

УДК 621.391

Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов

Часть 1. Модели и методика повышения скорости передачи данных

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

Постановка задачи: любой вооруженный конфликт современного времени начинается с применения авиации. Авиация решает большой спектр задач и одной из наиболее важных задач – это ведение воздушной разведки. При ее проведении большое внимание уделяется оперативности доставки разведывательных данных потребителям, так как именно от оперативности доставки разведанных зависит решение многих задач вооруженного конфликта. Для обеспечения передачи данных с борта летательного аппарата (ЛУ) на пункт управления (ПУ) и обработки информации применяется существующая каналобразующая аппаратура, которая в большинстве случаев не удовлетворяет современным требованиям по скорости передачи данных. Одним из вариантов повышения скорости передачи данных является разработка решений, ориентированных на адаптивное использование энергетического, сигнального и частотного ресурсов сети воздушной радиосвязи (СВРС), которая обеспечивает управление разведывательными ЛА и передачу данных наблюдения на ПУ. **Целью данной работы** является разработка результатов, ориентированных на адаптивное распределение энергетического, сигнального и частотного ресурсов СВРС и организацию высокоскоростных многоканальных СВРС с целью повышения оперативности обмена данными. В 1-й части научного исследования представлены модели и методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного ресурсов сети. **Элементами новизны представленных в работе моделей и методики** является учет технических особенностей следующих процессов: а) выбор типа направленной антенной системы для ЛА по критерию обеспечения наибольшего энергетического выигрыша для бюджета радиолинии; б) компенсация пространственных и временных параметров колебания точки прицеливания диаграммы направленности антенной системы, размещенной на ЛА; в) учет особенностей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» в процессе полета ЛА в рамках гауссовской, райевской и рэлеевской моделей распространения радиоволн; г) формирование вариантов применения технологии АСМ (Adaptive Coding and Modulation), которая используется для адаптивного к помеховым условиям выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в отдельном частотном канале СВРС; д) определение для каждого ЛА необходимого числа каналов СВРС, достаточного для передачи трафика разведывательных данных с требуемым качеством обслуживания. **Практическая значимость:** предложенные результаты позволят обеспечить повышение скорости передачи данных в СВРС без увеличения используемой полосы частот в благоприятных помеховых условиях. Итоговые значения выигрыша в скорости передачи

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов М. С., Шушков А. В., Макаренко С. И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 1. Модели и методика повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 125-219. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-125-219

Reference for citation:

Ivanov M. S., Shushkov A. V., Makarenko S. I. Increasing the data transmission rate in the air radio network of aircrafts controlling due to adaptive use of energy, signal and frequency resources of network. Part 1. Models and method of the data transmission rate increasing. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 1, pp. 125-219 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-125-219

данных при использовании предлагаемой методики представлены во 2-й части данного научного исследования.

Ключевые слова: управление военной авиацией, сеть воздушной радиосвязи, скорость передачи данных, антенная система, энергетический ресурс, сигнал, частотный ресурс, канал множественного доступа.

Введение

В настоящее время стремительно возрастает роль авиации Воздушно-космических сил (ВКС) для отстаивания геополитических интересов Российской Федерации (РФ). Одновременно с возрастанием интенсивности боевого применения летальных аппаратов (ЛА) авиации ВКС выявляются проблемные технические аспекты их эксплуатации и управления. Одним из таких аспектов является несоответствие принципов организации связи в сетях воздушной радиосвязи (СВРС) современным требованиям по скорости передачи разведывательных данных на пункты управления (ПУ), что особо остро отражается на ЛА, ведущих воздушную разведку. Анализ технических средств разведки, размещаемых на разведывательных ЛА, и оценка интенсивности трафика, поступающего от них, показали, что средства связи, размещенные на ВС, не позволяют им передавать данные воздушной разведки в режиме реального времени.

Основными типовыми недостатками технологических решений, используемых для передачи данных с ЛА, являются: относительно низкая скорость радиолиний, используемых для организации обмена данными с ЛА; использование топологии радиолиний «точка-точка» между ЛА и ПУ; отсутствие интеграции имеющихся технологических решений по организации высокоскоростной радиосвязи в состав воздушного эшелона объединенной автоматизированной цифровой системы связи (ОАЦСС) Вооруженных сил (ВС) РФ в режиме совместимости с существующими СВРС военной авиации.

Анализ предметной области исследования показал, что современные и перспективные средства радиосвязи воздушного эшелона системы связи ВС РФ, работающие в сантиметровом диапазоне длин волн (СМВ), позволяют организовать высокоскоростные СВРС со скоростью передачи данных до 34 Мбит/с на основе протокола случайного множественного доступа (протокол CSMA/CA) в одном частотном канале. Эти средства связи могут быть использованы для организации высокоскоростной передачи данных с разведывательных ЛА на наземные или воздушные ПУ с требуемой скоростью в многоканальном режиме «точка-многоточка» и «многоточка-многоточка» при этом, сохраняя режим совместимости, в части организации связи, с другими СВРС воздушного эшелона ОАЦСС ВС РФ.

Вместе с тем технологические решения для формирования многоканальных СВРС, как в существующей аппаратуре передачи данных (АПД) воздушного эшелона, так и в специализированных командных радиолиниях управления (КРУ) передачи разведывательных данных, в настоящее время отсутствуют. В данном исследовании в основу формирования технологических решений для организации многоканальных СВРС и повышения скорости обмена данными

ми положено адаптивное распределение энергетического, сигнального и частотного ресурса СВРС.

Таким образом, можно сформулировать противоречие в практике – *между* необходимостью обеспечения высокой скорости передачи данных в СВРС и отсутствием технологических решений по организации высокоскоростных многоканальных СВРС, совместимых с существующими технологиями связи воздушного эшелона системы связи ВС РФ и реализующими адаптивное распределение энергетического, сигнального и частотного ресурса СВРС к интенсивности передаваемого трафика.

Для разрешения данного противоречия в работе сформулирована актуальная цель исследования – повышение скорости передачи данных сети воздушной радиосвязи за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевого ресурса СВРС.

1. Анализ сети воздушной радиосвязи, как объекта исследования, и постановка задачи повышения скорости передачи данных в ней

1.2. Оценка интенсивности трафика, поступающего от технических средств разведки

Авиация решает большой спектр задач и одна из самых сложных из них – это ведение воздушной разведки. При ее проведении большое внимание уделяется оперативности доставки разведданных потребителям. Именно от оперативности доставки разведданных зависит решение многих задач вооруженного конфликта. Для обеспечения передачи разведданных с ЛА/БЛА на ПУ применяется существующая каналобразующая аппаратура имеет относительно низкие скорости передачи данных, которые, в большинстве случаев, не удовлетворяют современным требованиям по скорости передачи и оперативности доставки разведданных.

Таблица 1 – Поток трафика, формируемые техническими средствами разведки на борту ЛА/БЛА наблюдения [17]

Тип аппаратуры разведки	Кол-во аппаратуры	Интенсивность потока данных с учетом предварительного сжатия
ТВ-камера	1-4	2-6 Мбит/с
Фотокамера	1-4	до 4 Мбит/с
Тепловизионная аппаратура	1-4	до 0,5 Мбит/с
Лазерная аппаратура	1	до 0,5 Мбит/с
РЛС	1	до 10 Мбит/с
РТР аппаратура (с обработкой сигналов РЛС на борту)	1	0,2-1 Мбит/с
РР аппаратура (с обработкой сигналов связных РЭС на борту, без передачи радиопереговоров)	1	0,2-1 Мбит/с

Особенностью бортового комплекса разведки (БКР) ЛА/БЛА является то, что технические средства разведки формируют значительные потоки «сырых данных», которые могут достигать значений до 600-800 Мбит/с. Существующие высокоэффективные способы сжатия и кодирования видео- и радиолокационных данных позволяют снизить эти потоки данных до 20-150 Мбит/с (табл. 1), однако эти значения все равно превышают возможности существующей каналообразующей аппаратуры СВРС. Основной вклад в формирование больших потоков данных вносят ТВ- и фотокамеры, а также РЛС. При этом, на борту ЛА, как правило устанавливается несколько ТВ- и фотокамер – переднего, заднего и бокового обзоров.

1.3. Анализ технических средств и технологических решений по организации сети воздушной радиосвязи

В настоящее время в соответствии с перспективной концепцией построения систем связи специального назначения предполагается переход к многоэшелонированному принципу построения систем связи ВС – рис. 1.

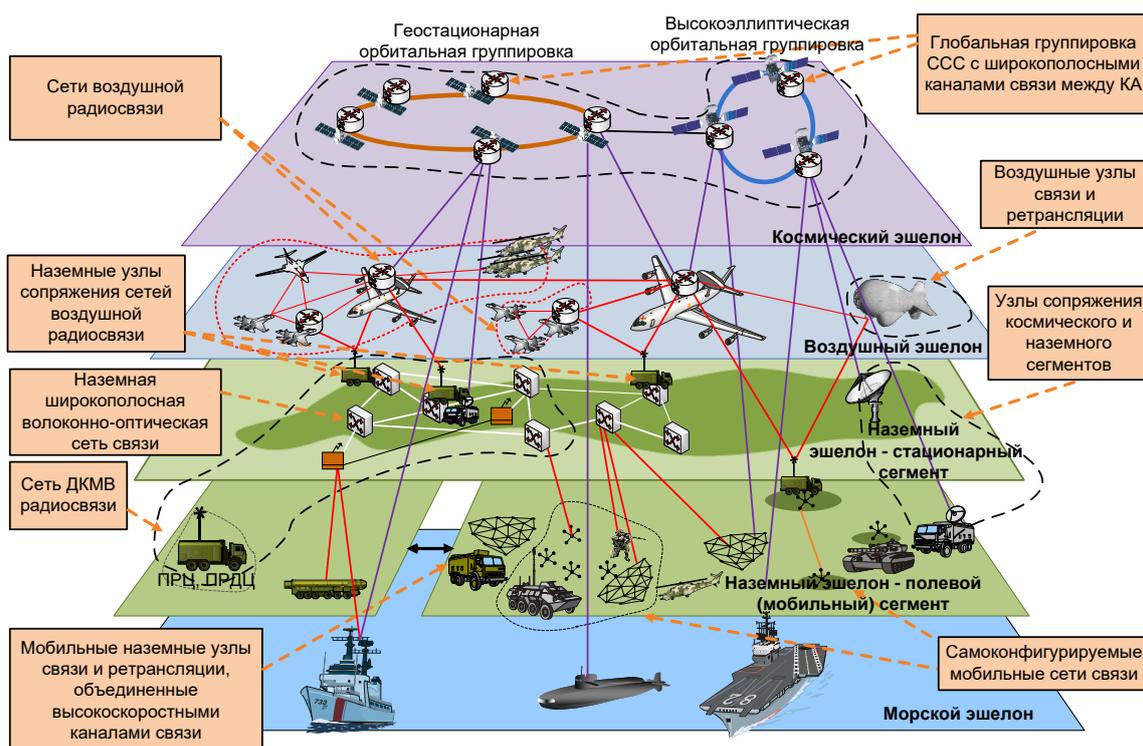


Рис. 1. Многоэшелонированное построение системы связи ВС РФ

Для управления одиночными и групповыми действиями ЛА военной авиации в составе системы связи ВС РФ организуется воздушный эшелон СВРС. Основные технологические решения в части организации воздушного эшелона представлены в работах [1, 8, 9]. Технической основой воздушного эшелона являются средства авиационной радиосвязи, посредством которых и осуществляется передача команд с ПУ на борт ЛА, их воспроизведение для ре-

шения задач траекторного управления, информационного обеспечения и управления аппаратурой ЛА.

Отдельные радиолинии управления организуются в виде СВРС на отдельных выделенных частотах, внутри которых ведется информационных обмен и передача команд между ЛА или управляемых групп ЛА, или ЛА конкретной группы. Структура типовой СВРС организованной для командного управления ЛА разведывательной авиации приведена на рис. 2.

Анализ современных и перспективных технических решений по организации СВРС, представленных в работах [1, 2, 8-14], показал, что в основу воздушного эшелона связи 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.

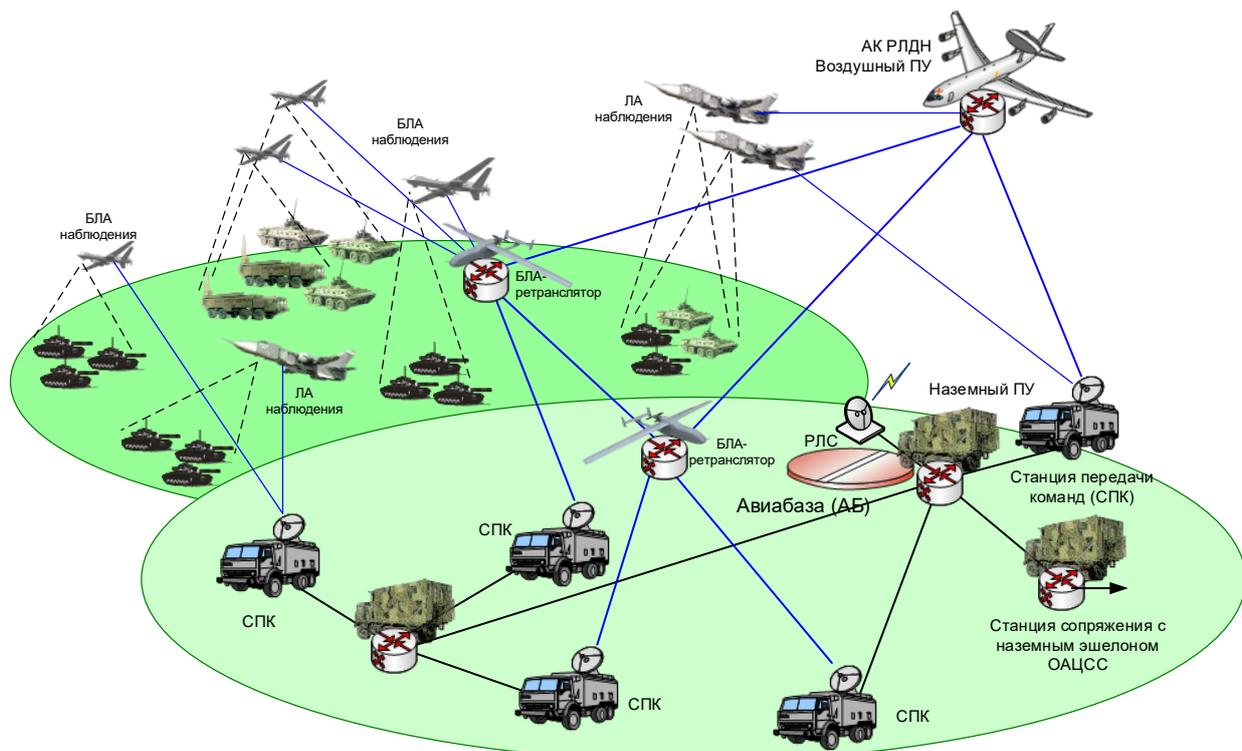


Рис. 2. Структура типовой СВРС управления ЛА

Как указывается в работе [2], в настоящее время задачи управления ЛА решаются путем организации КРУ и СОД при обмене информацией по направлениям ПУ – ЛА (ЛА – ПУ).

Технической основой перспективных СОД воздушного эшелона станут комплексы связи, которые не только обеспечат ЛА/БЛА фронтальной, истребительной и разведывательной авиации высокоскоростной цифровой связью, но и будут использоваться совместно с наземными подразделениями сухопутных войск. Некоторые ТТХ перспективного комплекса связи, значимые для решения задач ретрансляции информационных потоков, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Некоторые тактико-технические характеристики (ТТХ) перспективного комплекса связи [2, 15, 16]

№	Характеристика	Значение
1	Скорость передачи данных, кбит/с: - ДКМВ диапазон - МВ-ДМВ диапазон - ОСНОД (эффект.) - СМВ диапазон - спутниковая линия связи ЕССС-2 (ЕССС-3) ДМВ-2	до 2,4 до 16 до 40 (100) до 34400 до 2,4 (до 2048)
2	Количество одновременно обслуживаемых сетей	до 38
3	Количество направлений связи: - ДКМВ диапазон - МВ-ДМВ диапазон - ОСНОД (эффект.) - СМВ диапазон - спутниковая линия связи ЕССС-2 (ЕССС-3) ДМВ-2	1 2 1 1 1
4	Дальность связи, км: - в направлении «земля-борт» для ДКМВ диапазона - в направлении «земля-борт» для МВ-ДМВ диапазона, ОСНОД - в направлении «борт-борт» для МВ-ДМВ диапазона, ОСНОД	1500 350 500

Таким образом, каналобразующая аппаратура авиационной радиосвязи позволяет организовать многоканальные (многочастотные) СВРС в КВ диапазоне в полосе частот 2-30 МГц с шириной полосы канала до 100 Гц со скоростью передачи данных до 1,2 кбит/с в каждом канале. В УКВ диапазоне многоканальные (многочастотные) СВРС могут быть организованы в штатных диапазонах авиационных частот радиосвязи 30-88, 100-145, 156-174 и 220-400 МГц с шириной полосы канала 25 кГц со скоростью передачи данных до 16 кбит/с в каждом канале.

При этом для организации высокоскоростной передачи УКВ диапазон 30-88, 100-145, 156-174 и 220-400 МГц можно представить, как массив 12040 типовых каналов с шириной по 25 кГц с потенциальной скоростью передачи в канале 16 кбит/с и потенциальной текущей суммарной емкостью 192,64 Мбит/с.

Дополнительно для высокоскоростной передачи данных можно задействовать СМВ диапазон (4-6 ГГц), в котором могут формироваться каналы с полосой частот по 140 МГц и со скоростью передачи до 34,3 Мбит/с.

Информационный обмен внутри СВРС ведется с помощью универсальных кодограмм воздушной связи (УКВС). При этом на максимальное время доставки УКВС накладываются ограничения, связанные с режимом реального времени управления авиацией и необходимостью передачи информационного трафика, критичного к задержкам (речь, видео). Несмотря на то, что существующие стандарты передачи информационных сообщений управления ЛА определяют граничные значения времени доведения сообщений в несколько секунд, к сообщениям голосового управления, а также к трафику фото- и видеоданных, поступающих от разведывательных средств на ЛА в режиме реального времени, предъявляются гораздо более жесткие требования информации (табл. 3, 4) [17].

Таблица 3 – Допустимые значения параметров качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика [17]

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}

Таблица 4 – Требования к качеству услуг (QoS), предоставляемых мультисервисными сетями связи [17]

Тип данных	Название услуги	Требуемая скорость передачи	Параметры качества услуги		
			Задержка, мс	Джиттер	Потери, %
Аудио	Телефония	4-64 кбит/с	< 150 мс (отличное QoS); < 400 мс (допустимое QoS)	<1 мс	<3%
	Передача голоса	4-32 кбит/с	< 1 с (для воспроизведения); < 2 с (для записи)	<1 мс	<3%
	Звуковое вещание	16-128 кбит/с	<10 с	<<1 мс	<1%
Видео	Видеоконференция	>384 кбит/с	< 150 мс (отличное QoS); < 400 мс (допустимое QoS)		<1%
Данные	Просмотр web-страниц	≈10 кбит/с	< 2 с/стр. (отличное QoS); < 4 с/стр. (допустимое QoS)	-	0
	Передача файлов	10 кбит/с 10 Мбит/с	< 15с (отличное QoS); < 60 с (допустимое QoS)	-	0
	Передача изображений	100 кбит/с	< 15с (отличное QoS); < 60 с (допустимое QoS)	-	0
	Доступ к электронной почте	<10 кбит/с	< 2 с (отличное QoS); < 4 с (допустимое QoS)	-	0
	Факс	≈10 кбит/с	<30с/ стр.	-	< 10^{-6} BER

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 [18, 19]:

- АМСД «запрос-ответ», в соответствии с которым передача сообщений абонентам осуществляется только в ответ на полученный запрос;

- АМСД «по расписанию», отличающийся 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), который представляет возможность передавать сообщения в любой свободный момент времени на основе случайного обращения абонентов к КМД.

Каждому вышеприведенному АМСД соответствует своя модель доступа абонентов к сети, на базе которой ведутся исследования СВРС, построенной на данном типе АМСД. Однако исследования [18-20] показали, что эффективность различных АМСД по критерию максимизации вероятностно-временных характеристик (ВВХ) доставки сообщения существенно отличается. Анализ результатов моделирования, представленных в работах [18-20], показал, что именно АСМСД обладает наилучшими ВВХ среди всех АМСД. К достоинствам АСМСД 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 АСМСД рассматривается, как наиболее перспективный АМСД для применения в СВРС. Таким образом, можно 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 ПУ и ЛА. Таким образом, модель СВРС должна соответствовать КМД с 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).

2. Формирование актуальных технических направлений решения задачи повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи

Подводя итог анализу предметной области исследования, можно сделать вывод, что современные и перспективные средства радиосвязи воздушного эшелона системы связи ВС РФ, работающие в СМВ диапазоне позволяют организовывать высокоскоростные СВРС передачи данных со скоростью до 34 Мбит/с на основе протокола CSMA/CA на одном условном канале. Эти средства связи могут быть использованы для организации высокоскоростной передачи данных с ЛА на наземные или воздушные ПУ с требуемой скоростью в многоканальном режиме «точка-многоточка» и «многоточка-многоточка», при этом сохраняя режим совместимости, в части организации связи, с другими СВРС воздушного эшелона системы связи ВС РФ.

Вместе с тем технологические решения для формирования многоканальных СВРС, как в существующей АПД воздушного эшелона, так и в специали-

зированных КРУ передачи разведывательных данных, в настоящее время отсутствуют.

Одним из вариантов организации высокоскоростных многоканальных СВРС для своевременной и полной передачи разведывательных данных с ЛА является разработка решений, ориентированных на адаптивное распределение сигнального ресурса СВРС между частотными каналами СВРС, пропорционально интенсивности передаваемого трафика и с учетом текущего этапа полета ЛА.

Под распределением сигнального ресурса понимается использование технологии адаптивного кодирования и модуляции (Adaptive Coding and Modulation – ACM), в которой комбинация типа сигнала и скорости кодирования выбирается адаптивно к складывающимся помеховым условиям и условиям распространения радиоволн. При этом, в отличие от существующих технических решений, используемых в КРУ, линиях радиосвязи (ЛРС) передачи разведанных, помехоустойчивые, но низкоскоростные сигналы BPSK и QPSK, предполагается дополнительно использовать более информационно-ёмкие сигналы: 8PSK, 16QAM, 64QAM. Аналогичный подход предлагается и для помехоустойчивого кодирования, целесообразным является переход от использования фиксированной скорости кода к сверточному кодированию с переменной скоростью, которая также выбирается адаптивно в зависимости от складывающихся помеховых условий и условий распространения радиоволн. Для повышения энергетического выигрыша и реализации технологии ACM рассматривается переход от использования всенаправленных антенных систем к направленным, с большим коэффициентом направленного действия (КНД).

Так же рассматривается подход адаптивного распределения частотного ресурса, под которым понимается выбор конкретного числа условных частотных каналов, выделяемых каждому ЛА в многоканальной СВРС на различных этапах полета ЛА, с учетом интенсивности передаваемого трафика, формируемого техническими средствами разведки. При этом подразумевается, что каждый частотный канал функционирует в режиме АСМСД по протоколу CSMA/CA.

3. Анализ научно-методического аппарата и результатов известных решений в области повышения скорости передачи данных сети воздушной радиосвязи

Общим проблемам управления авиацией при решении задач нанесения ударов и отражения воздушного нападения посвящены работы научной школы академика РАН Е.А. Федосова [3]. Вопросам управления авиации с АК РЛДН посвящена фундаментальная работа В.С. Вербы [4]. Основам организации радиоуправления ЛА посвящены работы научной школы В.И. Меркулова [5, 6]. При этом особенности управления БЛА рассматриваются в работах К.Л. Войткевича, А.А. Сулиммы, П.А. Зац [21], С.И. Макаренко [7], А.Р. Гайдунка, С.Г. Капустина, И.А. Каляева [22, 23]. Как отмечается в данных работах современной тенденцией развития систем управления ЛА и БЛА является их переход к сетевым принципам. Особенности реализации данного сете-

центрического принципа управления силами и средствами представлены в работах В.С. Вербы, С.С. Поливанова [24], Е.А. Кондратьева [25, 26], С.И. Макаренко [27], М.С. Иванова, С.И. Макаренко, С.А. Попова [28-30].

При этом, как подчеркивается в работах В.С. Вербы и В.И. Меркулова [1, 4-6, 31], для управления авиацией первостепенное значение имеет организация СВРС. Именно СВРС является технической основой доведения команд управления и информации о тактической обстановке управляемым ЛА, и вопрос рациональной организации связи является одним из важнейших вопросов управления ЛА при ведении ими боевых действий.

Переход к сетцентрическим принципам управления авиацией, а особенно разведывательной авиацией, потребует пересмотра принципов организации авиационной радиосвязи и информационного обеспечения. А именно, повышения скорости передачи данных в СВРС, в том числе и в интересах повышения своевременности (оперативности) и полноты передаваемых разведывательных данных с разведывательного ЛА. Обеспечение повышения данного показателя качества СВРС, а также его адаптация к передаваемым потокам трафика в канале радиосвязи возможно за счет перехода к прогнозированию интенсивности трафика, поступающего от ЛА, и в дальнейшем на основе этого прогноза – распределению сигнального ресурса СВРС.

Вопросам совершенствования СВРС военной и гражданской авиации посвящены работы: С.И. Макаренко [17, 32-34], М.С. Иванова [27, 35-38], В.И. Меркулова [1, 5, 6, 9], А.В. Комякова [11], К.Л. Войткевича [12-14, 21], А.А. Сулима [21], Е.А. Белоусова [12-14, 39], А.В. Кейстовича [12, 13, 40], Х.И. Сайфетдинова [12-14, 39], С.В. Киткаева [41], А.Н. Дмитриева [18, 19, 42, 43], О.В. Мотина, А.В. Максимова [18, 19], О.А. Блакитного [42], В.И. Калинина [44-46], С.Ю. Гоцуцова [47].

Общие принципы организации связи при управлении воздушным движением представлены в работах В.А. Силякова, В.Н. Красюка [48], Б.И. Кузьмина [49], В.К. Кульчицкого [50, 51].

При этом необходимо отметить, что результаты вышеуказанных работ только частично применимы к СВРС управления ЛА военной авиации. Для этих СВРС свойственны такие специфические особенности как: высокая интенсивность информационного обмена на конечных этапах полета ЛА в район боевых действий (БД) и, непосредственно, боевого применения ЛА; высокие требования по устойчивости и помехозащищенности радиосвязи к применению средств радиоэлектронного подавления (РЭП); высокая динамика изменения топологии СВРС; территориальная ограниченность стационарной наземной инфраструктуры связи и высокая интенсивность изменения конфигурации сопряжения узлов СВРС с наземными узлами. Все эти особенности не учитываются в вышеуказанных работах, которые посвящены вопросам управления гражданской авиации.

Общие принципы организации связи при управлении боевой авиацией представлены в работах В.С. Вербы [8], В.И. Меркулова [1, 5, 6, 8, 9], Е.А. Федосова [2], С.И. Макаренко, В.И. Сапожникова, Г.И. Захаренко, В.Е. Федосеева [10].

Вопросы маршрутизации информационных потоков и команд управления ЛА именно боевой авиации в СВРС были рассмотрены в работе К.Л. Войткевича [52]. В этой работе описаны основные принципы маршрутизации трафика в СВРС, а также в наземных сетях при решении задач управления боевыми ЛА. Основные принципы организации связи СВРС, представленные в работе К.Л. Войткевича [52], в дальнейшем получили развитие в работах: С.В. Алехина [53], А.А. Сулим, П.А. Зац [21], Е.А. Белоусова, В.Ф. Брянцева [12, 13, 39], А.В. Кейстовича [12, 13, 40], Х.И. Сайфетдинова [12, 13]. В этих работах были описаны различные варианты совершенствования СВРС, в частности: конкретизированы подходы к маршрутизации сообщений в СВРС, представлены предложения по организации локальных СВРС гражданского и военного назначения, предложена концепция быстрой реконфигурации аппаратуры связи на основе концепции «программируемого радио».

В работах А.Н. Дмитриева, А.В. Максимова, О.А. Блакитного [18, 19, 54, 55], С.И. Макаренко, М.С. Иванова [56, 57] рассмотрены вопросы организации локальных СВРС, объединяющих группы ЛА, а также исследованы вопросы эффективности различных алгоритмов доступа абонентов к радиоканалу связи.

В работах Д.Г. Пантенкова, В.И. Великоиваненко [58], С.И. Макаренко [59-61], М.С. Иванова [62-64] рассмотрены вопросы эффективного управления ресурсами СВРС в интересах обеспечения высокой пропускной способности сети для организации высокоскоростного информационного обеспечения ЛА истребительной и фронтовой авиации.

В работах: С.И. Макаренко, М.С. Иванова [56, 65, 66], рассмотрены вопросы организации гибридных сетей воздушной радиосвязи, вопросы маршрутизации информационных потоков в СВРС на основе децентрализованных и иерархических подходов.

Различные аспекты построения сетевых информационных систем представлены в работах Д.Г. Пантенкова, А.А. Ломакина, В.И. Великоиваненко [58, 67].

В работах С.И. Макаренко [10, 68-71], М.С. Иванова [70, 72-76], Д.Г. Пантенкова, А.А. Ломакина [77], С.В. Дворникова [78], Е.А. Попова, А.Ф. Крячко, С.С. Дворникова, С.В. Томашевича [79], А.В. Пшеничникова, Д.А. Бурькина, А.В. Железняк, Д.С. Рябенко [80], С.В. Дворникова, Е.А. Попова, Р.В. Иванова, А.А. Погорелова [81, 82], С.В. Дворникова, С.С. Дворникова, Е.В. Морозова [83], А.А. Балюка, А.В. Крупенина, Д.С. Махова, О.А. Финько [84], Д.В. Самойленко, М.А. Еремеева, О.А. Финько [85-88], рассмотрены вопросы обеспечения помехозащищенности СВРС от средств РЭП противника.

Вопросы организации и ведения воздушной разведки такими новыми средствами, как БЛА, учет специфики их боевого применения, особенностей компоновки технических средств разведки, рассмотрены в работах А.А. Гаврилова [89], В.В. Ростопчина [90], И.Е. Афолина, С.И. Макаренко, С.В. Петрова [91], И.А. Бугакова, А.Д. Сорокина, А.В. Хомякова [92], М.С. Иванова [93], С.А. Вакина, Л.Н. Шустова [94], В.И. Потапова, Б.И. Казарьяна [95], Н.В. Рощиной [96], П.В. Самойлова, К.А. Иванова [97].

Вместе с тем в вышеуказанных работах вопросы организации высокоскоростных линий радиосвязи в составе СВРС воздушного эшелона, с учетом интенсивности и специфики трафика разведанных, поступающего от разведывательных ЛА/БЛА, а также организация распределения сигнального ресурса многоканальных СВРС – не рассматривались.

Необходимо отметить, что общий подход к адаптивному распределению сигнального и частотно-временного ресурса сетей связи в зависимости от объема трафика, поступающего в сеть, не является принципиально новым. В настоящее время известны работы научной школы Е.А. Новикова [98-112], посвященные прогнозированию объема трафика, поступающего от абонентов, и последующего распределения частотно-временного ресурса в спутниковых системах связи с учетом сделанного прогноза. Вместе с тем данные работы ориентированы на стандарт спутниковой связи DVB-RCS и не учитывают специфику СВРС военной авиации.

В работах С.И. Макаренко [32-34], М.С. Иванова [62-64] уже были рассмотрены вопросы адаптации параметров СВРС и каналов управления ЛА к интенсивности поступающего от ЛА трафика. Вместе с тем данные работы не рассматривали специфику разведывательной авиации и тот фактор, что такие ЛА формируют потоки трафика в десятки Мбит/с. Кроме того при рассмотрении вопросов адаптации параметров СВРС были рассмотрены только временные параметры СВРС, в частности – возможности регулировки вероятности использования различными ЛА канала множественного доступа в СВРС с протоколом CSMA/CA. При этом возможности распределения сигнального ресурса СВРС, а также возможности организации многоканальных СВРС, в данных работах не рассматривались.

Таким образом, проведенный анализ ранее опубликованных работ в исследуемой предметной области позволил сформулировать **противоречие в науке** – между необходимостью обеспечения высокой скорости передачи данных в СВРС и несовершенством разработанного научно-обоснованного решения, на основе современного уровня развития научно-методического аппарата синтеза структуры СВРС.

Статья продолжает и развивает цикл предыдущих работ авторов [27, 28, 35-38, 56, 57, 62-66], посвященных тематике повышения пропускной способности и скорости передачи данных в объединённой воздушно-космической сети радиосвязи.

4. Постановка и формализация научной задачи повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи

Для разрешения сформулированного противоречия в науке и достижения **цели исследования** – повышения скорости передачи данных в СВРС, необходимо решить **научную задачу** разработки моделей и методики повышения скорости передачи данных СВРС путем адаптивного распределения энергетического, сигнального и частотного ресурсов СВРС с учетом интенсивности передаваемого трафика.

Для формализации научной задачи введем обозначения:

M – количество ЛА;

m – номер ЛА;

λ_m – интенсивность трафика в частотном канале m -ого ЛА;

λ_j – интенсивность трафика, формируемого j -ым техническим средством разведки;

J_m – количество технических средств разведки на m -ом ЛА;

j – номер технического средства разведки;

$T_{зад}$ – время задержки пакета в отдельном частотном канале СВРС, с;

$T_{зад}^{треб}$ – требуемое значение задержки передачи трафика в СВРС;

C_m – скорость передачи данных в частотном канале m -ого ЛА;

C_e – эффективная пропускная способность СВРС;

C_{ei} – эффективная пропускная способность i -й СВРС, сформированной на i -ом частотном канале;

R – ресурс СВРС;

R_S – сигнальный ресурс СВРС;

R_F – частотный ресурс СВРС.

В общей вербальной форме, постановка научной задачи может быть сформулирована так – повышение скорости передачи данных в частотном канале каждого m -го ЛА ($\{C_m\}$) в многоканальной СВРС ($\sum C_{ei}$) до уровня, необходимого для обеспечения передачи трафика от технических средств разведки данного ЛА ($\sum \lambda_j$) с требуемой своевременностью ($T_{зад} \leq T_{зад}^{треб}$), за счет адаптивного распределения сигнально-частотного ресурса СВРС ($R = R_S \cup R_F$):

$$C_m = \arg f(\lambda_m, R_S, R_F, C_{ei}) \mid \lambda_m \geq \sum_{j=1}^{J_m} \lambda_j, T_{зад} \leq T_{зад}^{треб}. \quad (1)$$

К основным рамкам исследования относится следующее:

1. Сеть воздушной радиосвязи – многоканальная сеть пакетной цифровой передачи данных в соответствии со стандартами воздушного эшелона ОАЦСС, сформированная на множестве частотных каналов, на каждом из которых используется временное разделение абонентов на основе алгоритма случайного множественного доступа к каналу множественного доступа.

2. Рассматриваемые уровни OSI – физический и канальный уровни СВРС.

3. Ограничения по ВВХ передачи трафика, параметрам частотных каналов, вариантам использования сигнального, частотного и временного ресурса – определяются на основе существующих и перспективных технических авиационных средств связи воздушного эшелона ОАЦСС.

4. Модель трафика в частотном канале и трафика, поступающего от технических средств разведки – стационарный простейший поток.

5. Информационная нагрузка в частотных каналах СВРС представляет собой независимый пуассоновский процесс. Источники трафика в частотных каналах СВРС образуют суммарный независимый процесс, который является пуассоновским.

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

7. В СВРС ведется квити́рование успешной доставки пакетов, при этом полагается, что квитанции прибывают надежно и без потерь.

8. Каналы множественного доступа в СВРС являются бесшумными. Факторы воздействия средств РЭП и естественных помех – не рассматриваются.

5. Модель адаптивного использования энергетического и сигнального ресурсов сети воздушной радиосвязи

Повышение скорости обмена данными между ПУ и ЛА может вестись путем рационализации использования сигнального ресурса СВРС, для чего необходимо рассмотреть два вопроса:

1) переход к использованию на ЛА направленных антенн с целью повышения энергетического выигрыша по показателю отношения сигнала к сумме шума и помехи (ОСШП), так как применение технологии адаптивного кодирования сигналов, использование более емких* и менее помехозащищенных конструкций сигналов требует повышенной энергетики полезных сигналов;

2) переход к использованию технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ при высоких значениях ОСШП, при этом целесообразно предусмотреть использование не только помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов, которые используются в настоящее время, но и других, информационно более емких сигналов (в частности рассмотреть возможность использования QAM сигналов).

В целом, данные направления рационализации использования сигнального ресурса СВРС в интересах повышения скорости передачи данных в частотных каналах сети согласуются с общими тенденциями по использованию технологий повышения эффективности антенных систем и технологии АСМ, которые используются в различных наземных и космических системах связи, но пока не применяются в системах воздушной радиосвязи. К примерам таких технологий можно отнести технологию повышения эффективности антенных систем MIMO (Multiple Input Multiple Output – метод пространственной передачи/приема сигнала «множественный вход – множественный выход» на основе использования нескольких антенн), а также различные варианты технологии АСМ, применяемые как в наземных сетях широкополосного доступа (MIMO и АСМ в сетях стандартов IEEE 802/11ac, IEEE 802.11n, IEEE 802.16), так в спутниковых каналах связи (АСМ в каналах и сетях стандартов DVB-S, DVB-S2 и DVB-RSC).

Для рационализации использования сигнального ресурса СВРС в интересах повышения скорости обмена данными в модели предполагается формализовать и исследовать следующие основные факторы, специфичные для организации воздушной радиосвязи:

- использование различных вариантов направленных антенных систем на ЛА в интересах повышения значения ОСШП, с учетом ошибок в

* под информационной емкостью сигнала в работе понимается количество бит данных, передаваемых одним вариантом реализации сигнала. Например: BPSK передает 1 бит, QPSK – 2 бита, 8PSK – 3 бита и т.д.

наведении луча антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА, а также необходимости управления лучом антенной системы с целью компенсации данных ошибок;

- использование технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, с учетом изменения особенностей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» в процессе полета ЛА, в интересах повышения скорости передачи данных в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки (при высоких значениях ОСШП), за счет использования не только помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов, но и информационно более емких QAM сигналов.

Для формализации параметров модели были введены следующие обозначения:

- B – бюджет линии связи между ЛА и ПУ, дБ;
- BER – вероятность ошибки при приеме бита данных;
- D – дальность прямой видимости, км;
- $d_{\text{прям}}$ – расстояние между элементами фазированной антенной решетки (ФАР) для прямоугольной сетки;
- $d_{\text{треуг}}$ – расстояние между элементами ФАР для треугольной сетки;
- E_b/N_0 – отношение мощности сигнала к мощности аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), дБ;
- F – частота сигнала, ГГц;
- $G_{\text{ПРД}}$ – коэффициент усиления антенны передатчика, дБи;
- $L_{\text{ПРМ}}$ – потери в фидере и антенне приемника, дБ;
- $G_{\text{ПРМ}}$ – усиление антенны приемника, дБи;
- h_1 – высота первой антенны (высота полета ЛА) в м;
- h_2 – высота второй антенны (высота полета ЛА) в м;
- L – потери сигнала на трассе распространения радиоволн, дБ;
- $L_{\text{ПРД}}$ – потери в фидере и антенне передатчика, дБ;
- M – количество позиций сигнала в сигнальном созвездии;
- P_e – вероятность ошибки при приеме бита данных;
- $P_{e \text{ in Vit}}$ – вероятность ошибочного приема бита на входе декодера Витерби;
- $P_{e \text{ out Vit}}$ – вероятность ошибочного приема бита на выходе декодера Витерби;
- $P_{\text{ПРД}}$ – выходная мощность передатчика, дБм;
- $P_{\text{ПРМ}}$ – уровень теплового шума на входе приемника (отрицательное число), дБм;
- q – отношение мощности сигнала к суммарной мощности шума и помехи, дБ;
- Q_x, Q_y – сектор сканирования ФАР в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- R – скорость помехоустойчивого кода;

$\Delta Q_x, \Delta Q_y$ – ширина диаграммы направленности (ДН) ФАР в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
 θ_{\max} – максимальное отклонение луча ФАР.

5.1. Формализация вариантов повышения скорости передачи данных за счет использования направленных антенн

5.1.1. Анализ бюджета радиолинии в СВРС

ЛРС между ЛА, а также между ЛА и ПУ организуется в пределах прямой радиовидимости [10]:

$$D = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (2)$$

где: D – дальность прямой видимости в км; h_1 – высота первой антенны (высота полета ЛА) в м; h_2 – высота второй антенны (высота полета ЛА) в м.

Зависимость дальности прямой радиовидимости от высоты полета ЛА и высоты антенны ПУ, в соответствии с выражением (2) представлена на рис. 3. Из графиков на рис. 3. видно, что с учетом рефракции в атмосфере и при отсутствии препятствий на пути распространения радиоволн существует возможность организовать ЛРС «ЛА – ПУ» в УКВ диапазоне на дальностях 350-400 км. При этом высота полета ЛА составит порядка 7-10 км. Такая высота полета и радиус действия типичны для ЛА оперативно-тактического назначения [113, 114].

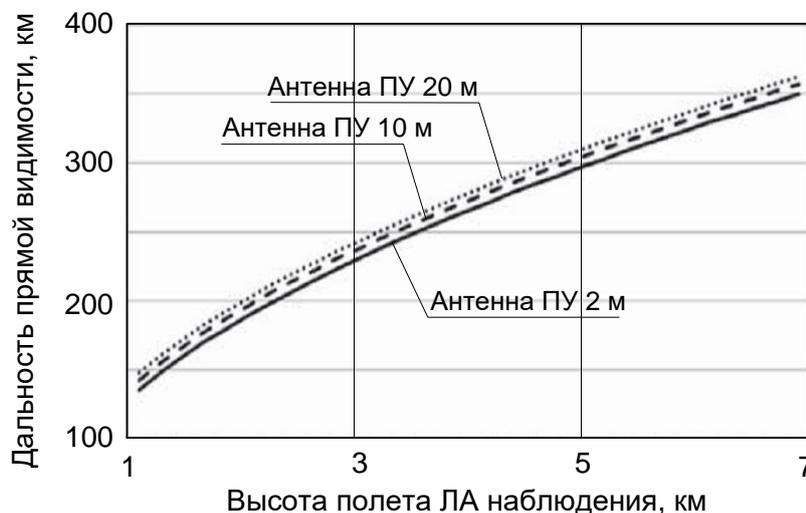


Рис. 3. Зависимость дальности прямой видимости от высоты полета ЛА и высоты антенны ПУ

При организации связи на больших расстояниях, в отсутствие воздействия таких дестабилизирующих факторов, как воздействие средств радиоэлектронного подавления (РЭП) противника, основным фактором, влияющим на качество ЛРС, является затухание сигнала на трассе, которое рассчитывается как:

$$L = 92,45 + 20\log(10F) + 20\log(10D) \quad (3)$$

где: L – потери сигнала на трассе распространения радиоволн, дБ; F – частота сигнала, ГГц; D – дальность прямой видимости, км.

На рис. 4 приведены зависимости потерь на трассе ЛРС от дальности связи для традиционных частот авиационной радиосвязи в УКВ диапазоне 200-600 МГц [114]. На рис. 5 приведены зависимости потерь на трассе ЛРС от дальности связи для перспективных частот авиационной радиосвязи в диапазоне 400-2800 МГц [113].

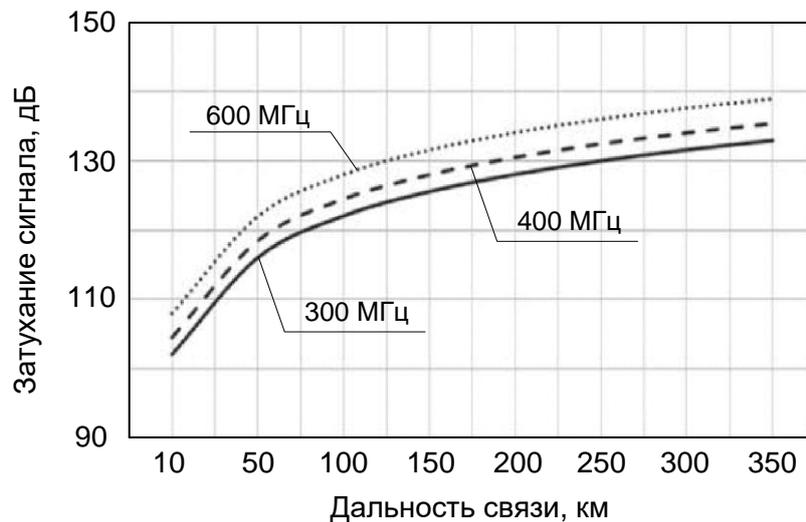


Рис. 4. Зависимости уровня затухания сигнала на трассе ЛРС от дальности связи для традиционных частот авиационной радиосвязи в УКВ диапазоне 200-600 МГц

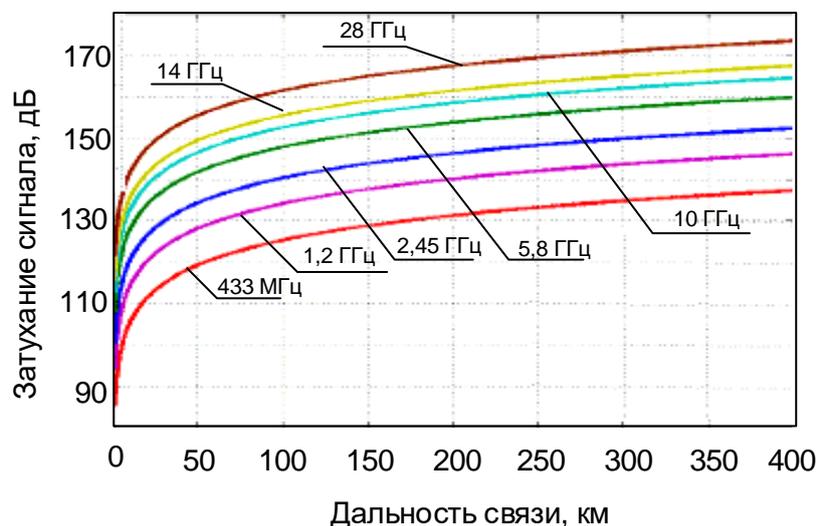


Рис. 5. Зависимости уровня затухания сигнала на трассе ЛРС от дальности связи для перспективных частот авиационной радиосвязи в диапазоне 400-2800 МГц

Анализ графиков на рис. 4 и 5 показывает, что организация высокоскоростной передачи данных со скоростью от 2 Мбит/с возможна в традиционном УКВ диапазоне авиационной радиосвязи (200-600 МГц), а вот для обеспечения

скорости передачи порядка десятков Мбит/с требуется использовать СВВ диапазон частот (выше 3 ГГц).

Важным параметром организации ЛРС является бюджет линии связи между ЛА и ПУ. Исходя из полученных ограничений на дальность прямой видимости, затухание сигнала на трассе распространения и минимально допустимый бюджет канала, можно сформировать требования к каналу связи ЛА средней и большой дальности [114]:

$$B = P_{\text{ПРД}} - L_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРД}} - L - L_{\text{ПРМ}} + G_{\text{ПРМ}} - P_{\text{ПРМ}}, \quad (4)$$

где: B – бюджет линии связи между ЛА и ПУ, дБ; $P_{\text{ПРД}}$ – выходная мощность передатчика, дБм; $L_{\text{ПРД}}$ – потери в кабеле и антенне передатчика, дБ; $G_{\text{ПРД}}$ – коэффициент усиления антенны передатчика, дБи; L – потери на трассе распространения радиоволн, дБ; $L_{\text{ПРМ}}$ – потери в кабеле и антенне приемника, дБ; $G_{\text{ПРМ}}$ – усиление антенны приемника, дБи; $P_{\text{ПРМ}}$ – уровень теплового шума на входе приемника (отрицательное число), дБм.

Анализ выражения (4) показывает, что основными факторами, влияющими на бюджет канала связи, являются направленные свойства антенн, мощность передатчика и чувствительность приемника (рис. 6).

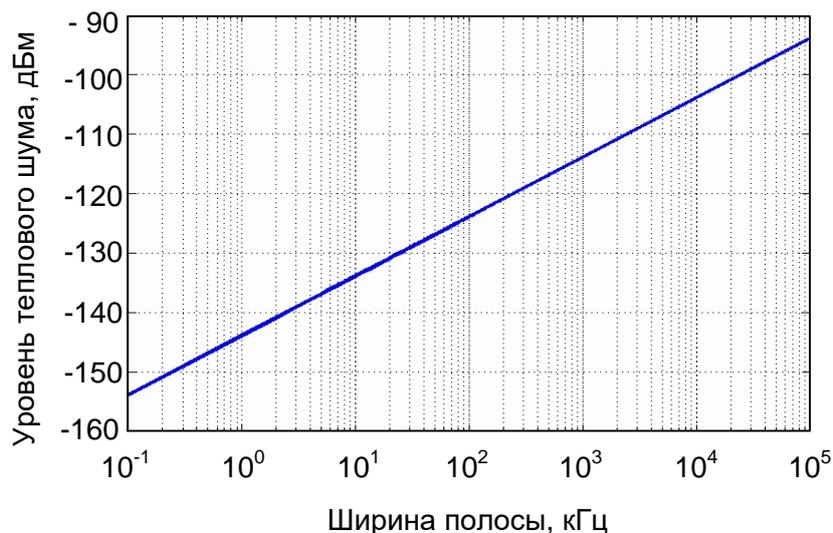


Рис. 6. Зависимость мощности теплового шума на входе приемника от ширины полосы пропускания аналогового тракта

Для обеспечения требуемого бюджета радиолинии затухание сигнала на трассе ЛРС (рис. 4) необходимо компенсировать повышением выходной мощности сигнала передатчиков и использованием антенных систем с большим коэффициентом усиления. При этом ограничения на массогабаритные характеристики аппаратуры ЛА (особенно БЛА) не позволяют разместить на борту крупно апертурную антенну, обеспечивающую высокий коэффициент усиления, а также мощное прямо-передающее устройство. Это должно компенсироваться увеличением коэффициента усиления антенны, повышением мощности передатчика, размещенного на ПУ и чувствительностью приемника. Например, на мобильном наземном ПУ на автомобильной платформе возможно размещение параболической антенны диаметром 1-3 м, обеспечивающей усиление порядка

14-25 дБи (для частоты сигнала 600 МГц), а также передатчика с выходной мощностью порядка 45 дБм.

В табл. 5 представлены результаты расчета бюджета линии связи «ЛА – ПУ», в соответствии с выражением (4) для различных вариантов антенных систем, а также итоговые значения достигаемого энергетического выигрыша от их использования [114].

Таблица 5 – Анализ бюджета линии связи «ЛА – ПУ» [114]

Характеристика	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Выходная мощность передатчика ЛА, дБм	40	40	40	40
Потери в тракте ЛА, дБ	1,5	1,5	3	1,5
Усиление антенны ЛА, дБи	12	20	6	8
Потери при распространении на трассе линии связи, дБ	136			
Усиление антенны ПУ, дБи	20,5			
Потери в аналоговом тракте ПУ, дБ	1,5			
Уровень теплового шума на входе приемника ПУ, дБм	-100			
Бюджет линии связи, дБ	33,5	41,5	26	28,5

В качестве бортовой антенной системы рассматриваются:

- вариант 1 – кольцевая антенная решетка;
- вариант 2 – активная фазированная антенная решетка (АФАР);
- вариант 3 – нескольких переключаемых антенн с шириной диаграммы направленности 60°;
- вариант 4 – параболическая антенна диаметром 0,5 м на опорно-поворотном устройстве (ОПУ).

Для всех вариантов организации канала связи в качестве антенны ПУ рассматривалась параболическая антенна с диаметром 2 м с функцией сопровождения ЛА.

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что все предложенные варианты антенн обеспечивают связь «ЛА – ПУ». Однако, с учетом требуемой высокоскоростной передачи данных от ЛА (для видеопотока не менее 2 Мбит/с), вероятности битовой ошибки и погодных условий (дождь, туман и т.д.), характеристики, представленные в табл. 5, могут значительно ухудшаться.

В табл. 6 представлена шкала градаций качества принимаемого изображения видеосигнала, рекомендованная Международным консультативным комитетом по радиовещанию. Согласно табл. 6 удовлетворительное качество передачи изображения достигается при отношении сигнал/шум на входе приемника не менее 38 дБ [114].

В соответствии с информацией, представленной в табл. 5 и 6, далее сформулированы требования к перспективному комплексу связи ЛА, обеспечивающему высокоскоростную передачу видеоданных. Эти требования представлены в табл. 7.

Таблица 6 – Шкала градаций качества принимаемого изображения видеосигнала, рекомендованная Международным консультативным комитетом по радиовещанию

Качество изображения	Визуальные искажения	ОСШП на входе приемника, дБ
Отлично	Незаметно	>46,6
Хорошо	Заметно, но не мешает	>42,3
Удовлетворительно	Заметно, немного мешает	>38,0
Плохо	Мешает	>33,2
Очень плохо	Сильно мешает	>29,2

Таблица 7 – Требования к перспективному комплексу связи ЛА, обеспечивающему высокоскоростную передачу данных

Характеристика	Значение
Выходная мощность передатчика	не менее 10 Вт
Диапазон рабочих частот	200-600 МГц
Ширина полосы	не менее 4 МГц
Скорость передачи данных	не менее 2 Мбит/с
Тип сигнала	BPSK/QPSK
Тип передаваемой информации	поток видео, покадровое изображение, текстовые сообщения
Тип антенной системы	антенная решетка с электронным управлением диаграммой направленности
Коэффициент усиления антенны	не менее 12 дБи
Масса аппаратуры	не более 20 кг

Таким образом, обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что для обеспечения бюджета канала связи при большом затухании сигнала на трассе ЛРС необходимо использовать направленные антенны на борту ЛА. При этом задача управления направлением максимального усиления бортовой антенны может быть решена несколькими способами:

- использованием многоэлементной кольцевой антенны с управляемой диаграммой направленности (вариант 1 в табл. 5);
- использованием фазированной антенной решетки (ФАР) с управляемой диаграммой направленности (вариант 2 в табл. 5);
- использованием нескольких переключаемых антенн (вариант 3 в табл. 5);
- использованием параболической антенны на опорно-поворотном устройстве (вариант 4 в табл. 5).

Оценивая преимущества использования того или иного варианта антенной системы, отметим, что судя по данным табл. 5 варианты построения бортовой аппаратуры с кольцевой антенной решеткой или активной фазированной решеткой являются наиболее выгодными. Вместе с тем, необходимо учитывать некоторые конструктивные и эксплуатационные особенности ЛА, которые накладывают дополнительные ограничения на выбор типа антенной системы. К таким ограничениям относятся:

- возможность конструктивного исполнения антенной системы размещаемой на борту ЛА;
- стоимость реализации антенной системы, а также возможности ее размещения на борту ЛА без изменения конструктива фюзеляжа ЛА;
- обеспечение ЭМС и пространственной «развязки» антенной системы передачи данных с другим РЭО (навигационным, радиолокационным и т.д.) на борту ЛА.

Рассмотрим преимущества и недостатки вышеуказанных типов антенных систем для их использования в ЛА с учетом представленных факторов более подробно.

5.1.2. Обоснование требований к антенной системе в интересах компенсации неустойчивости ее пространственного положения

В работе [115] показано, что на ЛА в режиме стационарного полета постоянно действуют случайные воздушные потоки, приводящие к неустойчивости его пространственного положения, в результате чего он совершает короткопериодические и длиннопериодические колебания. Колебания первого вида незначительны по амплитуде, быстро затухающие, резкие могут быть представлены как колебания с периодом от 0,5-3 с. Длиннопериодические колебания медленные, слабозатухающие, сопровождаются относительно большими отклонениями ЛА по тангажу, курсу и крену, соответствуют периоду 10-30 с. Кроме этого, ЛА в процессе эволюций в пространстве может совершать маневры, которые могут быть ограничены следующими параметрами неустойчивости: амплитуда колебаний по крену – 20° , тангажу – 10° , курсу – 25° , длительность неустойчивости – 0,2-1 с. В результате рассмотренных неустойчивостей пространственных эволюций ЛА, возникает изменение точек прицеливания ДН антенны относительно расчетного направления. Результаты проведенного в работе [115] имитационного моделирования влияния неустойчивости пространственного положения ЛА на неустойчивость точки прицеливания ДН антенны приведены на рис. 7.

Из анализа характера перемещения точки прицеливания ДН антенны (рис. 7) можно сделать вывод о том, что сектор сканирования ДН в вертикальной плоскости составляет – 40° , по азимуту – 50° . Максимальный угол отклонения точки прицеливания ДН углу места $\pm 20^\circ$, по азимуту $\pm 25^\circ$. Таким образом, ширина ДН антенны должна составлять порядка $60^\circ \times 60^\circ$ для уверенной компенсации неустойчивости пространственного положения ЛА в процессе его маневров.

Данные требования ориентированы на компенсацию пространственной неустойчивости ЛА исключительно за счет увеличения ширины ДН. Вместе с тем, возможно использование более узконаправленных антенных систем в случае, если существует возможность упреждающего расчета и прогнозирования изменения направления на точку прицеливания ДН с учетом пространственных эволюций ЛА.

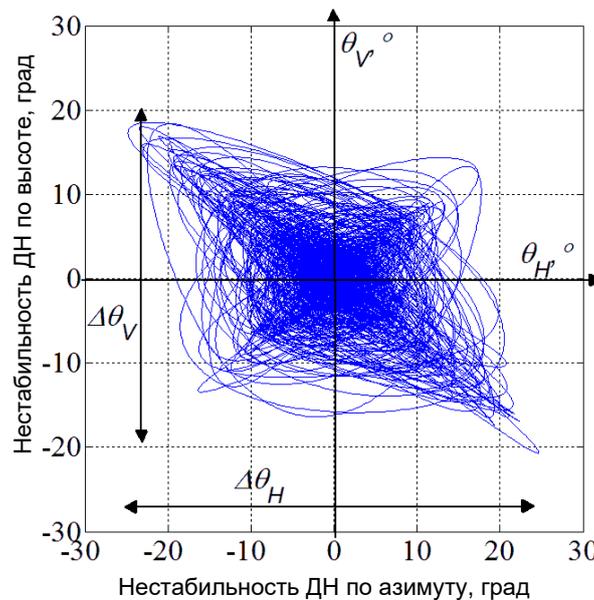


Рис. 7. Перемещения точки прицеливания ДН антенны, обусловленные эволюцией пространственного положения ЛА [115]

В современных бортовых навигационных комплексах (БНК) ЛА используется инерциальная навигационная система, с коррекцией по сигналам радиотехнической системы дальней навигации (РСДН), радиотехнической системы ближней навигации (РСБН) и спутниковой радионавигационной системы (СРНС), что позволяет с высокой точностью определять положение ЛА в пространстве, скорость линейных и угловых перемещений, ускорение линейных перемещений. Точность определения углового положения ЛА может достигать десятых долей градуса, но так как БНК выдают показания с частотой 50 Гц, и именно по данным показателям бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ) пересчитывает направление ДН в точку прицеливания, то между моментами выдачи показаний БНК появляется ошибка наведения ДН, значение которой тем больше, чем выше нестабильность ЛА в полете. В работе [115] приведены результаты имитационного моделирования ошибки наведения ДН антенны в результате нестабильности пространственного положения ЛА при управлении ДН по значениям БНК. Показано, что ошибка наведения ДН антенны может достигать $\pm 10^\circ$, а значит ширина ДН антенны должна быть до 20° .

Для уменьшения дестабилизирующего влияния нестабильности пространственного положения ЛА в работе [115] предложено краткосрочное прогнозирование траектории смещения точки прицеливания ДН антенны в интервалах между моментами формирования навигационной информацией БНК. Это краткосрочное прогнозирование основано на использовании интерполяционных полиномов Эрмитта. Использование такого прогнозирования позволяет уменьшить ошибку наведения ДН антенны при применении интерполяционного полинома Эрмитта 1-й степени до 4° , а 3-й степени – до 2° . При прогнозировании интерполяционными полиномами управление лучом антенны осуществляется непрерывно, что позволяет в среднем сократить ошибку наведения ДН, а значит использовать еще более узконаправленные антенные системы.

5.1.3. Использование многоэлементной кольцевой антенны с управляемой диаграммой направленности

Перспективы использования на ЛА многоэлементной кольцевой антенны с управляемой диаграммой направленности для организации высокоскоростной передачи данных подробно рассмотрены в работе [113].

Кольцевая антенная решетка (рис. 8) может быть использована для создания антенной системы с управляемым направлением максимума диаграммы направленности. Благодаря кольцевой симметрии антенной решетки, удастся получить направленные диаграммы, которые не изменяются при сканировании в пределах 360° в плоскости решетки.

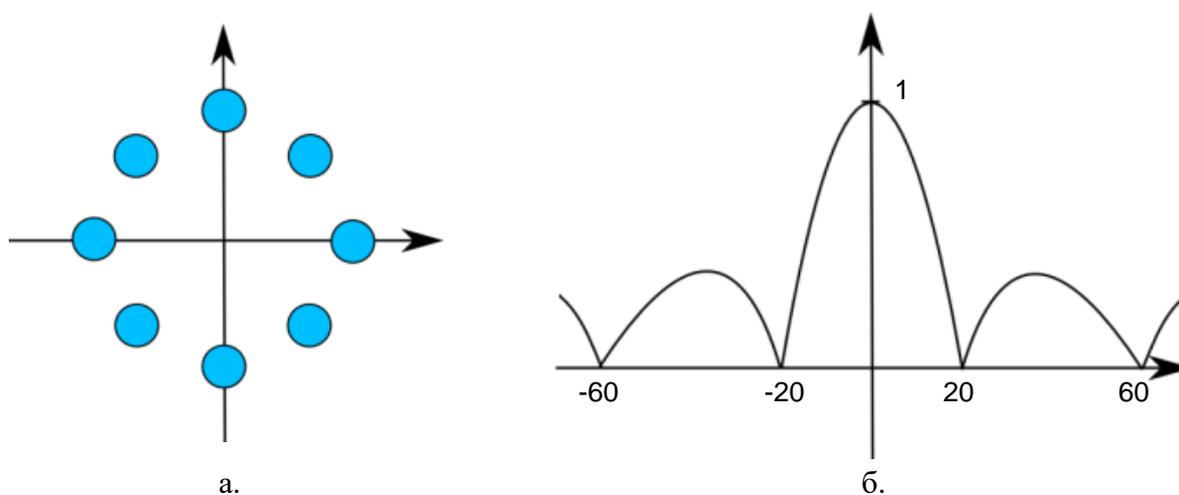


Рис. 8. Кольцевая антенная решетка

Для получения большого коэффициента усиления кольцевой антенной решетки необходимо увеличивать число элементов (до 32, 64 и более). Преимуществом такой антенны является возможность немеханического сканирования, как в азимутальной плоскости, так и по углу места [113]. При этом во время сканирования передача сигнала может не прерываться. Использование многоэлементной кольцевой антенны осложняется необходимостью изготовления сложных диаграммо-образующих устройств.

5.1.4. Использование многоэлементной фазированной антенной решетки с управляемой диаграммой направленности

Перспективы использования ФАР на ЛА подробно рассмотрены в работе [115]. В данной работе подробно рассмотрены вопросы управления лучом диаграммы направленности ФАР в условиях эволюций ЛА в пространстве, а также обоснованы предъявляемые требования к ФАР авиационного базирования, предназначенной для высокоскоростной передачи данных.

Преимуществом ФАР является возможность электронного управления ДН при сканировании по азимуту и углу места. При известных требованиях к ДН, диапазону рабочих частот, сектору сканирования, можно определить геометрические размеры ФАР и количество ее элементов. Минимально необходимое количество элементов ФАР $n_{\text{ФАР}}$ определяется из размера сектора сканирования и необходимой ширины ДН в соответствии с выражением [116]:

$$n_{\text{ФАР}} \geq n_x n_y = \left(\frac{Q_x}{\Delta Q_x} + 1 \right) \left(\frac{Q_y}{\Delta Q_y} + 1 \right), \quad (5)$$

где: Q_x, Q_y – сектор сканирования ФАР в горизонтальной и вертикальной плоскостях; $\Delta Q_x, \Delta Q_y$ – ширина диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Расстояние между элементами ФАР для прямоугольной $d_{\text{прямо}}$ и треугольной $d_{\text{треуго}}$ сеток определяется исходя из максимального отклонения луча θ_{max} согласно [116]:

$$d_{\text{прямо}} < \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\text{max}}}, \quad d_{\text{треуго}} < \frac{2\lambda}{\sqrt{3}(1 + \sin \theta_{\text{max}})}, \quad d_{\text{мин}} = \frac{\lambda}{2}, \quad (6)$$

где λ – длина волны.

В соответствии с выражениями (5) и (6) для перспективных диапазонов частот авиационной радиосвязи в диапазоне 1-12 ГГц рассчитаны максимальные (для прямоугольной сетки) и минимальные (для межэлементного расстояния, равного половине длины волны) линейные размеры ФАР, которые представлены в табл. 8.

Таблица 8 – Зависимость геометрических размеров ФАР от диапазона частот

Частота, ГГц	Длина волны, см	Межэлементное расстояние, см		Размер ФАР, см	
		макс.	мин.	макс.	мин.
1	30	20	15	300	225
2	15	10	7,50	150	112,5
3	10	6,67	5	100	75
4	7,50	5	3,75	75	56,25
5	6	4	3	60	45
6	5	3,33	2,50	50	37,5
7	4,29	2,86	2,14	42,86	32,14
8	3,75	2,5	1,88	37,5	28,13
9	3,33	2,22	1,67	33,33	25
10	3	2	1,5	30	22,5
12	2,50	1,67	1,25	25	18,75

Из анализа табл. 8 следует вывод, что при организации передачи данных с ЛА путем использования ФАР целесообразным является использование более высоких частот, что позволит уменьшить размеры ФАР, устанавливаемой на борту. Вместе с тем необходимо учитывать, что при использовании частот выше 10 ГГц будет увеличиваться затухание сигнала в осадках.

Одним из элементов любой антенны с электронным управлением лучом является фазовращатель (ФВ). Так как в состав ФАР должно входить от нескольких сотен до нескольких тысяч ФВ, то характеристики и стоимость антенны зависят от параметров и стоимости ФВ. Существует несколько основных видов ФВ: на основе намагниченного феррита, на основе р-і-п диодов, на полевых транзисторах, на микроэлектромеханических структурах (МЭМС), на основе сегнетоэлектриков [116].

ФВ на основе намагниченного феррита были первыми, которые нашли применение в составе ФАР, где управление фазой сигнала происходит в результате изменения напряженности постоянного магнитного поля, приложенного к ферриту. Ферритовые ФВ сложны в реализации для широкого применения, а цепи управления ими обладают высоким энергопотреблением (единицы Вт), что определяет их применение в мощных радиолокационных комплексах [117].

Недостатком ФВ на основе р-і-п диодов является их высокая стоимость, которая, по оценкам специалистов, может достигать от 100\$ до 200\$ за штуку при массовом производстве, что приведет к высокой стоимости ФАР [117]. Также необходимо отметить, что ФВ данного типа являются устройствами с дискретными состояниями, что требует создания гибридных интегральных схем на микрополосковых линиях с навесными р-і-п диодами.

ФВ на полевых транзисторах имеют преимущество из-за возможности реализации монолитной схемы, включающей в себя малошумящие усилители, что подходит для активных ФАР, они имеют малые массогабаритные характеристики и энергопотребление по цепям питания (сотни мВт), но сравнительно дороги при массовом производстве [115].

ФВ на основе МЭМС имеют минимальные потери мощности практически во всем диапазоне СВЧ, обладают низким потреблением в цепях управления. Основными недостатками являются низкое быстродействие, ограниченный срок службы, существенно меньший, чем у полупроводниковых ФВ, сложность изготовления [115].

Преимущества ФВ на основе сегнетоэлектриков: малое время переключения (десятки наносекунд), низкое потребление по цепям управления (единицы мВт), низкие фазовые шумы, более низкая себестоимость (по сравнению с полупроводниковыми ФВ), а также возможность интегрального исполнения [115].

Отметим, что в настоящее время отечественной промышленностью уже освоено производство ФАР с коэффициентом усиления порядка 25 дБм и шириной диаграммы направленности $\approx 10^\circ$ при 64 элементах решетки. Обеспечение же большого коэффициента усиления с использованием ФАР требует более 64 элементов решетки.

5.1.5. Использование нескольких переключаемых антенн с узкой диаграммой направленности

Перспективы использования на ЛА нескольких переключаемых антенн с узкой диаграммой направленности для организации высокоскоростной передачи данных подробно рассмотрены в работе [113].

При использовании нескольких переключаемых антенн пространственные направления по азимуту разбиваются на сектора (зоны) – рис. 9. Минимальное количество антенн – 4, в этом случае ширина диаграммы направленности должна составлять более 90° . При использовании широко распространенных патч-антенн с шириной диаграммы направленности около 60° , число секторов равно 6. С увеличением коэффициентов усиления антенн растет число зон (рис. 9), а для размещения большого количества антенн необходимо увеличивать габаритные размеры и массу всей антенной системы. При этом наличие

переключаемых элементов неизбежно приводит к перерывам в передаче информации.

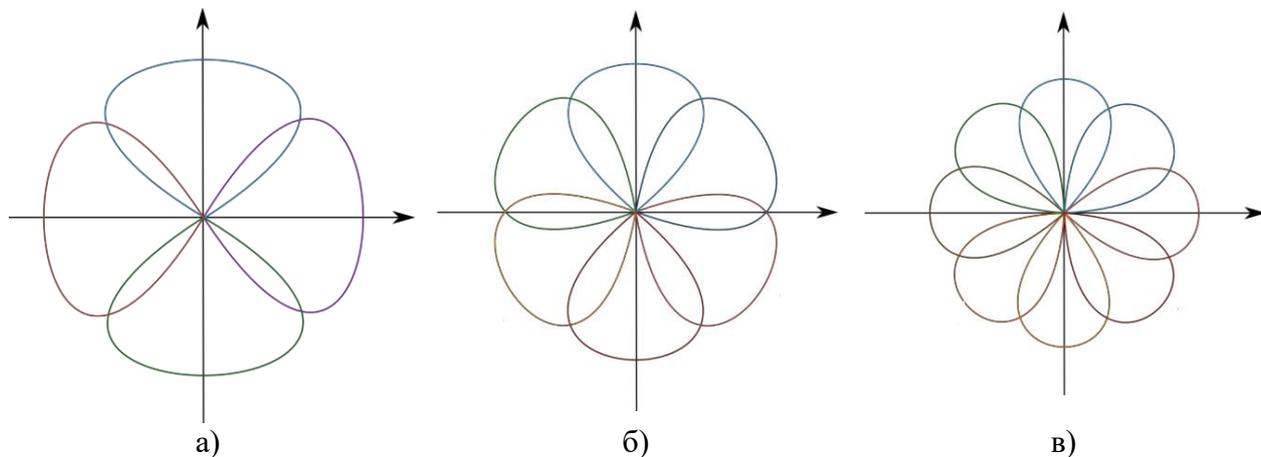


Рис. 9. Диаграммы направленности переключаемых патч-антенн

При использовании переключаемых антенн на борту ЛА возникает необходимость выбора той антенны, которая в настоящее время, с учетом пространственных эволюций ЛА, направлена в сторону ПУ, и для которой требуется коммутация сигналов. Возможны несколько вариантов реализации подобной схемы выбора [113].

1. Переключение выхода усилителя мощности передатчика между антеннами (один передатчик, один усилитель мощности, несколько антенн).
2. Переключение выхода передатчика между усилителями мощности и антеннами (один передатчик, несколько совмещенных усилителей мощности и антенн).
3. Переключение сигнала между передатчиками (число передатчиков и усилителей мощности равно числу антенн).

Рассмотрим эти варианты более подробно.

1. При реализации схемы переключения выхода усилителя мощности передатчика между антеннами выходной сигнал с усилителя мощности коммутируется между несколькими антеннами, в соответствии со схемой на рис. 10.

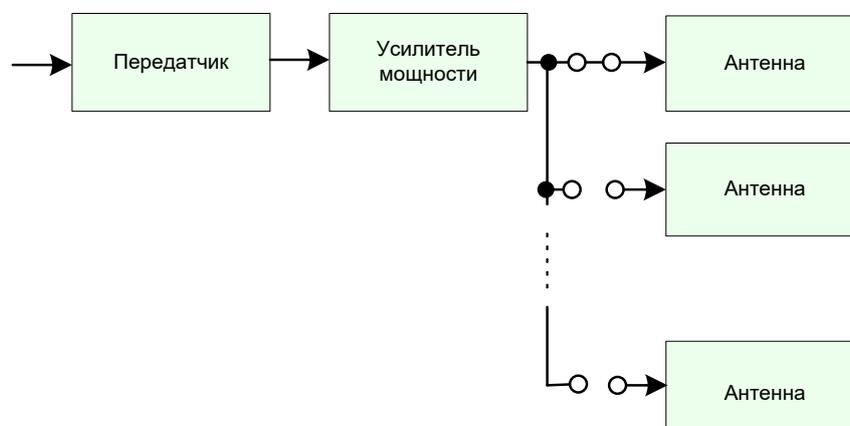


Рис. 10. Переключение выхода усилителя мощности передатчика между антеннами (один передатчик, один усилитель мощности, несколько антенн)

Достоинством этого варианта является использование единого передающего модуля и усилителя мощности для работы на несколько антенных устройств. Недостатками являются: потери в коммутирующем устройстве; наличие ограничений по уровню мощности для полупроводниковых коммутаторов. Современные быстродействующие полупроводниковые коммутаторы имеют большие потери (порядка 0,3-2 дБ) и не большую допустимую мощность сигнала. Электромеханические же коммутаторы рассчитаны на большие мощности и имеют малые потери, но их недостатком является высокое время переключения (примерно 20 мс) и относительно высокая цена.

2. В варианте с переключением выхода передатчика между усилителями мощности и антеннами для снятия ограничений, которые накладывает коммутатор СВЧ-сигналов, усилитель мощности передатчика выносится за переключатель. В этом случае число усилителей мощности равно числу антенн (рис. 11).

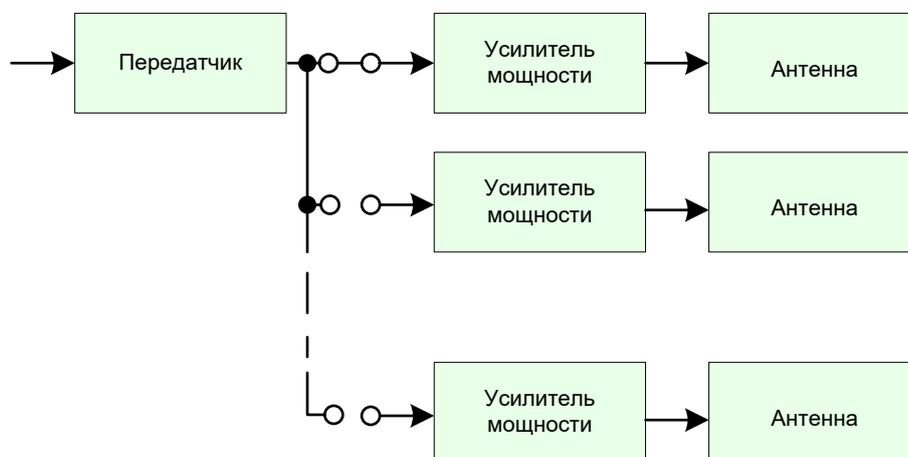


Рис. 11. Переключение выхода передатчика между усилителями мощности и антеннами (один передатчик, несколько совмещенных усилителей мощности и антенн)

К недостаткам такого варианта можно отнести: наличие нескольких усилителей мощности, которыми нужно управлять (включать/выключать при переключении антенн); усилители СВЧ-сигналов высокой мощности (более 1 Вт) имеют большие массогабаритные характеристики. Кроме того, для данного варианта необходимо разрабатывать единый многоканальный блок усилителей мощности с общей системой питания и охлаждения.

3. Третий вариант подразумевает отказ от переключателей СВЧ-сигналов и использование для каждой антенны своего передатчика и усилителя мощности (рис. 12). В этом случае переключатель сигналов выполняется на уровне программируемой логики (путем использования ПЛИС или при помощи микроконтроллера). К достоинствам данного варианта следует отнести высокую надежность системы – даже в случае выхода из строя одного из передатчиков, остальные останутся рабочими, обеспечивая связь в оставшихся азимутальных секторах.



Рис. 12. Переключение сигнала между передатчиками (число передатчиков и усилителей мощности равно числу антенн)

5.1.6. Использование параболической антенны на опорно-поворотном устройстве

Перспективы использования на ЛА параболической антенны на опорно-поворотном устройстве (ОПУ) для организации высокоскоростной передачи данных подробно рассмотрены в работе [113].

В частности, в работе [113] показано, что для компенсации большого затухания на трассе линии связи в традиционных УКВ (200-400 МГц) и в перспективных (1,2-2,8 МГц) диапазонах частот авиационной радиосвязи могут быть использованы параболические антенны большого диаметра (рис. 13). При этом передвижные ПУ могут быть оборудованы ОПУ с параболическими антеннами диаметром 1-3 м, а на стационарных ПУ могут быть использованы антенны и большего диаметра.

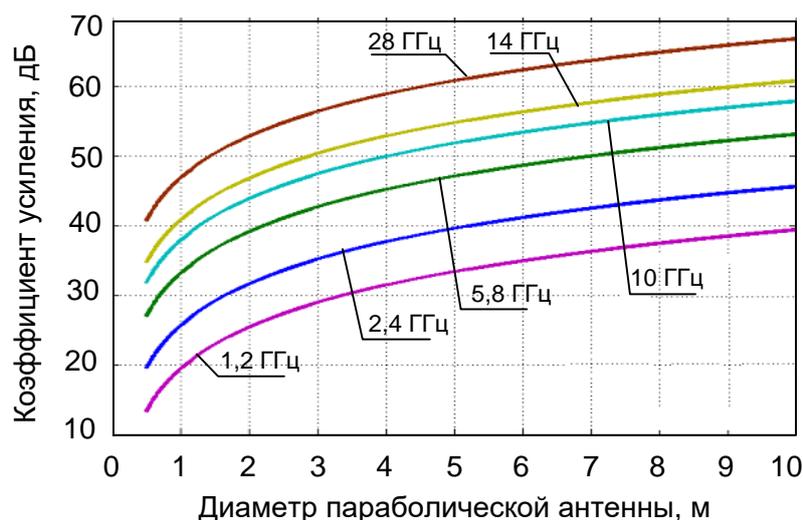


Рис. 13. Зависимость коэффициента усиления параболической антенны от диаметра зеркала для перспективного диапазона частот авиационной радиосвязи

Установка параболической антенны на ОПУ позволяет использовать единственную антенну для высокоскоростной передачи данных с ЛА, при этом

такая антенна будет непрерывно отслеживать направление на ПУ и обеспечивать связь без разрывов. Ориентация поворотной платформы в пространстве будет вычисляться с использованием БЦВМ ЛА и собственной навигационной информации.

При установке антенны на ОПУ главной задачей является передача СВЧ-сигнала через вращающийся переход, который может быть выполнен в трех вариантах (рис. 14):

1) вращающийся СВЧ-переход размещается перед антенной и после усилителя мощности;

2) вращающийся СВЧ-переход размещается после передатчика и перед услителем мощности и антенной;

3) передатчик, усилитель мощности и антенна размещаются на ОПУ при этом через многоканальный вращающийся переход передаются цифровые сигналы и напряжение питания.

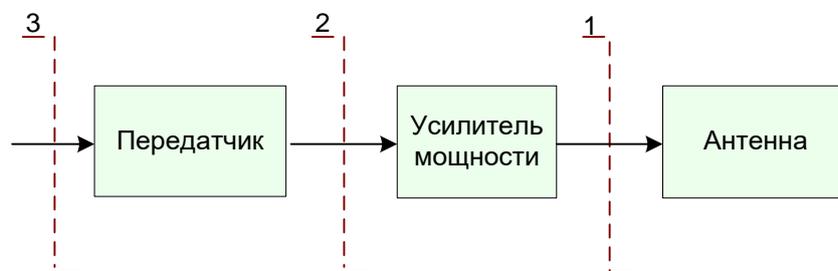


Рис. 14. Варианты размещения вращающегося перехода

Данные варианты организации передачи СВЧ сигнала подробно рассмотрены в работе [113]. В данной работе показано, что вращающийся коаксиальный переход СВЧ-сигнала (вариант 1) является сложным устройством и, как правило, может пропускать через себя высокие мощности при низких потерях (рис. 15а). К недостаткам использования вращающегося коаксиального СВЧ-перехода нужно отнести его высокую стоимость.

При установке на ОПУ только антенны или антенны и усилителя мощности (вариант 2) остальное оборудование необходимо размещать как можно ближе к вращающемуся СВЧ-переходу, т.е. фактически – под ОПУ. Так как отдельные антенны могут быть выполнены и как плоские антенные решетки, и как антенны с расположением элементов вдоль направления излучения (например, антенны бегущей волны: спиральная, вибраторная и т.д.), то при размещении подобного объекта на ОПУ, большая часть поверхности поворотной платформы остается неиспользуемой. Учитывая это, для повышения эффективности использования площади поворотной платформы целесообразным является размещение на ОПУ помимо антенны и передающего оборудования, а также усилителя мощности (вариант 3). В этом случае, требуется простой многоканальный вращающийся переход. Необходимым требованием к такому переходу является возможность передачи цифровых сигналов по стандартным интерфейсным стыкам ЛА (например, по таким как Ethernet), а также возможность

передачи больших токов для питания выходного усилителя мощности (рис. 15б, в).



а.



б.



в.

Рис. 15. Технические средства, реализующие вращающийся СВЧ-переход: а) Вращающийся коаксиальный переход Diamand satcom 18-2124-0 (SMA, 0-18 ГГц, потери до 0,3 дБ, мощность до 200 Вт); б) Вращающийся переход AC7195 (Ethernet 1000-Base-T, RG-178, до 43 контактов общего назначения, ток до 10 А); в) Вращающийся переход серии ME2121 (Ethernet 1000-Base-T, до 24 контактов общего назначения, ток до 10 А) [113]

Учитывая вышеуказанное, рациональным вариантом является размещение на ОПУ всей бортовой приемо-передающей аппаратуры (вариант 3), так как это позволяет отказаться от вращающихся волноводных переходов, имеющих высокие потери и низкую надежность. Вариант такой ОПУ был обоснован в работе [113] и представлен на рис. 16.

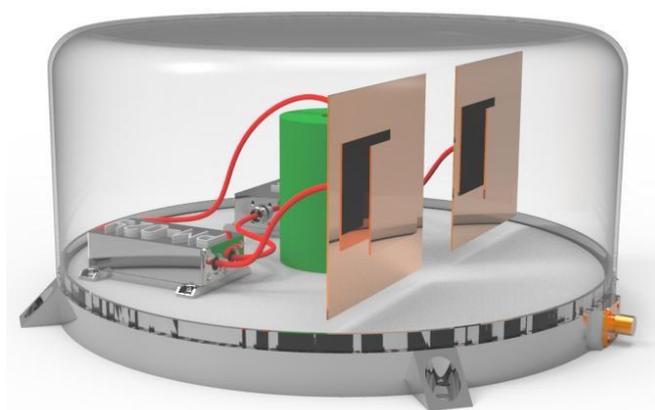


Рис. 16. Вариант технической реализации ОПУ с антеннами, приемопередатчиком и усилителем мощности [113]

Ориентация данной ОПУ в пространстве должна осуществляться по сигналам от спецвычислителя БНК ЛА, который будет непрерывно вычислять направление на ПУ. Для повышения эффективности антенной системы на ОПУ необходимо использовать антенны с круговой поляризацией как наиболее инвариантной к эволюциям ЛА в пространстве и увеличивать их апертуру за счет

создания геометрических больших антенных решеток с большим количеством элементов ФАР в горизонтальной плоскости. Сужение диаграммы направленности в горизонтальной плоскости позволит повысить коэффициент усиления антенны при постоянной ширине диаграммы направленности в вертикальной плоскости, что обеспечит возможность наведения антенны при любых допустимых углах полета ЛА.

Проведенный анализ использования различных направленных антенных систем для повышения скорости обмена данными с ЛА показал, что варианты использования кольцевой антенной решетки или активной фазированной решетки являются наиболее энергетически выгодными. Вместе с тем, при реализации таких антенных систем необходимо учитывать нестабильность взаимного положения ЛА и ПУ и компенсировать этот фактор электронным управлением лучом ДНА.

Использование активной фазированной антенной решетки позволяет обеспечить приблизительный энергетический выигрыш в бюджете радиолинии по данным [113]: 8 дБ относительно кольцевой антенной решетки; 13 дБ относительно параболической антенны на ОПУ; 15 дБ относительно нескольких переключаемых антенн с диаграммой направленности 60° .

Использование кольцевой антенной решетки позволяет обеспечить приблизительный энергетический выигрыш в бюджете радиолинии: 5 дБ относительно параболической антенны на ОПУ; 7,5 дБ относительно нескольких переключаемых антенн с диаграммой направленности 60° .

Повышение энергетики полезных сигналов – это известный подход, но трудно реализуемый на практике, так как организовать баланс между энергетикой, требуемой для всех радиоэлектронных систем (РЭС) ЛА, и создаваемой на борту ЛА невозможно из-за ограниченности мощности энергосистемы ЛА.

5.2. Формализация варианта повышения скорости передачи данных за счет адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в отдельном канале сети воздушной радиосвязи

Анализ используемых сигналов в ЛРС ЛА/БЛА показывает, что в основном используются сигналы типа BPSK и QPSK. Использование этих сигналов обусловлено, прежде всего, необходимостью обеспечения высокой помехозащищенности КРУ, а также высокими требованиями к уровню вероятности потери данных (на уровне значений 10^{-3} - 10^{-8}) при передаче фото- и видеоинформации (см. табл. 3 и 4).

Вместе с тем, скорость передачи данных в ЛРС может быть повышена путем перехода к более информационно-емким сигналам, например, таким как M-PSK или M-QAM, если их использование возможно в текущих помеховых условиях. Это становится возможным при повышении энергетического бюджета радиолинии за счет использования направленных антенн на ЛА. При этом подобный переход предусматривается технологией ACM (Adaptive Coding and Modulation) – адаптивного к помеховым условиям выбора вида сигнала и скорости кодирования. Различные варианты данной технологии уже реализованы в каналах спутниковой связи DVB-S/DVB-S2 и в наземных сетях широкополос-

ного доступа, работающих по стандартам IEEE 802/11ac, IEEE 802.11n, IEEE 802.16. Поэтому разработка варианта применения технологии АСМ для частотных каналов СВРС позволит повысить скорость передачи данных в благоприятных помеховых условиях.

5.2.1. Обоснование использования QAM сигналов, как рационального способа повышения скорости передачи данных в отдельном канале сети воздушной радиосвязи

Произведем оценку уровня информационной емкости и помехозащищенности QAM, BPSK, QPSK сигналов, используя математический аппарат теории оптимального приема сигналов [103].

При фазовой модуляции (BPSK, QPSK, M-PSK) вся информация кодируется в фазе передаваемого сигнала. Следовательно, передаваемый сигнал на протяжении одного символьного периода времени может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} s_m(t) &= \operatorname{Re}\left\{g(t)e^{j2\pi(m-1)/M}e^{j2\pi f_c t}\right\} = g(t)\cos\left[2\pi f_c t + 2\pi(m-1)/M\right] = \\ &= g(t)\cos\left[2\pi(m-1)/M\right]\cos 2\pi f_c t - g(t)\sin\left[2\pi(m-1)/M\right]\sin 2\pi f_c t, \\ m &= 1, 2, \dots, M = 2^K \quad t_0 \leq t \leq T. \end{aligned} \quad (7)$$

При этом в выражении $s_n = a_n + jb_n$ значения a_n и b_n определяются, как $a_n = \cos(2\pi(m-1)/M)$ и $b_n = \sin(2\pi(m-1)/M)$, соответственно; $g(t)$ – форма импульса; $\theta_m = 2\pi(m-1)/M$, $m = 1, 2, \dots, M = 2^K$ – возможные фазы несущей.

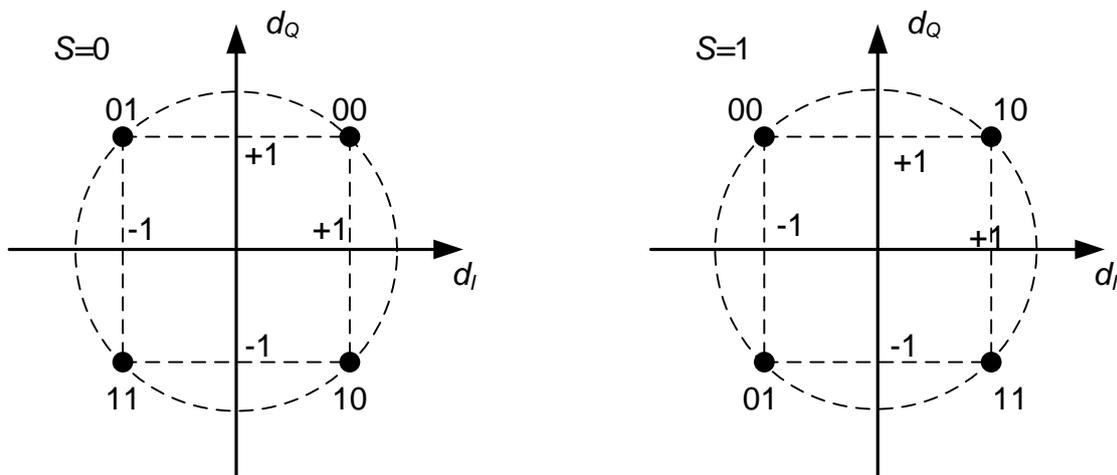
Все возможные сигналы $s_m(t)$ имеют одинаковую энергию:

$$E_{s_m} = \int_0^{R_s} s_m^2(t)dt \approx \frac{1}{2} \int_0^{R_s} g^2(t)dt = \frac{1}{2} E_g. \quad (8)$$

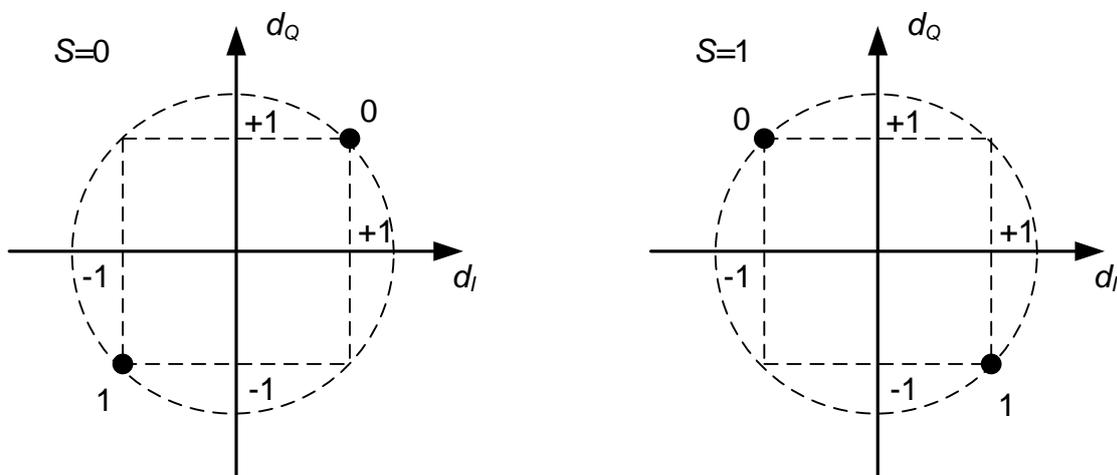
Отметим, что для $g(t) = 1$, т.е. для прямоугольного импульса сигнал имеет постоянное значение амплитуды огибающей в отличие от других способов амплитудной модуляции M-РАМ и M-QAM. Однако прямоугольные импульсы являются спектрально неэффективными, а более целесообразные формы импульсов обычно вводят непосредственно огибающую M-PSK

$$d_{mn} = \sqrt{E_g(1 - \cos 2\pi(m-n)/M)} \geq \sqrt{E_g(1 - \cos 2\pi/M)} = d_{\min}. \quad (9)$$

Формирование созвездия M-PSK часто осуществляется с помощью кода Грея, где фазы соседних сигналов различаются на одно битовое значение (рис. 17).



а) формирование сигнала QPSK



б) формирование сигнала BPSK

Рис. 17. Формирование созвездий сигнала M-PSK

Сигнал M-QAM может быть представлен в виде:

$$s_m(t) = \text{Re} \{ A_m e^{j\theta_m} g(t) e^{j2\pi f_c t} \} = A_m g(t) \cos[2\pi f_c t + \theta_m], \quad 0 \leq t \leq T_s. \quad (10)$$

При этом энергия M-QAM сигнала $s_m(t)$ составляет:

$$E_{s_m} = \int_0^{T_s} s_m^2(t) dt \approx \frac{1}{2} A_m^2 E_g. \quad (11)$$

Расстояние между точками в созвездии сигнала:

$$d_{mn} = \sqrt{\frac{1}{2} E_g [(a_m - a_n)^2 + (b_m - b_n)^2]},$$

где $a_k = A_k \cos \theta_k$ и $b_k = A_k \sin \theta_k$ при $k = m, n$.

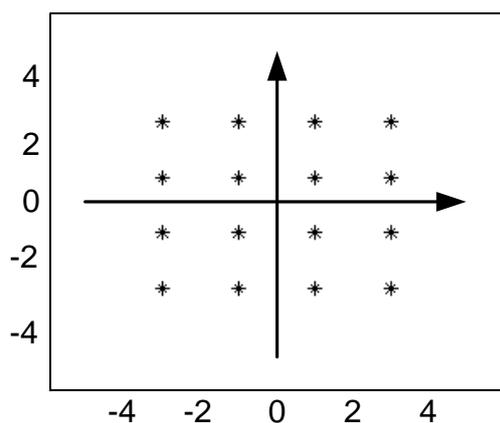
Для квадратичных созвездий, где a_n и b_n принимают значение $(2m-1-L)d$, $m = 1, 2, \dots, L = 2^l$, минимальное расстояние между точками сигнала – $d_{\min} = d\sqrt{2E_g}$.

Примеры сигнальных созвездий M-QAM представлены на рис. 18.

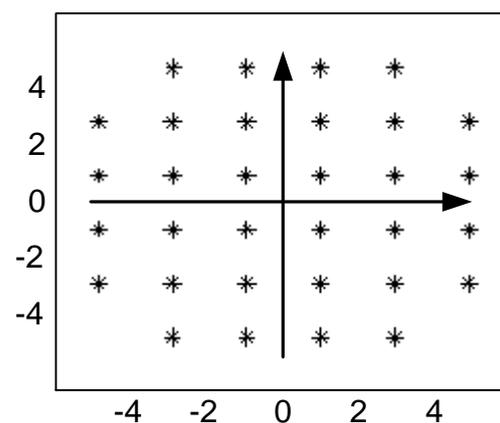
При квадратурной амплитудной модуляции M-QAM информационные биты кодируются, как по амплитуде, так и по фазе передаваемого сигнала. В отличие от сигналов M-PSK и M-FSK, в которых одна степень свободы, в рамках которой кодируются информационные биты, в M-QAM имеется две степени свободы – амплитуда и фаза.

В работе [104] выполнено исследование влияния увеличения числа позиций модуляции M в сигналах PSK, FSK и QAM на достоверность передачи информации. На рис. 19 представлена зависимость вероятности битовой ошибки BER (Bit Error Rate) от ОСШП E_b/N_0 для неортогональных M-PSK (рис. 19а) и ортогональных M-FSK (рис. 19б) сигналов.

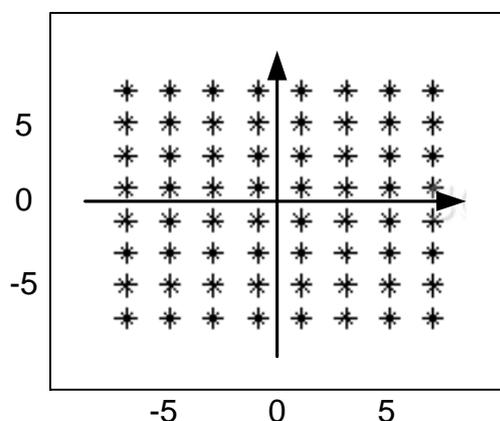
Как видно из рис. 19а BER возрастает с увеличением числа M . А при передаче ортогональных сигналов BER с увеличением M , наоборот, снижается (см. рис. 19б). Физически увеличение BER с ростом M для графиков, изображенных на рис. 19а объясняется тем, что при многофазной передаче сигналов по мере роста M на сигнальную плоскость помещается все больше сигнальных векторов. По мере того, как векторы располагаются плотнее, для появления ошибки требуется все меньше энергии. Размещение большего числа векторов сигналов эквивалентно повышению скорости передачи данных без увеличения ширины полосы пропускания.



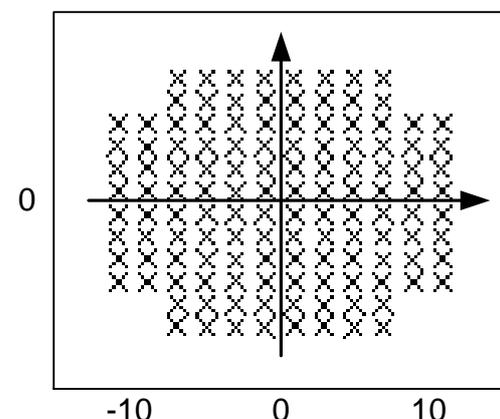
а) Созвездие сигнала 16QAM



б) Созвездие сигнала 32QAM



в) Созвездие сигнала 64QAM



г) Созвездие сигнала 128QAM

Рис. 18. Примеры созвездий сигналов M-QAM

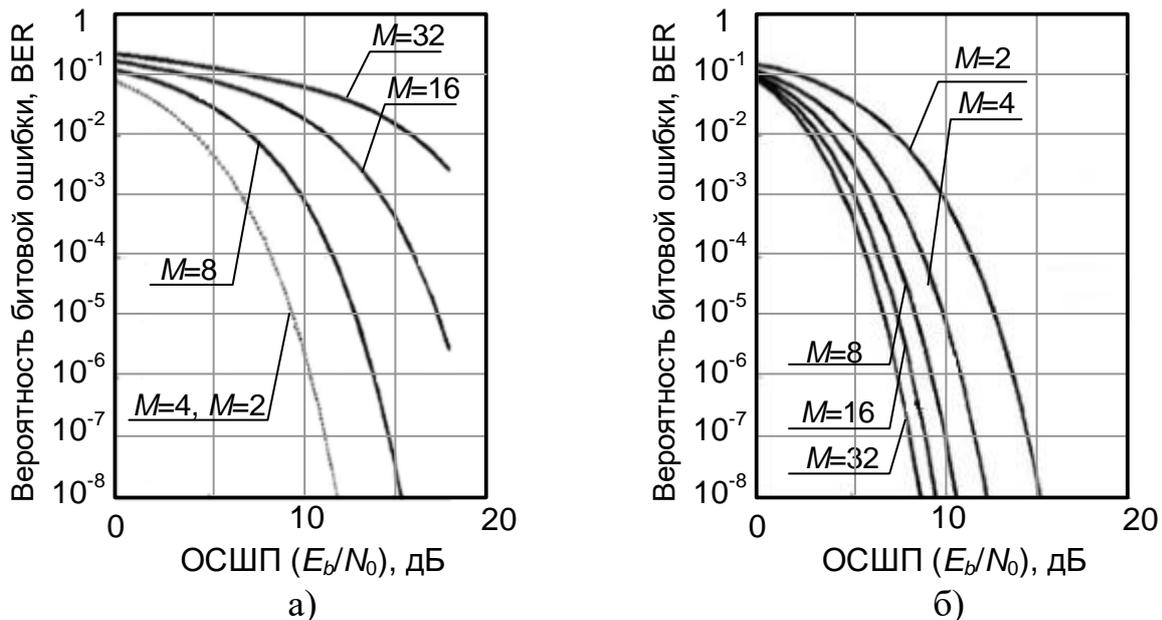


Рис. 19. Зависимость вероятности битовой ошибки BER от ОСШП для M-PSK и M-FSK сигналов: а) Зависимость вероятности битовой ошибки BER от ОСШП E_b/N_0 для неортогональных M-PSK сигналов; б) Зависимость вероятности битовой ошибки BER от ОСШП E_b/N_0 для ортогональных M-FSK сигналов [104]

Для графиков, изображенных на рис. 19б повышение значений M подразумевает увеличение требуемой ширины полосы частот за счет того, что вводятся новые частоты. Расстояние между векторами сигналов M -ортогонального пространства постоянно и введение дополнительной оси (она перпендикулярна всем предыдущим) не приводит к уплотнению, т.е. переданный сигнал не становится более уязвимым к шуму при увеличении числа позиций M , а даже наоборот, вероятность ошибки снижается. Таким образом, для неортогональных сигналов увеличение числа позиций сигналов M позволяет увеличить скорость передачи данных при той же полосе частот канала за счет снижения помехозащищенности (увеличения BER) или требуемого значения ОСШП E_b/N_0 . То есть с увеличением M возрастает спектральная эффективность, а энергетическая, наоборот – снижается. Для ортогональных наборов сигналов увеличение M дает снижение BER, или требуемого E_b/N_0 , за счет увеличения полосы пропускания системы, т.е. наблюдается выигрыш в энергетической эффективности за счет уменьшения спектральной эффективности. Под уменьшением спектральной эффективности понимается разница в значении ОСШП E_b/N_0 при одинаковом значении BER.

Из рис. 19а видно, что модуляции PSK при $M=2$ (BPSK) и при $M=4$ (QPSK) соответствует одна кривая. При этом спектральная эффективность QPSK в 2 раза выше, чем у BPSK. Это объясняется тем, что при использовании QPSK добавляется квадратурная составляющая, а при BPSK используется только синфазная. Тогда при условии, что синфазный и квадратурный потоки битов

независимы, ширина спектра сигнала с QPSK равна половине ширины спектра сигнала с BPSK при одинаковой битовой скорости [105].

Существенно повысить энергетическую эффективность позволяет переход к использованию QAM сигналов. Как видно из рис. 20, сигналы M-QAM превосходят по эффективности сигналы M-PSK, причем энергетический выигрыш M-QAM увеличивается с ростом значения M . Например, для $M=8$ при $BER=10^{-4}$ выигрыш составляет около 0,5 дБ, а при $M=16$ уже около 4 дБ. Физически это объясняется тем, что расстояние между соседними позициями отдельных сигналов в созвездии M-PSK меньше, чем в M-QAM. Созвездие M-PSK представляет собой окружность с равномерно распределенными на ней позициями сигналов, а созвездие M-QAM – квадрат с позициями сигналов, равномерно распределенных по его площади. Чем больше расстояние между позициями сигналов в созвездии, тем менее вероятна ошибка в детектировании соседнего сигнала.

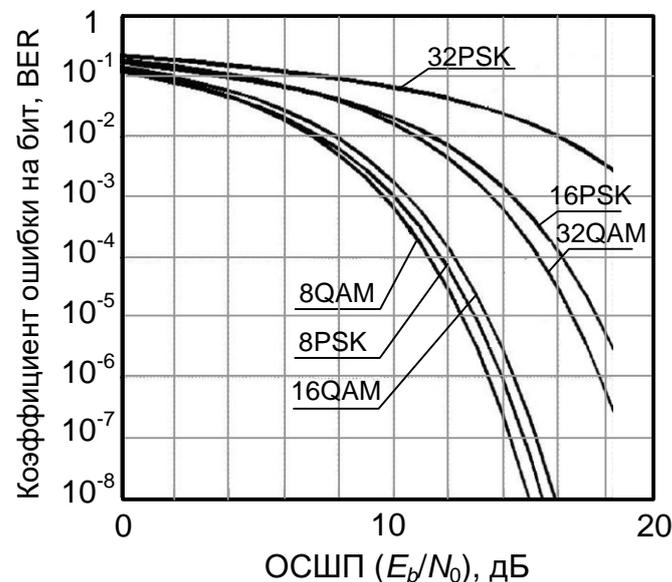


Рис. 20. Зависимость вероятности битовой ошибки BER от ОСШП для M-PSK и M-QAM при $M=8, 16, 32$ [105]

Обобщая вышеуказанное, можно сделать вывод, что M-QAM является более спектрально-эффективным и информационно-емким способом модуляции, поскольку, при заданной ширине полосы сигнала, он позволяет кодировать большее число битов (по сравнению с M-PSK).

5.2.2. Анализ аналитических оценок помехозащищенности PSK и QAM сигналов, а также проверка их адекватности на основе экспериментальных исследований

Произведем оценку уровня помехозащищенности BPSK, QPSK и QAM сигналов для обоснования предложений о возможной замене помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов, на более информационно-емкие QAM сигналы при благоприятной помеховой обстановке.

В теоретических работах (например, [103-107]) для учета различных особенностей приема BPSK, QPSK и QAM сигналов обосновываются различные аналитические выражения для расчета вероятности ошибки на бит, достаточные для инженерного применения, в зависимости от энергетических соотношений ОСШП с АБГШ, некоторые из которых приведены в табл. 9.

Таблица 9 – Выражения для вероятности ошибки на бит в зависимости от ОСШП [103, 104, 106]

Вид сигнала	Выражения для вероятности ошибки на бит в зависимости от ОСШП
M-QAM	$P_e = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3q \log_2 M}{2(M-1)}} \right) \quad (12)$
	$P_e = \frac{1}{\log_2 M} \left[2 \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q \left(\sqrt{\frac{3q \log_2 M}{M-1}} \right) - \left(\frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q \left(\sqrt{\frac{3q \log_2 M}{M-1}} \right) \right)^2 \right] \quad (13)$
16QAM	$P_e = \frac{3}{4} Q \left(\sqrt{\frac{4}{5} q} \right) \quad (14)$
64QAM	$P_e = \frac{7}{12} Q \left(\sqrt{\frac{2}{7} q} \right) \quad (15)$
M-PSK	$P_e = \frac{2}{\log_2 M} \left[Q \left(\sin^2 \left(\frac{\pi}{M} \right) \sqrt{2q \log_2 M} \right) \right] \quad (16)$
BPSK	$P_e = Q(\sqrt{2q}) \quad (17)$
QPSK	$P_e(q) = 2Q(\sqrt{2q}) - Q^2(\sqrt{2q}) \quad (18)$
	$P_e = 2Q(\sqrt{2q}) \quad (19)$

В табл. 9 обозначения имеют следующий смысл: q – отношение эквивалентного ОСШП, равное отношению энергетической плотности сигнала (бита) к энергетической плотности АБГШ; M – количество состояний сигнала, позволяющих передавать в символе $\log_2 M$ битов;

$$Q(z) = p(x \geq z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-x^2/2} dx = \frac{1}{2\sqrt{2}} \operatorname{erfc}(z) \text{ – интеграл вероятности.}$$

Вместе с тем, приведенные в табл. 9 теоретические выражения получены при значительном количестве допущений и требуют экспериментальной проверки. Проверка проводилась в соответствии с методикой, представленной в

работе [108]. Проведенное аналитическое моделирование вышеуказанных аналитических зависимостей (рис. 21 и 22) и сравнение с экспериментальными исследованиями, выполненными по методике [108], показало следующее.

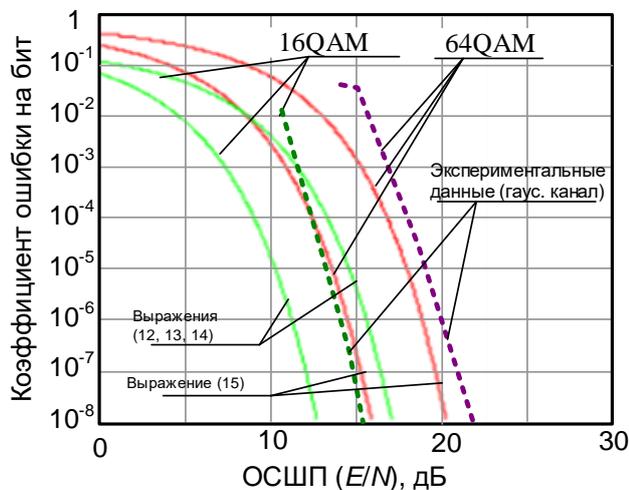


Рис. 21. Результаты экспериментальной проверки аналитической оценки BER для QAM сигналов

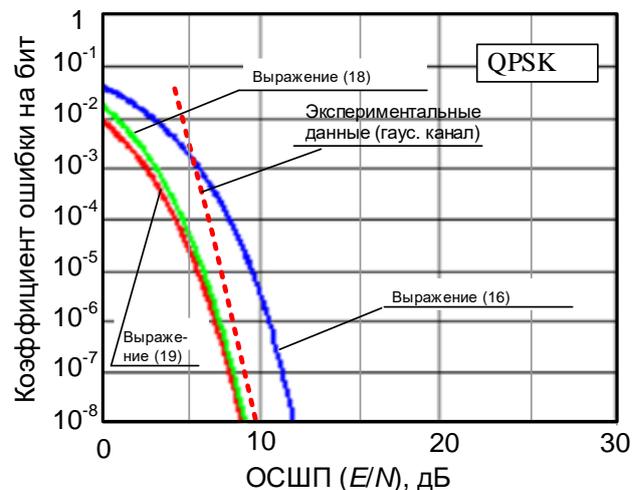


Рис. 22. Результаты экспериментальной проверки аналитической оценки BER для PSK сигналов

Для созвездий сигналов QAM общепринятые частные выражения (14) и (15) сходятся к общей формуле (13), при этом значения, полученные по общим формулам (12) и (13), отличаются на величины до 8 дБ по значению ОСШП. Однако, сравнение значений, полученных по выражениям (12) и (13), с данными экспериментальных исследований показало, что значения, полученные по выражению (13) отличаются от экспериментальных данных для гауссовой модели многолучевого распространения до 10 дБ, что не позволяет его использовать для практических нужд. Вместе с тем, значения, полученные по выражению (12) соответствуют данным для той же модели распространения при значениях вероятности ошибки на бит $P_e \leq 10^{-3}$ с погрешностью до 2 дБ для QAM-16 и до 5 дБ для QAM-64 по значению ОСШП, что является достаточным для инженерного применения. Необходимо отметить, что при увеличении сложности созвездия сигналов погрешность значений, полученных по выражению (12) увеличивается.

Для BPSK и QPSK созвездий сигналов частные выражения (18) и (19) не сходятся к значению общей формулы (16), однако в диапазоне от 6 дБ и выше по ОСШП совпадают со значениями, полученными в результате экспериментальных исследований для гауссовой модели многолучевого распространения радиоволн. Сравнительный анализ значений, полученных по общей формуле (16), и значений, полученных по выражениям (18) и (19), а также экспериментальных данных показал, что расхождения в расчетах для выражения (16) составляют до 7 дБ, что позволяет использовать данное выражение при приблизи-

тельных расчетах с учетом указанной погрешности только в условиях высоких значений ОСШП.

Таким образом, для приближенного инженерного расчета и оценки уровня помехоустойчивости QAM, BPSK и QPSK, без учета особенностей многолучевого распространения радиоволн, можно использовать выражения (12), (17), (18), (19).

5.2.3. Коррекция аналитических оценок помехозащищенности PSK и QAM сигналов на основе экспериментальных исследований с учетом многолучевого распространения радиоволн

Для коррекции аналитических выражений оценки помехозащищенности, зависящих от единственного параметра ОСШП (определяемого как отношение мощности сигнала на несущей к спектральной плотности АБГШ) E_b/N_0 , а также учета многолучевого распространения радиоволн были проведены экспериментальные исследования. Экспериментальная оценка помехоустойчивости BPSK, QPSK и QAM сигналов проводилась по методике, представленной в работе [108]. При этом рассматривались следующие модели многолучевого распространения [108-110].

1. Модель гауссовского канала – соответствует каналу с АБГШ, в котором многолучево́сть полностью отсутствует, то есть рассматривается один прямой луч между ПРД и ПРМ. Таким образом, данная модель описывает идеальные условия распространения, не встречающиеся на практике, и, как правило, используется для получения оценки с идеальными условиями распространения.

2. Модель райесовского канала – соответствует каналу с помехами (АБГШ, импульсный шум, гармонические сигналы, переходные помехи из смежных и соседних каналов и пр.), моделирует наличие прямого луча и нескольких отраженных лучей с разными мощностью и задержками прихода в точку приема, статистические свойства которых описываются распределением вероятностей Райса. Данная модель соответствует приему на наружную направленную антенну.

3. Модель рэлеевского канала – отличается от райесовского канала отсутствием прямого луча, при этом статистические свойства отраженных лучей описываются распределением вероятностей Рэля. Применяется при моделировании условий приема на портативное оборудование (как вне, так и внутри помещений), при приеме в движении и в отсутствие прямой видимости передатчика [110].

Таким образом, модель гауссовского канала соответствует «идеальным» условиям, модель райесовского канала – режиму фиксированной ЛРС (в том числе и в составе многопролетной ЛРС с ретрансляцией сигналов), а модель райесовского канала – работе ПРД в режиме станции широкополосного вещания/доступа и приему от нее сигналов мобильными абонентами, в том числе в условиях пересеченной местности.

Экспериментальные исследования линии радиосвязи «ПУ – ЛА» с QAM, BPSK и QPSK сигналами проводились с помощью прибора для тестирования вещательного оборудования SFU фирмы Rohde & Schwarz и комплексного анализатора сигналов MS2721B фирмы Anritsu. В качестве дополнительного контрольного средства использовался измерительный приемник EFA-T фирмы Rohde & Schwarz. Прибор SFU позволяет сформировать QAM, BPSK, QPSK и OFDM сигналы с внесением в них детерминированных искажений, соответствующих различным шумам и помехам при передаче и приеме сигнала в реальном тракте. С помощью анализатора MS2721B можно измерить параметры принимаемого сигнала и после его демодуляции и декодирования с коэффициентами ошибок в широком диапазоне. Таким образом, эти измерительные приборы позволяют выбрать режимы работы ЛРС (модуляцию, кодовую скорость, защитный интервал) и модель канала цифрового вещания (вид многолучевости), задать требуемую интенсивность помех и оценить помехоустойчивость приема.

Для учета множественности реализаций моделей каналов за основу были приняты модели каналов с АБГШ, содержащие по 20 отраженных лучей [109] с кодовой скоростью $R=2/3$ (рис. 23) и $R=3/4$ (рис. 24). В качестве помехоустойчивого кода использовался код Витерби.

Результаты экспериментальной оценки помехозащищенности ЛРС с QAM, BPSK и QPSK сигналами представлены в виде граничного значения коэффициента ошибки на бит, который соответствует вероятности ошибочного приема бита P_e после различных этапов декодирования (рис. 23 и 24):

- на входе декодера Витерби ($P_{e\ in\ Vit}$);
- на выходе декодера Витерби ($P_{e\ out\ Vit}$).

Влияние многолучевости на характеристики помехоустойчивости ЛРС в райсовском и рэлеевском каналах с АБГШ показано на рис. 25 и 26. Для исследования использовались стандартные модели каналов радиосвязи [109], содержащие по 20 отраженных лучей при кодовой скорости $R=3/4$.

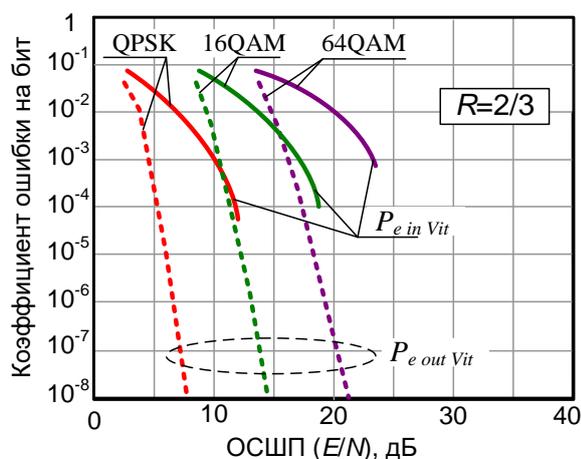


Рис. 23. Влияние скорости кодирования на коэффициент ошибки при $R=2/3$

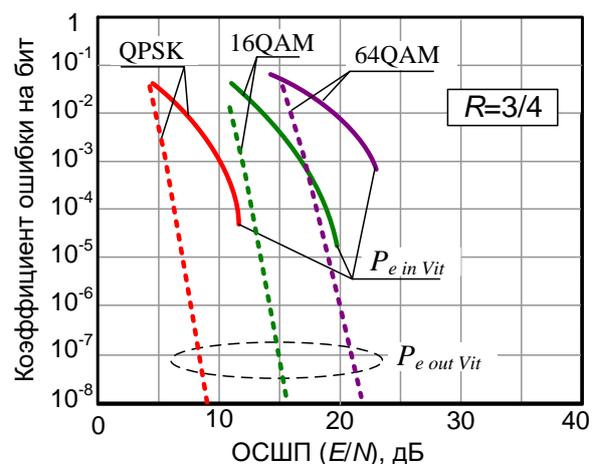


Рис. 24. Влияние скорости кодирования на коэффициент ошибки при $R=3/4$

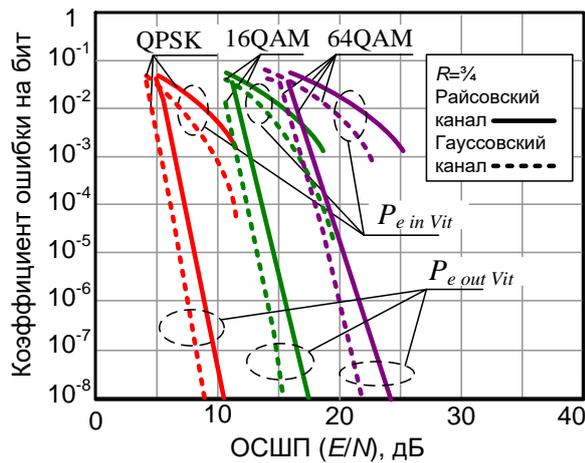


Рис. 25. Влияние многолучевости на райсовский канал

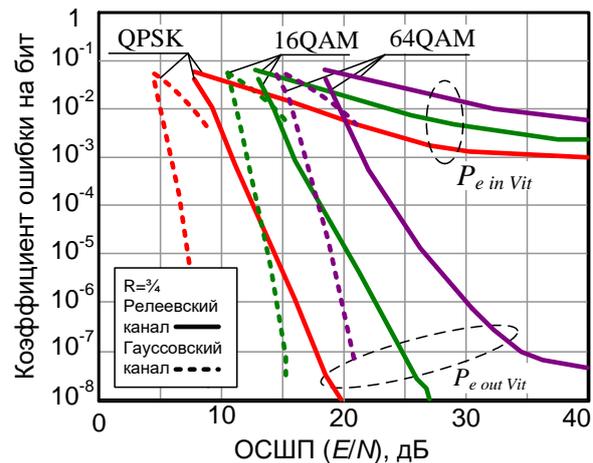


Рис. 26. Влияние многолучевости на рэлеевский канал

Анализ зависимостей, изображенных на рис. 25 показал, что значения показателей $P_{e in Vit}$ и $P_{e out Vit}$ для райсовского канала, в общем, соответствуют значению тех же показателей в гауссовском канале при сдвиге их вправо примерно на 1,2 дБ, что соответствует значению потерь, возникающих за счет отраженных сигналов. По мере роста ОСШП E_b/N_0 увеличивается отклонение показателей $P_{e out Vit}$, что соответствует изменению структуры ошибок в ЛРС и на выходе декодера Витерби, возникающих за счет группы отраженных сигналов.

Вышеуказанный эффект изменения структуры ошибок в ЛРС и резкое снижение помехоустойчивости также проявляются в модели рэлеевского канала (рис. 26). Даже при высоких значениях ОСШП E_b/N_0 наблюдается устойчиво-постоянное значение показателя ошибок в канале $P_{e in Vit}$, при котором данный показатель стремится к некоторому предельному значению. Причем для созвездия сигналов 64QAM эффект стремления к устойчиво-постоянному значению наблюдается и для показателя $P_{e out Vit}$. Это показывает, что даже при низком значении ОСШП вероятность ошибки в рэлеевском канале не может быть произвольно низкой. Исследование, проведенное в работе [108], показало, что в аналогичных условиях для созвездия сигналов 64QAM в области $E_b/N_0 > 30$ дБ ошибки приема возникают в виде коротких пакетов длиной до 10 бит, разделенных безошибочными интервалами до нескольких десятков секунд.

С целью оценки положительного влияния кодека Витерби на прием сигналов с недостаточной помехоустойчивостью были исследованы значения $P_{e out Vit}$ в райсовском и рэлеевском каналах для различных кодовых скоростей.

Зависимости, приведенные на рис. 27 и 28, позволяют оценить качественный характер и значения снижения помехоустойчивости для созвездия сигналов 64QAM в многолучевых каналах. Для райсовского канала (рис. 27) во всем диапазоне кодовых скоростей снижение $P_{e out Vit}$ при увеличении ОСШП имеет линейную зависимость и составляет 0,5-1,5 дБ. В рэлеевском канале (рис. 28) при увеличении кодовой скорости наблюдается эффект стремления $P_{e out Vit}$ к устойчиво-постоянной зависимости, когда увеличение ОСШП не ведет к повышению помехоустойчивости приема сигналов. Причем именно значение кодовой скорости определяет начало такого устойчиво-постоянного участка зави-

симости $P_{e\ out\ Vit}(q)$. Таким образом, рэлеевский канал является наиболее сложным случаем распространения радиоволн, и для обеспечения заданного уровня помехоустойчивости приема в нем необходимо не только иметь высокий уровень ОСШП, но и реализовать перестройку кодовой скорости в кодеке Витерби для обеспечения использования его на линейных участках зависимости $P_{e\ out\ Vit}(q)$.

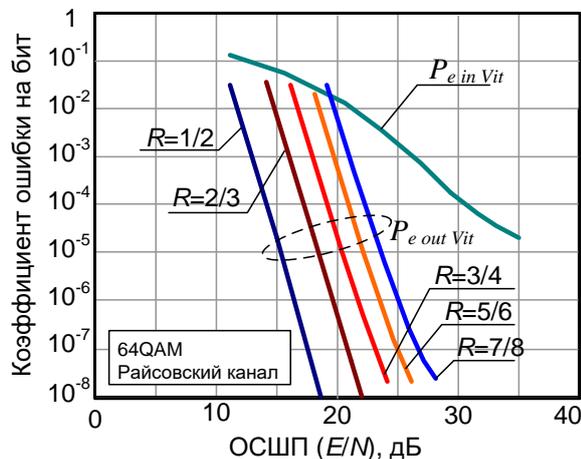


Рис. 27. Зависимость отношения коэффициента ошибки на бит от ОСШП для райсовского канала

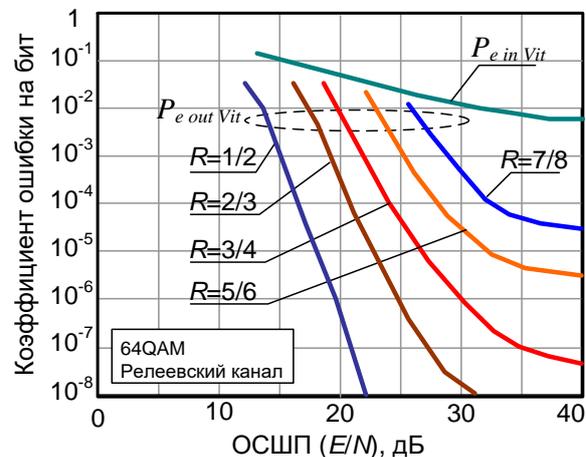


Рис. 28. Зависимость отношения коэффициента ошибки на бит от ОСШП для рэлеевского канала

Проведенный анализ помехозащищенности сигналов BPSK, QPSK, 16QAM и 64QAM показал, что граничное значение битовой ошибки в 10^{-3} , требуемое для достоверной передачи фото- и видео-разведанных, может быть обеспечено не только помехозащищенными BPSK и QPSK сигналами, но и информационно-емкими 16QAM и 64QAM сигналами в условиях благоприятной помеховой обстановки. Дополнительным способом повышения скорости передачи может являться переход от использования помехоустойчивых кодов с фиксированной скоростью кодирования к сверточному кодированию Витерби с переменной скоростью кодирования.

На основе анализа результатов эмпирических исследований, представленных на рис. 23-28, в методике повышения скорости передачи данных в СВРС за счет адаптивного распределения сигнального ресурса сети будут предложены конкретные схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования для повышения скорости передачи данных ЛРС в условиях благоприятной помеховой обстановки и с учетом требуемого значения битовой ошибки в 10^{-3} , необходимого для передачи фото- и видео- разведанных.

5.3. Выводы по моделированию адаптивного использования энергетического и сигнального ресурсов сети воздушной радиосвязи

По результатам проведенного моделирования можно сделать следующие выводы. Повышение скорости обмена данными между ПУ и ЛА может вестись путем рационализации использования сигнального ресурса СВРС, а именно:

- перехода к использованию на ЛА направленных антенн, с целью повышения энергетического выигрыша по показателю ОСШП;
- перехода к использованию технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ при высоких значениях ОСШП, при этом целесообразно предусмотреть использование не только помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов, которые используются в настоящее время, но и информационно более емких QAM сигналов.

В составе модели использования сигнального ресурса СВРС для повышения скорости обмена данными в модели формализованы и исследованы следующие факторы, совместный учет которых составляет научную новизну модели:

- использование направленных антенных систем на ЛА (рассматривались: многоэлементная кольцевая антенна; ФАР; комплект переключаемых антенн; параболическая антенна на ОПУ);
- пространственные (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временные (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметры колебания точки прицеливания направленной антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА;
- учет возможности применения технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, который позволит повысить скорость передачи данных в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM);
- учет изменения особенностей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» в процессе полета ЛА за счет эмпирических данных об исследовании функционирования технологии АСМ, а также об исследовании качества приема PSK и QAM сигналов, которые предполагаются к использованию в предлагаемом варианте технологии АСМ для каналов СВРС, в рамках гауссовской, райевской и рэле-евской моделей распространения радиоволн.

Отметим, что учет вышеперечисленных факторов позволяет обосновать предложения по повышению скорости обмена данными отдельного частотного канала в СВРС, однако вопрос требуемого числа таких каналов, выделяемых в СВРС для обеспечения обмена разведанными между ПУ и ЛА с требуемым качеством, остался неисследованным. В связи с этим целесообразно на основе представленной модели использования сигнального ресурса СВРС сформировать модель организации доступа абонентов к СВРС, которая описала бы процесс выделения частотных каналов СВРС отдельным абонентам с учетом интенсивности информационного обмена с ними. При этом введено допущение о том, что в каждом частотном канале СВРС реализуется предложенный вариант технологии АСМ с целью повышения скорости обмена данными в нем.

6. Модель адаптивного использования частотного ресурса сети воздушной радиосвязи и организации доступа абонентов к сетевой среде

Как сказано выше, для высокоскоростной передачи разведанных каналообразующая аппаратура авиационной радиосвязи позволяет организовать многоканальные (многочастотные) СВРС:

- в стандартном УКВ диапазоне авиационной радиосвязи 30-88, 100-145, 156-174 и 220-400 МГц с каналами шириной 25 кГц и со скоростью передачи данных до 16 кбит/с в каждом канале;
- в перспективном диапазоне авиационной радиосвязи (2-6 ГГц), в котором формируются каналы со случайным множественным доступом по технологии CSMA/CA с полосой частот по 140 МГц и со скоростью передачи до 34,3 Мбит/с в каждом канале.

Дополнительно к этим режимам для высокоскоростной передачи разведанных предлагается в перспективном диапазоне авиационной радиосвязи (2-6 ГГц) формировать высокоскоростные каналы с предлагаемым вариантом реализации технологии АСМ, со случайным множественным доступом абонентов по технологии CSMA/CA и с полосами частот каналов по 5, 10, 15, 20 МГц и с потенциально достижимой скоростью передачи от 5,36, 11,2, 16,8 и 22,4 Мбит/с, соответственно, в каждом канале.

Данные высокоскоростные каналы должны выделяться в СВРС абонентам с учетом интенсивности формируемого ими трафика разведанных. Для моделирования процесса выделения каналов необходимо сформировать модель организации доступа абонентов к СВРС. Данная модель формализует процесс выделения частотных каналов СВРС отдельным абонентам с учетом интенсивности информационного обмена ими разведанными при допущении о том, что в каждом частотном канале реализуется алгоритм случайного множественного доступа, а максимальная пропускная способность канала соответствует реализации предложенного варианта технологии АСМ.

Формирование модели ведется в 2-а этапа (рис. 29):

1) формализация процесса случайного множественного доступа к отдельному частотному каналу СВРС с целью получения аналитических выражений для оценки качества обслуживания трафика разведанных (задержки передачи и вероятности отказа в обслуживании) в одном канале с учетом того, что пропускная способность канала определяется реализацией технологии АСМ;

2) формализация процесса распределения частотных каналов СВРС с целью получения значения количества каналов, необходимых для передачи трафика разведанных заданной интенсивности с требуемым качеством, при том, что вероятностно-временные характеристики отдельного канала были определены на предыдущем этапе.

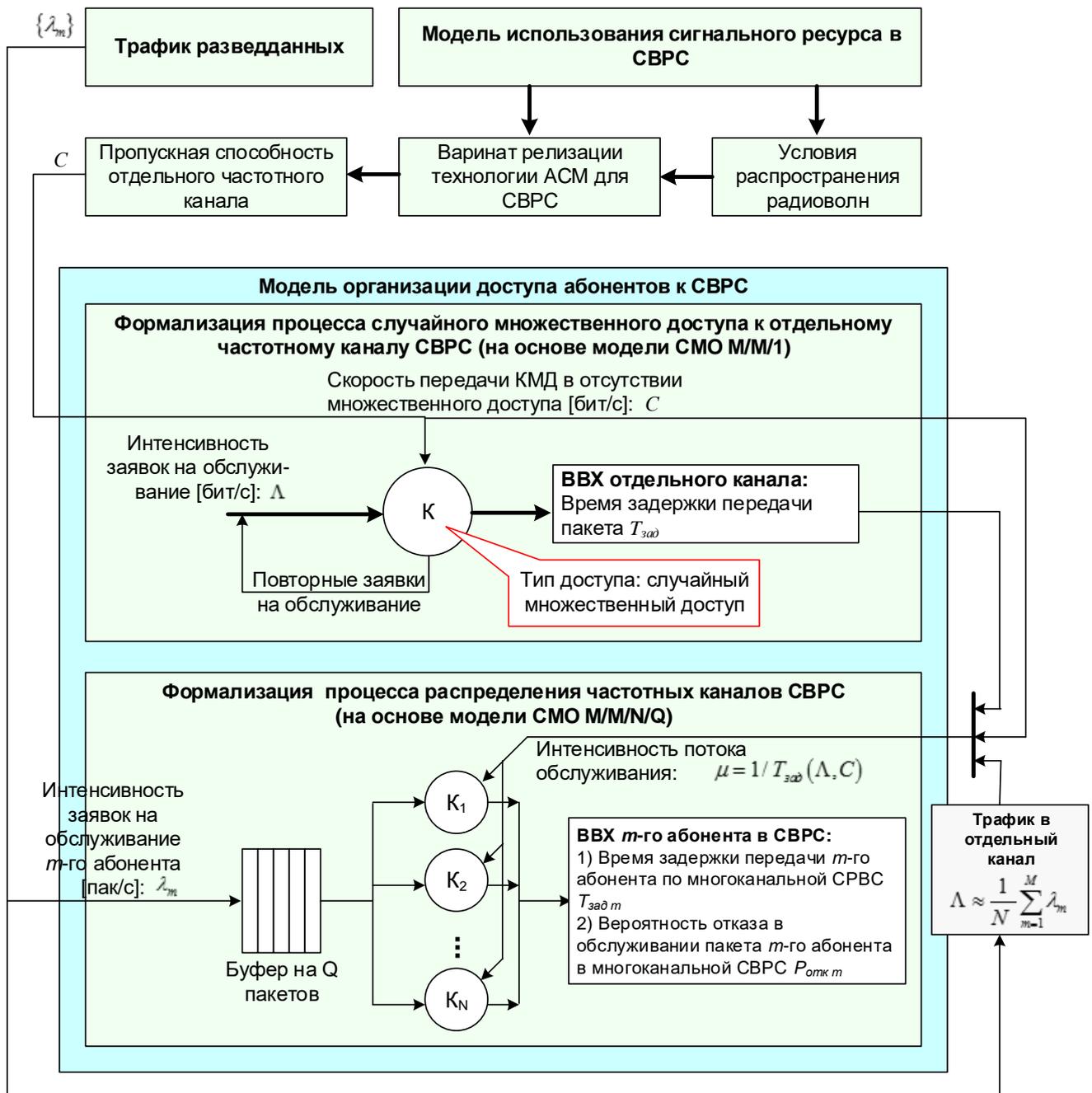


Рис. 29. Схема модели организации доступа абонентов к СВРС

В работе [20] разработана модель ненастойчивого множественного доступа с проверкой несущей (МДПН) для сети со случайным множественным доступом, в которой в качестве исходных данных выступают вероятности появления заявок и вероятность успешной передачи заявки, нормированных ко времени передачи типовой заявки. В работах [56, 57] эта модель была переработана в модель СВРС, функционирующей по протоколу CSMA/CA на отдельном частотном канале. В данном разделе данная модель приводится для обоснования интенсивности обслуживания отдельного частотного канала СВРС, функционирующего в режиме канала множественного доступа (КМД).

6.1. Алгоритм функционирования абонента в процессе случайного множественного доступа к каналу

Алгоритм работы абонента в модели МДПН представляет собой следующую последовательность действий (рис. 30):

- 1) если КМД свободен, то абонент передает пакет;
- 2) если КМД занят, то абонент откладывает свою передачу на более позднее время, в соответствии с распределением задержки повторной передачи. Когда наступает это время, абонент вновь проверяет КМД и повторяет вышеуказанные действия.

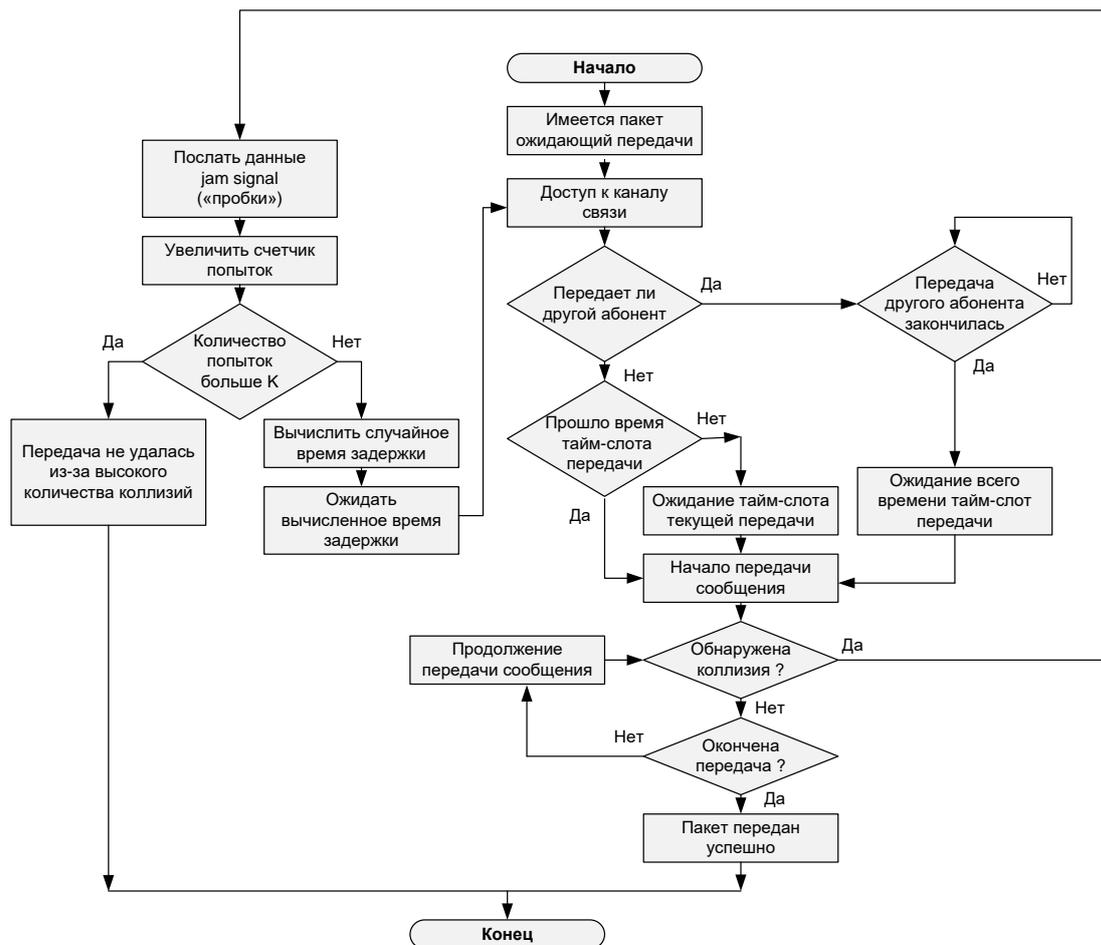


Рис. 30. Общая схема АСМСД в СВРС

6.2. Формирование исходных данных для моделирования

Исходными данными для построения модели СВРС с АСМСД являются:
 M – количество абонентов, совместно использующих КМД СВРС;

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

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

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

ходящееся на всех абонентов;

G_m – вероятность того, что m -й абонент передает пакет в каком-либо окне;

$$G = \sum_{m=1}^M G_m = 1 \text{ – средний трафик в КМД, определяемый как число попыток}$$

передач пакетов за время окна P_{win} ;

T_w – среднее время, за которое пакет будет успешно принят;

S/G – средняя вероятность успешной передачи в сети;

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

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

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

$t_{кв}$ – нормированное время до получения квитанции (предполагается, что заблокированный пакет или потерпевший наложение пакет задерживается на время до получения квитанции).

Допущения модели МДПН: канал является бесшумным; все абоненты находятся в пределах прямой видимости; канал для передачи квитанций отделен от рассматриваемого канала и полагается, что квитанции прибывают надежно и без затрат. Результаты модели получены в допущение, что нагрузка сети стремится к нулю.

6.3. Расчет показателей качества обслуживания абонентов при их случайном множественном доступе к отдельному частотному каналу сети воздушной радиосвязи

Среднее число успешных передач за окно длиной P_{win} определяется как [20]:

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}}, \quad (20)$$

а средняя задержка пакета, выраженная в количестве окон:

$$T_w = \left(\frac{G}{S} - 1 \right) (2a + 1 + t_{кв} + K) + 1 + a. \quad (21)$$

Выразим параметры модели МДПН через абсолютные величины и введем новые переменные для формирования модели СВРС:

D_{mes} – длина пакета (УКВС) в битах;

C – пропускная способность КМД (отдельного частотного канала) СВРС в бит/с;

C_e – эффективная скорость КМД (отдельного частотного канала) СВРС в бит/с;

T_{max} – ограничение на максимальное время жизни пакета (обязательное условие для систем реального времени) в секундах;

$T_{зад}$ – время задержки пакета в отдельном частотном канале СВРС, с;

T_{liv} – время «жизни пакета» при его передаче по СВРС, с;

λ_m – интенсивность трафика в бит/с, поступающего от m -ого ЛА.

Параметр a в выражении (21) зависит от радиуса СВРС и определяется максимальным расстоянием между самыми удаленными абонентами (ЛА) в СВРС:

$$a = \frac{d_{\max} / c}{P_{\text{win}}} = \frac{d_{\max} C}{c D_{\text{mes}}}, \quad (22)$$

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

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

$$P_{\text{win}} = \frac{D_{\text{mes}}}{C}. \quad (23)$$

Интенсивность поступления пакетов от m -го абонента эквивалентна количеству порождаемых этим терминалом пакетов, длиной D_{mes} бит, за время длительности окна P_{win} . То есть:

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

откуда следует, что вероятность того, что m -й абонент передаст пакет равна:

$$G = \frac{P_{\text{win}}}{D_{\text{mes}}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{D_{\text{mes}}}{C / D_{\text{mes}}} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m. \quad (24)$$

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

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

Подставляя (20), (22), (23) в (24), получим выражение для определения среднего количества успешных передач пакетов нормированное к длине окна. Учитывая, что S – нормированная величина и выражая эффективную скорость канала через C_e получим:

$$C_e = SC = C \frac{\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m e^{-\frac{d_{\max} C}{c D_{\text{mes}}} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m}}{\frac{1}{C} \left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{c D_{\text{mes}}} \right) \sum_{m=1}^M \lambda_m + e^{-\frac{d_{\max} C}{c D_{\text{mes}}} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m}} = \frac{C e^{-\frac{d_{\max} C}{c D_{\text{mes}}} \sum_{m=1}^M \lambda_m} \sum_{m=1}^M \lambda_m}{\left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{c D_{\text{mes}}} \right) \sum_{m=1}^M \lambda_m + C e^{-\frac{d_{\max} C}{c D_{\text{mes}}} \sum_{m=1}^M \lambda_m}} \quad (26)$$

В выражении (26) параметр C соответствует пропускной способности КМД в отсутствие использования технологии случайного множественного доступа. Параметр C соответствует пропускной способности отдельного частотного канала СВРС.

Определим время задержки при передаче в СВРС в секундах из выражения (21). Параметр $t_{\text{кв}}$, отвечающий за доставку квитанции не зависит от параметров канала в модели МДПН, что определяется введенными в эту модель допущениями. Если убрать допущение о том, что квитанции доставляются

надежно по отдельному каналу и без затрат и учетом специфику СВРС, получим, что квитанции доставляются по тому же каналу; а m -й абонент в ответ на входящий трафик генерирует ответный трафик квитанций с интенсивностью $\lambda_{m\text{ кв}}$ бит/с. В этом случае из (24) получим:

$$G_m = \frac{P_{win}}{D_{mes}} (\lambda_m + \lambda_{m\text{ кв}}),$$

тогда:

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{ кв}}) = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{ кв}}). \quad (27)$$

Определим $t_{кв}$, как задержку пакета квитанции, который не требует квитанции успешного приема:

$$t_{кв} = \left(\frac{S}{G} - 1 \right) (2a + 1 + K) + 1 + a. \quad (28)$$

Тогда выражение для времени задержки, выраженной в секундах, будет определяться из (21) и (28):

$$T_{зад} = P_{win} T_W = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{G}{S} - 1 \right) \left(\frac{G}{S} (2a + K + 1) + 1 + a \right) + 1 + a \right], \quad (29)$$

где: G – определяется из выражения (27), a – выражением (22) и S – определяется равенством:

$$S = \frac{e^{-\frac{d_{max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{ кв}})} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{ кв}})}{\left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right) \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{ кв}}) + C e^{-\frac{d_{max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{ кв}})}}. \quad (30)$$

Отметим, что для СВРС, как для системы управления и системы ретрансляции данных в режиме времени близкому к реальному, накладывается ограничение на максимальное время доставки пакета по СВРС – T_{max} . Для выражения (29) параметр K является варьируемым, однако необходимо учитывать условие, при котором передача пакета в СВРС имеет смысл. При превышении времени нахождения в сети T_{liv} («жизни пакета») максимально допустимого значения T_{max} передача пакета становится нецелесообразной, поэтому на параметр K накладвается ограничение:

$$K \leq \frac{T_{max} - T_{liv}}{P_{win}},$$

откуда с учетом (24) получим:

$$K \leq \frac{C(T_{max} - T_{liv})}{D_{mes}}. \quad (31)$$

Дополнительный трафик квитанций будет влиять на эффективную скорость канала и выражение (26) с учетом (27) примет вид:

$$C_e = \frac{C e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})}{\left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}}\right) \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}}) + C e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})}}. \quad (32)$$

Рассмотрим случай, когда в ответ на каждые несколько принятых пакетов абонент генерирует один пакет квитанции. Длина информационного пакета и пакета квитанции совпадают и равны D_{mes} . В этом случае можно ввести коэффициент $k_{кв}$, который показывает долю трафика квитанций, который генерируется как подтверждение успешно принятых пакетов трафика. Например, если $k_{кв}=0,1$, то на 10 пакетов информационного трафика генерируется 1 пакет квитанции, то есть:

$$k_{кв} = \lambda_{m\text{кв}}/\lambda_m. \quad (33)$$

Введем обозначение: Λ – общая интенсивность трафика, генерируемого всеми абонентам (ЛА) в СВРС, выраженная в бит/с:

$$\Lambda = (1 + k_{кв}) \sum_{m=1}^M \lambda_m. \quad (34)$$

В итоге, получим систему выражений для определения эффективной пропускной способности канала и задержки канала:

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \frac{\Lambda e^{-\Lambda \frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}{\Lambda \left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}}\right) + C e^{-\Lambda \frac{d_{\max}}{cD_{mes}}}}; \\ C_e = CS; \\ T_{\text{зад}} = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(\frac{\Lambda}{SC} \left(2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} + K + 1 \right) + 1 + \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \right) + 1 + \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \right]; \\ K \leq \frac{C(T_{\text{max}} - T_{\text{liv}})}{D_{mes}}. \end{array} \right. \quad (35)$$

Система (35) определяет характеристики качества обслуживания в СВРС при пакетной коммутации в условиях, когда надежность передачи обеспечивается передачей квитанций об успешном приеме по этому же каналу. Такие КМД характерны для СВРС с АСМСД, обслуживающих группу ЛА и наземный ПУ.

Модель СВРС получена при следующих допущениях: все абоненты находятся в зоне видимости друг от друга, скрытые абоненты отсутствуют; все абоненты статистически одинаковы, доминирующие источники отсутствуют; трафик в КМД представляет собой стационарный, независимый процесс, который является пуассоновским; нагрузка сети стремится к нулю.

Время запаздывания передачи команд и разведанных между ПУ и ЛА определяется временем передачи пакетов в канале СВРС. С учетом этого своевременность передачи трафика в СВРС определяется выражением (35). Эта

своевременность рассчитывается, как функция от интенсивности входного потока сообщений (Λ), длины сообщений (D_{mes}), максимального радиуса сети (d_{max}) и пропускной способности КМД (C), и из выражения (21) с учетом (22), (27) и (30), при ограничениях на отсутствие квитиования заявок, составит:

$$T_{зад} = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} \right]. \quad (36)$$

А для случая с квитиованием заявок из выражения (29), с учетом (22), (27) и (30), время задержки сообщения составит:

$$T_{зад} = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} + \left(\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \times \left(2 \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} \right) + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} \right]; \quad (37)$$

где:

$$S = \frac{\Lambda e^{-\Lambda \frac{d_{max}}{c D_{mes}}}}{\Lambda \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} \right) + C e^{-\Lambda \frac{d_{max}}{c D_{mes}}}}. \quad (38)$$

В данном подразделе представлены выражения для времени задержки пакета в отдельном частотном канале СВРС ($T_{зад}$) в зависимости от интенсивности трафика (Λ), поступающего в отдельный частотный канал в режиме КМД с АСМСД по протоколу CSMA/CA. Эти зависимости получены для случаев с квитиованием (выражение (36)) и без квитиования (выражение (37)) поступающего в канал трафика Λ . При этом параметр пропускной способности C в данных выражениях соответствует пропускной способности отдельного частотного канала СВРС с учетом реализации варианта технологии АСМ. В дальнейшем значение времени задержки пакета в отдельном частотном канале ($T_{зад}$) будет использовано для обоснования средней интенсивности обслуживания отдельного канала в многоканальной (многочастотной) СВРС, в интересах определения необходимого числа каналов, которые должны выделяться каждому ЛА для передачи разведанных с требуемой интенсивностью и качеством обслуживания.

6.4. Моделирование процесса распределения частотных каналов сети воздушной радиосвязи

Для моделирования процесса распределения частотных каналов сети воздушной радиосвязи введем следующие обозначения:

- C – пропускная способность отдельного частотного канала СВРС в бит/с;
- c – скорость распространения электромагнитных волн;
- D_{mes} – длина пакета (УКВС) в битах;
- l – длина очереди в СМО, бит;
- M – количество абонентов в СВРС;
- m – номер абонента в сети;

N – количество каналов СВРС, выделяемых для обслуживания M абонентов;

n – количество каналов СВРС, выделяемых для обслуживания конкретного абонента сети;

$P_{отк\ m}$ – вероятность отказа в обслуживании пакета трафика m -го абонента в многоканальной СВРС, вследствие возникающего превышения очереди на обслуживания объема буфера;

Q – размер буфера передатчика абонента, бит;

$T_{зад}$ – время обслуживания пакета в отдельном частотном канале СВРС, с;

$T_{зад\ m}$ – время обслуживания пакета трафика m -го абонента в многоканальной СВРС, с;

$T_{ож\ m}$ – время ожидания в очереди пакета трафика m -го абонента, при его обработке в многоканальной СВРС, с;

V – производительность одного канала обслуживания, бит/с;

$y = \lambda_m/\mu$ – нагрузка СМО;

z – число занятых каналов обслуживания в СМО, формализующей процесс распределения частотных каналов в СВРС;

Λ – суммарный трафик, поступающий в СВРС от всех абонентов;

λ_m – интенсивность трафика в бит/с поступающего от m -го абонента сети;

μ – интенсивность обслуживания трафика абонентов в отдельном частотном канале, бит/с;

ρ – загрузка СМО.

Алгоритм распределения каналов СВРС отдельным абонентам представляет собой следующую последовательность действий:

1) весь трафик m -го абонента (λ_m) поступает в СВРС из буферного устройства размером Q бит и распределяется равномерно между N выделенными абоненту частотными каналами;

2) доля трафика m -го ЛА ($\approx \lambda_m/N$) направляется в каждый КМД, где он обслуживается с интенсивностью обслуживания $\mu=1/T_{зад}$ ($T_{зад}$ определяется в соответствии с выражениями (36) и (37));

3) если дополнительный трафик абонента, поступающий в каналы КМД, ведет к повышению времени обслуживания трафика или к снижению вероятности отказа в обслуживании так, что эти параметры перестают удовлетворять требованиям к качеству обслуживания (эти требования представлены в табл. 3 и 4 для различных типов передаваемых данных), то абоненту выделяется дополнительный частотный канал СВРС $N+1$.

Исходя из данных положений процесс обслуживания трафика отдельного абонента можно представить, как модель СМО типа $M/M/N/Q$. Допущения модели: трафик от одного абонента соответствует простейшему потоку с интенсивностью λ_m ; значение величины времени обслуживания распределено экспоненциально $\mu=1/T_{зад}$.

6.5. Моделирование процесса случайного множественного доступа абонентов к отдельному каналу сети воздушной радиосвязи

Отдельный абонент формирует поток трафика с интенсивностью λ_m , который поступает в N каналов обслуживания, при этом в каждом из этих каналов реализуется случайный множественный доступ и обслуживание этого и других абонентов в соответствии с АСМСД. При формировании модели следует учесть, что в каналах помимо трафика λ_m данных m -го абонента обслуживается и трафик других абонентов сети. В результате, при допущениях о равномерном распределении трафика между каналами обслуживания и о равенстве источников трафика, получим модель М/М/Н/Q многоканальной СВРС, представленную на рис. 31.

В данной модели суммарная интенсивность трафика, поступающего от всех абонентов СВРС, будет равна:

$$\sum_{m=1}^M \lambda_m.$$

При допущении о равномерной загрузке каналов СВРС получим, что в каждый из N каналов поступает трафик с интенсивностью:

$$\Lambda \approx \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M \lambda_m. \tag{39}$$

Значение Λ используется при расчете времени задержки пакета в отдельном частотном канале СВРС $T_{зад}$, т.к. каждый канал представляет собой КМД с АСМСД, а в данной модели введено допущение о равномерной загрузке каналов от всех абонентов СВРС.

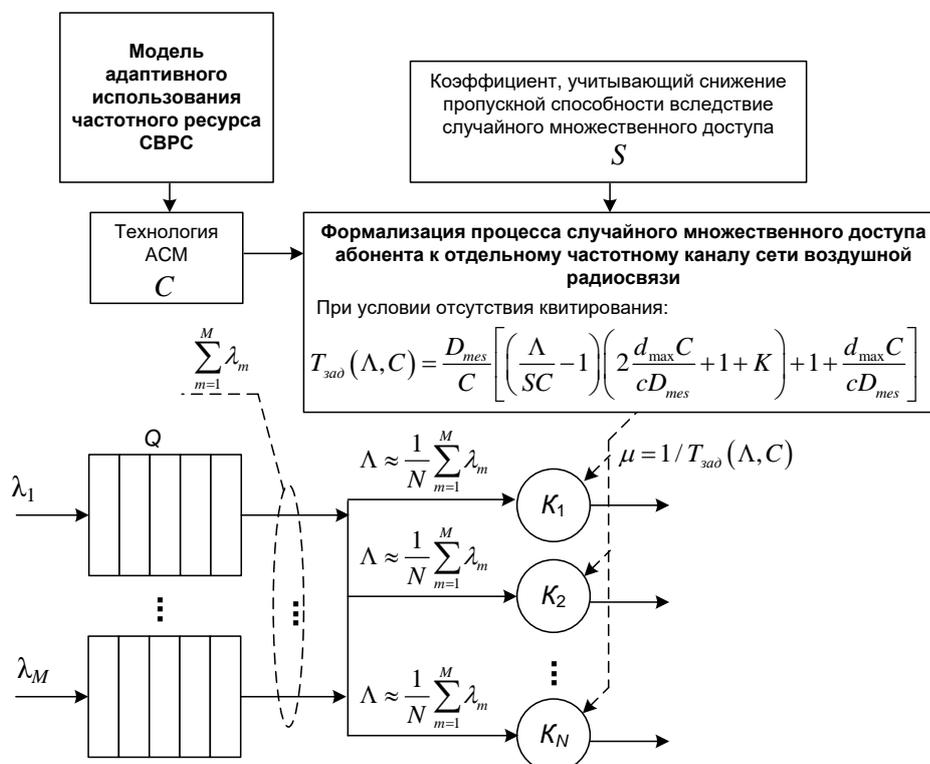


Рис. 31. Схема процесса распределения частотных каналов в многоканальной СВРС относительно всех абонентов сети

Значение $T_{зад}$ рассчитывается как функция от интенсивности входного потока сообщений (Λ), длины сообщений (D_{mes}), максимального радиуса сети (d_{max}) и пропускной способности КМД (C) и составляет при отсутствии квитирования заявок:

$$T_{зад}(\Lambda, C) = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right]; \quad (40)$$

при квитировании заявок:

$$T_{зад}(\Lambda, C) = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} + \left(\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times \left(2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right) + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right]; \quad (41)$$

где:

$$S = \frac{\Lambda e^{-\Lambda \frac{d_{max}}{cD_{mes}}}}{\Lambda \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \right) + C e^{-\Lambda \frac{d_{max}}{cD_{mes}}}}. \quad (42)$$

При этом значение пропускной способности C в выражениях (40) и (41) соответствует пропускной способности отдельного частотного канала СВРС с учетом реализации варианта технологии АСМ, предложенного ранее.

6.6. Модель процесса распределения отдельному абоненту частотных каналов в многоканальной сети воздушной радиосвязи

Возвращаясь к модели отдельного абонента, и с учетом математических соотношений предыдущего подраздела, получим СМО типа $M/M/N/Q$, представленную на рис. 32.

Рассмотрим СМО (рис. 32), содержащую N идентичных каналов обслуживания и буфер передатчика с ограниченной емкостью Q_b бит. В СМО, соответствующей m -му абоненту (ЛА), поступает поток пакетов трафика разведанных с интенсивностью $\lambda_{b m}$ бит/с. Объем пакета трафика равен D_{mes} бит. В этом случае объем буфера в количестве пакетов будет равен $q = Q_b / D_{mes}$ пакетов, а интенсивность трафика: $\lambda_m = \lambda_{b m} / D_{mes}$ пакетов/с. Длительность обработки пакета в канале является случайной величиной со средним значением $\mu = 1 / T_{зад}(C, \Lambda)$ пакета/с. Выбор пакета из буфера осуществляется в соответствии с беспriorитетной дисциплиной обслуживания в порядке поступления по правилу «первым пришёл – первым обслужен» (FIFO – First In, First Out). При этом

если в момент поступления пакета свободны несколько каналов обслуживания, поступивший пакет случайным образом направляется в один из них.

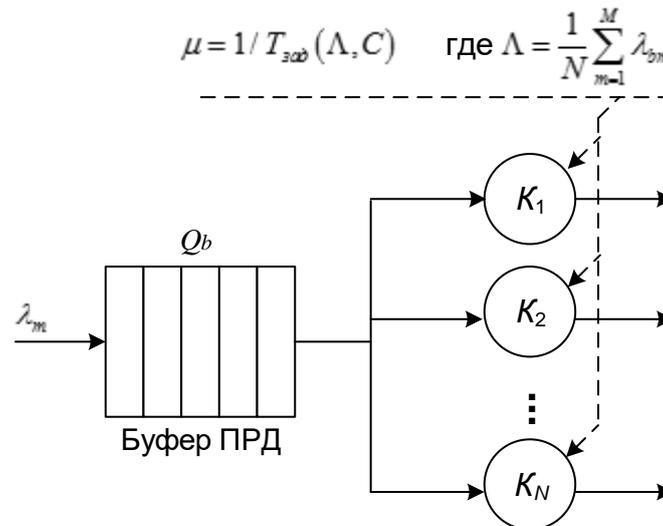


Рис. 32. Схема процесса распределения частотных каналов в многоканальной СВРС относительно всех абонентов сети

Введём следующие допущения для модели СМО:

- поток пакетов трафика – простейший;
- длительность обработки пакетов в каждом из каналов распределена по экспоненциальному закону со средним значением $\mu = 1/T_{зад}(C, \Lambda)$, при этом значение $T_{зад}(C, \Lambda)$ соответствует задержке передачи пакета в КМД, функционирующем по протоколу CSMA/CA, значение

$$\Lambda = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M \lambda_m = \frac{1}{N D_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_{bm}$$

– интенсивности входного в СМО потока,

выраженного в количестве пакетов в секунду, а параметр C – пропускной способности КМД без учета протокола CSMA/CA, при реализации в КМД предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования;

- все N каналов обслуживания идентичны, и любой пакет может быть обслужен любым каналом;
- емкость буфера абонента ограничена и равна Q_b ;
- загрузка системы $\rho = \lambda/N\mu$ может принимать значение $0 \leq \rho \leq 1$;
- суммарная интенсивность трафика имеет значение $\lambda_m > 0$.

В следующем подразделе для СМО такого типа сформулированы расчетные соотношения по вычислению качества обслуживания трафика абонента на основе классических подходов к расчету показателей СМО, представленных в работах [118, 119].

6.7. Расчет показателей качества обслуживания абонента при распределении частотных каналов в многоканальной сети воздушной радиосвязи

Для формализации рассматриваемых процессов введем следующие обозначения и сокращения:

$C_{отн\ m}$ – относительная пропускная способность СМО, соответствующей m -му абоненту;

N – количество каналов обслуживания в СМО;

$N_{ср}$ – среднее число каналов, задействованных в процессе обслуживания пакетов в СМО;

P_n – вероятность нахождения СМО в состоянии s_n с n пакетами ($0 \leq n \leq N+Q$);

$P_{отк\ m}$ – вероятность отказа в обслуживании поступившего в СМО пакета m -го абонента;

Q_b – количество мест в очереди СМО, пакетов;

$q_{ср}$ – средняя длина очереди в процессе обслуживания пакетов в СМО, пакетов;

s_i – состояние СМО, при котором в ней находится i пакетов ($0 \leq n \leq N+Q$);

$T_{зад\ m}$ – среднее время задержки при обслуживании пакета в СМО, соответствующей m -му абоненту;

$T_{ож\ m}$ – среднее время ожидания пакета в буфере m -го абонента;

λ_m – интенсивность входного потока в СМО от m -го абонента, пак./с;

μ – интенсивность потока обслуживания одним каналом в СМО, пак/с;

ρ – загрузка СМО.

Рассмотрим модель СМО типа $M/M/N/Q$ [119]. Для данной СМО при допущениях о стационарном режиме функционирования будет иметь место простейший поток поступления и обслуживания пакетов и марковская цепь переходов системы между различными состояниями s , приведенная на рис. 33.

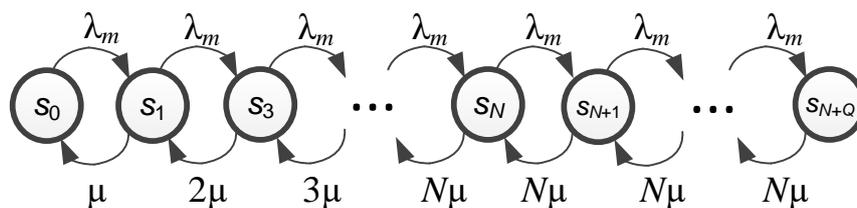


Рис. 33. Марковская цепь для описания функционирования СМО $M/M/N/Q$

Состояние системы $s=s_i$ соответствует наличию в СМО i -го количества заявок, обусловленного свободными местами в очереди и незанятостью каналов обслуживания.

Для данной СМО вероятности нахождения в конкретном состоянии определяются следующим образом [119]:

вероятность нахождения системы в состоянии без заявок:

$$P_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda_m}{\mu} \right)^i \right) + \left(\frac{\lambda_m}{\mu} \right)^N \cdot \frac{\frac{\lambda_m}{N\mu} - \left(\frac{\lambda_m}{N\mu} \right)^{Q+1}}{N! \left(1 - \frac{\lambda}{N\mu} \right)} \right)^{-1}; \quad (43)$$

вероятность нахождения системы в состоянии s_i :

$$P_i = \begin{cases} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda_m}{\mu} \right)^i P_0, & i \leq N; \\ \frac{1}{N! N^{i-Q}} \left(\frac{\lambda_m}{\mu} \right)^i P_0, & N < i \leq (N + Q). \end{cases} \quad (44)$$

В соответствии с данными вероятностями основные показатели качества обслуживания в СМО $M/M/N/Q$ определяются следующим образом [119]:
загрузка системы:

$$\rho = \lambda / N\mu; \quad (45)$$

вероятность отказа в обслуживании пакета m -го абонента:

$$P_{\text{отк } m} = P_{N+Q}; \quad (46)$$

относительная пропускная способность СМО, соответствующая m -му абоненту:

$$C_{\text{отн } m} = 1 - P_{N+Q}; \quad (47)$$

время ожидания пакета в буфере m -го абонента:

$$T_{\text{ож } m} = \sum_{i=1}^Q \frac{i}{N\mu} P_{N-1+i}; \quad (48)$$

среднее время задержки при обслуживании пакета в СМО, соответствующей m -му абоненту:

$$T_{\text{зад } m} = T_{\text{ож } m} + \frac{1 - P_{\text{отк } m}}{\mu}; \quad (49)$$

среднее число каналов, задействованных в процессе обслуживания пакетов в СМО:

$$N_{\text{ср}} = \frac{\lambda_m}{\mu} \left(1 - \frac{1}{N! N^Q} \left(P_0 \cdot \frac{\lambda_m}{\mu} \right)^{N+Q} \right). \quad (50)$$

Значения $P_{\text{отк } m}$ и $T_{\text{зад } m}$, рассчитанные по формулам (46) и (49), соответственно, являются показателями качества обслуживания трафика m -го ЛА в СВРС при выделении данному ЛА N частотных каналов для передачи его данных. При этом выделение конкретного числа N каналов СВРС определенному абоненту сети должно производиться с учетом того, что показатели $P_{\text{отк } m}$ и $T_{\text{зад } m}$ для передаваемых типов разведданных должны быть не хуже требований, предъявляемых к обслуживанию данного типа трафика. Требования к обслуживанию различных типов трафика представлены в табл. 3 и 4.

В данном подразделе представлены математические зависимости (выражения (47) и (49)) для расчета качества обслуживания m -го абонента СВРС по показателям: время обслуживания пакета трафика m -го абонента в многока-

нальной СВРС ($T_{\text{зад } m}$), вероятность отказа в обслуживании вследствие потери пакета ($P_{\text{отк}}$), в зависимости от общей интенсивности трафика СВРС (Λ) и интенсивности трафика m -го абонента (λ_m), с учетом того, что интенсивность обслуживания каждого канала соответствует реализации процедуры случайного множественного доступа, при котором происходит обслуживание этого и других абонентов в соответствии с АСМСД.

Представленные зависимости (выражения (47) и (49)) позволяют обосновать выделение каждому отдельному m -му абоненту СВРС определенного числа N частотных каналов для передачи данных с соблюдением требований к качеству обслуживания. При этом требования к обслуживанию различных типов трафика разведанных представлены в табл. 3 и 4 и являются ограничениями, накладываемыми на минимальное количество каналов N , которое позволяет передать трафик разведанных с требуемым качеством.

6.8. Выводы по результатам моделирования организации доступа абонентов к сети воздушной радиосвязи

По результатам проведенного моделирования можно сделать следующие выводы. Повышение скорости обмена данными в СВРС может вестись путем рационализации организации доступа абонентов к сети, а, именно – выделения каждому отдельному m -му абоненту в многоканальной СВРС такого числа частотных каналов, которое позволит обеспечить передачу разведанных различного типа (аудио-, фото-, видеоданные) с соблюдением требований к качеству его обслуживания. При этом учитывается, что каждый отдельный частотный канал функционирует в режиме случайного множественного доступа по протоколу CSMA/CA, а также то, что помимо трафика данного m -го абонента каждый канал обслуживает еще и трафик других абонентов СВРС. Кроме того, учитывается, что пропускная способность отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации варианта технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ.

Научная новизна модели организации доступа абонентов к СВРС состоит в том, что в отличие от известных моделей процесс доступа абонентов к СВРС представлен в виде многоканальной СМО типа $M/M/N/Q$, параметры которой учитывают специфику организации воздушной радиосвязи, а, именно – через параметры входного потока учитываются параметры трафика разведанных, формируемых разведывательным ЛА, а через параметры каналов обслуживания – режим случайного множественного доступа абонентов к каждому каналу по протоколу CSMA/CA, режим совместной обработки трафика всех абонентов СВРС во всех каналах сети, а также то, что пропускная способность каждого отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации варианта технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в интересах повышения скорости передачи в канале обслуживания.

Отметим, что взаимоувязанный учет вышеперечисленных факторов в модели организации доступа абонентов к СВРС позволяет обосновать методику повышения скорости передачи данных в СВРС за счет адаптивного распреде-

ления сигнально-частотного ресурса сети, в которой обобщить ранее формализованные и исследованные теоретические положения.

7. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи за счет адаптивного распределения энергетического, сигнального и частотного ресурсов сети

Методика повышения скорости передачи данных в СВРС за счет адаптивного распределения сигнально-частотного ресурса сети должна учитывать теоретические положения по повышению скорости передачи данных и результаты их исследования, формализацию факторов, учитывающих специфику организации воздушной радиосвязи и передачу данных с ЛА, которые были представлены в:

- модели адаптивного использования энергетического и сигнального ресурсов СВРС;
- модели адаптивного использования частотного ресурса СВРС и организации доступа абонентов к сетевой среде.

К таким факторам и теоретическим положениям относятся:

- учет предложений по использованию направленных антенных систем на ЛА – рассмотрено в подразделе 5.1;
- пространственные (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временные (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметры колебания точки прицеливания ДН направленной антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА – рассмотрены в подразделе 5.1.2;
- учет возможности применения технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, что позволит повысить скорость передачи данных в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM) – рассмотрено в подразделе 5.2;
- учет изменения особенностей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» в процессе полета ЛА за счет эмпирических данных об исследовании функционирования технологии АСМ, а также об исследовании качества приема PSK и QAM сигналов, которые предполагаются к использованию в предлагаемом варианте технологии АСМ для каналов СВРС, в рамках гауссовской, райевской и рэле-евской моделей распространения радиоволн – рассмотрены в подразделе 5.2.3.

7.1. Схема методики повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи за счет адаптивного распределения сигнально-частотного ресурса сети

Схема методики представлена на рис. 34. Методика состоит из следующих этапов:

1) Выбор антенной системы (АС) по критерию обеспечения наибольшего энергетического выигрыша в бюджете радиолинии. Выбор производится из тех вариантов, которые позволяют разместить антенную систему на ЛА.

2) Компенсация пространственных (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временных (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметров колебания точки прицеливания направленной антенной системы, размещенной на ЛА.

3) Формирование вариантов применения технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в отдельном частотном канале СВРС, для различных моделей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» – гауссовской, райевской и релейской моделей распространения радиоволн.

4) Определение для каждого ЛА необходимого числа каналов СВРС, достаточного для передачи трафика разведанных с требуемым качеством обслуживания.

Данные этапы представлены в отдельных подразделах далее.

7.2. Выбор антенной системы

В подразделе 5.1 представлен математический аппарат для анализа различных вариантов антенных систем для ЛА, а в подразделе 5.1.6 приведены результаты исследования достигаемого энергетического выигрыша для рассматриваемых вариантов антенн. Рассматривались следующие варианты:

- вариант 1 – кольцевая антенная решетка;
- вариант 2 – активная ФАР;
- вариант 3 – нескольких переключаемых антенн с шириной диаграммы направленности, равной 60° ;
- вариант 4 – параболическая антенна диаметром 0,5 м на ОПУ.

Проведенный расчет и анализ использования различных направленных антенных систем для повышения скорости обмена данными показал, что вариант использования кольцевой антенной решетки или активной фазированной решетки являются наиболее энергетически выгодными.

Использование активной фазированной антенной решетки позволяет обеспечить энергетический выигрыш в бюджете радиолинии: приблизительно 8 дБ относительно кольцевой антенной решетки; 13 дБ относительно параболической антенны на ОПУ; 15 дБ относительно нескольких переключаемых антенн с шириной диаграммы направленности 60° .

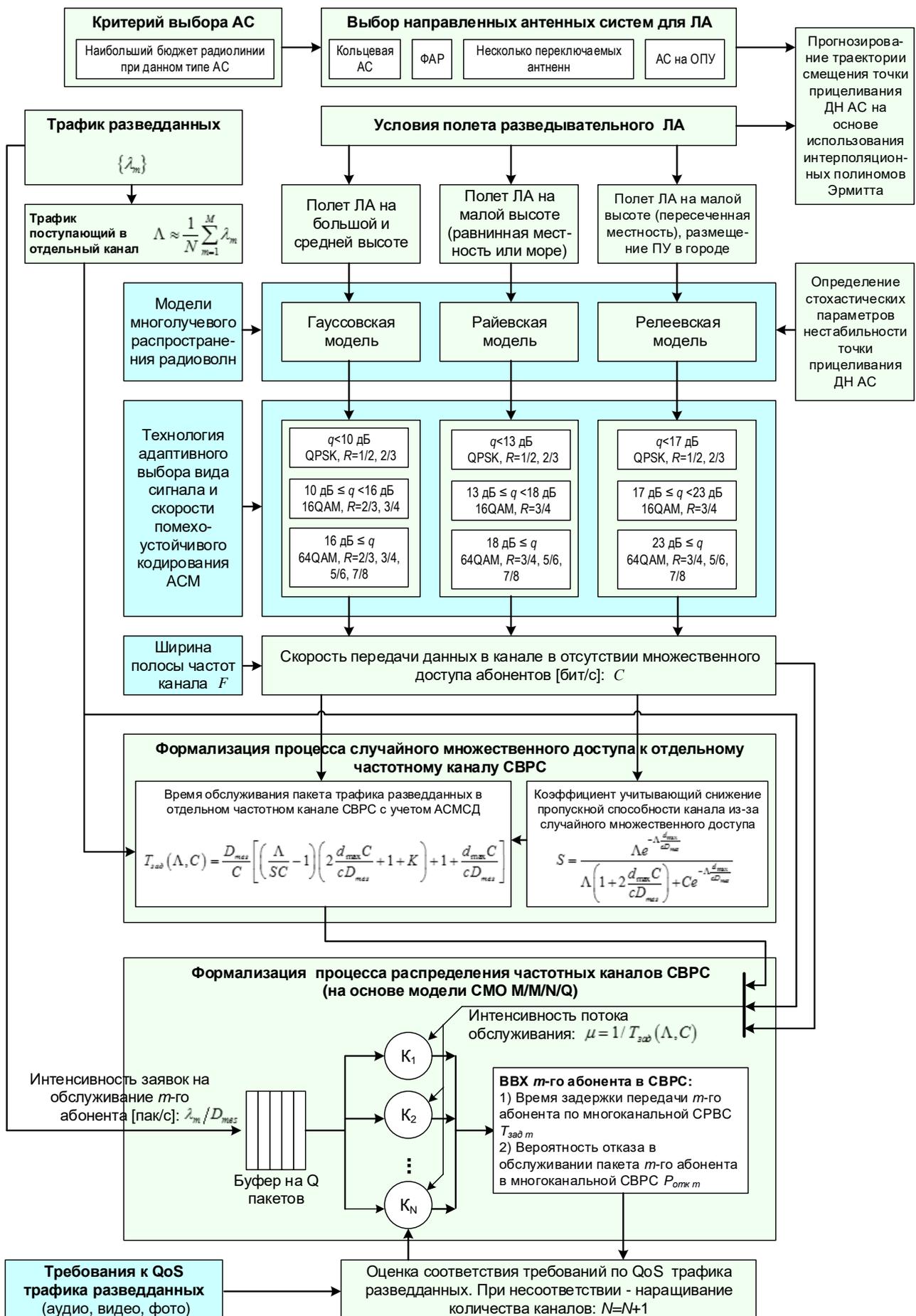


Рис. 34. Схема методики повышения скорости передачи данных в СВРС

Использование кольцевой антенной решетки позволяет обеспечить приблизительный энергетический выигрыш в бюджете радиолинии: 5 дБ относительно параболической антенны на ОПУ; 7,5 дБ относительно нескольких переключаемых антенн с диаграммой направленности 60°.

Вместе с тем, при использовании таких антенных систем необходимо учитывать нестабильность взаимного положения ЛА и ПУ и компенсировать этот фактор управлением лучом ДН антенны.

7.3. Компенсация пространственных и временных параметров колебания точки прицеливания направленной антенной системы летательного аппарата

В подразделе 5.1.2 показано, что на ЛА в режиме «стационарного полета» постоянно действуют случайные воздушные потоки, приводящие к нестабильности его пространственного положения, в результате чего он совершает короткопериодические и длиннопериодические колебания. Колебания первого вида незначительны по амплитуде, быстро затухающие, резкие, с периодом от 0,5-3 с. Длиннопериодические колебания медленные, слабозатухающие, сопровождаются относительно большими отклонениями ЛА по тангажу, курсу и крену, с периодом 10-30 с. Кроме этого, ЛА в процессе эволюций в пространстве может совершать маневры, которые в краткосрочном приближении могут быть ограничены следующими параметрами нестабильности: амплитуда колебаний по крену – 20°, тангажу – 10°, курсу – 25°, длительность нестабильности – 0,2-1 с [115]. В результате рассмотренных нестабильности и пространственных эволюций ЛА возникает случайный сдвиг точки прицеливания ДН антенны относительно расчетного направления.

Для повышения направленных свойств антенной системы необходимо компенсировать нестабильность пространственного положения ЛА, что требует управления диаграммой направленности антенны. Подробно исследование этого вопроса проведено в работе [115]. Реализация данного решения возможна по следующим направлениям:

- использование гиросtabilизированных платформ (ГСП);
- установка сервоприводов наведения узконаправленных антенн;
- применение антенн с электронным управлением лучом (ФАР или кольцевая антенна).

ГСП и сервоприводы могут быть использованы для направленной антенны на ОПУ, а в ФАР или кольцевой антенной решетке реализуется электронное управление лучом.

Гиросtabilизированные платформы позволяют устранить влияние внешних воздействий, выводящих антенну из заданного положения. Вместе с тем ГСП обладают серьезными недостатками – такими, как большой вес и высокое энергопотребление вследствие большого числа потребителей электроэнергии. ГСП имеют низкую устойчивость к внешним воздействиям, что требует обтекаемой формы стабилизируемого объекта или его защиты кожухом. Таким образом, применение ГСП для стабилизации АС на ЛА нецелесообразно.

Также для изменения пространственной ориентации ДН направленной антенны на ОПУ можно использовать сервопривод, управление которым должно осуществляться по сигналам БНК и системы автоматического сопровождения антенны по направлению, а качество связи – по уровню ОСШП на выходе приемника. Необходимо отметить, что механическое сканирование обладает инерционностью, при этом в антенную систему для реализации данного решения потребуется установка дополнительного оборудования, что также является нецелесообразным.

В подразделе 5.1.6 обоснованно использование на ЛА следующих антенн (в порядке их эффективности):

- ФАР;
- кольцевая антенная решетка;
- параболическая антенна на ОПУ.

Так как в ФАР и кольцевой антенной решетке используется электронное управление лучом, при этом именно эти типы антенн являются наиболее энергетически эффективными, то рассмотрим вариант электронного управления лучом для компенсации нестабильности точки прицеливания ДН, возникающей вследствие маневров ЛА.

Из анализа процесса перемещения точки прицеливания ДН антенны, представленного в подразделе 5.1.2, можно сделать вывод о том, что сектор сканирования ДН в вертикальной плоскости должен составлять 50° , ширина ДН антенны с учетом допусков должна составлять порядка $60^\circ \times 60^\circ$ для уверенной компенсации нестабильности пространственного положения ЛА в процессе его маневров.

Данные требования ориентированы на компенсацию пространственной нестабильности ЛА исключительно за счет увеличения ширины ДН. Вместе с тем, возможно использование более узконаправленных антенных систем в случае, если существует возможность упреждающего расчета и прогнозирования изменения направления на точку прицеливания ДН с учетом пространственных эволюций ЛА.

В современных БНК ЛА используется инерциальная навигационная система с коррекцией по сигналам РСДН, РСБН и СРНС, что позволяет с высокой точностью определять положение ЛА в пространстве, его скорость линейных и угловых перемещений. Точность определения положения ЛА может достигать десятых долей градуса, но так как БНК выдают показания с частотой 50 Гц и именно по этим данным БЦВМ пересчитывает значение требуемого направления ДН в точку прицеливания, то между моментами выдачи показаний БНК появляется ошибка наведения ДН, значение которой тем больше, чем выше нестабильность ЛА.

В работе [115] приведены результаты имитационного моделирования ошибки наведения ДН антенны, возникающей в результате нестабильности положения ЛА при управлении ДН по показаниям БНК. Показано, что ошибка наведения ДН антенны может достигать $\pm 10^\circ$, а значит ширина ДН антенны должна быть до 20° .

Для уменьшения негативного влияния неустойчивости положения ЛА в работе [115] предложено краткосрочное прогнозирование траектории смещения точки прицеливания ДН антенны в интервалах между моментами формирования навигационной информацией БНК. Данное прогнозирование основано на использовании интерполяционных полиномов Эрмита.

Способность БНК выдавать значения скоростей угловых перемещений позволяет реализовать краткосрочное прогнозирование неустойчивости положения ЛА с помощью интерполяционного полинома Эрмита. Полученные в результате имитационного моделирования в работе [115] графики (рис. 35), позволяющие оценить ошибку наведения ДН антенны при краткосрочном прогнозировании интерполяционными полиномами Эрмита 1-й (рис. 35б) и 3-й (рис. 35в) степени, в сравнении с отсутствием такого прогнозирования (рис. 35а).

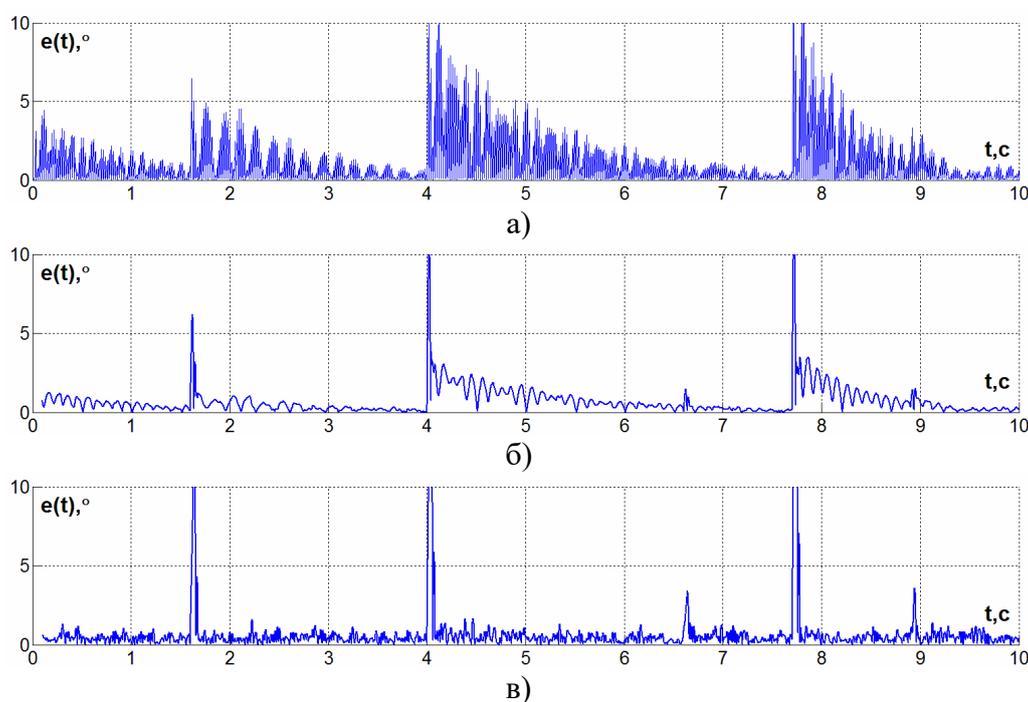


Рис. 35. Ошибка наведения ДН антенной системы $e(t)$ во времени с момента начала влияния дестабилизирующего фактора: а) без прогнозирования; б) с прогнозированием полиномом Эрмита 1-й степени; в) с прогнозированием полиномом Эрмита 3-й степени

С целью формирования управляющих воздействий после получения очередных показаний БНК осуществляется прогнозирование перемещения ЛА на один интервал вперед, определение траектории перемещения ЛА, расчет параметров наведения антенны до получения следующих показаний [115].

Результаты моделирования, полученные в работе [115] достаточно объемны, поэтому ниже представлены только выводы:

- размах вариации ошибки наведения ДН антенны при прогнозировании интерполяционным полиномом Эрмита 1-й степени (рис. 35б) зависит от скорости движения ЛА;

- размах вариации ошибки наведения ДН антенны практически не зависит от амплитуды и частоты колебаний ЛА (рис. 35б);
- минимальное значение среднего квадрата ошибки прогнозирования получено при прогнозировании интерполяционным полиномом Эрмита 3-й степени;
- при снижении точности определения пространственного положения ЛА точность прогнозирования точки прицеливания полиномом Эрмита 3-й степени становится ниже точности прогнозирования полиномом Эрмита 1-й степени.

На графиках рис. 36, по материалам работы [115], показан фрагмент перемещения точки прицеливания в системе координат ДН антенны в результате различных колебаний ЛА (рис. 36, сплошная линия). При управлении ЛА, без прогнозирования колебаний, параметры наведения ДН антенны меняются только после поступления очередных показаний из БНК, что приводит к дискретному перемещению луча ДН (точки, соединенные пунктирной линией на рис. 36а). При краткосрочном прогнозировании интерполяционными полиномами Эрмита управление движением луча ДН осуществляется непрерывно (рис. 36б, штриховая линия), что позволяет в среднем сократить ошибку наведения ДН, а значит использовать более узконаправленные антенные системы.

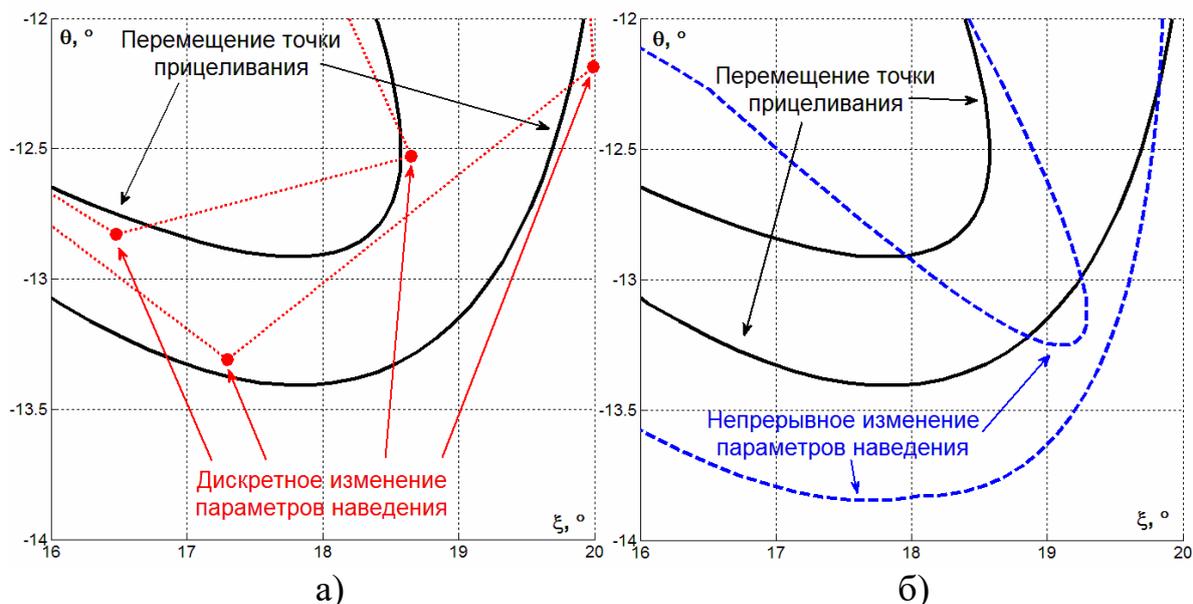


Рис. 36. Управление лучом по показаниям БНК в системе координат антенны (фрагмент): а) без прогнозирования; б) с прогнозированием

Таким образом, использование прогнозирования позволяет уменьшить ошибку наведения ДН ранее обоснованных типов антенн, при применении интерполяционного полинома Эрмита 1-й степени до 4° , а 3-й степени – до 2° [115]. При прогнозировании интерполяционными полиномами управление лучом ДН антенны осуществляется непрерывно, что позволяет в среднем сократить ошибку наведения ДН, а значит использовать более узконаправленные антенные системы.

7.4. Формирование вариантов адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования для отдельного частотного канала сети воздушной радиосвязи при различных моделях распространения радиоволн

Проведенный в подразделе 5.2.2 анализ помехозащищенности сигналов BPSK, QPSK, 16QAM и 64QAM показал, что граничное значение битовой ошибки в 10^{-3} , требуемое для достоверной передачи фото- и видео- разведанных, может быть обеспечено не только помехозащищенными BPSK и QPSK сигналами, но и информационно более емкими 16QAM и 64QAM сигналами в условиях благоприятной помеховой обстановки. Дополнительным способом повышения скорости передачи может являться переход от использования помехоустойчивых кодов с фиксированной скоростью кодирования к сверточному кодированию Витерби с переменной скоростью кодирования.

Анализ графиков, изображенных на рис. 23–28 (подраздел 5.2.2), позволяет предложить следующую схему адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования для повышения скорости передачи данных СВРС в условиях благоприятной помеховой обстановки и с учетом требуемого значения битовой ошибки в 10^{-3} , необходимого для передачи фото и видео разведанных:

1) для гауссовского канала:

- при ОСШП $q < 4,5$ дБ – сигнал QPSK, код Витерби с $R=1/2$;
- при ОСШП $4,5 \text{ дБ} \leq q < 10$ дБ – сигнал QPSK, код Витерби с $R=2/3$;
- при ОСШП $10 \text{ дБ} \leq q < 13$ дБ – сигнал 16QAM, код Витерби с $R=2/3$;
- при ОСШП $13 \text{ дБ} \leq q < 16$ дБ – сигнал 16QAM, код Витерби с $R=3/4$;
- при ОСШП $16 \text{ дБ} \leq q < 18$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=2/3$;
- при ОСШП $18 \text{ дБ} \leq q < 20$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=3/4$;
- при ОСШП $20 \text{ дБ} \leq q < 22$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=5/6$;
- при ОСШП $q > 22$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=7/8$.

2) для райевского канала:

- при ОСШП $q < 7$ дБ – сигнал QPSK, кодирование Витерби с $R=1/2$;
- при ОСШП $7 \text{ дБ} \leq q < 13$ дБ – сигнал QPSK, код Витерби с $R=2/3$;
- при ОСШП $13 \text{ дБ} \leq q < 18$ дБ – сигнал 16QAM, код Витерби с $R=3/4$;
- при ОСШП $18 \text{ дБ} \leq q < 20$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=3/4$;
- при ОСШП $20 \text{ дБ} \leq q < 22$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=5/6$;
- при ОСШП $q > 22$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=7/8$.

3) для рэлеевского канала:

- при ОСШП $q < 12$ дБ – сигнал QPSK, кодирование Витерби с $R=1/2$;
- при ОСШП $12 \text{ дБ} \leq q < 17$ дБ – сигнал QPSK, код Витерби с $R=2/3$;
- при ОСШП $17 \text{ дБ} \leq q < 23$ дБ – сигнал 16QAM, код Витерби с $R=3/4$;
- при ОСШП $23 \text{ дБ} \leq q < 25$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=3/4$;
- при ОСШП $25 \text{ дБ} \leq q < 30$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=5/6$;
- при ОСШП $q > 30$ дБ – сигнал 64QAM, код Витерби с $R=7/8$.

Предложенная схема адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования позволит обеспечить повышение скорости передачи разведанных СВРС при использовании той же полосы частот при благоприятных помеховых условиях (при значениях ОСШП свыше 10-17 дБ).

В целом, адаптивная схема, предлагаемая для повышения скорости передачи данных СВРС, согласуется с общими тенденциями по использованию технологии АСМ (Adaptive Coding and Modulation) в различных других современных системах связи, например, в таких как наземные сети широкополосного доступа (АСМ в сетях стандартов IEEE 802/11ac, IEEE 802.11n, IEEE 802.16), а также в спутниковых каналах связи (АСМ в каналах и сетях стандартов DVB-S, DVB-S2 и DVB-RSC). Актуальность направлений исследований по вопросу использования технологии АСМ подтверждается уже имеющимися работами по данной тематике [111, 112, 120].

Итоговые значения выигрыша в скорости передачи данных СВРС при использовании предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования, относительно используемых в настоящее время фиксированных схем с QPSK и кодированием Боуза-Чоудхури-Хоквингема/Рида-Соломона (БЧХ/РС) с $R=2/3, 3/4$, будут представлены в части второй данной научной работы, где так же будут приведены ориентировочные оценки для максимальных потенциально достижимых значений скоростей передачи данных СВРС с реализацией предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала, при использовании каналов с различной полосой частот в перспективном УКВ диапазоне авиационной радиосвязи.

7.5. Определение для каждого летательного аппарата необходимого числа каналов сети воздушной радиосвязи, достаточного для передачи данных с требуемым качеством обслуживания

В подразделе 6 представлена модель организации доступа абонентов к СВРС в виде СМО типа $M/M/N/Q$. Вместе с тем, данная модель реализует многоканальное распределение частного ресурса для произвольного m -го абонента сети, но не позволяет по известному значению интенсивности входных данных (λ_m) определить минимально необходимое число каналов обслуживания (N), которые способны обслужить трафик разведданных с требуемым качеством (вероятность отказа – не выше требуемого $P_{отк\ m} \leq P_{отк}^{треб}$; задержка передачи – не дольше требуемого $T_{зад\ m} \leq T_{зад}^{треб}$). При этом требуемые значения $T_{зад}^{треб}$ и $P_{отк}^{треб}$ определяются для отдельных типов разведданных с учетом значений, указанных в табл. 3 и 4.

Схема расчета необходимого числа для потребного количества каналов обслуживания (N) при известной интенсивности входных данных (λ_m) представлена на рис. 37.

Представленная в данном подразделе методика интегрально объединяет ранее полученные научные результаты [28, 35-38, 56, 57, 62-66] и позволяет обеспечить достижение общей цели исследования – повышение скорости передачи данных сети воздушной радиосвязи за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевого ресурса СВРС.

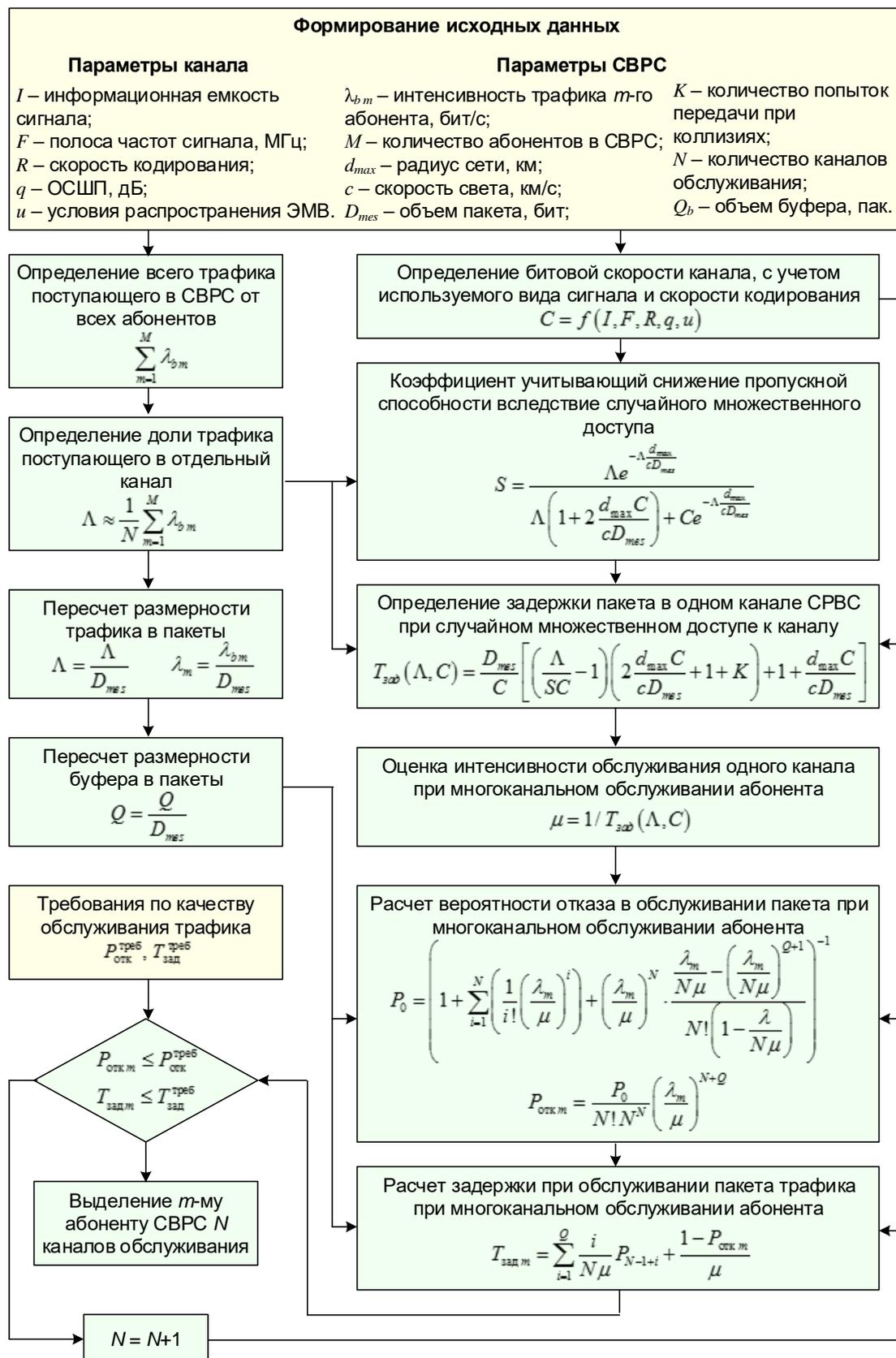


Рис. 37. Схема расчета необходимого числа каналов для многоканального обслуживания абонента

Методика повышения скорости передачи данных СВРС состоит из следующих этапов:

1. Выбор антенной системы для ЛА по критерию обеспечения наибольшего энергетического выигрыша для бюджета радиолинии. производится из тех вариантов, аэродинамическая конструкция которых позволяет разместить антенную систему на ЛА. Проведенный расчет и анализ использования различных направленных антенных систем ЛА показал, что варианты использования ФАР и кольцевой антенной решетки являются наиболее энергетически выгодными.

2. Компенсация пространственных и временных параметров колебания точки прицеливания направленной антенной системы, размещенной на ЛА. Показано, что ЛА в процессе эволюций в пространстве может совершать маневры, которые в краткосрочном приближении могут быть ограничены следующими параметрами неустойчивости: амплитуда колебаний по крену – 20° , тангажу – 10° , курсу – 25° . Данные маневры порождают короткопериодические колебания, которые незначительны по амплитуде, быстро затухающие, резкие, с периодом от 0,2-3 с, а также длиннопериодические колебания – медленные, слабо затухающие, с периодом 10-30 с, сопровождающиеся относительно большими отклонениями ЛА по тангажу, курсу и крену. В результате этих колебания ЛА возникают ошибки наведения ДН антенны со значениями отклонений от требуемого направления до $\pm 10^\circ$. Для компенсации этих отклонений ДН предложено осуществлять прогнозирование колебаний положения ЛА на основе применения интерполяционного полинома Эрмитта. Использование интерполяционного полинома Эрмитта позволит уменьшить ошибку наведения ДН антенны, при применении интерполяционного полинома Эрмитта 1-й степени – до 4° , а 3-й степени – до 2° .

3. Формирование вариантов применения технологии АСМ, ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в отдельном частотном канале СВРС, для различных моделей распространения радиоволн на трассе «ПУ – ЛА» и «ЛА – ПУ» – гауссовской, райевской и рэлеевской моделей распространения радиоволн. Предложен адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, что позволит повысить скорость передачи данных в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки (свыше 10-17 дБ для различных моделей распространения радиоволн), за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM), а также сверточного кодирования Витерби с переменной скоростью кодирования ($R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$) вместо кодирования БЧХ/РС с фиксированными скоростями $R = 2/3, 3/4$.

4. Определение для каждого ЛА необходимого числа каналов СВРС, достаточного для передачи трафика разведанных с требуемым качеством обслуживания. При этом учитывается, что каждый отдельный частотный канал функционирует в режиме случайного множественного доступа по протоколу CSMA/CA, а также то, что помимо трафика данного абонента каждый канал об-

служивает еще и трафик других абонентов СВРС. Кроме того, учитывается, что пропускная способность отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации варианта технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ, предлагаемой в данном научном исследовании.

Научной новизной методики повышения скорости передачи данных в СВРС является то, что в отличие от известных методик в ней совместно формализованы и учтены следующие факторы:

- энергетические параметры направленных антенных систем и критерий их выбора для использования на ЛА;
- пространственные (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временные (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметры колебания точки прицеливания ДН направленной антенной системы, размещенной на ЛА, возникающие вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА, а также теоретические предложения по их прогнозированию;
- теоретические предложения по использованию технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования в канале радиосвязи, что обеспечивает повышение скорости передачи данных в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки (свыше 10-17 дБ для различных моделей распространения радиоволн) за счет использования не только помехоустойчивых PSK сигналов (BPSK и QPSK), но и информационно более емких QAM сигналов (16QAM и 64QAM);
- формализация процесса выделения каналов СВРС абонентам проведена в виде многоканальной СМО типа $M/M/N/Q$, параметры которой учитывают специфику организации воздушной радиосвязи, а именно – через параметры входного потока учитываются параметры трафика разведанных, формируемых ЛА, а через параметры каналов обслуживания – режим случайного множественного доступа абонентов к каждому каналу по протоколу CSMA/CA, режим совместной обработки трафика всех абонентов СВРС во всех каналах сети, а также то, что пропускная способность каждого отдельного канала СВРС определяется с учетом реализации предложенного варианта технологии АСМ, позволяющей осуществлять адаптивный выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования.

Выводы

Проведен анализ существа технических решений и условий организации связи в интересах обеспечения высокоскоростного обмена данными между ПУ и ЛА. Показано, что перспективными направлениями повышения скорости обмена данными в СВРС являются следующие:

- переход к использованию на ЛА направленных антенн с целью повышения энергетического выигрыша по показателю ОСШП.

При переходе к использованию на ЛА направленных антенн необходимо учесть пространственные (амплитуда колебаний по крену, тангажу и курсу) и временные (период медленных и быстрых колебаний, длительность затухания быстрых колебаний) параметры колебания точки прицеливания ДН антенной системы, размещенной на ЛА, вследствие воздействия случайных воздушных потоков и целенаправленных маневров ЛА;

- переход к использованию технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ, которая позволит повысить скорость передачи при высоких значениях ОСШП, при этом целесообразно предусмотреть использование информационно более емких QAM сигналов, а не только помехоустойчивых BPSK и QPSK сигналов, которые используются в настоящее время.

При внедрении технологии АСМ в СВРС (ЛРС) необходимо учесть изменение условий распространения радиоволн в процессе полета ЛА и при организации обмена данными с различными ретрансляторами (в частности, наземного, морского и воздушного базирования);

- переход к использованию многоканального обслуживания абонентов в СВРС, когда каждому абоненту выделяется такое количество частотных каналов, которое позволяет обслужить передаваемых трафик (аудио-, фото- и видеоданные) с требуемым качеством (своевременность передачи и вероятность потери пакета – не выше требуемого).

При переходе к многоканальному обслуживанию абонентов в СВРС необходимо учитывать возможности повышения скорости передачи отдельных частотных каналов за счет реализации варианта технологии адаптивного выбора вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодирования АСМ, а также учесть, что каждый отдельный частотный канал в СВРС функционирует в режиме случайного множественного доступа по протоколу CSMA/CA, и то, что помимо трафика данного абонента каждый канал обслуживает еще и трафик других абонентов СВРС.

В качестве нового **научного результата**, интегрально объединяющего вышеизложенные результаты и позволяющего обеспечить достижение цели исследования, представлена методика повышения скорости передачи данных в СВРС.

В научном исследовании с целью повышения скорости передачи данных в СВРС решена научная задача разработки моделей и методики повышения скорости передачи данных в СВРС путем адаптивного распределения сигнально-частотного ресурса СВРС с учетом интенсивности передаваемого трафика.

Литература

1. Меркулов В. И., Гандурин В. А., Дрогалин В. В. и др. Авиационные системы радиоуправления: учебник для военных и гражданских ВУЗов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008.
2. 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.,

Федунов 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.

3. Антонов Д. А., Бабич Р. М., Балыко Ю. П., Белоглазов И. Н., Бернинский Е. Я., Борисов Л. В., Виноградов С. М., Войтенко В. И., Герасимов А. А., Гузеев Б. Н., Доценко А. В., Жеребин А. М., Зайцев А. В., Зинич В. С., Инсаров В. В., Кислицын В. А., Кичигин Г. Г., Колпаков К. М., Корниенко В. Н., Кравченко В. С., Кульчак М. Г., Махов Е. А., Немыченков И. В., Попов В. А., Пухов А. Л., Селезнев И. С., Сорокин Ю. Н., Топорков Н. В., Федосов Е. А., Червин В. И. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.

4. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

5. Меркулов В. И., Дрогалин В. В., Канащенков А. Н., Лепин В. Н., Самарин О. Ф., Соловьев А. А. Авиационные системы радиоуправления. Том 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с.

6. Меркулов В. И., Канащенков А. И., Чернов В. С., Дрогалин В. В., Антипов В. Н., Анцев Г. В., Кулабухов В. С., Лепин В. Н., Сарычев В. А., Саблин В. Н., Самарин О. Ф., Тупиков В. А., Турнецкий Л. С., Харьков В. П. Авиационные системы радиоуправления. Том 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

7. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10204.

8. Верба В. С., Меркулов В. И. Теоретические и прикладные проблемы разработки систем радиоуправления нового поколения // Радиотехника. 2014. № 5. С. 39-44.

9. Меркулов В. И. Научно-технические проблемы разработки авиационных систем радиоуправления // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2015. № 3. С. 43-50.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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). С. 11.

14. 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.

15. 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.

16. Научно-производственное предприятие «Полет». Официальный сайт. [Электронный ресурс]. 2017. – URL: <http://www.polyot.atnn.ru> (дата доступа 03.02.2017).

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

18. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов многостанционного доступа // Тезисы докл. науч. техн. конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.

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

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

21. 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.

22. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.

23. Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 7. С. 8-16.

24. Вербя В. С., Поливанов С. С. Организация информационного обмена в сетевых боевых операциях // Радиотехника. 2009. № 8. С. 57-62.

25. Кондратьев А. Е. Общая характеристика сетевых архитектур, применяемых при реализации перспективных сетевых концепций ведущих зарубежных стран // Военная мысль. 2008. № 12. С. 63-74.

26. Кондратьев А. Е. Реализация концепции сетевых войн в ВВС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 5. С. 44-49.

27. Васильченко А. С., Иванов М. С., Колмыков Г. Н. Формирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного

подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 403-420. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416.

28. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетевая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. – СПб.: Научно-технические технологии. 2018. – 898 с.

29. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С. Перспективы ведения боевых действий с использованием сетевых технологий // Военная мысль. 2014. № 3. С. 3-12.

30. Иванов М. С., Попов С. А. Применение теории сетевых войн войсками НАТО // Охрана, безопасность, связь. 2013. Т. 2. С. 157.

31. Военная радиосвязь [Электронный ресурс]. 2019. – URL: <https://military.trevr.ru> (дата обращения 20.06.2019).

32. Макаренко С. И. Задача адаптивного управления пропускной способностью каналов сети воздушной радиосвязи в условиях квазистационарности потоков данных // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта». – Ставрополь: СВВАИУ, 2007. – С. 25-28.

33. Макаренко С. И. Расчет параметров алгоритма адаптивного распределения пропускной способности каналов наведения в сети воздушной радиосвязи // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта». – Ставрополь: СВВАИУ, 2007. – С. 28-33.

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

35. Иванов М. С., Афонин И. Е., Макаренко С. И. Повышение устойчивости автоматизированной системы управления комплекса с беспилотными летательными аппаратами в условиях воздействия средств физического поражения и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 92-134. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134.

36. Васильченко А. С., Иванов М. С., Малышев В. А. Формирование полетных зон беспилотных летательных аппаратов по степени устойчивости управления ими в условиях применения средств противовоздушной обороны и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2019. №4. С. 262-279. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10410.

37. Смирнов С. В., Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН основанная на децентрализованном принципе ретрансляции информационных потоков // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 1. С. 57-68. DOI: 10.18469/ikt.2018.16.1.06.

38. Смирнов С. В., Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Единая сеть воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН, основанная на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 54-68.

39. 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.

40. Кейстович А. В., Милов В. Р. Виды радиодоступа в системах подвижной связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 278 с.

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

42. 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.

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

44. 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. 2011.

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

46. Калинин В. И. Поточковые сетевые модели в системах связи с подвижными объектами [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 2011.

47. 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.

48. Силяков В. А., Красюк В. Н. Системы авиационной радиосвязи: Учебное пособие / Под ред. В.А. Силякова. – СПб.: ГУАП, 2004. – 160 с.

49. Кузьмин Б. И. Сети и системы авиационной цифровой электросвязи: учебное пособие. В 3-х частях. – СПб.: ОАО «НИИЭИР», 1999, 2000, 2003.

50. Кульчицкий В. К., Мешалов Р. О., Журавлев С. С. Системы, комплексы и средства авиационной электросвязи / Под ред. С.А. Кудрякова. – СПб.: Свое издательство, 2015.

51. Кудряков С. А., Кульчицкий В. К., Поваренкин Н. В., Пономарев В. В., Рубцов Е. А., Соболев Е. В., Сушкевич Б. А. Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь. Учебное пособие. – СПб.: Свое издательство, 2016.

52. 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.

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

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

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

56. 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.

57. Иванов М. С., Аганесов А. В., Макаренко С. И. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 2. Исследование пропускной способности объединенной сети и разработка алгоритма распределения информационных потоков для маршрутизатора узла сети связи воздушного эшелона // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 260-285. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-260-285.

58. 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.

59. Макаренко С. И. Особенности распределения ресурсов радио сети управления авиационными комплексами перехвата в условиях варьирования интенсивности информационного обмена // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «VIII научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского». Часть 2. – М.: изд. ВВИА имени Н.Е. Жуковского, 2007. – С. 118.

60. Макаренко С. И. Задача адаптивного управления пропускной способностью каналов сети воздушной радиосвязи в условиях квазистационарности потоков данных // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта». – Ставрополь: СВВАИУ, 2007. – С. 25-28.

61. Макаренко С. И. Расчет параметров алгоритма адаптивного распределения пропускной способности каналов наведения в сети воздушной

радиосвязи // Сборник докладов юбилейной Всероссийской научно-технической школы-семинара «Проблемы совершенствования боевых авиационных комплексов, повышение эффективности их эксплуатации и ремонта». – Ставрополь: СВВАИУ, 2007. С. 28-33.

62. Иванов М. С., Пономорев 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.

63. Иванов М. С., Пономорев 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.

64. Иванов М. С., Пономорев 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.

65. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С. А. Применение Mesh-технологий в системах межсетевого обмена с целью повышения пропускной способности каналов связи // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-1. С. 196-203.

66. Аганесов А. В., Иванов М. С., Попов С.А., Шунулин А. В. Повышение пропускной способности сети воздушно-космической радиосвязи за счет использования Mesh-технологий в системах межсетевого обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.

67. 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.

68. 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 20.04.2020).

69. Макаренко С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 2. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (дата доступа 26.08.2016).

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

71. Макаренко С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на сетевой уровень модели взаимодействия открытых систем и функционирование протокола маршрутизации оценки состояния канала (OSPF) // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. № 7 (59). С. 956-961.

72. Рябков П. В., Иванов М. С. Использование геоинформационных технологий для прогноза качества функционирования спутниковых радионавигационных систем // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XV международной научно-методической конференции. Воронеж. 12-13 февраля 2015 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет. 2015. С. 60-64.

73. Иванов М. С., Попов С. А., Тихомиров Н. М. Оптимизация приёма радиосигналов в системах связи с быстрой программной перестройкой радиочастоты // Радиолокация, навигация и связь: XX Международная научно-техническая конференция, Воронеж, 15-17 апреля 2014 года. – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2014. С. 728-732.

74. Богданов А. Е., Попов С. А., Иванов М. С., Березин А. В. Компенсационные способы борьбы с прицельными по частоте помехами в системах авиационной радиосвязи, использующих псевдослучайную перестройку рабочей частоты // Радиотехника. 2013. № 8. С. 81-85.

75. Федосеев В. Е., Иванов М. С. Синтез демодулятора с оптимальной компенсацией структурной прерывистой помехи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 10. С. 91-94.

76. Федосеев В. Е., Иванов М. С. Методика и результаты анализа потенциальной помехоустойчивости приема цифрового сигнала на фоне манипулированной структурной помехи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 108-111.

77. Пантенков Д. Г., Гусаков Н. В., Егоров А. Т., Ломакин А. А., Литвиненко В. П., Великоиваненко В. И., Лю-Кэ-Сю Е. Ю. Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 52-71. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.5.007.

78. Дворников С. В. Методика оценки имитоустойчивости каналов управления роботизированных устройств // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 64-69.

79. 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.

80. 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.

81. Дворников С. В., Попов Е. А., Иванов Р. В. Защита каналов управления робототехникой // Радиотехника. 2018. № 12. С. 62-68.

82. 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.

83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. Гаврилов А. Автоматизированная система сбора, обработки и распределения разведывательной информации СВ США DCGS-A // Зарубежное военное обозрение. 2010. № 7. С. 32-40.

90. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения 20.05.2019).

91. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Описательная модель комплексов разведки, используемых для вскрытия системы воздушно-космической обороны и целеуказания при нанесении удара средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 190-214.

92. Бугаков И. А., Сорокин А. Д., Хомяков А. В. Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при

решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника // Известия Института инженерной физики. 2019. № 1 (51). С. 65-68.

93. Иванов М. С., Аганесов А. В., Крылов А. А., Галлиев С. Ф., Агеев А. М., Легконогих Д. С., Березин А. В., Рябков П. В., Межуев А. М., Абросимов И. П. Беспилотные летательные аппараты: справочное пособие / Под. общ. ред. С.А. Попова. – Воронеж: Научная книга, 2015. – 619 с.

94. Вакин С. А., Шустов Л. Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. – М.: Сов. Радио, 1968. – 448 с.

95. Казарьян Б. И. Беспилотные аппараты. Способы применения в составе боевых систем // Военная мысль. 2012. № 3. С. 21-26.

96. Рощина Н. В. Системы и средства управления беспилотных летательных аппаратов как объект их поражения // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2019. № 1 (4). С. 68-74.

97. Самойлов П. В., Иванов К. А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59-65. – URL <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (дата обращения: 16.10.2019).

98. Новиков Е. А., Павлов А. Р., Зиннуров С. Х. Метод оперативного планирования частотно-временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 14-23.

99. Новиков Е. А., Косяков Е. Н., Павлов А. Р. Динамическое резервирование радиоресурса в сетях спутниковой связи при передаче самоподобного трафика // Труды Научно-исследовательского института радио. 2014. № 2. С. 49-60.

100. Жуков С. Е., Новиков Е. А., Павлов А. Р. Метод динамического распределения радиоресурса ретранслятора в сетях спутниковой связи с учетом неоднородности трафика и запаздывания при управлении // Труды Научно-исследовательского института радио. 2014. № 1. С. 74-80.

101. Новиков Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 79-86.

102. Новиков Е. А. Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3 (64). С. 78-83.

103. Комашинский В. И., Максимов А. В. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации: основы моделирования. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 176 с.

104. Маслов П. В. Сравнительный анализ методов цифровой модуляции // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 2. С. 46.

105. Борисов В. А., Калмыков В. В., Ковальчук Я. М., Себекин Ю. Н., Сенин А. И., Федоров И. Б., Цикин И. А. Радиотехнические системы передачи

информации: Учебное пособие для вузов / под ред. В.В. Калмыкова. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.

106. Песков С. Н., Ищенко А. Е. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи // Телеспутник. 2010. № 11. С. 70-75.

107. Иванов Ю. А., Невструев И. А. Структура и помехоустойчивость систем беспроводного доступа с OFDM // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т. 5. № 3. С. 25-29.

108. Красносельский И. Н., Канев С. А. Исследование помехоустойчивости системы DVB-T на модели канала с многолучевым распространением // Электросвязь. 2010. № 7. С. 28-30.

109. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 300 744 V1.6.1. – Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. 2009. – URL: <http://www.etsi.org> (дата доступа 12.04.2019).

110. Заключительные акты Региональной конференции радиосвязи по планированию цифровой наземной радиовещательной службы в частях Районов 1 и 3 в полосах частот 174-230 МГц и 470-862 МГц (РКР-06). Женева, 2006. URL: <http://www.itu.int/publ/R-ACT-RRC.14-2006/en> (дата доступа 12.06.2018).

111. Трифонов П. В. Адаптивное кодирование в многочастотных системах. Дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2005. – 147 с.

112. Семин Д. С. Универсальное устройство помехоустойчивого кодирования, адаптивное к изменению условий функционирования радиосистемы передачи информации. Дис. ... канд. техн. наук. – Рязань: РГРТУ, 2013. – 197 с.

113. Боев Н. М. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 147-158.

114. Донченко А. А., Чиров Д. С. Обоснование требований к системе связи беспилотных летательных аппаратов средней и большой дальности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. №12. С. 12-16.

115. Сивов А. Ю., Алешин М. Г. Обоснование основных параметров антенной системы ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате // Техника радиосвязи. 2011. № 16. С. 43-54.

116. Воскресенский Д. И., Степаненко В. И., Филипов В. С. Устройство СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. Учебное пособие для вузов / под ред. Д. И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.

117. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Фазовращатели сканирующих антенн для радаров обзора территорий // Беспроводные технологии. 2006. № 2. С. 26-28.

118. Алиев Т. И. Задачи и методы проектирования дискретных систем. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 127 с.

119. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

120. Новиков О. А., Петухов С. И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. – М.: Советское радио, 1969. – 400 с.

References

1. Merkulov V. I., Gandurin V. A., Drogalin V. V. and etc. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia* [Aircraft systems control]. Moscow, Air force engineering Academy named after Professor N.E. Zhukovskogo, 2008.
2. 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).
3. Antonov D. A., Babich R. M., Balyko Iu. P., Beloglazov I. N., Berninskii E. Ia., Borisov L. V., Vinogradov S. M., Voitenko V. I., Gerasimov A. A., Guzeev B. N., Dotsenko A. V., Zherebin A. M., Zaitsev A. V., Zinich V. S., Insarov V. V., Kislitsyn V. A., Kichigin G. G., Kolpakov K. M., Kornienko V. N., Kravchenko V. S., Kul'chak M. G., Makhov E. A., Nemychenkov I. V., Popov V. A., Pukhov A. L., Seleznev I. S., Sorokin Iu. N., Toporkov N. V., Fedosov E. A., Chervin V. I. *Aviatsiia VVS Rossii i nauchno-tekhnicheskii progress. Boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnia, zavtra* [Aviation of the Russian air force and scientific-technical progress. Combat systems and system yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Drofa Publ., 2005. 734 p. (in Russian).
4. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funkcionirovaniia. Monografiia* [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (in Russian).
5. Merkulov V. I., Drogalin V. V., Kanashchenkov A. N., Lepin V. N., Samarin O. F., Solov'ev A. A. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 1. Printsipy postroeniia sistem radioupravleniia. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation radio system. Volume 1. Principles of systems radioupravlenie. Fundamentals of synthesis and analysis]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 192 p. (in Russian).
6. Merkulov V. I., Konashenkov A. I., Chernov V. S., Dragalin V. V., Antipov V. N., Antsev G. V., Kulabukhov V. S., Lepin V. N., Sarychev V. A., Sablin V. N., Samarin O. F., Tupikov V. A., Turnetskii L. S., Khar'kov V. P. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 3. Sistemy komandnogo radioupravleniia. Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniia* [Aviation radio system. Volume 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).
7. Makarenko S. I. Military Robots - the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10204.
8. Verba V. S., Merkulov V. I. Heoretical and practical problems of designing next generation of radio guidance systems. *Radiotekhnika*, 2014, no. 5, pp. 39-44 (in Russian).

9. Merkulov V. I. Nauchno-tehnicheskie problemy razrabotki aviatsionnykh sistem radioupravleniia [Scientific-technical problems of development of aviation systems radio]. Nauchnye chteniia po aviatsii, posviashchennye pamiati N. E. Zhukovskogo [Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky], 2015, no. 3, pp. 43-50 (in Russian).

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

11. Komiakov A. V., Vdovin L. M., Kondina I. V., Kulakov D. S. Sovremennaia otechestvennaia aviatsionnaia apparatura avtomaticheskogo obmena dannymi [Modern Russian aviation equipment automatic data exchange]. *Elektrosviaz*, 2010, no. 6, pp. 32-37 (in Russian).

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

13. Belousov E. L., Briantsev V. F., Voitkevich K. L., Keistovich A. V., Saifetdinov Kh. I. Perspektivnoe bortovoe oborudovanie seti aviatsionnoi radiosviazi [Perspective avionics network aeronautical telecommunication]. *Transactions Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev*, 2012, vol. 96, no. 3, pp. 11 (in Russian).

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

15. 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).

16. 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).

17. 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).

18. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Otsenka effektivnosti setei vozdushnoi radiosviazi 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).

19. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Motin O. V. Modeli setei radiosviazi, 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).

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

21. 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).

22. Kalyayev I. A., Gaiduk A. R., Kapustin S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniia v gruppakh robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 280 p. (in Russian).

23. Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Conceptual aspects of group application of unmanned aerial vehicles. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 7, pp. 8-16 (in Russian).

24. Verba V. S., Polivanov S. S. Organizatsiia informatsionnogo obmena v setetsentricheskikh boevykh operatsiakh [Organization of information exchange in network-centric combat operations]. *Radiotekhnika*, 2009, no. 8, pp. 57-62 (in Russian).

25. Kondratev A. E. Obshchaia kharakteristika setevykh arkhitektur, primeniaemykh pri realizatsii perspektivnykh setetsentricheskikh kontseptsii vedushchikh zarubezhnykh stran [General characteristics of the network architectures used in the implementation of promising network-centric concepts of leading foreign countries]. *Military Thought*, 2008, no. 12, pp. 63-74 (in Russian).

26. Kondratev A. E. Realizatsiia kontseptsii setetsentricheskaia voina v VVS SShA [Implementation of the concept of network-centric warfare in the U.S. air force]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2009, no. 5, pp. 44-49 (in Russian).

27. Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Kolmykov G. N. Unmanned aerial vehicles flight routes formation, taking into account the location of air defense and electronic warfare means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 403-420. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10416 (in Russian).

28. Makarenko S. I., Ivanov M. S. *Setecentricheskaya vojna – principy, tekhnologii, primery i perspektivy. Monografiya* [Network-centric warfare – principles, technologies, examples and perspectives. Monography]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2018. 898 p (in Russian).

29. Bogdanov A. E., Popov S. A., Ivanov M. S. Prospects of warfare using network-centric technologies. *Military Thought*, 2014, no. 3, pp. 3-12 (in Russian).

30. Ivanov M. S., Popov S. A. Primenenie teorii setecentricheskikh vojn vojskami NATO [Application of the theory of network-centric wars by NATO troops]. *Guards, security, communication*, 2013, Vol. 2, pp. 157-164 (in Russian).

31. Military radio communication. 2019. Available at: <https://military.trcvr.ru> (accessed 20.06.2019).

32. Makarenko S. I. Zadacha adaptivnogo upravleniia propusknoi sposobnost'iu kanalov seti vozdushnoi radiosviazi v usloviakh kvazistatsionarnosti potokov dannykh [The task of the adaptive bandwidth control channel network air radio in conditions of quasi-stationarity of data streams]. *Sbornik dokladov konferentsii «Problemy sovershenstvovaniia boevykh aviatsionnykh kompleksov, povyshenie effektivnosti ikh ekspluatatsii i remonta»* [Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference “Problems of improving combat airplane, increasing the efficiency of their operation and repair”], Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 2007, pp. 25-28 (in Russian).

33. Makarenko S. I. Raschet parametrov algoritma adaptivnogo raspredeleniia propusknoi sposobnosti kanalov navedeniia v seti vozdushnoi radiosviazi. [Calculation of parameters of the algorithm adaptive bandwidth channel capacity of guidance channel in the air network radio channel]. *Sbornik dokladov iubileinoi Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi shkoly-seminara «Problemy sovershenstvovaniia boevykh aviatsionnykh kompleksov, povyshenie effektivnosti ikh ekspluatatsii i remonta»* [Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference “Problems of Improving Combat Airplane, Increasing the Efficiency of Their Operation and Repair”], Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 2007, pp. 28-33 (in Russian).

34. Makarenko S. I. Adaptivnoe upravlenie skorostiami logicheskikh soedinenii v kanale radiosviazi mnozhestvennogo dostupa [Adaptive Control Speed Logical Connections in the Radio Multiaccess Channel]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2008, no. 6, pp. 54-58 (in Russian).

35. Ivanov M. S., Afonin I. E., Makarenko S. I. Increasing stability of the control system of unmanned aerial vehicles in the conditions of fire damage and electronic warfare. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 92-134. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134 (in Russian).

36. Vasilchenko A. S., Ivanov M. S., Malyshev V. A. Unmanned aerial vehicles flight zones formation, based on their control stability degree in air defense and electronic warfare conditions. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 262-279. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10410 (in Russian).

37. Smirnov S. V., Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov A. S. AWACS guided integrated aircraft control radio network based on decentralized routing. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 57-68 (in Russian). DOI: 10.18469/ikt.2018.16.1.06.

38. Smirnov S. V., Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. Integral radio network of aircrafts control from AWACS, based on the hierarchical principle of routing. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 54-68 (in Russian).

39. 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

40. Keistovich A. V., Milov V. R. *Vidy radiodostupa v sistemakh podvizhnoi svyazi* [The types of radio access in system of mobile communication]. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2015. 278 p. (in Russian).

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

42. Dmitriev A. N., Maksimov A. V., Blakitnyi O. A. Problema postroeniia edinoi avtomatizirovannoi sistemy radiosvyazi 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 radiosvyazi"* [Proceedings of the Conference "Problems of radio communication"]. Nizhni Novgorod, Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «Polet», 1999 (in Russian).

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

44. 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).

45. Kalinin V. I. Prostranstvennye modeli zon obsluzhivaniia sistem svyazi 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).

46. Kalinin V. I. Potokovye setevye modeli v sistemakh svyazi s podvizhnymi ob"ektami [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).

47. Gotsutsov S. Iu. Sovershenstvovanie avtomatizirovannykh sistem upravleniia vozдушnym 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).

48. Siliakov V. A., Krasiuk V. N. *Sistemy aviatsionnoi radiosvyazi* [Aviation radio]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2004. 160 p. (in Russian).

49. Kuzmin B. I. *Seti i sistemy aviatsionnoi tsifrovoi elektrosviazi* [Network and system aviation digital telecommunications], In 3 volumes. Saint-Petersburg, Research institute of economy and information electronics, 1999, 2000, 2003.

50. Kul'chitskii V. K., Meshalov R. O., Zhuravlev S. S. *Sistemy, komplekсы i sredstva aviatsionnoi elektrosviazi* [Systems, complexes and means of aviation telecommunication]. Saint-Petersburg, Svoe izdatelstvo Publ., 2015.

51. Kudriakov S. A., Kul'chitskii V. K., Povarenkin N. V., Ponomarev V. V., Rubtsov E. A., Sobolev E. V., Sushkevich B. A. *Radiotekhnicheskoe obespechenie poletov vozdushnykh sudov i aviatsionnaia elektrosviaz'* [Radio-technical flight support of aircraft and aeronautical telecommunications]. Saint-Petersburg, Svoe izdatelstvo Publ., 2016.

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

53. 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).

54. 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).

55. 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).

56. 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. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-183-259 (in Russian).

57. Ivanov M. S., Aganesov A. V., Makarenko S. I. Bandwidth increasing the of a united aerospace communications network. Part 2. Studying of bandwidth increasing in a joint aerospace communications network and developing an information flows distribution algorithm for an air network router. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp.260-285. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-260-285 (in Russian).

58. Patenkov D. G., Velikoivanenko V. I. Sintez mnogofunktsional'nyh adaptivnyh informacionno-upravljajushhih sistem kompleksov s BPLA pri sovместnom funktsionirovanii s celevymi kosmicheskimi segmentami orbital'nyh gruppировок 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).

59. Makarenko S. I. Osobennosti raspredeleniia resursov radio seti upravleniia aviatsionnymi kompleksami perekhvata v usloviakh var'irovaniia intensivnosti informatsionnogo obmena [Features of resource allocation radio network control aircraft interception complexes in terms of the variation of the intensity of data exchange]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "VIII nauchnye chteniia poaviatsii, posviashchennye pamiati N.E. Zhukovskogo"* (Proceedings of the 8th All-Russian Scientific Conference on Aviation, Dedicated to the Memory of N. E. Zhukovsky). Part 2, Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Publ., 2007, 118 p. (in Russian).

60. Makarenko S. I. Zadacha adaptivnogo upravleniia propusknoi sposobnost'iu kanalov seti vozdukhnoi radiosviazi v usloviakh kvazistatsionarnosti potokov dannykh [The task of the adaptive bandwidth control channel network air radio in conditions of quasi-stationarity of data streams]. *Sbornik dokladov konferentsii «Problemy sovershenstvovaniia boevykh aviatsionnykh kompleksov, povyshenie effektivnosti ikh ekspluatatsii i remonta»* (Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of improving combat airplane, increasing the efficiency of their operation and repair"), Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 2007, pp. 25-28 (in Russian).

61. Makarenko S. I. Raschet parametrov algoritma adaptivnogo raspredeleniia propusknoi sposobnosti kanalov navedeniia v seti vozdukhnoi radiosviazi. [Calculation of parameters of the algorithm adaptive bandwidth channel capacity of guidance channel in the air network radio channel]. *Sbornik dokladov iubileinoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi shkoly-seminara «Problemy sovershenstvovaniia boevykh aviatsionnykh kompleksov, povyshenie effektivnosti ikh ekspluatatsii i remonta»* (Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of Improving Combat Airplane, Increasing the Efficiency of Their Operation and Repair"), Stavropol, Stavropol Higher Military Aviation Engineering College, 2007, pp. 28-33 (in Russian).

62. 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).

63. 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).

64. 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).

65. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A. Application Mesh-технологий in systems of the gateway exchange for the purpose of increase of throughput of communication channels. *Guards, security, communication*, 2017, no. 1-1, pp. 196-203 (in Russian).

66. Aganesov A. V., Ivanov M. S., Popov S. A., Shunulin A. V. Increasing space-air communications system network bandwidth using mesh technology in interworking systems. *Theory and technology of radio communication*, 2016, no. 2, pp. 12-16 (in Russian).

67. 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).

68. 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 20 April 2020) (in Russian).

69. Makarenko S. I. Estimation of quality of service in radio network with package transmitting in unstationary mode under influence of external destructive factors. *Radio electronics journal*, 2012, no. 6, pp. 2. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (accessed 26 August 2016) (in Russian).

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

71. Makarenko S. I. Analiz vozdeistviia prednamerennykh pomekh na setevoi uroven' modeli vzaimodeistviia otkrytykh sistem i funktsionirovanie protokola marshrutizatsii otsenki sostoianiia kanala (OSPF) [Analysis of the Impact of Intentional Interference at the Network Level Model of Open Systems Interaction and Functioning of the Routing Protocol Assessment Channel (OSPF)]. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2009, vol. 59, no. 7, pp. 956-961 (in Russian).

72. Rybkov P. V., Ivanov M. S. Ispol'zovanie geoinformacionnykh tehnologij dlja prognoza kachestva funkcionirovaniia sputnikovyykh radionavigacionnykh sistem [The use of geoinformation technologies for forecasting the quality of functioning of satellite radio navigation systems]. *Informatika: problemy, metodologiya, tehnologii: materialy XV mezhduna-rodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii. Voroneg. 12-13 February 2015.* [Informatics: problems, methodology, technologies: materials of the XV International Scientific and Methodological Conference. Voroneg. 12-13 February 2015.] 2015, pp. 60-64 (in Russian).

73. Popov S. A., Ivanov M. S., Tihomirov N. M. Optimizaciya priyoma radiosignalov v sistemah svjazi s bystroj programmnoj perestrojkoy radiochastoty [Optimization of radio signal reception in communication systems with fast radio

frequency software tuning]. *RLNC-2014*, Voroneg, 15-17 april 2014, pp. 728-732 (in Russian).

74. Bogdanov A. E., Popov S. A., Ivanov M. S., Berezin A. V. Compensatory ways of struggle against aim hindrances on frequency in systems of an aviation radio communication using pseudo-casual reorganisation of working frequency. *Journal Radioengineering*. 2013, no. 8, pp. 81-85 (in Russian).

75. Fedoseev V. E, Ivanov M. S. Synthesis of the demodulator with optimum indemnification of the structural faltering hindrance. *The bulletin of Voronezh state technical university*, 2010, Vol. 6, no. 10. pp. 91-94 (in Russian).

76. Fedoseev V. E, Ivanov M. S. Technique and results of the analysis of the potential noise stability of reception of the digital signal against the manipulated structural hindrance. *The bulletin of Voronezh state technical university*, 2010, Vol. 6, no. 11, pp. 108-111 (in Russian).

77. Pantenkov D. G., Gusakov N. V., Egorov A. T., Lomakin A. A., Litvinenko V. P., Velikoivanenko V. I., Lu-Ke-Syu E. Yu. Technical implementation of high-speed data radio channel from an unmanned aerial vehicle to ground control station. *Bulletin of Voronezh state technical University*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 52-71 (in Russian). DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.5.007.

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

79. 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).

80. 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).

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

82. 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).

83. 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).

84. 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.

85. 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).

86. 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).

87. Samoylenko D. V., Finko O. A. Ensuring the integrity of information in an autonomous group of unmanned aerial vehicles by methods of modular arithmetic. *Engineering Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2017, vol. 107-108, no. 5-6, pp. 20-27 (In Russian).

88. 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).

89. Gavrilov A. Avtomatizirovannaya sistema sbora, obrabotki i raspredeleniya razvedyvatel'noi informatsii SV SShA DCGS-A [Automated system of collection, processing and distribution of intelligence information, US army DCGS-A]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2010, no. 7, pp. 32-40 (in Russian).

90. Rostopchin V. V. Udarnye bespilotnye letatel'nye apparaty i protivovozdushnaya oborona – problemy i perspektivy protivostoianiya. [Strike unmanned aerial vehicles and air defense-problems and prospects of confrontation]. *Bespilotnaya aviatsiya* [Unmanned aircraft], 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdushnaya_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoianiya (accessed 20 may 2019).

91. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S.V. Descriptive model of intelligence systems used to detect the elements of an aerospace defense system and target designation when aerospace attack means are doing prompt global strike. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 1, pp. 190-214 (in Russian).

92. Bugakov I. A., Sorokin A. D., Khomyakov A. V. Indicators of the efficiency of the application of a group of unarmored aircraft devices at the solution of the problem of air identification in conditions of opposition of the enemy. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2019, no. 1 (51), pp. 65-68 (in Russian).

93. Ivanov M. S., Aganesov A. V., Krylov A. A., Galliev S. F., Ageev A. M., Legkonogikh D. S., Berezin A. V., Riabkov P. V., Mezhev A. M., Abrosimov I. P. *Bespilotnye letatel'nye apparaty: spravochnoe posobie* [Drones: a reference guide]. Voronezh, Nauchnaya Kniga Publ., 2015. 619 p (in Russian).

94. Vakin S. A., Shustov L. N. *Osnovy radioprotivodeistviya i radiotekhnicheskoi razvedki* [The basics of jamming and electronic reconnaissance]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1968. 448 p. (in Russian).

95. Kazarian B. I. Bespilotnye apparaty. Sposoby primeneniya v sostave boevykh sistem [Drones. Methods of application as part of combat systems]. *Military Thought*, 2012, no. 3, pp. 21-26 (in Russian).

96. Roshchina N. V. Sistemy i sredstva upravleniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov kak ob'ekt ih porazheniya [Systems and controls of unmanned aerial vehicles as an object of their destruction]. *Vestnik Yaroslavskego vysshego voennogo uchilishcha protivovozdushnoy oborony*, 2019, no. 1 (4), pp. 68-74 (in Russian).

97. Samojlov P. V., Ivanov K. A. Ugrozy primeneniya malorazmernykh BPLA i opredelenie naibolee effektivnogo sposoba bor'by s nimi [Threats of using small-sized UAVs and determining the most effective way to deal with them]. *Young scientist*, 2017, no. 45, pp. 59-65. Available at: <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (accessed 16 October 2019) (in Russian).

98. Novikov E. A., Pavlov A. R., Zinnurov S. H. Method of operative planning of the satellite repeater's time-and-frequency resource under non stationary ingress flow. *Aerospace Instrument Making*, 2014, no. 5, pp. 14-23 (in Russian).

99. Novikov E. A., Kosyakov E. N., Pavlov A. R. Dynamic reservation of a radio resource in satellite communication networks by transfer of the self-similar traffic. *Trudi NIIR*, 2014, no. 2, pp. 49-60 (in Russian).

100. Zhukov S. E., Novikov E. A., Pavlov A. R. Method of radio resource dynamic distribution in networks of satellite communication taking into account heterogeneity of a traffic and delay at management. *Trudi NIIR*, 2014, no. 1, pp. 74-80 (in Russian).

101. Novikov E. A. Operative distribution of satellite repeater radio resource in terms of non-stationary ingress flow with account of time lagged control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, vol. 69, no. 2, pp. 79-86 (in Russian).

102. Novikov E. A. Using of structural dynamics models in tasks of time-frequency source distribution in satellite communication system based on DVB-RCS standard. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, vol. 64, no 3, pp. 78-83 (in Russian).

103. Komashinskij V. I., Maksimov A. V. *Sistemy podvizhnoj radiosvjazi s paketnoj peredachej informacii: osnovy modelirovaniya* [Mobile radio communication systems with packet data transmission: modeling basics]. Moscow, Gorjachaja linija – Telekom Publ., 2007. 176 p. (in Russian).

104. Maslov P. V. Sravnitelnyj analiz metodov cifrovoj moduljatsii [Comparative analysis of digital modulation methods]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskij vestnik*, 2013, no. 2, pp. 46 (in Russian).

105. Borisov V. A., Kalmykov V. V., Kovalchuk Ja. M., Sebekin Ju. N., Senin A. I., Fedorov I. B., Cikin I. A. *Radiotekhnicheskie sistemy peredachi informacii* [Radio engineering systems for transmitting information]. Moscow, Radio i Svjaz Publ., 1990. 304 p (in Russian).

106. Peskov S. N., Ishhenko A. E. Raschet verojatnosti oshibki v cifrovyyh kanalah svjazi [Calculating the probability of error in digital communication channels]. *Telesputnik*, 2010, no. 11, pp. 70-75 (in Russian).

107. Ivanov U. A., Nevstruev I. A. Structure and noise immunity of OFDM wireless access systems. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2009, vol. 5, no. 3, pp. 25-29 (in Russian).

108. Krasnosselsky I. N., Kanev S. A. Analyzing DVB-T system's interference immunity in a multipath fading channel as a model. *Electrosvyaz*, 2010, no. 7, pp. 28-30 (in Russian).

109. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 300 744 V1.6.1. – Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and

modulation for digital terrestrial television. 2009. Available at: <http://www.etsi.org> (accessed 14 May 2019).

110. Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference on the Planning of Digital Terrestrial Broadcasting Service in parts of Districts 1 and 3 in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RKR-06). Geneva. 2006. Available at: <http://www.itu.int/publ/R-ACT-RRC.14-2006/en> (accessed 12.06.2018).

111. Trifonov P. V. *Adaptivnoe kodirovanie v mnogochastotnyh sistemah*. Dis. kand. tehn. nauk [Adaptive coding in multi-frequency systems. Ph.D. Thesis]. Saint-Petersburg, SPbGPU, 2005. 147 p. (in Russian).

112. Semin D. S. *Universal'noe ustrojstvo pomehoustojchivogo kodirovanija, adaptivnoe k izmeneniju uslovij funkcionirovanija radiosistemy peredachi informacii*. Dis. kand. tehn. nauk [A universal device of noise-resistant coding, adaptive to changes in the operating conditions of the radio information transmission system. Ph.D. Thesis]. Rjazan', RGRTU, 2013. 197 p. (in Russian).

113. Boev N. M. Postroenie sistem svjazi bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlja peredachi informacii na bol'shie rasstojanija [Construction of communication systems of unmanned aerial vehicles for transmitting information over long distances]. *Izvestiya SFU. Technical sciences*, 2014, vol. 3, pp. 147-158 (in Russian).

114. Donchenko A. A., Chirov D. C. Rationale requirements for the communication system of UAVS medium and long range. *T-Comm*, 2015, vol. 9, no. 12, pp. 12-16. (in Russian).

115. Sivov A. Yu., Aleshin M. G. Obosnovanie osnovnyh parametrov antennoj sistemy retrans-ljatora svjazi na bespilotnom letatel'nom apparate [Substantiation of the main parameters of the antenna system of a communication repeater on an unmanned aerial vehicle]. *Radio communication Technology*, 2011, no. 16, pp. 43-54. (in Russian).

116. Voskresensky D. I., Stepanenko V. I., Filippov V. S. *Ustrojstvo SVCh i anteny. Proektirovanie faziro-vannyh antennyh reshetok: uchebnoe posobie dlja vuzov* [The device of microwave and antenna. Design of phased antenna arrays: a textbook for universities]. Moscow, Radio Engineering, 2003. 632 p. (in Russian).

117. Vendik O. G., Parnes M. D. Fazovrashhateli skanirujushhih antenn dlja radarov obzora ter-ritorij [Phase shifters of scanning antennas for territory survey radars]. *Wireless technologies*, 2006, no. 2, pp. 26-28 (in Russia).

118. Aliyev T. I. *Zadachi i metody proektirovanija diskretnyh system* [Problems and methods of designing discrete systems]. St. Petersburg, ITMO University, 2015. 127 p. (in Russian).

119. Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Theory of queuing]. Moscow, Mechanical Engineering, 1979. 432 p. (in Russia).

120. Novikov O. A., Petukhov S. I. *Prikladnye voprosy teorii massovogo obsluzhivaniya* [Applied questions of the theory of queuing]. Moscow, Soviet Radio, 1969. 400 p. (in Russian).

Статья поступила 1 января 2023 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.

Шушков Александр Владимирович – соискатель ученой степени кандидата наук. Технический директор. ООО «Гигалаб». Область научных интересов: системы авиационной радиосвязи. E-mail: bugs78rus@gmail.com

Адрес: 108811, Россия, г. Москва, Киевское шоссе 22-й км, д. 4, стр. 5, блок Е, офис 602Е.

Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, доцент. Проректор по научной работе. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М.А. Бонч-Бруевича. Профессор кафедры информационной безопасности. Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1.

Increasing the data transmission rate in the air radio network of aircrafts controlling due to adaptive use of energy, signal and frequency resources of network

Part 1. Models and method of the data transmission rate increasing

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

Problem statement: In modern wars, air force solve a large number of tasks, one of which is conducting the air reconnaissance. The timeliness of the delivery of intelligence data to consumers is of great importance. To ensure the transfer of intelligence data to the control station (CS), equipment is used, which in most cases does not meet modern requirements for the rate of data transmission. One of the options for increasing the data transmission rate is adaptively use of energy, signal and frequency resources in the channels of the air radio communication network (ARCN). **The aim of this paper** is to develop the models and the method focused on the adaptive distribution of energy, signal and frequency resources of the SVRS in order to increase the data transmission rate. Models and method of increasing the data transmission rate in the ARCN are presented in this paper - the 1st part of the scientific research. **The novelty** elements of the models and the method presented in the paper are taking into account the technical features of the following processes: a) selection of the directional antenna system type for an aircraft according to the criterion of ensuring the greatest energy gain for the radio line budget; b) compensation of spatial and temporal parameters of the oscillation for the aiming point of the directional pattern of the antenna system placed on an aircraft; c) taking into account changes in the characteristics of the propagation of radio waves on the line "CS – aircraft" and "aircraft – CS" in the aircraft flight within Gaussian, Rayev and Rayleigh models of radio wave propagation; d) the formation of options for the application of ACM technology (Adaptive Coding and Modulation), which is used to select the type of signal and code in a separate frequency channel of the ARCN adaptive to noise conditions; e) determining for each aircraft the required number of channels of the ARCN sufficient to transmit intelligence data with the required quality of service. **Practical significance:** the proposed models and method will allow for increase of the data transmission rate in the ARCN without in-

creasing the frequency band in favorable noise conditions. The final values of the increase in data transfer rate when using the proposed method are presented in 2nd part of the scientific research.

Keywords: military aviation control, aerial radio communication network, data transmission rate, antenna system, energy resource, signal, frequency resource, multiple access channel.

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.

Alexander Vladimirovich Shushkov – Doctoral Student. Technical Director. Gigalab ltd. Field of research: systems and networks aero-nautical radio communication. E-mail: bugs78rus@gmail.com

Address: 108811, Russia, Moscow, Kievskoe shosse 22nd km, d. 4, p. 5, block E, office 602E.

Sergey Ivanovich Makarenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Vice-Rector for Research. The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: 193232, Russia, Saint Petersburg, Bolshevikov prospect, d. 22, k. 1.