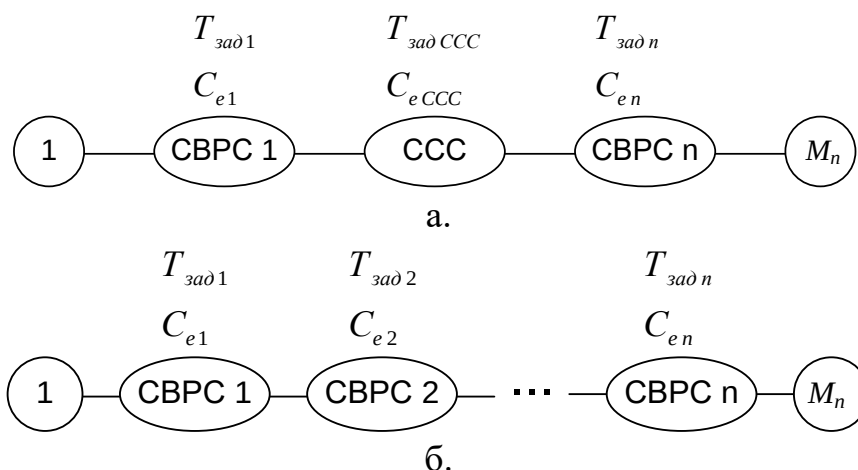


Рис. 14. Общая схема ИНС в ОВКСС: а) через CCC;
б) ретрансляция через СВРС, соединенных по Mesh-технологии

При этом, как показано ранее, эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений для интенсивности трафика Λ_{CCC} (50) и $\Lambda_{СВРС\ n}$ (58) будут определяться как:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$C_{e\ n} = S_n C_n, \quad (63)$$

где показатели S_n , C_n определяются так же, как и в выражении для времени задержки передачи пакета;

2) для CCC на основе протокола S-Aloha:

$$C_{e\ CCC} = \frac{\Lambda_{CCC} (K_{CCC} - 1) e^{-\frac{\Lambda_{CCC}}{C_{CCC}}}}{K_{CCC} - e^{-\frac{\Lambda_{CCC}}{C_{CCC}}}}. \quad (64)$$

Показатели $T_{зад\ ИНС}$ и $C_{е\ ИНС}$ формируют показатели качества обслуживания ОВКСС.

Для численной оценки показателей качества функционирования ОВКСС проведем предварительное упрощение модели ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков. Дополнительно введем следующие допущения:

- информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС, имеет равную интенсивность Λ_1 ;
- все СВРС имеют одинаковые параметры объема пакета, радиуса сети, настойчивости протокола CSMA/CA, равные соответственно D_{mes} , d_{max} , K ;
- коэффициент внешнего трафика у всех СВРС одинаков и равен $k_{вн}$, причем внешний трафик равномерно распределен по СВРС и коэффициенты трафика по всем межсетевым направлениям $СВРС_i \rightarrow СВРС_j$ имеют равные значения: $k_{вн\ i,j} = k_{вн}/(N-1)$;
- коэффициент доли внешнего трафика, направляемого в CCC, у всех СВРС одинаков и равен $k_{вн\ CCC}$, при этом трафик через CCC также рав-

номерно распределен по всем межсетевым направлениям $CBPC_i \rightarrow CBPC_j$;

- количество исходящих внешних Mesh-каналов связи из СВРС одинаково и равно z , соответственно связность всех СВРС также одинакова и равна $k_{св}$.

В результате данных упрощений схема аналитических вычислений для модели ОВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков примет вид, представленный на рис. 15.

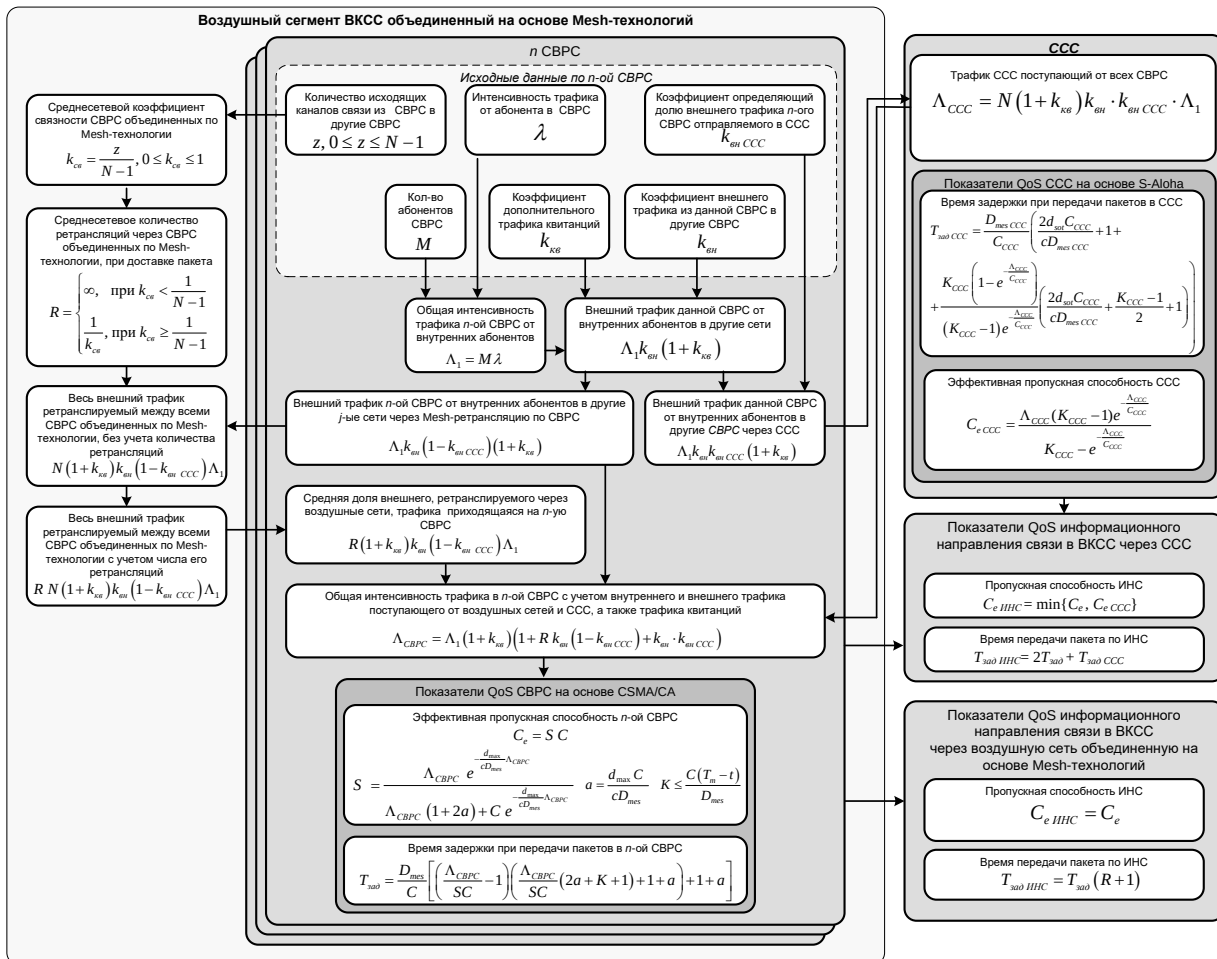


Рис. 15. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

В представленной на рис. 15 упрощенной схеме вычислений интенсивности информационных потоков Λ_{CCC} и $\Lambda_{CBPC n}$ ранее определяемых по выражениям (50) (58), теперь определяются в соответствии с вновь введенными допущениями:

- интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной СВРС:

$$\Lambda_{CBPC} = \Lambda_1 (1+k_{кв}) \left(1+R k_{св} (1-k_{св CCC}) + k_{св} \cdot k_{св CCC} \right), \quad (65)$$

- интенсивность трафика в CCC:

$$\Lambda_{CCC} = N(1+k_{св})k_{св} \cdot k_{св CCC} \cdot \Lambda_1. \quad (66)$$

Остальные параметры, а именно времена задержки в СВРС, ССС и ИНС, а также пропускная способность СВРС, ССС и ИНС, определяются по ранее представленным соответствующим выражениям, с учетом (65) и (66).

Во второй части данной научной работы проведено исследование возможностей по обслуживанию абонентов для ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе упрощенной модели.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о более низкой пропускной способности спутникового сегмента ОВКСС. Это ведет к большей задержке сообщений в ССС, чем в воздушном Mesh-сегменте. Существенными факторами, определяющими качество обслуживания в ОВКСС, являются коэффициенты $k_{вн}$, $k_{вн\ ССС}$ и $k_{св}$.

Интересным результатом является инвариантность уровня пропускной способности и времени передачи в воздушном Mesh-сегменте от количества сетей N . Это связано с тем, что в качестве параметра моделирования используется значение связности $k_{св}$. Для сохранения того же значения $k_{св}$ при увеличении сетей N нужно пропорционально нарастить и количество связей в графе Mesh-сегмента ОВКСС.

Анализ временных задержек, показывает, что ССС и СВРС, построенные на современном оборудовании, не способны обеспечить ретрансляцию мультимедийного трафика (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном масштабе времени), так как требуемое время задержки при его передаче не должно превышать 0,5-0,6 с. Таким образом, решение задачи глобальной передачи мультимедийного трафика требует не только внедрения Mesh-технологий в средства авиационной радиосвязи, но и существенного увеличения пропускной способности каналов, а также разработки протоколов гибкой балансировки нагрузки в ОВКСС между ее спутниковым и воздушным Mesh-сегментом [45].

Предложенная модель ОВКСС позволяет исследовать качество обслуживания данной сети, а также оценить предельные возможности ОВКСС по количеству обслуживаемых абонентов и подсетей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности каналов. Результаты, представленные в этом подразделе, предлагается использовать для развития подсистемы маршрутизации и ретрансляции информационных потоков управления авиацией, представленных в работах [45, 47, 90, 91].

К элементам новизны, разработанной в этом подразделе модели относится рассмотрение сложной многоуровневой сети связи, ядро которой составляет ССС, а нижний уровень образован СВРС, объединенных на основе Mesh-технологии. В отличие от известных моделей многоуровневых сетей связи на основе ССС, например, представленных в работах [35-38, 87], разработанная в этом подразделе модель учитывает специфику Mesh-технологии в СВРС управления авиацией.

Анализ прироста пропускной способности ОВКСС при использовании децентрализованного принципа ретрансляции (на основе результатов моделирования, представленных в части второй данной научной работы) показал, что этот прирост обеспечивается при различных соотношениях трафика направляе-

мого в воздушный и космический сегменты. В связи с этим дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку методики балансировки информационных потоков в ОВКСС, по аналогии с работой [39]. Целью этой методики должно стать обоснование рационального значения параметра $k_{\text{вн CCC}}$ при заданных параметрах ОВКСС $k_{\text{вн}}$, $k_{\text{св}}$, M , N , с целью максимизировать пропускную способность ОВКСС.

2.5 Методика распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной воздушно-космической сети связи

В упрощенной схеме расчета параметров децентрализованной ОВКСС, представленной на рис. 15, время задержки передачи пакета между абонентами разных СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

– при передаче через CCC:

$$T_{\text{зад ИНС}} = 2T_{\text{зад}} + T_{\text{зад CCC}}; \quad (67)$$

– при передаче через СВРС соединенные по Mesh-технологии:

$$T_{\text{зад ИНС}} = T_{\text{зад}} (R + 1). \quad (68)$$

При этом время задержки пакета при передаче по отдельным звеньям будет определяться следующим образом, с учетом того что значения для интенсивности трафика определяются из выражений Λ_{CCC} (65) и $\Lambda_{\text{СВРС } n}$ (66):

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$T_{\text{зад}} = \frac{D_{\text{mes}}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}}}{SC} - 1 \right) \left(\frac{\Lambda_{\text{СВРС}}}{SC} (2a + K + 1) + 1 + a \right) + 1 + a \right], \quad (69)$$

где:

$$S = \frac{\Lambda_{\text{СВРС}} e^{-\frac{d_{\text{max}}}{cD_{\text{mes}}} \Lambda_{\text{СВРС}}}}{\Lambda_{\text{СВРС}} (1 + 2a) + C e^{-\frac{d_{\text{max}}}{cD_{\text{mes}}} \Lambda_{\text{СВРС}}}}, \quad a = \frac{d_{\text{max}} C}{cD_{\text{mes}}}, \quad K \leq \frac{C(T_m - t)}{D_{\text{mes}}}.$$

2) для CCC на основе протокола S-Aloha:

$$T_{\text{зад CCC}} = \frac{D_{\text{mes CCC}}}{C_{\text{CCC}}} \left(\frac{2d_{\text{сot}} C_{\text{CCC}}}{cD_{\text{mes CCC}}} + 1 + \frac{K_{\text{CCC}} \left(1 - e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}} \right)}{(K_{\text{CCC}} - 1) e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}}} \left(\frac{2d_{\text{сot}} C_{\text{CCC}}}{cD_{\text{mes CCC}}} + \frac{K_{\text{CCC}} - 1}{2} + 1 \right) \right) \quad (70)$$

Как показано ранее, пропускная способность ИНС в децентрализованной ОВКСС будет определяться минимальной эффективной пропускной способностью отдельного звена ИНС:

– при передаче через CCC:

$$C_{e \text{ ИНС}} = \min\{C_e, C_{e \text{ CCC}}\}; \quad (71)$$

– при передаче через СВРС соединенные по Mesh-технологии:

$$C_{e \text{ ИНС}} = C_e. \quad (72)$$

При этом пропускные способности отдельных звеньев C_e и $C_{e\text{ CCC}}$ в ИНС, с учетом того, что значения для интенсивности трафика $\Lambda_{\text{СВРС}}$ и Λ_{CCC} определяются из выражений (65) и (66) будут определяться следующим образом:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA:

$$C_e = S C, \quad (73)$$

где показатели S , C определяются также как и в выражении (69) для времени задержки передачи пакета.

2) для CCC на основе протокола S-Aloha:

$$C_{e\text{ CCC}} = \frac{\Lambda_{\text{CCC}} (K_{\text{CCC}} - 1) e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}}}{K_{\text{CCC}} + e^{-\frac{\Lambda_{\text{CCC}}}{C_{\text{CCC}}}}}. \quad (74)$$

Исследования пропускной способности и времени задержки передачи в ИНС для ОВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков, представленные в части второй, показали, что в такой сети существует некоторое равновесное состояние, в котором время задержки при передаче по ИНС в космическом сегменте и по ИНС в воздушном сегменте – равны. Такие случаи обозначены на рис. 16 стрелками.

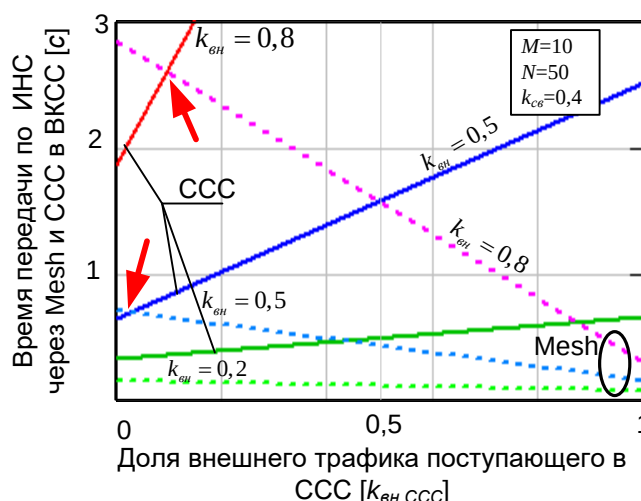


Рис. 16. Время передачи в ИНС (через CCC и через Mesh) в ОВКСС с децентрализованным принципом информационного обмена при изменении доли трафика в составе внешнего трафика, поступающего в CCC

Анализ графиков на рис. 16 показывает, что в ОВКСС построенной на основе децентрализованного принципа информационного обмена, в зависимости от значений коэффициентов $k_{\text{вн}}$ и $k_{\text{вн CCC}}$, сегментом с наиболее низкой пропускной способностью может выступать как CCC, так и воздушный сегмент. При этом соотношение коэффициентов $k_{\text{вн}}$ и $k_{\text{вн CCC}}$ фактически определяют поведение всей системы. При этом существует такое значение $k_{\text{вн CCC}}$ при заданных параметрах M , N , $k_{\text{св}}$ и $k_{\text{вн}}$ достигается балансировка нагрузки по времени задержки передачи (рис. 16):

$$T_{\text{зад ИНС}} = 2T_{\text{зад}} + T_{\text{зад CCC}} = T_{\text{зад}}(R+1), \quad (75)$$

где $T_{зад}$, $T_{зад\ CCC}$ определяются по формулам (69), (70) с учетом выражений для интенсивности трафика $\Lambda_{СВРС}$ (65) и Λ_{CCC} (66).

Преобразовав выражение (75) к виду

$$f(k_{вн\ CCC}) = T_{зад\ CCC} - T_{зад}(R-1) = 0, \quad (76)$$

и подставляя в него выражения (69), (70) и далее (65), (66) получим трансцендентное уравнение относительно параметра $k_{вн\ CCC}$ (здесь не приводится ввиду громоздкости записи).

В связи с этим решение для уравнения (76) относительно параметра $k_{вн\ CCC}$ предлагается вести в численном виде с использованием метода Ньютона (метода касательных) [92]. Общая схема методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной воздушно-космической сети связи на основе численного решения уравнения (76) относительно параметра $k_{вн\ CCC}$ – представлена на рис. 17.

Особенностью методики является численное решение уравнения (76) относительно $k_{вн\ CCC}$. В соответствии с методом Ньютона [92] выбор начальной точки и направления приближения при построении касательных определяется путем определения произведения производных функции. В случае если произведение отрицательно:

$$f'(k_{вн\ CCC}) f''(k_{вн\ CCC}) < 0,$$

то приближение осуществляется слева, если положительно:

$$f'(k_{вн\ CCC}) f''(k_{вн\ CCC}) > 0,$$

то справа.

Задается искомая точность поиска корня ε для значения $k_{вн\ CCC}$. Итерационная процедура поиска численного решения заключается в последовательном нахождении значений $k_{вн\ CCC\ n+1}$:

$$k_{вн\ CCC\ n+1} = k_{вн\ CCC\ n} - \frac{f(k_{вн\ CCC\ n})}{f'(k_{вн\ CCC\ n})}, \quad (77)$$

пока не будет достигнута заданная точность:

$$|k_{вн\ CCC\ n+1} - k_{вн\ CCC\ n}| \leq \varepsilon,$$

или

$$\left| \frac{f(T_{диагн\ n})}{f'(T_{диагн\ n})} \right| \leq \varepsilon.$$

Значение $k_{вн\ CCC}$ являющееся решением уравнения $f(k_{вн\ CCC})=0$ задаваемого выражением (76) определяет долю внешнего трафика направляемого в космический сегмент и необходимого для балансировки нагрузки в ОВКСС.

Результаты моделирования распределения потоков по представленной в этой части научной работы методике приведено в части второй. Моделирование распределения проводилось при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам перспективных средств связи.

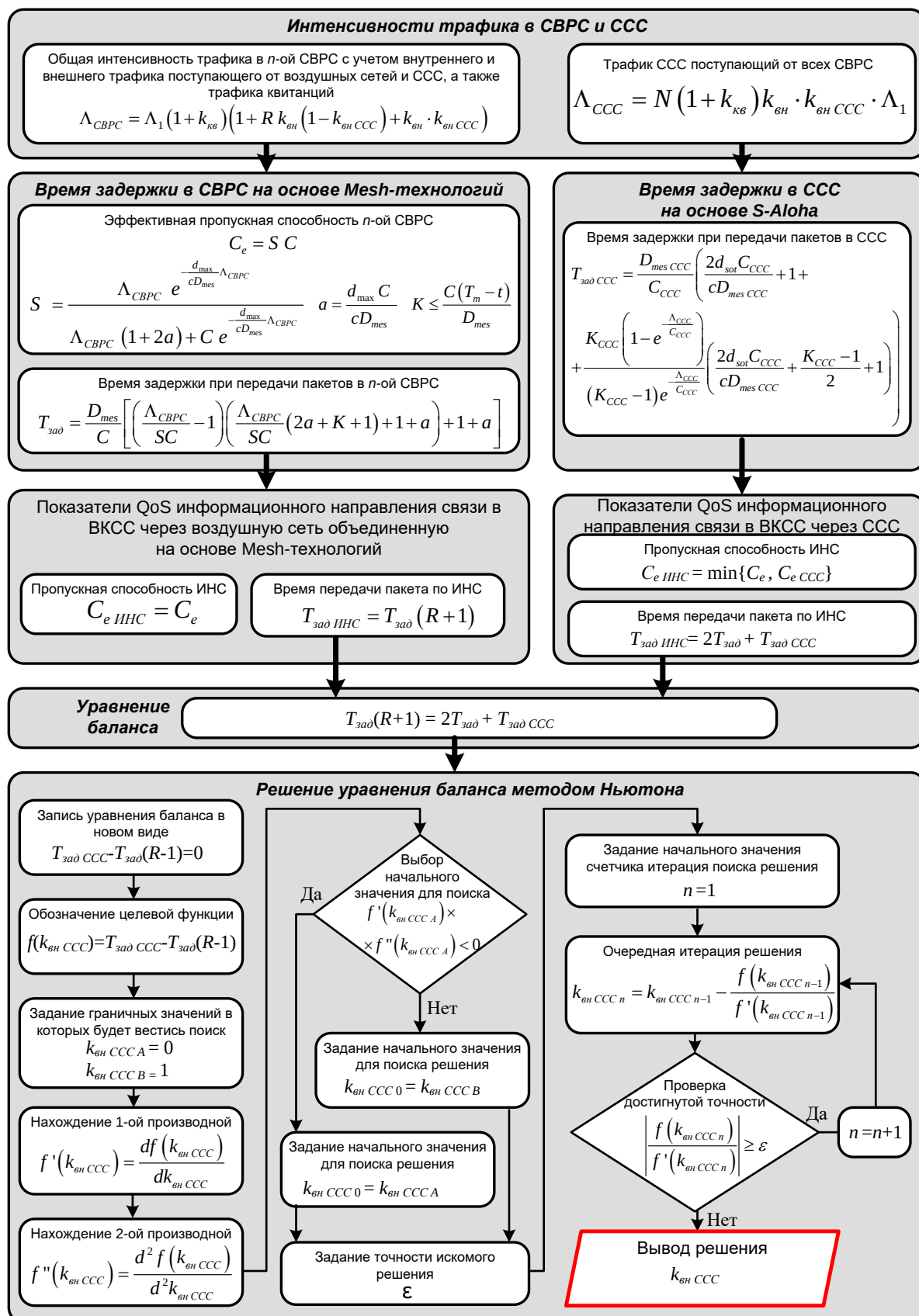


Рис. 17. Схема методики распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегментам объединенной воздушно-космической сети связи

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие общие выводы:

- балансировка нагрузки целесообразна и возможна для ОВКСС с низким уровнем связности сетей воздушного сегмента $k_{св}$;
- балансировка нагрузки в ОВКСС регулируемая параметром $k_{вн\ CCC}$ обеспечивает перераспределение части информационных потоков в космический сегмент, однако общее время передачи при этом увеличивается;
- с увеличением информационной нагрузки на ОВКСС за счет роста доли внешнего трафика $k_{вн}$ возможности передачи нагрузки через космический сегмент снижаются, а задержка его передачи по ИНС $T_{зad}$ – растет;
- расчетное значение $k_{вн\ CCC}$ доли передаваемого через космический сегмент трафика прямо пропорционально задержке передаче (чем выше доля спутникового трафика – тем выше задержка $T_{зad}$).

Коэффициент балансировки $k_{вн\ CCC}$ является своеобразным делителем долей внешнего трафика и в дальнейшем может быть использован для балансировки нагрузки критичной к задержкам. Доля внешнего трафика $1-k_{вн\ CCC}$ (трафика критичного к задержкам) может быть направлена через воздушный сегмент, а доля трафика $k_{вн\ CCC}$ (трафика некритичного к задержкам) – через ССС. Однако вопрос выбора конкретных значений $k_{вн\ CCC}$ с учетом такого распределения и QoS по классам трафика требует отдельной проработки.

Использование Mesh-технологии позволяет существенно повысить пропускную способность ОВКСС за счет реализации децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков. Повышение реализуется за счет использования избыточного ресурса пропускной способности СВРС и фактически ведет к ретрансляции подавляющей части трафика ОВКСС через воздушный сегмент.

В ОВКСС существует равновесное состояние, в котором время задержки при передаче по ИНС в космическом сегменте и по ИНС в воздушном сегменте – равны. Такое состояние соответствует определенному значению коэффициента $k_{вн\ CCC}$, определяющего долю внешнего трафика, передаваемого через ССС. Представленная методика позволяет обосновать рациональное значение коэффициента $k_{вн\ CCC}$ которое позволяет сбалансировать информационную нагрузку в ОВКСС.

Новизной методики, отличающей ее от аналогичных работ [39, 87, 88] является совместный учет специфики как воздушных сетей, так и космического сегмента, а также использование метода Ньютона для получения решения. Проведенное исследование показывает, что балансировка нагрузки целесообразна и возможна для ОВКСС с низким уровнем связности сетей воздушного сегмента $k_{св}$. При этом расчетное значение доли передаваемого через космический сегмент трафика $k_{вн\ CCC}$ прямо пропорциональна задержки передаче (чем выше доля спутникового трафика – тем выше задержка $T_{зad}$).

Выводы

Для анализа процессов информационного обмена в ОВКСС были использованы известная модель ССС на основе протокола S-Aloha и модель СВРС на основе протокола CSMA/CA – модель ненастойчивого множественного доступа. Модель СВРС была модифицирована для учета транзитной информационной нагрузки других СВРС, а также ухода части информационных потоков в ССС. Модель ССС была модифицирована с целью учета сопряжения с СВРС в части распределения информационной нагрузки между ней и воздушным сегментом.

Вышеуказанные модели СВРС и ССС были использованы для разработки **модели объединенной ВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков**, которая отличается от известных следующими элементами новизны:

- учетом возможности по ретрансляции частей информационных потоков одновременно через воздушный и космический сегмент объединенной сети;
- рассматривается иерархический принцип объединения отдельных сетей воздушной радиосвязи через спутниковый сегмент сети, когда все информационные потоки между СВРС ретранслируются через ССС;
- при моделировании впервые совместно учитываются особенности функционирования протокола CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в сети воздушной радиосвязи, протокола S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в сети спутниковой связи.

Результаты исследования на основе модели объединенной ВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков позволили сделать следующие выводы. Из-за того, что пропускная способность спутникового сегмента ОВКСС существенно ниже пропускной способности воздушного сегмента, то общая пропускная способность системы определяется именно пропускной способностью ССС. Такой же вывод можно сделать и о времени задержки передачи сообщений в ОВКСС – именно спутниковый сегмент определяет задержку передачи. Низкая пропускная способность ССС в ОВКСС не позволяет обслужить информационные потоки критичные к задержкам (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном времени), так как требуемая своевременность передачи не должно превышать 0,5-0,6 с.

Решение задачи обеспечения в ОВКСС требуемого уровня своевременности передачи информационных потоков критичных к задержкам может решаться двумя способами:

- расширение пропускной способности каналов связи, что потребует изменения регламента распределения частот авиационной радиосвязи, а также разработки новых средств авиационной связи с новыми информационно-ёмкими созвездиями сигналов и адаптивными схемами сигнально-кодовых конструкций;

- разработкой рационального принципа ретрансляции информационных потоков в ОВКСС, что потребует изменения только программного обеспечения средств авиационной связи.

Второй способ является технически более целесообразным, и может быть реализован за счет внедрения в СВРС Mesh-технологий децентрализованного обмена.

Развитие модели ОВКСС в направлении рационализации ретрансляции информационных потоков в ОВКСС путем использования возможностей межсетевого обмена в СВРС при внедрении в них Mesh-технологий позволило разработать **модель объединенной ВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий**, которая отличается от известных следующими элементами новизны:

- впервые учитываются возможности по ретрансляции частей информационных потоков одновременно через воздушный и космический сегмент объединенной сети;
- рассматривается децентрализованный принцип объединения отдельных СВРС, и ретрансляция информационных потоков как через СВРС сопряженные на основе Mesh-технологий, так и через спутниковый сегмент объединенной сети;
- при моделировании впервые учитываются особенности функционирования протоколов: CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в СВРС; S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в ССС.

Результаты исследования на основе модели объединенной ВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий позволили сделать следующие выводы. Существенными факторами, определяющими качество обслуживания в ОВКСС при использовании Mesh-технологий, являются: коэффициент внешнего трафика из СВРС ($k_{вн}$); коэффициент доли трафика, ретранслируемого через ССС ($k_{вн\ ССС}$) и коэффициент связности Mesh-сетей воздушного сегмента ($k_{св}$). Анализ своевременности передачи информационных потоков в ОВКСС показал, что решение задачи передачи трафика критичного к задержкам требует не только внедрения Mesh-технологий в средства авиационной радиосвязи с целью повышении уровня связности ($k_{св}$) воздушного сегмента, но разработки протоколов гибкой балансировки нагрузки в ОВКСС между ее спутниковым и воздушным Mesh-сегментом.

Для обоснования рационального значения доли трафика, ретранслируемого через ССС ($k_{вн\ ССС}$), при заданных параметрах ОВКСС ($k_{вн}$, $k_{св}$, M , N) с целью обеспечить заданный уровень своевременности передачи сообщений и исключения перегрузки спутникового сегмента ССС была разработана **методика распределения информационных потоков по воздушному и космическому сегменту объединенной воздушно-космической сети связи**. Данная методика отличается от известных следующими элементами новизны:

- основана на впервые разработанных моделях объединенной воздушно-космической сети связи с иерархическим и децентрализованным принципами ретрансляции информационных потоков абонентов;
- впервые позволяет обосновать доли информационных потоков, ретранслируемых через воздушный и космический сегменты объединенной воздушно-космической сети связи с целью балансировки нагрузки, а также обеспечения высокой пропускной способности и требуемого уровня своевременности передачи сообщений;
- учитывает особенности функционирования протоколов: CSMA/CA для ретрансляции информационных потоков в сети воздушной радиосвязи, S-Aloha для ретрансляции информационных потоков в сети спутниковой связи.

Проведенное исследование показывает, что балансировка нагрузки целесообразна и возможна для ОВКСС с низким уровнем связности сетей воздушного сегмента ($k_{св}$). При этом расчетное значение доли передаваемого через космический сегмент трафика ($k_{вн\ CCC}$) прямо пропорциональна задержке передачи (чем выше доля спутникового трафика – тем выше средняя задержка в ОВКСС).

Литература

1. Денисов Б. Б. Проблемы наращивания телекоммуникационного ресурса в интересах функционирования информационно-управляющих систем специального назначения [Доклад] // Доклад на научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения-2012». – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2012.
2. Кобозев Ю. Н. Перспективы развития систем связи и телекоммуникаций в информационно-управляющих системах специального назначения [Доклад] // Материалы Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах». Под ред. Ю.В. Бородакия. – М.: ОАО «Концерн «Созвездие», 2013. – С. 7-9.
3. Шептура В. Н. Архитектура перспективной системы связи группировки войск (сил) для обеспечения управления адаптивными действиями войск (сил) [Доклад] // Материалы Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах» / Под ред. Ю.В. Бородакия. – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. С. 16-20.
4. Легков К. Е., Ледянкин И. А. Основные подходы к предоставлению услуг в инфокоммуникационных системах специального назначения [Доклад] // Материалы Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». Том 4 «Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах» / Под ред. Ю.В. Бородакия. – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – С. 38-41.

5. Информационные технологии, связь и защита информации в МВД России – 2012 / По ред. М.Л. Тюркина, М.И. Шадаева, А.С. Аджемова, И.П. Иванова, С.В. Дворянкина, А.В. Куц, А.В. Квитко, П.А. Важева, Ю.А. Быстрова. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 156 с. – URL: www.informost.ru (дата доступа 03.02.2017).

6. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации – 2013: тематический сборник. / По ред. А.В. Абрамовича, А.В. Герасимова, С.В. Цибина, К.С. Ометова, Ю.А. Быстрова. – М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 216 с. – URL: www.informost.ru (дата доступа 03.02.2017).

7. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.

8. Коновалов О. А., Буслаев А. И., Маликов С. В. Актуальные направления развития перспективной системы связи вооруженных сил // III научные чтения имени А.С. Попова. Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией: сб. ст. по материалам Всероссийской НТК слушателей, курсантов и молодых ученых, посвященной 95-летию со Дня образования войск связи (10 октября 2014 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. С. 42-44.

9. Аганесов А. В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 67-97.

10. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 4 (20). С. 43-51.

11. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель объединенной воздушно-космической сети связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 1. С. 7-16.

12. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно космической сети связи построенной на основе Mesh-технологии // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 1. С. 17-25.

13. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: – Свое издательство, 2013. – 166 с.

14. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е., Немчилов А. В., Чаплыгин А. А. Пространственные и вероятностно-временные характеристики эффективности станций ответных помех при подавлении систем радиосвязи / Под ред. В.И. Борисова. – Воронеж: ОАО «Концерн «Созвездие», 2007. – 354 с.

15. Связь в Вооруженных силах Российской Федерации – 2013: тематический сборник. / По ред. А.В. Абрамовича, А.В. Герасимова, С.В. Цибина, К.С. Ометова, Ю.А. Быстрова. М.: ООО «Компания «Информационный мост», 2013. – 216 с. – URL: www.informost.ru (дата обращения 03.02.2022).

16. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.
17. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б., Зинич В. С., Карпеев В. И., Левитин В. Ф., Максимович В. А., Полушкин Ю. Ф., Слатин В. В., Федосов Е. А., Федунцов Б. Е., Широков Л. Е. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. Монография. – М.: Дрофа, 2004. – 816 с.
18. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.
19. Комяков А. В. Вдовин Л. М., Кондина И.В., Кулаков Д.С. Современная отечественная авиационная аппаратура автоматического обмена данными // Электросвязь. 2010. № 6. С. 32-37.
20. Комяков А. В. Войткевич К. Л., Сулима А. А. Инновационные решения для перспективных летательных аппаратов // Деловая слава России. 2013. № 3 (41). С. 26-27.
21. Белоусов Е. Л., Кейстович А. В., Войткевич К. Л., Брянцев В. Ф., Сайфетдинов Х. И. Современное оборудование сети авиационной электросвязи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2012. № 1-2. С. 70-73.
22. Белоусов Е. Л. Брянцев В. Ф., Войткевич К. Л., Кейстович А. В., Сайфетдинов Х. И. Перспективное бортовое оборудование сети авиационной радиосвязи // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3 (96).
23. Войткевич К. Л. Опыт по созданию бортовых комплексов связи для самолетов тактического звена управления // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2009. № 1-2. С. 42-43.
24. Научно-производственное предприятие «Полет» // Официальный сайт. [Электронный ресурс]. 2017. – URL: <http://www.polyot.atnn.ru> (дата доступа 03.02.2017).
25. Телегин Г. А., Моисеев Н. И., Демидов А. С., Рязанцев О. Д., Алыбин В. Г. Спутниковые интегрированные телекоммуникационные сети на технологии АТМ // 11 Международная конференция «Микроволновые и телекоммуникационные технологии» (CriMiCo'2001) (Севастополь, 10-14 сентября 2001 г.). Севастополь, 2001. С. 125-130.
26. Кузенков А. Состояние и перспективы развития отечественных ретрансляторов // Аэрокосмический курьер. 2013. № 2. С. 42-45.
27. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.
28. Макаренко С. И., Бородин Р. В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. №1 (73). С. 65-79.
29. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов

многостанционного доступа // Тезисы докладов юбилейной научно-техн. конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.

30. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Модели сетей радиосвязи, использующие различные алгоритмы множественного доступа // Тезисы докладов юбилейной научно-техн. конференции. – Калуга: ОАО «КНИИТМУ», 2002.

31. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер с англ. / Л. Клейнрок. – М.: Мир. 1979. – 600 с.

32. Макаренко С. И. Адаптивное управление скоростями логических соединений в канале радиосвязи множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 6. С. 54-58.

33. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: учебное пособие – М.: Альпина Паблишер, 2004. – 536 с.

34. Аболиц А. И., Степанов Л. А. Интеграция спутникового и наземного беспроводного широкополосного доступа // Электросвязь. 2007. № 9. С. 22-26.

35. Chen C., Ekici E. A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks // Wireless Networks. 2005. № 11. С. 507-521.

36. Chen C., Ekici E., Akyildiz I.F. Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks // Proceedings of the 5th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia. ACM, 2002. С. 109-116.

37. Durresi A., Dash D., Anderson B. L., Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture // Aerospace Conference. IEEE, 2004. Vol. 2. С. 1086-1104.

38. Akyildiz I. F., Ekici E., Bender M. D., MLSR: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2002. Vol. 10. № 3. С. 411-424.

39. Иванов В. И. Централизованный метод балансировки нагрузки в низкоорбитальной спутниковой системе // Т-Comm. 2014. № 4. С. 38-42.

40. Ададуров С. Е., Астанин А. В., Мальцев Г. Н., Рязанов С. Н., Степанов М.Г. и др. Моделирование сетевых спутниковых систем передачи информации. – М.: МО РФ, 1996. – 125 с.

41. Дарнопых В. В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения // Труды Московского авиационного института. 2004. № 16.

42. Киткаев С. В. Концепция технической модернизации средств авиационной электросвязи России // Электросвязь. 2009. № 5. С. 29-33.

43. Войткевич К. Л. Сулима А. А., Зац П. А. Проблемы построения канала управления беспилотными летательными аппаратами на основе ДКМВ-радиолинии // Электросвязь. 2014. № 7. С. 9-11.

44. Войткевич К. Л. Методы управления трафиком в наземно-воздушных сетях связи. Дис. ... д.т.н. по спец. 05.13.01 / Войткевич Константин Леонидович. – Н.Новгород: НПП «Полет», 1998. – 375 с.

45. Алехин С. В., Войткевич К. Л. Моделирование протокола маршрутизации для беспроводных мобильных сетей // Электросвязь. 2014. № 7. С. 7-8.

46. Войткевич К. Л., Резвов А. В., Шанин В. Н. Специализированные локальные беспроводные мобильные сети гражданского и военного

назначения // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. № 1-2. С. 130-133.

47. Белоусов Е. Л., Брянцев В. Ф., Войткевич К. Л., Кейстович А. В., Сайфетдинов Х. И. Вопросы создания авиационного радиосвязного оборудования по принципу «программируемое радио» // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 11-18.

48. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Блакитный О. А. Проблема построения единой автоматизированной системы радиосвязи региона и пути ее решения // Сборник трудов X юбилейной научно-технической конференции «Проблемы радиосвязи». – Н. Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

49. Дмитриев А. Н., Мотин О. В. Модель авиационного УКВ канала обмена данными // Тезисы докладов научно технической конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.

50. Дмитриев А. Н., Максимов А. В. Оптимизация авиационных сетей обмена данными // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». – Н. Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

51. Мотин О. В. Модель функционирования авиационного УКВ канала обмена данными // XXIV военно-научная конференция молодых ученых. – Щелково: 30 ЦНИИ МО РФ, 2001.

52. Иванов М. С., Пономарев А. В., Макаренко С. И. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного распределения сетевого частотно-временного ресурса с учетом интенсивности передаваемого трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 104-139. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139.

53. Иванов М. С., Пономарев А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 1. Модель интенсивности нестационарного трафика на различных этапах полета // Системы управления, связи и безопасности. 2021. №6. С. 120-147. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147.

54. Иванов М. С., Пономарев А. В., Макаренко С. И. Моделирование трафика, передаваемого в канале управления летательным аппаратом при управлении им в процессе выполнения специальных задач. Часть 2. Экстраполяция и прогнозирование интенсивности нестационарного трафика // Системы управления, связи и безопасности. 2021. №6. С. 148-172. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-148-172.

55. Макаренко С. И., Пономарев А. В. Исследование влияния своевременности передачи команд в сети воздушной радиосвязи на качество наведения летательного аппарата на цель // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 126-131. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-2-126-131.

56. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Задачи боевого управления единой системы воздушной радиосвязи в комплексе пунктов управления авиационной группировкой региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры № 100. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2003.

57. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Функциональная модель процесса управления авиацией региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры № 100. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2003.

58. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях истребительной авиации // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). 2005. № 26.

59. Гимбицкий В. А., Бакум А. Н. Совершенствования боевого управления авиацией ПВО // Тезисы докладов 18 НТК курсантов СВВАИУ. – Ставрополь: СВВАИУ, 1996.

60. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях дальней авиации и ВТА // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). 2005. № 26.

61. Калинин В. И. Методика оценки вероятности обслуживания абонентов с требуемой достоверностью в зоне обслуживания станции радиодоступа [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

62. Калинин В. И. Пространственные модели зон обслуживания систем связи с подвижными объектами [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

63. Калинин В. И. Потокосетевые модели в системах связи с подвижными объектами [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

64. Гоцуцов С. Ю. Совершенствование автоматизированных систем управления воздушным движением на основе технологий коммутации пакетов: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.22.13 / Гоцуцов Сергей Юрьевич. – М.: МИИГА, 2007. – 211 с.

65. Калимулина Э. Ю. Разработка и исследование аналитических моделей надёжности и их применение для оптимизации территориально-распределённых сетей: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.13.13 / Калимулина Эльмира Юрьевна. – М.: МТУСИ, 2009. – 222 с.

66. Морозов А. Н. Моделирование авиационных наземных фиксированных сетей передачи данных для организации воздушного движения в условиях дефицита исходных данных: дис. ... канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13.18. / Морозов Александр Николаевич. – М.: МФТИ (ТУ), 2006. – 211 с.

67. Колядов Д. В., Прохоров А. В. Влияние явления одновременной передачи вызовов на работу систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 204. С. 82-87.

68. Колядов Д. В., Прохоров А. В. Реализация перспективной системы коммутации речевой связи для управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. № 193. С. 55-58.

69. Прохоров А. В., Бондарь Д. С. Применение аппаратуры широкополосного радиодоступа в локальных сетях связи и передачи данных систем управления воздушным движением // Научный вестник Московского

государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 176. С. 93-100.

70. Скороваров А.С. Пути повышения эффективности функционирования авиационных средств обмена информацией с ППРЧ в условиях помех // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». – Н.Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

71. Семисошенко М. А. Управление автоматизированными сетями декаметрового диапазона в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. – СПб.: ВАС, 1997. – 364 с.

72. Макаренко С. И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 2. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (дата доступа 26.08.2016).

73. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. № 6. 2012. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (дата обращения 21.12.2017).

74. Макаренко С. И. Подавление сетевых систем управления радиоэлектронными информационно-техническими воздействиями // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 4. С. 15-59. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10402.

75. Перегудов М. А., Стешковой А. С. Модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 1. С. 128-154.

76. Перегудов М. А., Стешковой А. С., Бойко А. А. Вероятностная модель процедуры случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA // Труды СПИИРАН. 2018. № 4 (59). С. 92-114.

77. Шорин О. А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи: дис. ... доктора техн. наук по спец. 05.12.13 / Шорин Олег Александрович. – М.: МТУСИ, 2005. – 351 с.

78. Пастухов А. С., Иванов Ю. А. Оценка взаимного влияния самоподобных Internet и видеотрафика при передаче в стандарте DVB/IP/MPEG-4 по гибридным сетям спутниковой связи // Вестник Чувашского университета. 2008. № 2. С. 160-169.

79. Пастухов А.С., Разумов Я. М., Окулов К. Ю. Моделирование совместной передачи видео- и Internet-трафика в стандарте DVB/IP/MPEG-2 в гибридных спутниковых сетях связи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2007. Т. 3. № 2. С. 56-60.

80. Цветков К.Ю., Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: алгоритм расширяющегося поиска мобильных абонентов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2014. № 642. С. 41-48.

81. Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмолов А. Ф. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами:

баллистическое построение // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2012. № 634. С. 45-55.

82. Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмолов А. Ф. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: варианты реализации бортового коммуникационного оборудования спутника-ретранслятора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2012. № 635. С. 5-13.

83. Цветков К. Ю., Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: принципы построения шлюзовых станций и аппаратуры потребителей // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2013. № 638. С. 16-24.

84. Макаренко С. И. Время сходимости протоколов маршрутизации при отказах в сети // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 45-98. DOI: 10.24411/2410-9916-2015-10203.

85. Макаренко С. И. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебное пособие. – Ставрополь: СФ МГГУ им. М. А. Шолохова, 2008. – 352 с.

86. Авен О. И., Гуринов Н. Н., Коган Я. А. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982.

87. Ададуров С. Е., Астанин А. В., Мальцев Г. Н., Рязанов С. Н., Степанов М.Г. и др. Моделирование сетевых спутниковых систем передачи информации. – М.: МО РФ, 1996. – 125 с.

88. Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмолов А. Ф. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: пропускная способность межспутниковых и фидерных радиолиний // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2011. № 633. С. 108-123.

89. Легков К. Е. Методы повышения производительности беспроводных Mesh-сетей специального назначения // Т-Comm. 2011. № 3. С. 46-48.

90. Кулаков М. С. Анализ особенностей функционирования мобильных самоорганизующихся сетей MANET на уровне доступа к среде MAC // Т-Comm. 2014. № 10. С. 39-42.

91. Кулаков М. С. Применение алгоритмов самоорганизации для режима VDL-2 // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 12. № 5. С. 58-62.

92. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченкова Н. П. Вычислительные методы для инженеров. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.

93. Пантенков Д. Г., Ломакин А. А. Оценка устойчивости спутникового канала управления беспилотными летательными аппаратами при воздействии преднамеренных помех // Радиотехника. 2019. № 11 (17). С. 43-50.

94. Пантенков Д. Г., Великоиваненко В. И. Синтез многофункциональных адаптивных информационно-управляющих систем комплексов с БПЛА при совместном функционировании с целевыми космическими сегментами орбитальных группировок космических аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 6. С. 49-68.

95. Михайлов Р. Л. Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Монография. – Череповец: ЧВВИУРЭ, 2016. – 128 с.
96. Михайлов Р. Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2019. – 150 с.
97. Дворников С. В. Методика оценки имитостойчивости каналов управления роботизированных устройств // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 64-69.
98. Дворников С. В., Попов Е. А., Крячко А. Ф., Дворников С. С., Томашевич С. В. Компенсация структурных помех в радиочастотных каналах управления робототехнических систем // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 11. С. 95-106.
99. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Бурыкин Д. А., Железняк А. В., Дворников С. С., Рябенко Д. С. Методика трансформации сигнальных созвездий сигналов КАМ // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2014. № 4. С. 39-44.
100. Дворников С. В., Попов Е. А., Иванов Р. В. Защита каналов управления робототехникой // Радиотехника. 2018. № 12. С. 62-68.
101. Дворников С. В., Погорелов А. А., Дворников С. С., Иванов Р. В. Предложения по восстановлению сигналов в каналах управления беспилотных летательных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. № 1. С. 91-97.
102. Дворников С. В., Дворников С. С., Морозов Е. В. Модель взаимодействия радиотехнических систем беспилотных аппаратов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2020. № 1. С. 84-90.
103. Балюк А. А., Крупенин А. В., Махов Д. С., Финько О. А. Способ двумерного помехоустойчивого кодирования информации в пространственных параллельных радиоканалах робототехнических комплексов Патент на изобретение 2761903 С1, 13.12.2021. Заявка № 2021102009 от 28.01.2021.
104. Самойленко Д. В., Еремеев М. А., Финько О. А. Метод обеспечения целостности информации в группе робототехнических комплексов на основе криптокодовых конструкций // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2017. № 1. С. 70-78.
105. Самойленко Д. В., Финько О. А., Еремеев М. А. Распределённая обработка и защита информации в группировке комплексов с беспилотными летательными аппаратами // Теория и техника радиосвязи. 2017. № 4. С. 93-100.
106. Самойленко Д. В., Финько О. А. Обеспечение целостности информации в группе беспилотных летательных аппаратов в условиях деструктивных воздействий нарушителя // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 5-6 (107-108). С. 20-27.
107. Самойленко Д. В., Финько О. А. Обеспечение целостности информации в автономной группе беспилотных летательных аппаратов методами модулярной арифметики // Наука. Инновации. Технологии. 2016. № 4. С. 77-90.

References

1. Denisov B. B. Problemy narashhivaniya telekommunikacionnogo resursa v interesah funk-cionirovaniya informacionno-upravljajushhih sistem special'nogo naznache-nija [The problems of increasing the telecommunication resource in the interests of the functioning of special purpose information and control systems]. Doklad na nauchnoj konferencii «Sovremennye tendencii razvitija teorii i praktiki upravlenija v sistemah special'nogo naznachenija-2012». Moscow, Koncern «Sistemprom», 2012. (In Russian).
2. Kobozev Iu. N. Perspektivy razvitiia sistem sviazi i telekommunikatsii v informatsionno-upravliaiushchikh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia [Prospects for the Development of Communication and Telecommunication Systems in Management Information Systems, Special Purpose]. Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia» [Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Telecommunications and Communication in Management Information Systems], vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sozvezdie", 2013, pp. 7-9 (in Russian).
3. Sheptura V. N. Arkhitektura perspektivnoi sistemy sviazi gruppirovki voisk (sil) dlia obespecheniia upravleniia adaptivnymi deistviiami voisk (sil) [Architecture of Advanced Communication Systems Forces to Ensure Adaptive Management Actions of the Troops]. Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia» [Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Modern Trends in the Theory and Practice of Control Systems for Special Purposes"], vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 16-20 (in Russian).
4. Legkov K. E., Lediankin I. A. Osnovnye podkhody k predostavleniiu uslug v infokommunikatsionnykh sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia [Basic Approaches to the Provision of Services in Information and Communication Systems for Special Purposes]. Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia «Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v sistemakh spetsial'nogo naznacheniiia» [Proceedings of All-Russian Scientific Conference "Telecommunications and Communication in Management Information Systems"], vol. 4, Moscow, JSC "Concern "Sistemprom", 2013, pp. 38-41 (in Russian).
5. Tiurkin M. L., Shadaev M. I., Adzhemov A. S., Ivanov I. P., Dvoriankin S. V., Kuts A. V., Kvitko A. V., Vazhev P. A., Bystrov Iu. A. Informatsionnye tekhnologii, sviaz' i zashchita informatsii v MVD Rossii [Information Technology, Communication and Information Protection in the Ministry of Internal Affairs of Russia]. Moscow, "Company "Information Bridge", 2013, 156 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2017) (In Russian).
6. Abramovich A. V., Gerasimov A. V., Tsibin S. V., Ometov K. S., Bystrov Iu. A. Sviaz' v Vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii – 2013: tematicheskii sbornik [Communication in the Armed Forces of the Russian Federation – 2013: Thematic Collection]. Moscow, "Company "Information Bridge" Publ., 2013, 216 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2017) (in Russian).

7. Ivanov S. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediia. XXI vek. Sistemy upravleniia, sviazi i radioelektronnoi bor'by* [Weapons and Technology of Russia. The Encyclopedia. XXI Century. Control Systems, Communications and Electronic Warfare]. Moscow, "Weapons and Technology" Publ., 2006, 695 p. (in Russian).

8. Konovalov O. A., Buslaev A. I., Malikov S. V. Aktual'nye napravleniia razvitiia perspektivnoi sistemy sviazi vooruzhennykh sil [Current Trends in the Development of Advanced Communication Systems of the Armed Forces]. *Proceedings of III readings behalf of the A. S. Popov, Voronezh, Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin"*, 2014, pp. 42-44 (in Russian).

9. Aganesov A. V. Model of Radio Network with CSMA/CA Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 67-97. Available at: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (accessed 1 September 2022) (In Russian).

10. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Aerospace communications network model with traffic routing hierarchical principle. *Telecom IT*, 2015, no. 4, pp. 43-51 (In Russian).

11. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Model of united airspace network with decentralized traffic routing based on mesh technologies. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 7-16 (In Russian).

12. Aganesov A. V., Makarenko S. I. The traffic balancing method between aero and space segments in aerospace network based on Mesh-technology. *H&ES Research*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 17-25 (In Russian).

13. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem sviazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastity. Monografija* [Interference Resistance Communication Systems with Frequency-Hopping Spread Spectrum. Treatise]. Saint-Petersburg, Svoe Izdatelstvo Publ., 2013, 166 p. (in Russian).

14. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E., Nemchilov A. V., Chaplygin A. A. *Prostranstvennye i veroiatnostno-vremennye kharakteristiki effektivnosti stantsii otvetnykh pomekh pri podavlenii sistem radiosviazi* [Spatial and probabilistic-time characteristics of the effectiveness of the response stations interference suppression of radio communication systems]. Voronezh, Kontsern "Sozvezdie" Publ., 2007. 354 p. (in Russian).

15. Abramovich A. V., Gerasimov A. V., Tsibin S. V., Ometov K. S., Bystrov Iu. A. *Sviaz' v Vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii – 2013: tematicheskii sbornik* [Communication in the Armed Forces of the Russian Federation – 2013: Thematic Collection]. Moscow, "Company "Information Bridge" Publ., 2013, 216 p. Available at: www.informost.ru (accessed 03 February 2017) (in Russian).

16. Ivanov S. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediia. XXI vek. Sistemy upravleniia, sviazi i radioelektronnoi bor'by* [Weapons and Technology of Russia. The Encyclopedia. XXI Century. Control Systems, Communications and Electronic Warfare]. Moscow, "Weapons and Technology" Publ., 2006, 695 p. (in Russian).

17. Babich V. K., Bakhanov L. E., Gerasimov G. P., Gindrankov V. V., Grishin V. K., Goroshchenko L. B., Zinich V. S., Karpeev V. I., Levitin V. F., Maksimovich V. A., Polushkin Iu. F., Slatin V. V., Fedosov E. A., Fedunov B. E., Shirokov L. E. *Aviatsiia PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Air defense of Russia and scientific-technical progress: combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 816 p. (in Russian).

18. Makarenko S. I., Sapozhnikov V. I., Zakharenko G. I., Fedoseev V. E. *Sistemy svyazi* [Radio Communications System]. Voronezh, Military Aviation Engineering University, 2011. 285 p. (in Russian).

19. Komiakov A. V., Vdovin L. M., Kondina I. V., Kulakov D. S. *Sovremennaya otechestvennaya aviatsionnaya apparatura avtomaticheskogo obmena dannymi* [Modern Russian aviation equipment automatic data exchange]. *Elektrosvyaz*, 2010, no. 6, pp. 32-37 (in Russian).

20. Komiakov A. V., Voitkevich K. L., Sulima A. A. *Innovatsionnye resheniya dlia perspektivnykh letatel'nykh apparatov* [Innovative solutions for advanced aircraft]. *Delovaya slava Rossii*, 2013, vol. 41, no. 3, pp. 26-27 (in Russian).

21. Belousov E. L., Keistovich A. V., Voitkevich K. L., Briantsev V. F., Saifetdinov Kh. I. *Sovremennoe oborudovanie seti aviatsionnoi elektrosvyazi* [Modern equipment of the aeronautical telecommunication network]. *Sistemy i sredstva svyazi, televideniia i radioveshchaniia*, 2012, no. 1-2, pp. 70-73 (in Russian).

22. Belousov E. L., Briantsev V. F., Voitkevich K. L., Keistovich A. V., Saifetdinov Kh. I. *Perspektivnoe bortovoe oborudovanie seti aviatsionnoi radiosvyazi* [Perspective avionics network aeronautical telecommunication]. *Transactions of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev*, 2012, vol. 96, no. 3 (in Russian).

23. Voitkevich K. L. *Opyt po sozdaniyu bortovykh kompleksov svyazi dlia samoletov takticheskogo zvena upravleniya* [Experience in creating on-Board communication systems for aircraft tactical control]. *Sistemy i sredstva svyazi, televideniia i radioveshchaniia*, 2009, no. 1-2, pp. 42-43 (in Russian).

24. *Scientific-production enterprise "Flight"*. Official on-line site. [On line resource]. 2017. Available at: <http://www.polyot.atnn.ru> (accessed 6 November 2017) (in Russian).

25. Telegin G. A., Moiseev N. I., Demidov A. S., Rjazancev O. D., Alybin V. G. *Sputnikovye integrirovannye telekommunikatsionnye seti na tehnologii ATM* [Satellite integrated telecommunication networks based on ATM technology]. *11 Mezhdunarodnaya konferentsiya «Mikrovolnovye i telekommunikatsionnye tehnologii» (CriMiCo'2001)* (Sevastopol', 10-14 sentyabrja 2001 g.). Sevastopol, 2001. pp. 125-130 (In Russian).

26. Kuzenkov A. *Sostoianie i perspektivy razvitiia otechestvennykh retransliatorov* [The State and Prospects of Development of Domestic Repeaters]. *Aerospace courier*, 2013, vol. 2, pp. 42-45 (in Russian).

27. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniia uzlovogo oborudovaniia i strukturno-setevykh parametrov setej svyazi sledujushhego pokoleniia* [The Models and the Methods of

Measuring of Quality Indicators of Nodal Equipment Functioning and Network Structural Parameters of Next Generation Networks]. Krosnoyarsk, Polykom Publ., 2010. 389 p (In Russian).

28. Makarenko S. I., Borodinov R. V. Analiz tekhnologii obespecheniia kachestva obsluzhivaniia v mul'tiservisnykh ATM setiakh [The Analysis of Technologies to Ensure Quality of Service in Multiservice ATM Networks], *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2012, vol. 73, no. 1, pp. 65-79 (in Russian).

29. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Otsenka effektivnosti setei vozduшной radiosvazi pri ispol'zovanii razlichnykh algoritmov mnogostantsionnogo dostupa [Evaluation of the Effectiveness of the Networks to Air Radio Communications Using Different Algorithms for Multiple Access]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002. (in Russian).

30. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Modeli setei radiosvazi, ispol'zuiushchie razlichnye algoritmy mnozhestvennogo dostupa [Model Radio Communications Networks that use Different Algorithms for Multiple Access Telecommunications]. *Tezisy dokladov iubileinoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002. (in Russian).

31. Kleinrock L. *Queueing Systems: Volume II – Computer Applications*. New York, Wiley Interscience. 576 p (in Russian).

32. Makarenko S. I. Adaptivnoe upravlenie skorostiami logicheskikh soedinenii v kanale radiosvazi mnozhestvennogo dostupa [Adaptive Control Speed Logical Connections in the Radio Multiaccess Channel]. *Information and Control Systems*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

33. Kamnev V. E., Cherkasov V. V., Chechin G. V. *Sputnikovye seti svyazi* [Satellite communication networks]. Moscow, Alpina Publ., 2004. 536p. (in Russian).

34. Abolic A. I., Stepanov L. A. Integration of satellite and terrestrial wireless broadband access Satellite integrated telecommunication networks based on ATM technology [Integration of satellite and terrestrial wireless broadband access Satellite integrated telecommunication networks based on ATM technology]. *Telecommunications*, 2007, no. 9, p. 22-26 (in Russian).

35. Chen C., Ekici E. A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks. *Wireless Networks*, 2005, no. 11, pp. 507-521.

36. Chen C., Ekici E., Akyildiz I. F. Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks. *Proceedings of the 5th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia*. ACM, 2002, pp. 109-116.

37. Durresi A., Dash D., Anderson B. L. Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture. *Aerospace Conference. IEEE*, 2004, vol. 2, pp. 1086-1104.

38. Akyildiz I. F., Ekici E., Bender M. D. MLSP: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, vol. 10, no. 3, pp. 411-424.

39. Ivanov V. I. Centralizovannyj metod balansirovki nagruzki v nizkoorbital'noj sput-nikovoju sisteme [Centralized load balancing method in a low-orbit satellite system]. *T-Comm*, 2014, no. 4, pp. 38-42 (in Russian).

40. Adadurov S. E., Astanin A. V., Maltsev G. N., Riazanov S. N., Stepanov M. G. and etc. *Modelirovanie setevykh sputnikovykh sistem peredachi informatsii* [Simulation of network of satellite communication systems]. Moscow, The Ministry of Defence, 1996. 125 p. (in Russian).

41. Darnopyh V. V. Planirovanie celevogo funkcionirovaniya kosmicheskikh apparatov i sistem: zadachi, metody i algoritmy ih reshenija [Planning of the targeted functioning of spacecraft and systems: tasks, methods and algorithms for their solution]. *Proceedings of the Moscow Aviation Institut*, 2004, no. 16. (in Russian).

42. Kitkaev S. V. Kontseptsiiia tekhnicheskoi modernizatsii sredstv aviatsionnoi elektrosviasi Rossii [The Concept of Technical Modernization of Aviation's Telecommunication Russia]. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2009, no. 5, pp. 29-33 (in Russian).

43. Voitkevich K. L. Sulima A. A., Zats P. A. Problemy postroeniia kanala upravleniia bespilotnymi letatel'nymi apparatami na osnove DKMV-radiolinii [The problem of constructing a control channel of unmanned aerial vehicles based on dcmu-radio]. *Elektrosviaz*, 2014, no. 7, pp. 9-11 (in Russian).

44. Voitkevich K. L. *Metody upravleniia trafikom v nazemno-vozdushnykh setiakh sviasi* [Methods of traffic management in ground-air communication networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie "Polet", 1998, 375 p. (in Russian).

45. Alekhin S. V., Voitkevich K. L. Modelirovanie protokola marshrutizatsii dlia besprovodnykh mobil'nykh setei [Simulation of routing Protocol for wireless mobile networks]. *Elektrosviaz*, 2014, no. 7, pp. 7-8 (in Russian).

46. Voitkevich K. L., Rezvov A. V., Shanin V. N. Spetsializirovannye lokal'nye besprovodnye mobil'nye seti grazhdanskogo i voennogo naznacheniia [Specialized local mobile wireless network for civilian and military purposes] *Sistemy i sredstva sviasi, televideniia i radioveshchaniia*, 2013, no. 1-2, pp. 130-133 (in Russian).

47. Belousov E. L., Briantsev V. F., Voitkevich K. L., Keistovich A. V., Saifetdinov Kh. I. Issues of developing aviation radio communication equipment on "software-defined radio" principle. *Transactions of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev*, 2012, vol. 95, no. 2, pp. 11-18 (in Russian).

48. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Blakitnyi O. A. Problema postroeniia edinoi avtomatizirovannoi sistemy radiosviasi regiona i puti ee resheniia [The Problem of Constructing a Unified Automated Communication Systems of the Region and the Ways of its Solution]. *Konferentsiia "Problemy radiosviasi"* [Proceedings of the Conference "Problems of radio communication"]. Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «Polet», 1999 (in Russian).

49. Dmitriev A. N., Motin O. V. Model aviatsionnogo UKV kanala obmena dannymi [Model aviation ultrashort-waves communication channel]. *Tezisy dokladov nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC

“Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv”, 2002 (in Russian).

50. Dmitriev A. N., Maksimov A. V. Optimizatsiia aviatsionnykh setei obmena dannymi [Optimization of aviation networks data communication]. *Sbornik trudov X nauchno tekhnicheskoi konferentsii “Problemy radiosviasi” (Proceedings of the Conference Title «Problems of radio communication»)*, Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriiatiie “Polet”, 1999 (in Russian).

51. Motin O. V. Model' funktsionirovaniia aviatsionngo UKV kanala obmena dannymi [The Model of Functioning Aviation Ultrashort-waves Communication channel]. *XXIV voenno-nauchnaia konferentsiia molodykh uchenykh. (Proceedings of the Conference Title XXIV military-scientific conference of young scientists), Shchyolkovo, 30 tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut Ministerstva oborony Rossiiskoi Federatsii*, 2001 (in Russian).

52. Ivanov M. S., Ponamarev A. V., Makarenko S. I. Increasing data transmission rate technique in an aerial radio communication network for control of aircrafts through the adaptive frequency-time network resource distribution taking into account the transmitted teletraffic intensity. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 1, pp. 104-139. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139 (in Russian).

53. Ivanov M. S., Ponamarev A. V., Makarenko S. I. Simulation of the teletraffic that transmitted in a radio channel of control combat aircraft. Part 1. Non-stationary teletraffic intensity model at various flight stages. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 6, pp. 120-147. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147 (in Russian).

54. Ivanov M. S., Ponamarev A. V., Makarenko S. I. Simulation of the teletraffic that transmitted in a radio channel of control combat aircraft. Part 2. Extrapolation and forecasting of the intensity of non-stationary traffic. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 6, pp. 148-172. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-148-172 (in Russian).

55. Makarenko S. I., Ponamarev A. V. Study of the impact of timeliness of command transmission in an air radio communication network on the guidance quality of an aircraft at a target. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 126-131. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-2-126-131 (in Russian).

56. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Zadachi boevogo upravleniia edinoi sistemy vozdushnoi radiosviasi v komplekse punktov upravleniia aviatsionnoi gruppirovkoi regiona [The tasks of command and control of a unified system of air communication in the complex control of the aviation group of the region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).

57. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Funktsional'naia model' protsessa upravleniia aviatsii regiona [Functional model of the process control aviation in the region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh*

materialov kafedry №100. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2003 (in Russian).

58. Gimbitskii V. A. Analiz sistemy vozdushnoi radiosviazi v chastiakh istrebitel'noi aviatsii [Analysis of the air communication system in parts of fighter aircraft]. *Tematicheskii nauchno-tekhnicheskii sbornik filiala Voenno-vozdushnai inzhenernai akademii imeni N. E. Zhukovskogo*, Stavropol, 2005, no. 26 (in Russian).

59. Gimbitskii V. A., Bakum A. N. Sovershenstvovaniia boevogo upravleniia aviatsiei PVO [Improvement of Command and Control Air Anti-Aircraft Defence]. *Abstracts of Papers 18 Scientific Technical Conference of Cadet of Stavropol Higher Military Aviation Engineering College*, Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 1996 (in Russian).

60. Gimbitskii V. A. Analiz sistemy vozdushnoi radiosviazi v chastiakh dal'nei aviatsii i VTA [Analysis of the air communication system in parts of long-range aviation and military transport aircraft]. *Tematicheskii nauchno-tekhnicheskii sbornik filiala Voenno-vozdushnai inzhenernai akademii im. N.E. Zhukovskogo*, Stavropol, 2005, no. 26 (in Russian).

61. Kalinin V. I. Metodika otsenki veroiatnosti obsluzhivaniia abonentov s trebuemoi dostovernost'iu v zone obsluzhivaniia stantsii radiodostupa [The method of estimating the probability of customer service with the required accuracy in the service area of the radio access station]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov)*, 26 April 2011 (in Russian).

62. Kalinin V. I. Prostranstvennye modeli zon obsluzhivaniia sistem sviazi s podvizhnymi ob"ektami [Spatial models of service areas of communication systems with mobile objects]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov)*, 26 April 2011 (in Russian).

63. Kalinin V. I. Potokovye setevye modeli v sistemakh sviazi s podvizhnymi obektami [Streaming network models in communication systems with mobile objects]. *66 nauch. konf SPbNTORES A.S Popova (Abstracts of Paper 66 Scientific Technical Conference of St. Petersburg's Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communication Named after A. S. Popov)*, 26 April 2011 (in Russian).

64. Gotsutsov S. Iu. Sovershenstvovanie avtomatizirovannykh sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem na osnove tekhnologii kommutatsii paketov. Diss. kand. tehn. nauk [Improvement of Automated Systems of Air Traffic Control Based on the Technology of Packet Switching. Ph.D. Thesis]. Moscow, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2007, 211 p (in Russian).

65. Kalimulina E. Iu. Razrabotka i issledovanie analiticheskikh modelei nadezhnosti i ikh primeneniye dlia optimizatsii territorial'no-raspredeleennykh setei. Diss. kand. tehn. nauk [Research and development of analytical reliability models and their application to optimization of geographically distributed networks. Ph.D.

Tesis]. Moscow, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 2009, 222 p (in Russian).

66. Morozov A. N. *Modelirovanie aviatsionnykh nazemnykh fiksirovannykh setei peredachi dannykh dlia organizatsii vozdushnogo dvizheniia v usloviakh defitsita iskhodnykh dannykh*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Modeling aviation ground fixed data networks for air traffic management in conditions of deficiency of the original data. Ph.D. Tesis]. Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology, 211 p (in Russian).

67. Koliadov D. V., Prokhorov A. V. Vliianie iavleniia odnovremennoi peredachi vyzovov na rabotu sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem [Effect of Simultaneous Transmissions Phenomenon on Air Traffic Control Systems Functionality]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2014, no. 204, pp. 82-87 (in Russian).

68. Koliadov D. V., Prokhorov A. V. Realizatsiia perspektivnoi sistemy kommutatsii rechevoi sviazi dlia upravleniia vozdushnym dvizheniem [Implementation of Next-Generation Voice Communication System for Civil Aviation]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2013, no. 193, pp. 55-58 (in Russian).

69. Prokhorov A. V., Bondar' D. S. Primenenie apparatury shirokopolosnogo radiodostupa v lokal'nykh setiakh sviazi i peredachi dannykh sistem upravleniia vozdushnym dvizheniem [Application of Means of Broadband Radio Access in Local Communication Networks and Data Transmission for Systems of Air Traffic Management]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2012, no. 176, pp. 93-100 (in Russian).

70. Skorovarov A. S. Puti povysheniia effektivnosti funktsionirovaniia aviatsionnykh sredstv obmena informatsiei s PPRCh v usloviakh pomekh [Method of pseudorandom reorganization of working frequency]. *Sbornik trudov X Nauch.Tekhn. Konferentsii "Problemy radiosviasi" (Proceedings of the Conference «Problems of Radio Communication»)*. Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriiatie «Polet», 1999 (in Russian).

71. Semisoshenko M. A. *Upravlenie avtomatizirovannymi setiami dekametrovoi sviazi v usloviakh slozhnoi radioelektronnoi obstanovki* [The management of the automated networks decameter communication in a complex electronic environment]. Saint-Petersburg, Military Communications Academy, 1997. 364 p (in Russian).

72. Makarenko S. I. The countermeasures of the radio networks with the random multiple access by changing the radionet state to non-stable. *Radio electronics journal*, 2011, no. 9. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf> (accessed 26 August 2016) (in Russian).

73. Makarenko S. I. Estimation of quality of service in radio network with package transmitting in unstationary mode under influence of external destructive factors. *Journal of Radio Electronics*, 2012, no. 6. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (accessed 21 December 2017) (in Russian).

74. Makarenko S. I. Suppression of a Net-Centric Control System with Radio Cyber Attacks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 15-59. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10402 (in Russian).

75. Peregudov M. A., Steshkovoy A. S. Digital radio networks centralized elements synchronization model with random multiple access to the CSMA/CA type medium. *SPIIRAS Proceedings*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 128-154 (in Russian).

76. Peregudov M. A., Steshkovoy A. S., Boyko A. A. Probabilistic random multiple access procedure model to the CSMA/CA type medium. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 59, no. 4, pp. 92-114 (In Russian).

77. Shorin O. A. *Metody optimal'nogo raspredeleniia chastotno-vremennogo resursa v sistemakh podvizhnoi radiosvazi. diss. doktora tekhn. nauk* [Methods the Optimal Allocation of Time-Frequency Resource in Mobile Radio Systems. Dr. habil. thesis]. Moscow, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 2005, 351 p (in Russian).

78. Pastukhov A. S., Ivanov Yu. A. Ocenka vzaimnogo vliianiia samopodobnykh Internet i videotrafika pri peredache v standarte DVB/IP/MPEG-4 po gibridnim setiam sputnikovoi svyazi [Interference estimation of self-similar internet and video traffics on transmission throw hybrid satellite networks by DVB/IP/MPEG-4 standard]. *Proceedings of Chuvash State University*, 2008, no. 2, pp. 160-169 (In Russian).

79. Pastuhov A. S., Razumov Ja. M., Okulov K. Ju. Modelirovanie sovmestnoj peredachi video- i Internet-trafika v standarte DVB/IP/MPEG-2 v gibridnykh sputnikovyyh setjah svyazi [Simulation of joint transmission of video and Internet traffic in DVB/IP/MPEG-2 standard in hybrid satellite communication networks]. *Electrical and information complexes and systems*, 2007, vol. 3, no. 2, pp. 56-60 (in Russian).

80. Cvetkov K. Ju., Akmolov A. F., Efimov S. N. Konceptcija postroenija raznovysotnoj mnogosputnikovoj sistemy svyazi s mobil'nymi abonentami: algoritm rasshirjajushhegosja poiska mobil'nyh abonentov [The concept of building a multi-satellite multi-altitude communication system with mobile subscribers: an algorithm for expanding the search for mobile subscribers]. *Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*, 2014, no. 642, pp. 41-48 (in Russian).

81. Cvetkov K. Ju., Rodionov A. V., Akmolov A. F. Konceptcija postroenija raznovysotnoj mnogosputnikovoj sistemy svyazi s mobil'nymi abonentami: ballisticheskoe postroenie [The concept of building a multi-satellite multi-altitude communication system with mobile subscribers: ballistic construction]. *Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*, 2012, no. 634, pp. 45-55 (in Russian).

82. Cvetkov K. Ju., Rodionov A. V., Akmolov A. F. Konceptcija postroenija raznovysotnoj mnogosputnikovoj sistemy svyazi s mobil'nymi abonentami: varianty realizacii bortovogo kommunikacion-nogo oborudovanija sputnika-retransljatora [The concept of building a multi-satellite multi-satellite communication system with mobile subscribers: options for the implementation of on-board communication equipment of a repeater satellite]. *Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*, 2012, no. 635, pp. 5-13 (in Russian).

83. Cvetkov K. Ju., Akmolov A. F., Efimov S. N. Konceptija postroenija raznovysotnoj mnogosputnikovoj sistemy svjazi s mobil'nymi abonentami: principy postroenija shljuzovyh stancij i appa-ratury potrebitelej [The concept of building a multi-satellite multi-altitude communication system with mobile subscribers: principles of building gateway stations and consumer equipment]. *Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*, 2013, no. 638, pp. 16-24 (in Russian).

84. Makarenko S. I. Convergence Time of IGP Routing Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 2, pp. 45-98. DOI: 10.24411/2410-9916-2015-10203 (in Russian).

85. Makarenko S. I. *Computer systems, networks and telecommunication*. Stavropol, Sholokhov Moscow State University for the Humanities (Stavropol Branch) Publ., 2008, 352 p (in Russian).

86. Aven O. I., Gurin N. N., Kogan Ia. A. *Otsenka kachestva i optimizatsiia vychislitel'nykh sistem* [Quality assessment and optimization of computing systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 210p.

87. Adadurov S. E., Astanin A. V., Maltsev G. N., Riazanov S. N., Stepanov M. G. and etc. *Modelirovanie setevykh sputnikovykh sistem peredachi informatsii* [Simulation of network of satellite communication systems]. Moscow, The Ministry of Defence, 1996. 125 p. (in Russian).

88. Cvetkov K. Ju., Rodionov A. V., Akmolov A. F. Konceptija postroenija raznovysotnoj mnogosputnikovoj sistemy svjazi s mobil'nymi abonentami: propusknaja sposobnost' mezhsputnikovykh i fi-dernyh radiolinij [The concept of building a multi-satellite multi-satellite communication system with mobile subscribers: the bandwidth of inter-satellite and fiber radio lines]. *Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*, 2011, no. 633, pp. 108-123 (in Russian).

89. Legkov K. E. Methods of increase productivity of wireless mesh-networks of a special purpose. *T-Comm*, 2011, no. 3, pp. 46-48 (in Russian).

90. Kulakov M. S. Analysis of functioning of mobile self-organizing networks MANET on the media access control layer MAC. *T-Comm*, 2014, no. 10, pp. 39-42 (in Russian).

91. Kulakov M. S. Primenenie algoritmov samoorganizatsii dlja rezhima VDL-2 [Application of algorithms of self-organization for VDL mode-2]. *Fundamentalnye problemy radioelektronnogo priborostroeniia*, 2012, vol. 12, no. 5, pp. 58-62 (in Russian).

92. Amosov A. A., Dubinskii Iu. A., Kopchenova N. P. *Vychislitel'nye metody dlja inzhenerov* [Computational Approach for Engineers]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1994, 544 p (in Russian).

93. Patenkov D. G., Lomakin A. A. Assessment of stability of the satellite channel of control of unmanned aerial vehicles at influence of intentional interference. *Radioengineering*, 2019, vol. 17, no. 11, pp. 43-50 (in Russian).

94. Patenkov D. G., Velikoivanenko V. I. Sintez mnogofunkcional'nykh adaptivnykh informacionno-upravljajushhih sistem kompleksov s BPLA pri sovместnom funkcionirovanii s celevymi kosmicheskimi segmentami orbital'nykh

gruppirovok kosmicheskikh apparatov [Synthesis of multifunctional adaptive information and control system complexes with BOL in joint operation with the target space segments of orbital groupings of spacecraft]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2022, vol. 76, no. 6, pp. 49-68 (in Russian).

95. Mikhailov R. L. *Pomekhozashchishchennost' transportnykh setei svyazi spetsial'nogo naznachenii. Monografiia* [Noise immunity of transport networks for special purposes. Monograph]. Cherepovets, The Cherepovets higher military engineering school of radio electronics, 2016. 128 p (in Russian).

96. Mikhailov R.L. *Opisatelnye modeli sistem sputnikovoj svyazi kak kosmicheskogo jeshelona telekommunikatsionnykh sistem specialnogo naznachenija. Monografija* [Descriptive models of satellite communication systems as a space echelon of special-purpose telecommunications systems. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2019. 150 p. (in Russian).

97. Dvornikov S. V. Procedure of evaluation of imitation stability of robotic devices control channels. *Radio industry*, 2016, no. 2, pp. 64-69 (In Russian).

98. Dvornikov S. V., Popov E. A., Krychko A. F., Dvornikov S. S., Tomashevich S. V. Proposals for increasing the immunity of radio systems control channels. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 11, pp. 95-106 (In Russian).

99. Dvornikov S. V., Pshenichnikov A. V., Burikin D. A., Zheleznyak A. V., Dvornikov S. S., Ryabenko D. S. Transformation technique constellation QAM signals. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki*, 2014, no. 4, pp. 39-44 (In Russian).

100. Dvornikov S. V., Popov E. A., Ivanov R. V. Protection of robotics control channels. *Radiotekhnika*, 2018, no. 12, pp. 62-68 (In Russian).

101. Dvornikov S. V., Pogorelov A. A., Dvornikov S. S., Ivanov R. V. Proposals for restoring signals in control channels of unmanned aerial vehicles. *Questions of radio-electronics, the TV equipment series*, 2020, no. 1, pp. 91-97 (In Russian).

102. Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Morozov E. V. Model of radiotechnical systems of unmanned apparatus under conflict. *Questions of radio-electronics, the TV equipment series*, 2020, no 1, pp. 84-90 (In Russian).

103. Baluk A. A., Krupenin A. V., Mahov D. S., Finko O. A. Method for two-dimensional interference-resistant information encoding in spatial parallel radio channels of robotic complexes. Patent Russia no. 2021102009, 28.01.2021.

104. Samoylenko D. V., Ereemeev M. A., Finko O. A. Method for providing integrity information group robotic systems cryptocoding based structures. *Information Security Problems. Computer Systems*, 2017, no. 1, pp. 70-78 (In Russian).

105. Samoylenko D. V., Finko O. A., Ereemeev M. A. Distributed processing and data protection in the group of complexes with unmanned aerial vehicles. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2017, no. 4, pp. 93-100 (In Russian).

106. Samoylenko D. V., Finko O. A. Ensuring the integrity of information in an autonomous group of unmanned aerial vehicles by methods of modular arithmetic. *Enginery Problems. Series16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2017, vol. 107-108, no. 5-6, pp. 20-27 (In Russian).

107. Samoylenko D. V., Finko O. A. Ensuring the integrity of information in an autonomous group of unmanned aerial vehicles by methods of modular arithmetic. *Science. Innovations. Technologies*, 2016, no. 4, pp. 77-90 (In Russian).

Статья поступила 20 сентября 2022 г.

Информация об авторах

Иванов Максим Сергеевич – кандидат технических наук. Старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: сети и системы авиационной радиосвязи. E-mail: point_break@rambler.ru

Адрес: 394074, Россия, Воронеж, Старых Большевиков, д. 54а.

Аганесов Артур Валерьевич – соискатель ученой степени кандидата наук. Помощник начальника учебного отдела ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: маршрутизация информационных потоков и ретрансляция сообщений в воздушно-космических сетях связи. E-mail: aganesov.artur@yandex.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а.

Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, доцент. Ведущий научный сотрудник. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН. Профессор кафедры информационной безопасности. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., д. 39.

Bandwidth increasing of a joint aerospace communications network

Part 1. Models and method of bandwidth increasing of the united network with used Mesh-technologies

M. S. Ivanov, A. V. Aganesov, S. I. Makarenko

Problem statement: The Aerospace forces of Russia are used to solve the special military tasks in abroad, where global controlling of aircraft is not always possible. The global control of aircraft can be achieved by coupling the air radio communication networks (ARCN) for aviation control through the satellite communication systems (SatComm) due to SatComm provide global coverage over the entire territory of the Earth. At the same time, such coupling needs the solution some technological tasks, such as: the coordination of data exchange rates, the development of network protocols for the joint functioning of ARCN and SatComm, the development of routing protocols, as well as the ways for high bandwidth of air and space radio networks. **The aim of this paper is** to increase the capacity of the Joint AeroSpace Communications Network (JASCN) for aviation control through the development of models and a method of decentralized routing of information flows in air and space subnetworks of JASCN. **Novelty.** Elements of the models novelty are to review of JASCN as a multi-level system, the core of which is a SatComm, and the lower level is formed by several ARCNs, as well as take into account using of Mesh technology specifics in ARCN when a model of decentralized routing is formed. Elements of the method novelty are the joint consideration of both

air radio subnetworks specifics, as well as used of the Newton method to obtain a solution for balancing and routing traffic in JASCN. **Results of the study** are the model of JASCN with hierarchical routing of information flows through the SatComm; the model of JASCN with decentralized routing of information flows through the SatComm and adjacent ARCNs, which is based on Mesh technology; the method for distributing of information flows through the air and space subnetworks of JASCN. **Practical significance:** using of models and techniques, which are developed in this study, allows achieving high bandwidth of JASCN and global control for aircraft of the Russian Aerospace Forces.

Keywords: air radio communication networks, satellite communication system, communication organization, military aviation, aircraft control.

Information about Authors

Maxim Sergeevich Ivanov – Ph.D. of Engineering Sciences. Senior Lecturer of Department of Exploitation of Aircraft Electronic Equipment. Military Training and Research Center of the Air Force “Military Air Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and J. A. Gagarin”. Field of research: systems and networks aeronautical radio communication. E-mail: point_break@rambler.ru

Address: 394074, Russia, Voronezh, Old Bolsheviks str., 54a.

Artur Valerevich Aganesov – Doctoral Student. Assistant of head of training department. Military Training and Research Center of the Air Force “Military Air Academy Named After Professor N. E. Zhukovsky and Ju. A. Gagarin”. Field of research: traffic routing and message relay in aerospace communication networks; Mesh-networks. E-mail: aganesov.artur@yandex.ru

Address: Russia, 355000, Voronezh, Street of Old Bolsheviks, 54a.

Sergey Ivanovich Makarenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Leading Researcher. St. Petersburg Federal research center of the Russian Academy of Sciences. Professor of Information Security Department. Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: makserg@yandex.ru

Address: 197376, Russia, Saint Petersburg, 14th Linia, 39.