

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 2. Исследование достигаемого 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 каналообразующая 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. 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 изменения 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. **Целью данной работы является** исследование методики, с целью оценки достигаемого повышения скорости передачи данных. **Результат:** исследование показало, что предложенные решения обеспечивает повышение скорости передачи данных в каналах СВРС без увеличения полосы частот в благоприятных помеховых условиях на значения от 77% до 297% для разных типов комбинацией сигналов и кодирования, а также для различных моделей распространения радиоволн. **Практическая значимость:** предложенные результаты позволят обеспечить по-

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 2. Исследование достигаемого повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 220-243. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-220-243

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 2. Investigation of the achieved increase in data transfer rate. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 1, pp. 220-243 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-220-243

вышение скорости передачи данных в СВРС без увеличения используемой полосы частот в благоприятных помеховых условиях.

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

1. Введение

Статья является продолжением первой части работы [1] и развивает цикл предыдущих работ авторов [2-14], посвященных тематике повышения пропускной способности и скорости передачи данных в сетях воздушной радиосвязи (СВРС) управления летательными аппаратами (ЛА) военной и специальной авиацией.

В первой части данной научной работы представлена методика повышения скорости передачи данных СВРС, которая состоит из следующих этапов [1]:

1. Выбор антенной системы комплекса связи ЛА по критерию обеспечения наибольшего энергетического выигрыша для бюджета радиолинии. Выбор 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 фазированной антенной решетки (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 0,2-3 с, а также длиннопериодические колебания – медленные, слабозатухающие, с периодом 10-30 с, сопровождающиеся относительно большими отклонениями ЛА по тангажу, курсу и крену. В результате этих колебаний положения ЛА возникают ошибки наведения диаграммы направленности (ДН) антенны со значениями отклонений от требуемого направления до $\pm 10^\circ$. Для компенсации этих отклонений ДН предложено 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 Adaptive Coding and Modulation (АСМ), ориентированной на адаптивный к помеховым условиям выбор вида сигнала и скорости помехоустойчивого кодиро-

вания в отдельном частотном канале СВРС для различных моделей распространения радиоволн на трассе пункт управления (ПУ) «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 Боуза-Чоудхури-Хоквингема/Рида-Соломона (БЧХ/РС) с фиксированными скоростями $R = 2/3, 3/4$.

4. Определение для каждого ЛА необходимого числа каналов СВРС, достаточного для передачи трафика с требуемым качеством обслуживания. При этом учитывается, что каждый отдельный частотный канал функционирует в режиме случайного множественного доступа по протоколу CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance), а также то, что помимо трафика данного 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, предлагаемой в данном научном исследовании.

Научной новизной представленной 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);

- моделирование 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 разведданных, формируемых аппаратурой 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.

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 отношения сигнала к сумме шума и помехи (ОСШП);
- 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;
- 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).

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- разведданных, может быть обеспечено не только помехозащищенными BPSK и QPSK сигналами, но и более информационно-ёмкими 16QAM и 64QAM сигналами в условиях благоприятной помеховой обстановки. Дополнительным способом повышения скорости передачи может являться переход от использования помехоустойчивых кодов БЧХ/РС с фиксированной скоростью кодирования к сверточному кодированию Витерби с переменной скоростью кодирования.

* 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.

В работе [1] в составе методики была предложена схема адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования для повышения скорости передачи данных в линии радиосвязи (ЛРС) в условиях благоприятной помеховой обстановки и с учетом требуемого значения битовой ошибки в 10^{-3} , необходимого для передачи фото- и видео- разведанных. Предложенная схема адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования позволит обеспечить повышение скорости передачи разведанных в канале ПУ – ЛА при использовании той же полосы частот ЛРС при благоприятных помеховых условиях (при значениях ОСШП свыше 10-17 дБ).

Итоговые значения выигрыша в скорости передачи разведанных в канале СВРС при использовании предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования, относительно используемых в настоящее время фиксированных схем с QPSK и кодированием БЧХ/РС с $R=2/3, 3/4$, представлены в табл. 1. Эти же значения, с учетом типа канала и модели распространения радиоволн, а также с учетом складывающейся сигнально-помеховой обстановки, приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Значения выигрыша в скорости передачи данных в ЛРС «ЛА – ПУ» при использовании предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования

	Тип сигнала, скорость кодирования	Инф. емкость сигнала, бит	Скорость кода	Итоговая инф. скорость, бит/сигн. симв	Выигрыш в скорости относительно QPSK с $R=2/3$	Выигрыш в скорости относительно QPSK с $R=3/4$
Текущие схемы	QPSK, $R=2/3$	2	2/3	1,33	–	–
	QPSK, $R=3/4$	2	3/4	1,5	–	–
Предлагаемые схемы	QPSK, $R=1/2$	2	1/2	1	-25%	-33,33%
	QPSK, $R=2/3$	2	2/3	1,33	0%	-11,11%
	16QAM, $R=2/3$	4	2/3	2,67	100%	77,78%
	16QAM, $R=3/4$	4	3/4	3	125%	100%
	64QAM, $R=2/3$	6	2/3	4	200%	166,67%
	64QAM, $R=3/4$	6	3/4	4,5	237,5%	200%
	64QAM, $R=5/6$	6	5/6	5	275%	233,33%
64QAM, $R=7/8$	6	7/8	5,25	293,75%	250%	

Необходимо отметить, что отрицательные значения выигрыша в скорости передачи данных в некоторых ячейках табл. 1 и 2 соответствуют случаям, когда адаптивная схема в условиях неблагоприятной сигнально-помеховой обстановки выбирает наиболее помехоустойчивую комбинацию сигнала и скорости кодирования. В этом случае скорость передачи снижается, по сравнению с фиксированной схемой выбора сигнала и скорости кодирования, но передача данных будет более помехоустойчивой.

Таблица 2 – Значения выигрыша в скорости передачи данных в ЛРС «ЛА – ПУ» при использовании предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования с учетом типа канала и модели распространения радиоволн, а также с учетом складывающейся сигнально-помеховой обстановки

Значение ОСПП, дБ	Тип сигнала, скорость кодирования	Инф. емкость сигнала, бит	Скорость кода	Итоговая инф. скорость, бит/сигн. симв	Выигрыш в скорости относительно QPSK с $R=2/3$	Выигрыш в скорости относительно QPSK с $R=3/4$
Существующие фиксированные схемы						
на всем диапазоне ОСПП	QPSK, $R=2/3$	2	2/3	1,33	0%	-11,11%
	QPSK, $R=3/4$	2	3/4	1,5	12,50%	0%
Предлагаемые адаптивные схемы						
1) для гауссовской модели распространения						
менее 4,5	QPSK, $R=1/2$	2	1/2	1	-25%	-33,33%
4,5-10	QPSK, $R=2/3$	2	2/3	1,33	0%	-11,11%
10-13 дБ	16QAM, $R=2/3$	4	2/3	2,67	100%	77,78%
13-16 дБ	16QAM, $R=3/4$	4	3/4	3	125%	100%
16-18	64QAM, $R=2/3$	6	2/3	4	200%	166,67%
18-20	64QAM, $R=3/4$	6	3/4	4,5	237,5%	200%
20-22	64QAM, $R=5/6$	6	5/6	5	275%	233,33%
более 22	64QAM, $R=7/8$	6	7/8	5,25	293,75%	250%
2) для райевской модели распространения						
менее 7	QPSK, $R=1/2$	2	1/2	1	-25%	-33,33%
7-13	QPSK, $R=2/3$	2	2/3	1,33	0%	-11,11%
13-18	16QAM, $R=2/3$	4	2/3	2,67	100%	77,78%
18-20	64QAM, $R=3/4$	6	3/4	4,5	237,5%	200%
20-22	64QAM, $R=5/6$	6	5/6	5	275%	233,33%
более 22	64QAM, $R=7/8$	6	7/8	5,25	293,75%	250%
3) для рэлеевской модели распространения						
менее 12	QPSK, $R=1/2$	2	1/2	1	-25%	-33,33%
12-17	QPSK, $R=2/3$	2	2/3	1,33	0%	-11,11%
17-23	16QAM, $R=2/3$	4	2/3	2,67	100%	77,78%
25-30	64QAM, $R=5/6$	6	5/6	5	275%	233,33%
более 30	64QAM, $R=7/8$	6	7/8	5,25	293,75%	250%

В табл. 3 приведены ориентировочные оценки для максимальных потенциально достижимых значений скорости передачи разведанных в ЛРС при реализации предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала, и использовании каналов с различной полосой частот в перспективном УКВ диапазоне авиационной радиосвязи.

Таблица 3 – Максимальные значения потенциально достижимой скорости передачи данных в отдельном канале при реализации предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в перспективном УКВ диапазоне авиационной радиосвязи [Мбит/с]

Тип сигнала, скорость кода	Ширина полосы частот сигнала					
	1,4 МГц	3 МГц	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Существующие схемы						
QPSK, $R=2/3$	1,57	3,36	5,36	11,2	16,8	22,4
QPSK, $R=3/4$	1,76	3,78	6,03	12,6	18,9	25,2
Предлагаемые адаптивные схемы						
QPSK, $R=1/2$	1,18	2,52	4,02	8,4	12,6	16,8
QPSK, $R=2/3$	1,57	3,36	5,36	11,2	16,8	22,4
16QAM, $R=2/3$	3,14	6,72	11,2	22,4	33,6	44,8
16QAM, $R=3/4$	3,53	7,56	12,6	25,2	37,8	50,4
64QAM, $R=2/3$	4,7	10,08	16,8	33,6	50,4	67,2
64QAM, $R=3/4$	5,29	11,34	18,9	37,8	56,7	75,6
64QAM, $R=5/6$	5,88	12,6	21	42	63	84
64QAM, $R=7/8$	6,17	13,23	22,05	44,1	66,15	88,2

Таким образом, использование предложенного варианта технологии АСМ (сигналы QPSK, 16QAM, 64QAM с $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$) позволяет обеспечить повышение скорости передачи данных в отдельном канале СВРС в перспективном СВВ диапазоне авиационной радиосвязи на следующие значения (см. табл. 3):

- с 1,57 Мбит/с до 6,17 Мбит/с для канала с шириной полосы частот 1,4 МГц;
- с 3,36 Мбит/с до 13,23 Мбит/с для канала с шириной полосы частот 3 МГц;
- с 5,36 Мбит/с до 22,05 Мбит/с для канала с шириной полосы частот 5 МГц;
- с 11,2 Мбит/с до 44,1 Мбит/с для канала с шириной полосы частот 10 МГц;
- с 16,8 Мбит/с до 66,8 Мбит/с для канала с шириной полосы частот 15 МГц;
- с 22,4 Мбит/с до 88,2 Мбит/с для канала с шириной полосы частот 20 МГц.

В процентном отношении это соответствует повышению скорости передачи в канале СВРС на 77-250% (относительно варианта QPSK $R = 3/4$) и на 100-293% (относительно варианта QPSK $R = 2/3$) для гауссовской, райевской и рэлеевской моделей распространения радиоволн.

2. Исследование качества обслуживания отдельного канала сети воздушной радиосвязи при реализации в нем предлагаемой схемы адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в условиях случайного множественного доступа абонентов

Данное исследование основано на модели организации доступа абонентов к СВРС [10-12] и позволяет оценить повышение скорости передачи в отдельном канале СВРС при внедрении технологии адаптивного кодирования и модуляции АСМ. При исследовании использовались следующие ограничения на исходные данные:

- количество ЛА в СВРС: $M = 3$;
- интенсивность трафика, формируемого одним ЛА: $\lambda = 10$ Мбит/с;
- полоса частот канала: $F = 5, 10, 15, 20$ МГц;
- информационная емкость сигнала: 2 для QPSK, 4 для 16QAM, 6 для 64QAM;
- скорость помехоустойчивого кодирования: $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$;
- объем сообщений в СВРС: $D_{mes} = 1024$ бит;
- радиус СВРС: $d_{max} = 300$ км;
- количество попыток повторной передачи пакета при коллизии: $K = 10$.

Моделирование проводилось в пакете математического моделирования MathCAD по расчетным соотношениям, представленным в работе [1].

Результаты моделирования нагрузки λ , поступающей в отдельный канал, представлены на рис. 1.

Результаты моделирования загрузки отдельного канала ρ при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов представлены на рис. 2.

Результаты моделирования времени обслуживания пакета $T_{зад}$ в отдельном канале СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов в логарифмическом масштабе представлены на рис. 3.

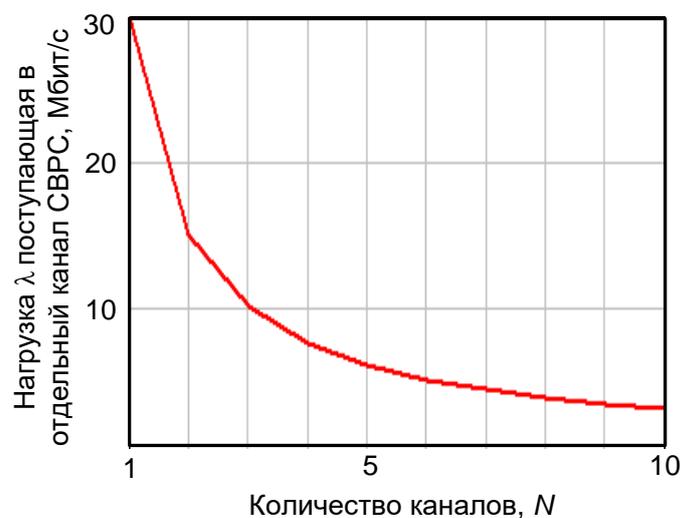
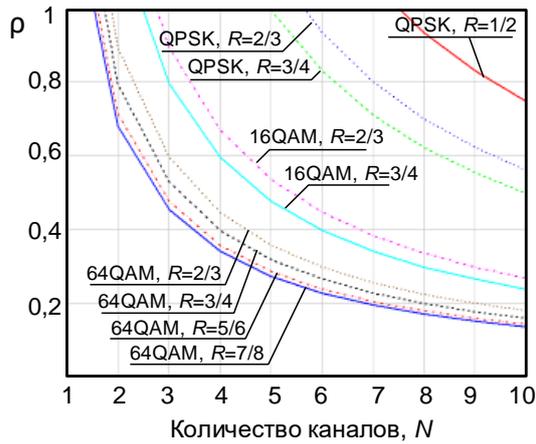
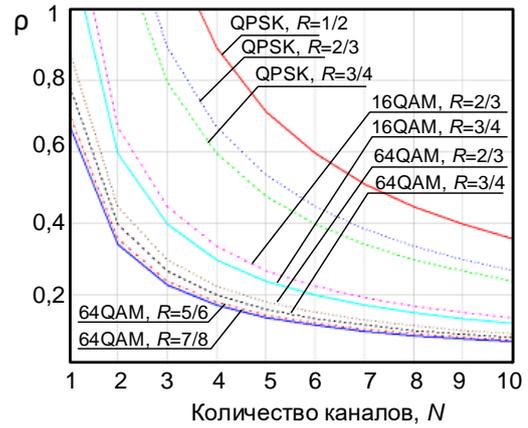


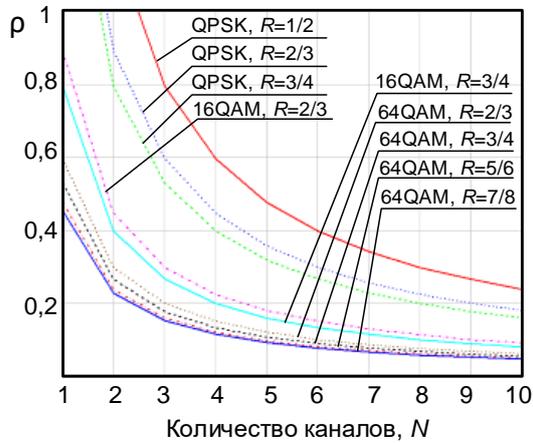
Рис. 1. Нагрузка λ , поступающая в отдельный канал СВРС



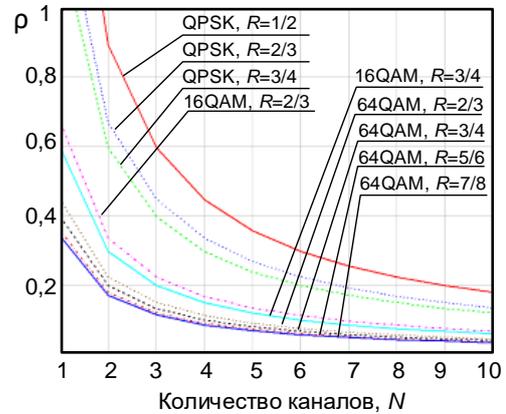
а) $F = 5$ МГц



б) $F = 10$ МГц

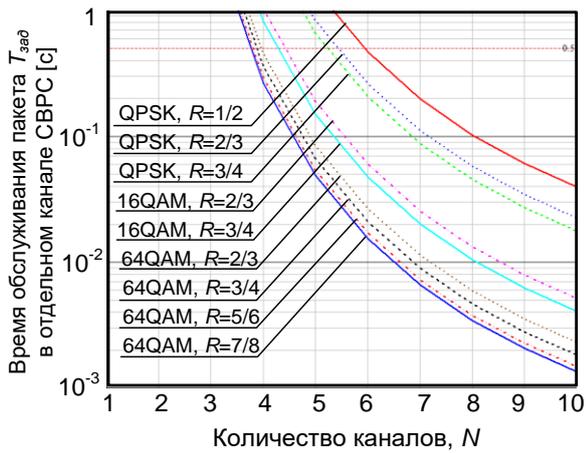


в) $F = 15$ МГц

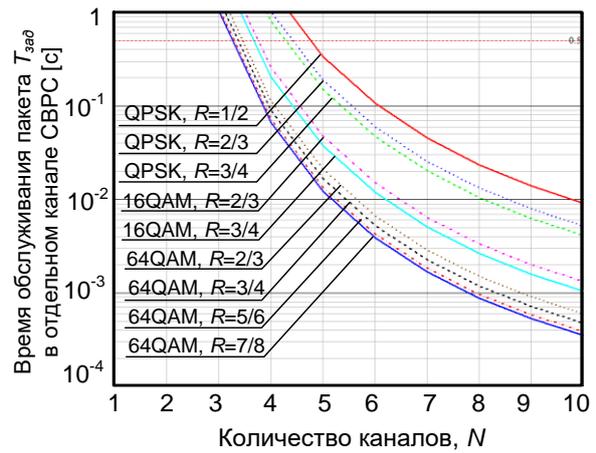


г) $F = 20$ МГц

Рис. 2. Загрузка ρ отдельного канала СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов



а) $F = 5$ МГц



б) $F = 10$ МГц

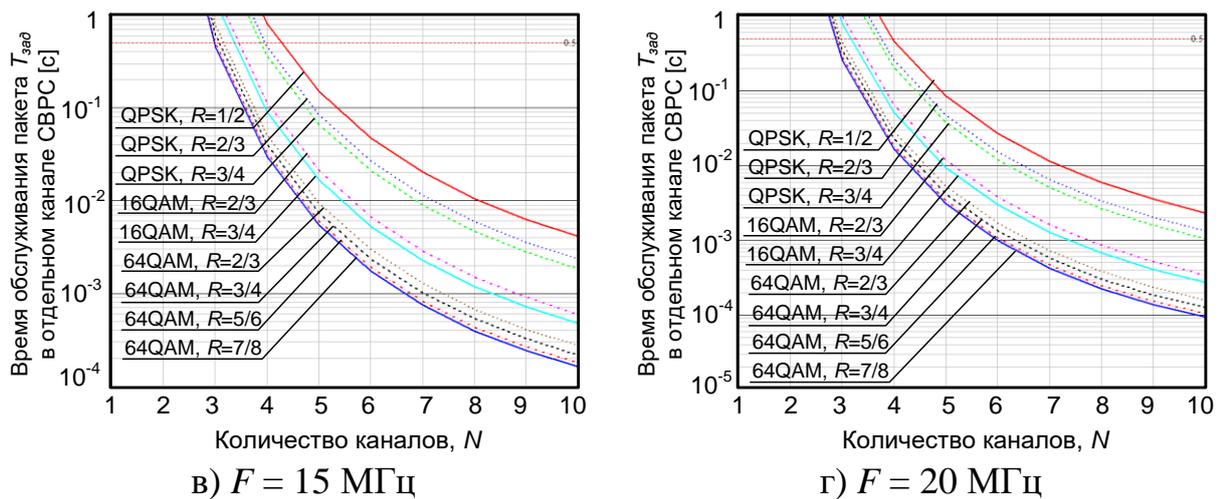


Рис. 3. Время обслуживания пакета $T_{зад}$ в отдельном канале СВРС при функционировании его в режиме случайного множественного доступа абонентов (логарифмический масштаб)

Анализ графиков, изображенных на рис. 1-3, позволяет сделать следующие выводы. Введение многоканального режима обслуживания абонентов значительно, в N раз, снижает долю трафика, поступающего в отдельный канал СВРС (где N – число каналов СВРС) – см. рис. 1. Одновременно с этим реализация предложений по использованию технологии АСМ позволяет повысить пропускную способность отдельных каналов и тем самым снизить нагрузку на систему передачи данных абонента (рис. 2). Такое одновременное повышение и количества каналов и скорости передачи в них позволяет обеспечить требуемый уровень своевременности передачи ($T_{зад}^{треб} \approx 0,5$ с) критичного к задержкам трафика (аудио- и видеоданные) – см. рис. 3.

В частности, для рассматриваемых условий моделирования требуемая своевременность обслуживания трафика аудио-, фото- и видеоданных (без учета вероятности отказа в обслуживании) достигается при выделении абоненту 4-6 каналов СВРС (рис. 3). Как видно из рис. 2 и 3 повышение информационной емкости сигналов и скорости кодирования положительно сказывается на скорости канала СВРС и позволяет снизить длительность обслуживания пакета в канале на один или даже несколько порядков.

3. Исследование процесса распределения частотных каналов в сети воздушной радиосвязи

В составе модели организации доступа абонентов к СВРС [1, 10-12] был формализован процесс распределения частотных каналов СВРС. В дальнейшем, данная формализация была использована в методике определения для каждого ЛА необходимого числа каналов СВРС, достаточного для передачи данных с требуемым качеством обслуживания. Этот этап методики позволяет по известной интенсивности входных данных (λ_m) определить минимально необходимое число каналов обслуживания (N), которые позволят обслужить трафик разведанных 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 $T_{\text{зад}}^{\text{треб}}$ и $P_{\text{отк}}^{\text{треб}}$ определяются для отдельных типов разведанных с учетом значений, указанных в табл. 4 и 5.

Таблица 4 – Допустимые значения параметров качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика [1]

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 5 – Требования к качеству услуг, предоставляемых мультисервисными сетями связи [1]

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	Видео-конференция	>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

Проведем исследование качества обслуживания трафика абонента при выделении ему требуемого числа каналов СВРС. При исследовании использовались следующие ограничения на исходные данные:

- количество ЛА в СВРС: $M = 3$;
- интенсивность трафика формируемого одним ЛА: $\lambda = 10$ Мбит/с;
- требуемое значение своевременности передачи трафика (аудио- и видеоданных), не больше: $T_{\text{зад}}^{\text{треб}} = 0,5$ с;

- требуемое значение вероятности отказа в обслуживании пакета трафика (аудио- и видеоданных), не больше: $P_{отк}^{треб} = 10^{-3}$ с;
- полоса частот канала: $F = 5, 10, 15, 20$ МГц;
- информационная емкость сигнала: 2 для QPSK, 4 для 16QAM, 6 для 64QAM;
- скорость помехоустойчивого кодирования: $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$;
- объем сообщений в СВРС: $D_{mes} = 1024$ бит;
- радиус СВРС: $d_{max} = 300$ км;
- количество попыток повторной передачи пакета при коллизии: $K = 10$;
- количество каналов обслуживания в СВРС: $N = 1, 2, \dots, 10$;
- размер буферного устройства абонента: $Q = 128$ кбит.

Моделирование проводилось в среде математического моделирования MathCAD по расчетным соотношениям, представленным в [1].

Результаты моделирования качества обслуживания трафика абонента при выделении ему требуемого числа каналов СВРС, сведены в табл. 6.

Таблица 6 – Достижимое качество обслуживания трафика ЛА при выделении абоненту необходимого числа каналов СВРС

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот одного канала, МГц	Необходимое число каналов N	Задержка в обслуживании пакета $T_{зад\ m}$, с	Вероятность отказа в обслуживании пакета $P_{отк\ m}$	Полоса частот, необходимая для СВРС, МГц
Существующие схемы					
QPSK, $R=2/3$	5	23	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	115
	10	15	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	150
	15	13	$9,8 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	195
	20	11	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	220
QPSK, $R=3/4$	5	21	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	105
	10	14	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	140
	15	13	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$	195
	20	11	$7,6 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	220
Предлагаемые схемы					
QPSK, $R=1/2$	5	27	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	135
	10	17	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	170
	15	14	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	210
	20	13	$9,8 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	260
QPSK, $R=2/3$	5	23	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	115
	10	15	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	150
	15	13	$9,8 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	195
	20	11	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	220
16QAM, $R=2/3$	5	15	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	75
	10	11	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	110
	15	10	$6,1 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	150
	20	9	$5,2 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	180
16QAM, $R=3/4$	5	14	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	70
	10	11	$7,6 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	110

	15	9	$8,3 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	135
	20	8	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-13}$	160
64QAM, $R=2/3$	5	13	$9,8 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	65
	10	9	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	90
	15	8	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-13}$	120
	20	7	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	140
64QAM, $R=3/4$	5	12	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$	60
	10	9	$8,3 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	90
	15	8	$5,7 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	120
	20	7	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-14}$	140
64QAM, $R=5/6$	5	11	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	55
	10	9	$6 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	90
	15	8	$4,4 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	120
	20	7	$5 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	140
64QAM, $R=7/8$	5	11	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-11}$	55
	10	9	$5,4 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	90
	15	8	$3,9 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	120
	20	7	$4,4 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	140

Число каналов, необходимых для обеспечения требуемого качества обслуживания, а также требуемый частотный ресурс при использовании различных комбинаций вида сигнала и скорости кодирования отдельно приведены в табл. 7 и 8 (на рис. 4 и 5), соответственно.

В табл. 9 и на рис. 6 приведена суммарная скорость обмена данными, достигаемая для одного абонента (ЛА) в СВРС при заданных условиях моделирования при реализации предлагаемого варианта технологии АСМ для каждого частотного канала (см. табл. 2 и 3) и многоканального обслуживания абонента, при этом трафик абонента обслуживается с требуемым качеством (см. табл. 7). Достигаемый при этом выигрыш в скорости, выраженный в процентах, приведен в табл. 10 и 11, а также на рис. 7.

Необходимо отметить, что отрицательные значения выигрыша в скорости в некоторых ячейках табл. 9 и на рис. 7 соответствуют случаям, когда из-за использования адаптивной схемы АСМ в условиях неблагоприятной сигнально-помеховой обстановки выбирается наиболее помехоустойчивая комбинация сигнала и скорости кодирования. В этом случае скорость передачи снижается, по сравнению с существующей схемой выбора сигнала и скорости кодирования, но передача данных будет более помехоустойчивой.

Таблица 7 – Число каналов, необходимых для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика абонента (ЛА)

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Существующие схемы				
QPSK, $R=2/3$	23	15	13	11
QPSK, $R=3/4$	21	14	13	11

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Предлагаемые схемы				
QPSK, $R=1/2$	27	17	14	13
QPSK, $R=2/3$	23	15	13	11
16QAM, $R=2/3$	15	11	10	9
16QAM, $R=3/4$	14	11	10	9
64QAM, $R=2/3$	13	9	8	7
64QAM, $R=3/4$	12	9	8	7
64QAM, $R=5/6$	11	9	8	7
64QAM, $R=7/8$	11	9	8	7

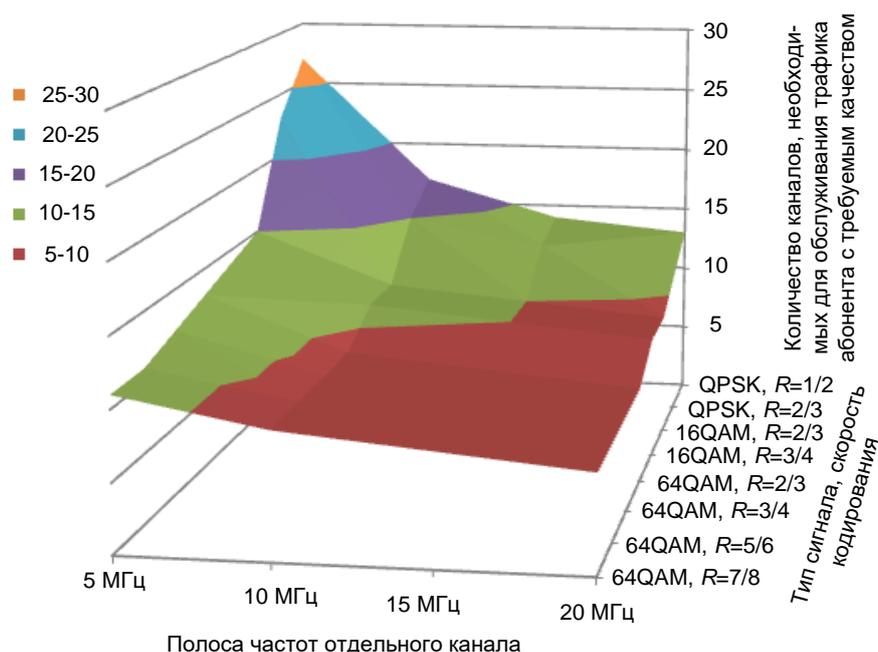


Рис. 4. Число каналов, необходимых для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика ЛА

Таблица 8 – Частотный ресурс СВРС, необходимый для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика ЛА [МГц]

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Существующие схемы				
QPSK, $R=2/3$	115	150	195	220
QPSK, $R=3/4$	105	140	195	220
Предлагаемые схемы				
QPSK, $R=1/2$	135	170	210	260
QPSK, $R=2/3$	115	150	195	220
16QAM, $R=2/3$	75	110	150	180
16QAM, $R=3/4$	70	110	135	160
64QAM, $R=2/3$	65	90	120	140
64QAM, $R=3/4$	60	90	120	140
64QAM, $R=5/6$	55	90	120	140
64QAM, $R=7/8$	55	90	120	140

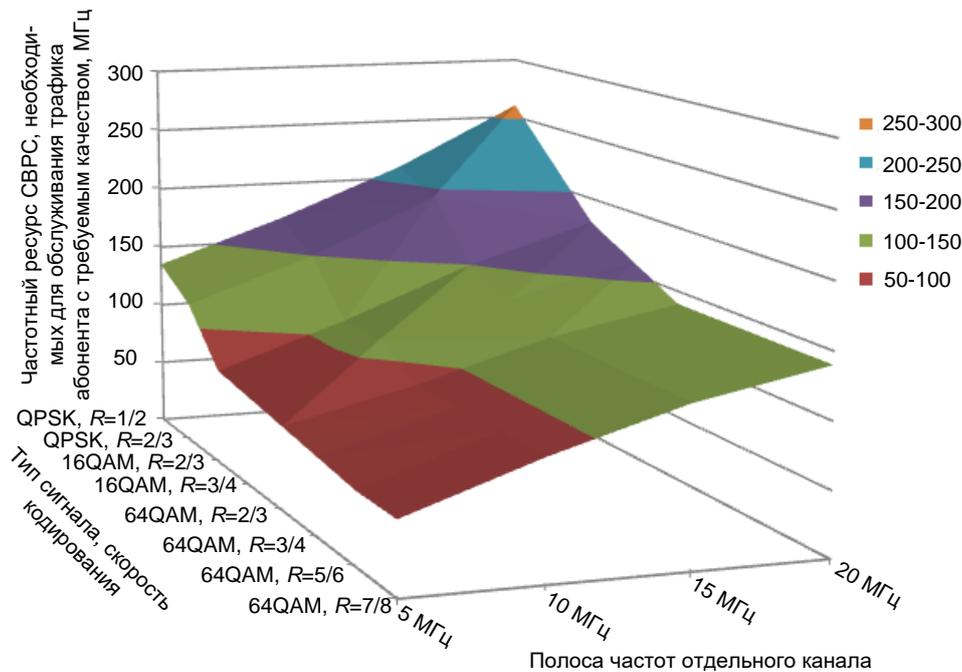


Рис. 5. Частотный ресурс СВРС, необходимый для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика ЛА

Таблица 9 – Абсолютные значения суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и при многоканальном обслуживании [Мбит/с]

Тип сигнала и скорость кодирования	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Существующие схемы				
QPSK, $R=2/3$	123,28	168	218,4	246,4
QPSK, $R=3/4$	126,63	176,4	245,7	277,2
Предлагаемые схемы				
QPSK, $R=1/2$	108,54	142,8	176,4	218,4
QPSK, $R=2/3$	123,28	168	218,4	246,4
16QAM, $R=2/3$	168	246,4	336	403,2
16QAM, $R=3/4$	176,4	277,2	378	453,6
64QAM, $R=2/3$	218,4	302,4	403,2	470,4
64QAM, $R=3/4$	226,8	340,2	453,6	529,2
64QAM, $R=5/6$	231	378	504	588
64QAM, $R=7/8$	242,55	396,9	529,2	617,4

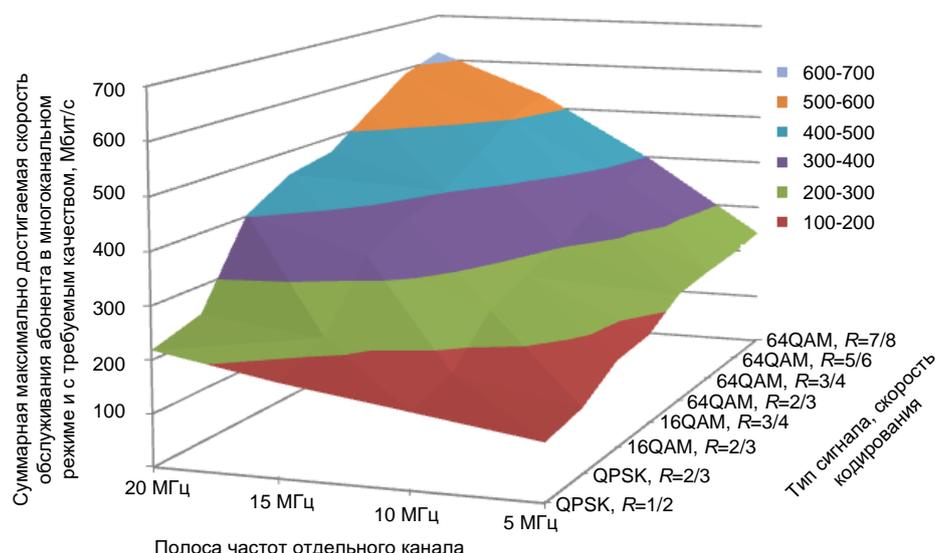


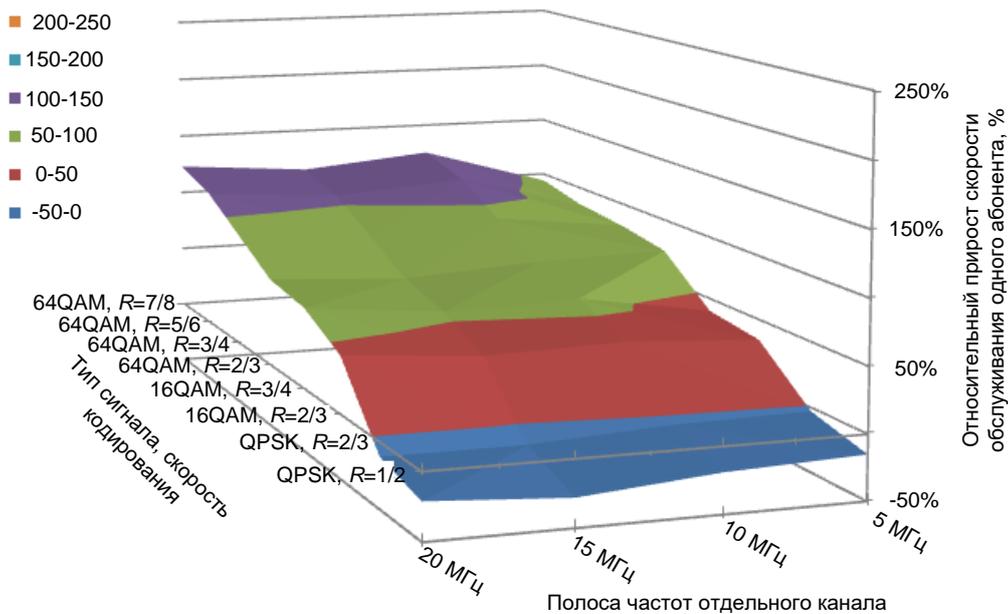
Рис. 6. Абсолютные значения суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и многоканальном обслуживании [Мбит/с]

Таблица 10 – Относительные значения прироста суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и многоканальном обслуживании в сравнении со схемой QPSK, R=2/3

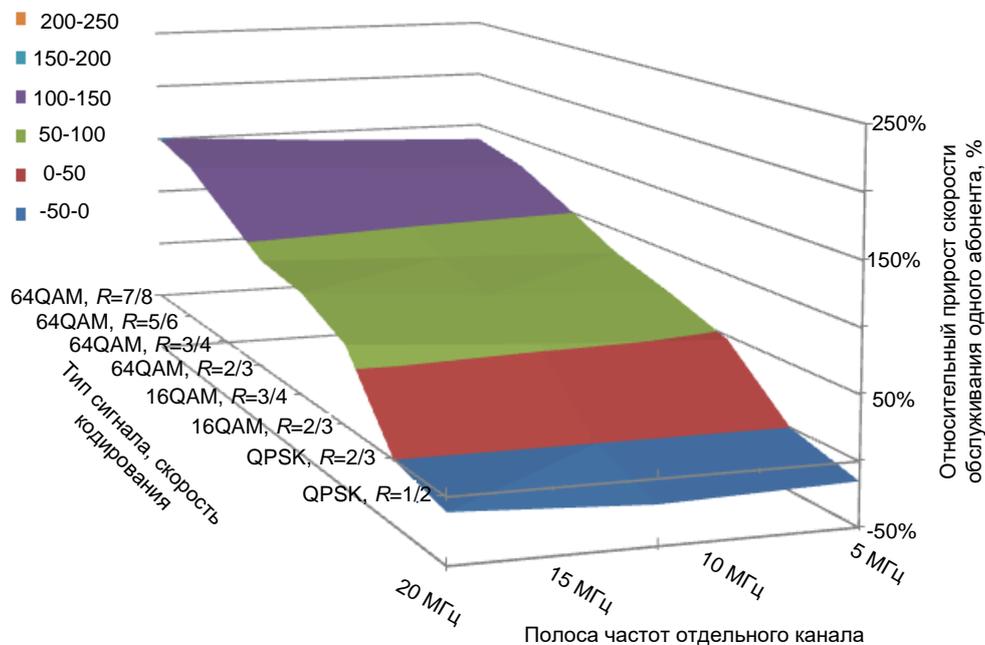
	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
QPSK, R=1/2	-12%	-15%	-19%	-11%
QPSK, R=2/3	0%	0%	0%	0%
16QAM, R=2/3	36%	47%	54%	64%
16QAM, R=3/4	43%	65%	73%	84%
64QAM, R=2/3	77%	80%	85%	91%
64QAM, R=3/4	84%	103%	108%	115%
64QAM, R=5/6	87%	125%	131%	139%
64QAM, R=7/8	97%	136%	142%	151%

Таблица 11 – Относительные значения выигрыша в приросте суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и многоканальном обслуживании в сравнении со схемой QPSK, R=3/4

	Полоса частот отдельного канала			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
QPSK, R=1/2	-15%	-19%	-28%	-21%
QPSK, R=2/3	-3%	-5%	-11%	-11%
16QAM, R=2/3	34%	40%	37%	45%
16QAM, R=3/4	40%	57%	54%	64%
64QAM, R=2/3	74%	71%	64%	70%
64QAM, R=3/4	81%	93%	85%	91%
64QAM, R=5/6	85%	114%	105%	112%
64QAM, R=7/8	94%	125%	115%	123%



а)



б)

Рис. 7. Относительные значения выигрыша в приросте суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним абонентом (ЛА) в СВРС при использовании технологии АСМ и многоканальном обслуживании: а) в сравнении со схемой QPSK, $R=2/3$; б) в сравнении со схемой QPSK, $R=3/4$

В результате анализа данных, представленных на вышеприведенных рисунках и таблицах можно сделать следующие выводы: одновременное использование в СВРС технологии АСМ и многоканального обслуживания абонентов позволяет значительно увеличить скорости передачи данных. В рассматриваемых условиях моделирования обеспечивается увеличение абсолютных значе-

ний суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним ЛА:

- с 126,6 Мбит/с (в режиме QPSK, $R=3/4$) до 242,5 Мбит/с (64QAM, $R=7/8$) для СВРС с каналами по 5 МГц;
- с 176,4 Мбит/с (в режиме QPSK, $R=3/4$) до 396,9 Мбит/с (64QAM, $R=7/8$) для СВРС с каналами по 10 МГц;
- с 245,7 Мбит/с (в режиме QPSK, $R=3/4$) до 529,2 Мбит/с (64QAM, $R=7/8$) для СВРС с каналами по 15 МГц;
- с 277,2 Мбит/с (в режиме QPSK, $R=3/4$) до 617,4 Мбит/с (64QAM, $R=7/8$) для СВРС с каналами по 20 МГц;

что соответствует относительному повышению скорости обмена данными на 97%, 136%, 142% и на 151%, соответственно.

Выводы

Работа содержит исследования основных научных результатов, полученных в части первой данной научной работы.

Анализ результатов исследований повышения скорости передачи данных в СВРС позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенные в научном исследовании варианты 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 в ЛРС – гауссовской, райевской и рэлеевской моделей распространения радиоволн, позволяют повысить скорость передачи данных в условиях благоприятной сигнально-помеховой обстановки в отдельных каналах связи.

Для рассматриваемых условий моделирование показало, что использование предложенного варианта технологии АСМ (сигналы QPSK, 16QAM, 64QAM с $R = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$) позволяет обеспечить повышение максимальной потенциально достижимой скорости передачи в отдельном канале СВРС в перспективном СМВ диапазоне авиационной радиосвязи на следующие значения (см. табл. 3):

- с 1,57 Мбит/с до 6,17 Мбит/с для канала 1,4 МГц;
- с 3,36 Мбит/с до 13,23 Мбит/с для канала 3 МГц;
- с 5,36 Мбит/с до 22,05 Мбит/с для канала 5 МГц;
- с 11,2 Мбит/с до 44,1 Мбит/с для канала 10 МГц;
- с 16,8 Мбит/с до 66,8 Мбит/с для канала 15 МГц;
- с 22,4 Мбит/с до 88,2 Мбит/с для канала 20 МГц.

В процентном отношении это соответствует повышению скорости передачи в канале СВРС на 77-250% (относительно варианта QPSK $R = 3/4$ – см. табл. 10) и на 100-293% (относительно варианта QPSK $R = 2/3$ – см. табл. 11) для гауссовской, райевской и рэлеевской моделей распространения радиоволн.

2. Введение многоканального режима обслуживания абонентов в СВРС позволяет в несколько раз снизить нагрузку на систему передачи данных абонента по сравнению с одноканальным обслуживанием. В рассматриваемых

условиях моделирование показало, что переход к $N=2$ (где N – число каналов, выделенных абоненту) снижает нагрузку в 2 раза, при $N \geq 6$ – более чем в 6 раз (рис. 2).

3. Адаптивное выделение каналов каждому абоненту (ЛА) с учетом интенсивности формируемого им трафика позволяет, во-первых, обеспечить требуемое качество обслуживания для передаваемого в режиме реального времени трафика аудио- и видеоданных, а во-вторых, обеспечить гибкое перераспределение частотного ресурса СВРС в виде выделения отдельных частотных каналов в пользу тех абонентов, которые формируют трафик с наибольшей интенсивностью. В рассматриваемых условиях моделирование показало, что для обеспечения требуемого качества обслуживания трафика (своевременность передачи $T_{\text{зад}} \leq 0,5$ с, вероятность отказа в обслуживании $P_{\text{отк}} \leq 10^{-3}$) на отдельный ЛА должно выделяться от 7 (каналы по 20 МГц в режиме 64QAM, $R=7/8$) до 27 каналов (каналы по 5 МГц в режиме QPSK, $R=1/2$) (табл. 7, рис. 4). Достижимые при этом показатели качества обслуживания трафика равны $T_{\text{зад}} \leq 0,005$ с, $P_{\text{отк}} \leq 5,3 \cdot 10^{-4}$ (табл. 6).

4. Многоканальный режим обслуживания абонентов с одной стороны требует увеличения количества частотных каналов, используемых каждым абонентом, а с другой стороны – за счет использования технологии АСМ скорость передачи такого отдельного канала значительно возрастает. В результате достигается экономия частотного ресурса СВРС в благоприятных сигнально-помеховых условиях. При рассматриваемых исходных данных для организации многоканальной СВРС, обслуживающей абонентов с требуемым качеством, требуется ширина полосы частот от 55-140 МГц (СВРС с каналами по 5-20 МГц в режиме 64QAM, $R=7/8$) (табл. 8, рис. 5). Для эквивалентного обслуживания абонентов для СВРС с фиксированными сигнально-кодовыми режимами требуется ширина полосы частот уже от 105-220 МГц (СВРС с каналами по 5-20 МГц в режиме QPSK, $R=3/4$) (табл. 8).

5. Одновременное использование в СВРС технологии АСМ и многоканального обслуживания абонентов позволяет значительно увеличить скорость передачи данных. Для рассматриваемых условий моделирование показало, что обеспечивается увеличение абсолютных значений суммарной потенциально достижимой скорости обмена данными с одним ЛА (табл. 9):

- с 126,6 Мбит/с (в режиме QPSK, $R=3/4$) до 242,5 Мбит/с (64QAM, $R=7/8$) для СВРС с каналами по 5 МГц;
- с 176,4 Мбит/с (в режиме QPSK, $R=3/4$) до 396,9 Мбит/с (64QAM, $R=7/8$) для СВРС с каналами по 10 МГц;
- с 245,7 Мбит/с (в режиме QPSK, $R=3/4$) до 529,2 Мбит/с (64QAM, $R=7/8$) для СВРС с каналами по 15 МГц;
- с 277,2 Мбит/с (в режиме QPSK, $R=3/4$) до 617,4 Мбит/с (64QAM, $R=7/8$) для СВРС с каналами по 20 МГц.

Это соответствует относительному повышению скорости обмена данными на 97%, 136%, 142% и на 151%, соответственно (табл. 10).

Таким образом, в результате моделирования предложенных положений доказан положительный эффект, заключающийся в повышении скорости пере-

дачи данных сети воздушной радиосвязи за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевого ресурса.

Литература

1. 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

2. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетецентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. – СПб.: Научное издательство «Лань». 2018. – 898 с.

3. 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

4. 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

5. 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

6. 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

7. 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.

8. 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

9. 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

10. 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

11. 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

12. 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

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

14. 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 межсетевых обмена // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 12-16.

References

1. 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

2. 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).

3. 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).

4. 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).

5. 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).

6. 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.

7. 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).

8. 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).

9. 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).

10. 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).

11. 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).

12. 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).

13. 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).

14. 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).

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: makserg@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 2. Investigation of the achieved increase in data transmission rate

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 1st part of the scientific research presents

models and methods for increasing the data transmission rate in the air radio network due to the adaptive use of energy, signal and frequency resources of the network. 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. The aim of this paper is to study the method in order to assess the achieved increase in data transmission rate. Practical significance: the proposed models and method will allow for increase of the data transmission rate in the ARCN without increasing the frequency band in favorable noise conditions.

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: makserg@yandex.ru

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