

УДК 621.391

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

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

Постановка задачи: возрастание интенсивности применения Воздушно-космических сил ведет к повышению требований: по оперативности управления летательными аппаратами (ЛА) на различных этапах полета; по своевременности передачи данных и команд управления на борт ЛА; к скорости передачи данных, в каналах управления и сети воздушной радиосвязи (СВРС), в целом. Директивный способ назначения частотно-временных ресурсов для отдельных каналов управления ЛА в СВРС не учитывает изменения интенсивности передаваемого по ним трафика, что ведет к снижению своевременности передачи команд управления ЛА и как следствие – к снижению эффективности управления ЛА. **Цель работы:** разработка методики повышения скорости передачи данных в каналах управления ЛА СВРС за счет адаптивного распределения временного и частотного ресурсов с учетом интенсивности передаваемого трафика при управлении летательными аппаратами. **Новизна:** элементами новизны представленного решения является введение новых операций, реализующих двухэтапное распределение сетевого ресурса – на первом этапе временного путем адаптивного изменения паузы захвата КМД СВРС, на втором этапе частотного ресурса в случае если суммарные требования по скоростям всех каналов управления ЛА не могут быть обеспечены распределением временного ресурса СВРС, при этом адаптивное распределение частотно-временного ресурса СВРС основано на прогнозируемом уровне интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика, а также требованиях по вероятности наведения ЛА на цель. **Результат:** использование представленного решения по адаптивному распределению временного и частотного ресурсов сети приведет к повышению скорости передачи данных в каналах управления и сети воздушной радиосвязи, что позволит обеспечить оперативность управления и своевременность передачи данных и команд управления на борт ЛА. **Практическая значимость** состоит в том, что разработанная методика может использоваться для решения задач повышения скорости передачи данных в СВРС управления ЛА за счет адаптивного распределения частотно-временного ресурса сети при наведении летательных аппаратов на воздушную цель.

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

Введение

В настоящее время стремительно возрастает роль истребительной авиации Воздушно-космических сил (ВКС) для отстаивания геополитических интересов Российской Федерации (РФ). Одновременно с возрастанием интенсивно-

Библиографическая ссылка на статью:

Иванов М. С., Понамореv 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

Reference for citation:

Ivanov M. S., Ponomarev 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 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-104-139

сти применения летальных аппаратов (ЛА) истребительной авиации ВКС выявляются проблемные технические аспекты их эксплуатации и управления. Одним из таких аспектов является несоответствие принципов организации связи в сетях воздушной радиосвязи (СВРС) управления ЛА истребительной авиации ВКС высоким требованиям по оперативности управления ЛА, своевременности передачи данных и команд на борт ЛА, скорости передачи, как отдельных каналов управления, так и СВРС, в целом. В частности, в СВРС используется директивный способ назначения частотно-временных ресурсов для отдельных каналов управления ЛА в СВРС, что не позволяет адаптивно распределять частотно-временные ресурсы СВРС. Предварительные исследования показали, что подобное назначение ресурсов для каналов управления ЛА в СВРС не учитывает изменения интенсивности передаваемого по ним трафика (команд и данных тактической воздушной обстановки) на различных этапах полета ЛА и характера выполняемых ими задач, что ведет к снижению своевременности передачи команд управления ЛА и как следствие – снижению эффективности управления ЛА [1, 2].

Анализ процессов управления ЛА в ходе решения типовых задач истребительной авиации ВКС показал, что СВРС является основным средством для управления одиночными и групповыми действиями ЛА, посредством которого и осуществляется передача команд с пункта управления (ПУ) на борт ЛА, их воспроизведение для решения задач траекторного управления, информационного обеспечения и управления аппаратурой ЛА. При этом интенсивность передачи трафика (команд и данных воздушной тактической обстановки) в канале управления ЛА при его командном наведении различна – на этапе полета в зону ведения боевых действий (БД) интенсивность может быть невысокой, однако она значительно возрастает на этапах непосредственного наведения ЛА на цель, ведении воздушного боя, преодолении зон противовоздушной обороны (ПВО) противника. Таким образом, трафик в канале управления ЛА имеет нестационарный характер, что не учитывается в современных технических средствах СВРС, которые спроектированы с учетом стационарного трафика в канале управления ЛА. Отсутствие учета нестационарного характера трафика в канале управления ЛА ведет к появлению неучтенной задержки передачи команд и данных в СВРС на наиболее важных этапах полета ЛА (полет ЛА в/из район(а) ведения БД; непосредственное наведение ЛА на цель и управление воздушным боем; постановка новой боевой задачи).

Разрешением вышеуказанной проблемной ситуации является повышение скорости передачи данных в СВРС, за счет внедрения адаптивного распределения частотно-временного ресурса СВРС по отдельным каналам управления ЛА в зависимости от интенсивности передаваемого по ним трафика.

1. Анализ известных работ в исследуемой области

Проведенный анализ ранее опубликованных работ показал, что общие принципы организации связи при управлении авиацией представлены в работах В.С. Вербы [3], В.Н. Меркулова [3-6], Е.А. Федосова [7], С.И. Макаренко,

В.И. Сапожникова, Г.И. Захаренко, В.Е. Федосеева [8, 9], А.В. Кейстовича, В.Р. Милова [10], В.М. Ланчева [11].

Вопросы маршрутизации информационных потоков и команд управления ЛА именно авиации специального назначения (СН) в СВРС были рассмотрены в работе К.Л. Войткевича [12]. В этой работе описаны основные принципы маршрутизации трафика в СВРС, а также в наземных сетях при решении задач управления ЛА. Основные принципы организации связи СВРС, представленные в работе К.Л. Войткевича [12], в дальнейшем получили развитие в работах: С.В. Алехина [13], А.А. Сулимы [14, 15], П.А. Зац [16], Е.А. Белоусова [17-19], В.Ф. Брянцева [17-19], А.В. Кейстовича [9, 10, 17, 18], Х.И. Сайфетдинова [17-19]. 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 специального назначения, предложена концепция быстрой реконфигурации аппаратуры связи на основе концепции «программируемого радио».

В работах А.Н. Дмитриева, А.В. Максимова, О.А. Блакитного [20], В.А. Гимбицкого, И.И. Сныткина [21-25], В.И. Калинина [26-28], рассмотрены вопросы организации СВРС управления авиацией СН в отдельном регионе при управлении массированными действиями разнородной группировки авиационного формирования.

В работах А.Н. Дмитриева, А.В. Максимова, О.А. Блакитного [29-32], А.В. Кейстовича, В.Р. Милова [9] рассмотрены вопросы организации локальных СВРС, объединяющих группы ЛА СН, а также исследованы вопросы эффективности различных алгоритмов доступа абонентов к радиоканалу связи.

В работах С.И. Макаренко [33-35] рассмотрены вопросы эффективного управления ресурсами СВРС в интересах обеспечения высокой пропускной способности сети для организации высокоскоростного информационного обеспечения ЛА оперативно-тактической авиации.

В работах С.И. Макаренко [36-40], А.В. Аганесова [36-38, 41-43], М.С. Иванова, С.А. Попова [39, 40, 42-44], А.Е. Богданова [44], С.В. Смирнова [39, 40, 45], рассмотрены вопросы организации гибридных сетей управления авиации, вопросы маршрутизации информационных потоков в СВРС на основе децентрализованных и иерархических подходов.

В работах Е.В. Головченко [46-50], П.А. Федюнина [46, 50], А.Д. Афанасьева [46, 48-50], К.С. Баева [47], А.А. Першина [48], В.А. Дьяченко [49, 50] рассмотрены высоко-абстрактные системотехнические вопросы построения СВРС и их моделирования на основе теории систем, теории управления и тензорной методологии. При этом в этих работах указывается на важность учета параметров трафика абонентов на эффективность функционирования СВРС.

Вместе с тем, вышеуказанные работы не учитывают фактор существенного варьирования интенсивности трафика в канале управления ЛА, возможности по прогнозированию объема данного трафика, с последующим упреждающим распределением частотно-временного ресурса СВРС по каналам управления ЛА с учетом сделанного прогноза.

Сходными, по отношению к данному исследованию являются работы Е.В. Головченко, П.А. Федюнина, А.Д. Афанасьева, В.А. Дьяченко [49-51]. В этих работах рассмотрены вопросы учета параметров передаваемого по СВРС трафика, однако в них не рассматривается нестационарность трафика, его существенное варьирование в зависимости от типа управления, решаемой целевой задачи (ЦЗ) и этапа полета каждого отдельного ЛА, а сформированные в этих работах предложения по управлению ресурсом СВРС относятся прежде всего к топологическому ресурсу, а не к частотно-временному.

Предлагаемый подход к упреждающему распределению частотно-временного ресурса сетей связи не является принципиально новым. В настоящее время известны работы Е.А. Новикова, А.А. Ковальского, С.Х. Зиннурова [52-57], 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-RSC (Digital Video Broadcasting-Return Chanel via Satellite) и не учитывают специфику СВРС управления ЛА.

В данной работе принят за основу общий подход, представленный в работах Е.А. Новикова, А.А. Ковальского, С.Х. Зиннурова [52-57], однако дополнительными факторами, которые необходимо учесть и которые определяют новизну данного научного исследования, являются: двухэтапное распределение сетевого ресурса, на первом этапе – временного ресурса, путем адаптивного изменения паузы захвата канала множественного доступа (КМД) СВРС, на втором этапе – частотного ресурса, в случае если суммарные требования по скоростям всех каналов управления ЛА не могут быть обеспечены распределением временного ресурса СВРС, при этом адаптивное распределение частотно-временного ресурса СВРС основано на прогнозируемом уровне интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика, а также требованиях по вероятности наведения ЛА на цель.

Цель работы – разработка методики повышения скорости передачи данных в каналах управления ЛА СВРС за счет адаптивного распределения временного и частотного ресурсов с учетом интенсивности передаваемого трафика при управлении ЛА.

Данная работа продолжает и развивает более ранние исследования авторов [1, 2, 34, 38-40, 44, 45, 58-60, 61], направленные на повышение эффективности СВРС управления ЛА СН.

2. Методика повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами

2.1. Основные положения и посылки

Как показано в [1, 2] учет нестационарности трафика в канале управления ЛА в СВРС сводится к процессу формирования аналитической функции, аппроксимирующей значения интенсивности входного потока на каждом из циклов управления. В свою очередь формирование такой аналитической функции и

в дальнейшем прогнозирование на ее основе интенсивности трафика в каждом канале управления ЛА формализуется в виде задачи экстраполяции.

Методика повышения скорости передачи данных в СВРС основывается на прогнозируемых значениях интенсивности трафика и позволяет увеличить скорости передачи данных (C_i) в тех каналах управления ЛА, в которых она недостаточна для своевременной передачи команд управления и данных информационного обеспечения, за счет тех каналов, в которых скорость передачи данных избыточна относительно передаваемой интенсивности трафика. Таким образом, фактически данная методика реализует прогнозирование и адаптацию скоростей отдельных каналов к уровню интенсивности передаваемого в них трафика λ_p (см. рис. 1).

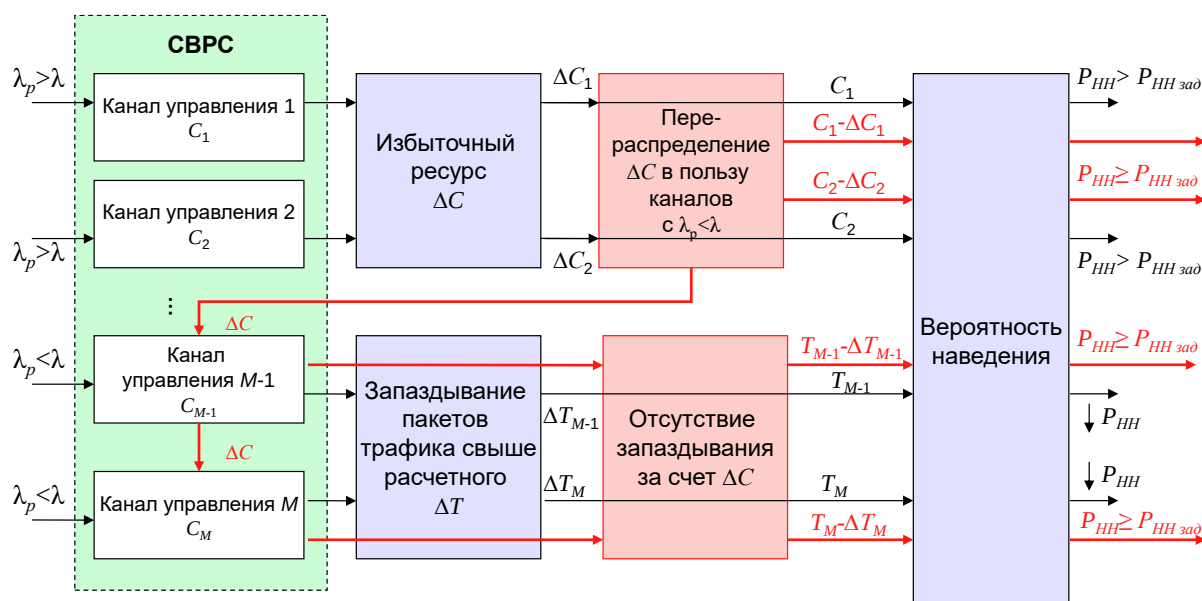


Рис. 1. Предлагаемый подход к адаптивному распределению скоростей каналов управления ЛА в СВРС

Такой подход не потребует применения аппаратуры радиосвязи ЛА с более высокими тактико-техническими характеристиками (ТТХ), а повысит эффективность СВРС, за счет более рационального адаптивного распределения общего ресурса скоростей передачи каналов управления ЛА. Повышение своевременности доставки пакетов трафика (T_i) по СВРС позволит повысить вероятность наведения управляемых ЛА (P_{HH}) на цель. При этом целевое значение своевременности доставки пакетов трафика в каждом канале управления ЛА будет выбираться с учетом текущего этапа полета ЛА, интенсивности трафика в каждом канале, исходя из требований к заданной вероятности наведения ЛА ($P_{HH \text{ зад}}$).

Общая схема методики повышения скорости передачи данных в СВРС управления ЛА представлена на рис. 2. Для разработки данной методики использовались методы системного анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории систем массового обслуживания, а также отдельные методы оценки эффективности ЛА.

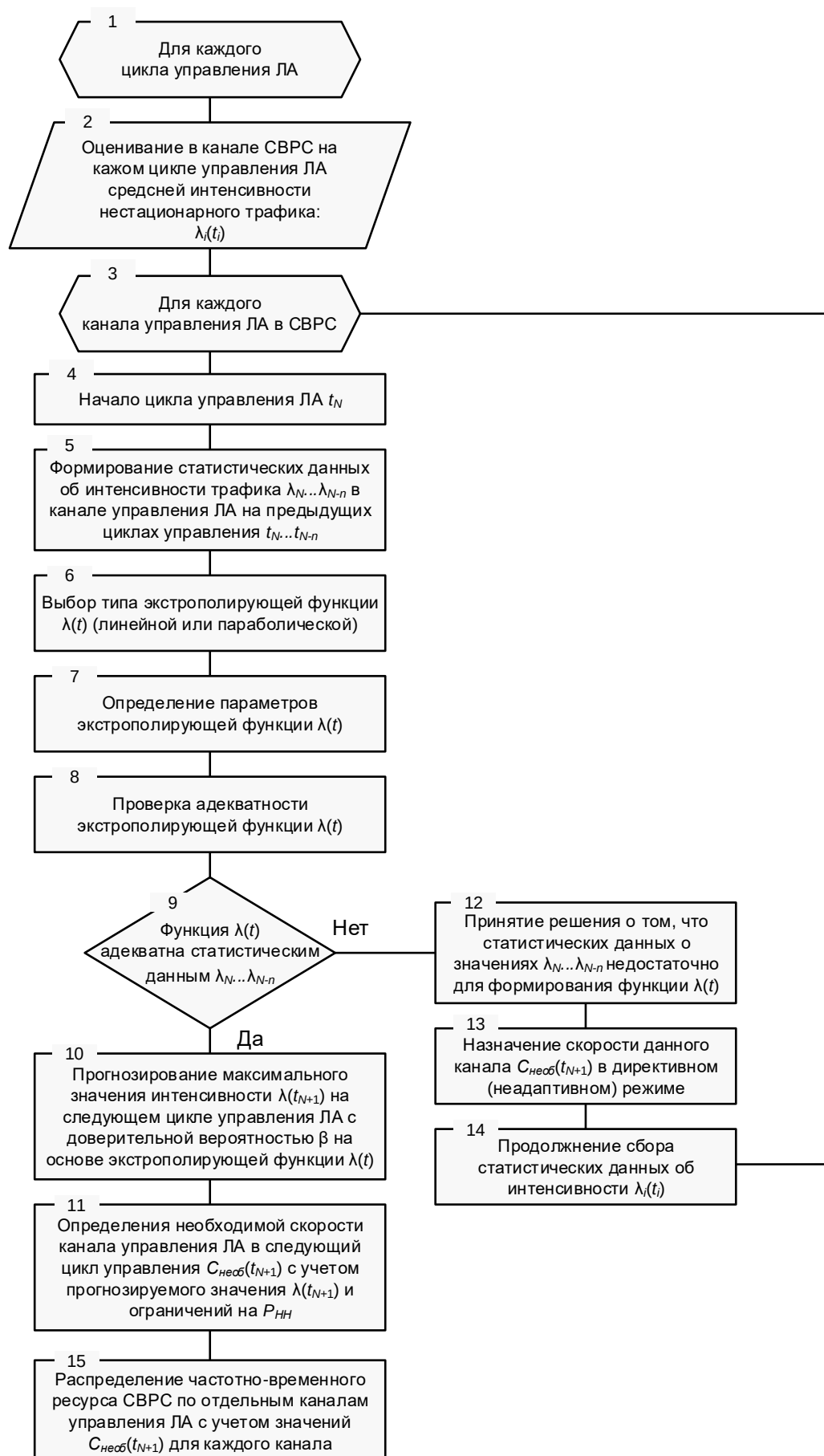


Рис. 2. Схема методики повышения скорости передачи данных в СВРС управления ЛА

При адаптивном распределении скоростей каналов управления ЛА в СВРС необходимо обеспечить анализ последовательности оценок интенсивности трафика для каждого канала СВРС в каждом цикле управления группой ЛА. На основании этих оценок необходимо спрогнозировать вероятный уровень интенсивности трафика в каждом из каналов на следующем цикле управления. В начале следующего цикла управления – перераспределить скорости передачи данных отдельных каналов управления в СВРС с учетом спрогнозированной нагрузки. В соответствии с этим, на каждом из циклов управления ЛА для каждого канала управления СВРС необходимо обеспечить решение следующих задач [1, 2]:

- формирование статистических данных об интенсивности трафика в канале управления ЛА на предыдущих циклах управления;
- выбор типа экстраполирующей функции, в соответствии с которой производится экстраполяция статистических данных об оценках интенсивности трафика;
- проверка адекватности полученной экстраполирующей функции;
- прогнозирование максимального уровня интенсивности трафика в следующий цикл управления с учетом погрешностей и ошибок экстраполяции;
- определение требуемой скорости канала управления ЛА в следующий цикл управления с учетом прогнозируемого уровня интенсивности трафика;
- в начале следующего цикла управления – перераспределение скоростей всех каналов управления ЛА в СВРС в соответствии с прогнозируемым значением требуемых скоростей каждого канала управления ЛА.

В целом, методика состоит из следующих основных этапов, суть которых более подробно рассмотрена далее в соответствующих подразделах статьи:

- 1) формализация процесса случайного множественного доступа ЛА к частотным каналам в составе СВРС;
- 2) расчет требуемой скорости канала управления ЛА;
- 3) адаптивное распределение временного ресурса КМД СВРС управления ЛА;
- 4) адаптивное распределение частотного ресурса СВРС управления ЛА.

2.2. Формализация процесса случайного множественного доступа летательных аппаратов к частотным каналам в составе СВРС

Вся совокупность канального ресурса СВРС может быть представлена множеством отдельных частотных каналов, каждый из которых представляет собой канал множественного доступа (КМД). Ресурс каждого КМД разделяется между абонентами (представляющими собой отдельные ЛА) по времени в соответствии с алгоритмом случайного множественного доступа.

В работе [62] представлена разработанная авторами модель ненастойчивого множественного доступа с проверкой несущей (МДПН), которая была взя-

та за основу для формализации процессов данного этапа разрабатываемой методики.

В качестве исходных данных выступает вероятность появления заявок и вероятность успешной передачи заявки, нормированных ко времени передачи типовой заявки. Так как данные величины априорно не известны, целесообразно переработать модель МДПН таким образом, чтобы, во-первых, модель соответствовала КМД СВРС, во-вторых, входными параметрами этой модели являлись: интенсивность трафика в каналах управления ЛА и максимальная пропускная способность КМД СВРС, а выходными параметрами – своевременность передачи пакетов трафика по СВРС и эффективная скорость передачи КМД, выраженная в бит/с.

Алгоритм работы абонента в модели МДПН представляет собой следующую последовательность действий (рис. 3):

- 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 описанные действия.

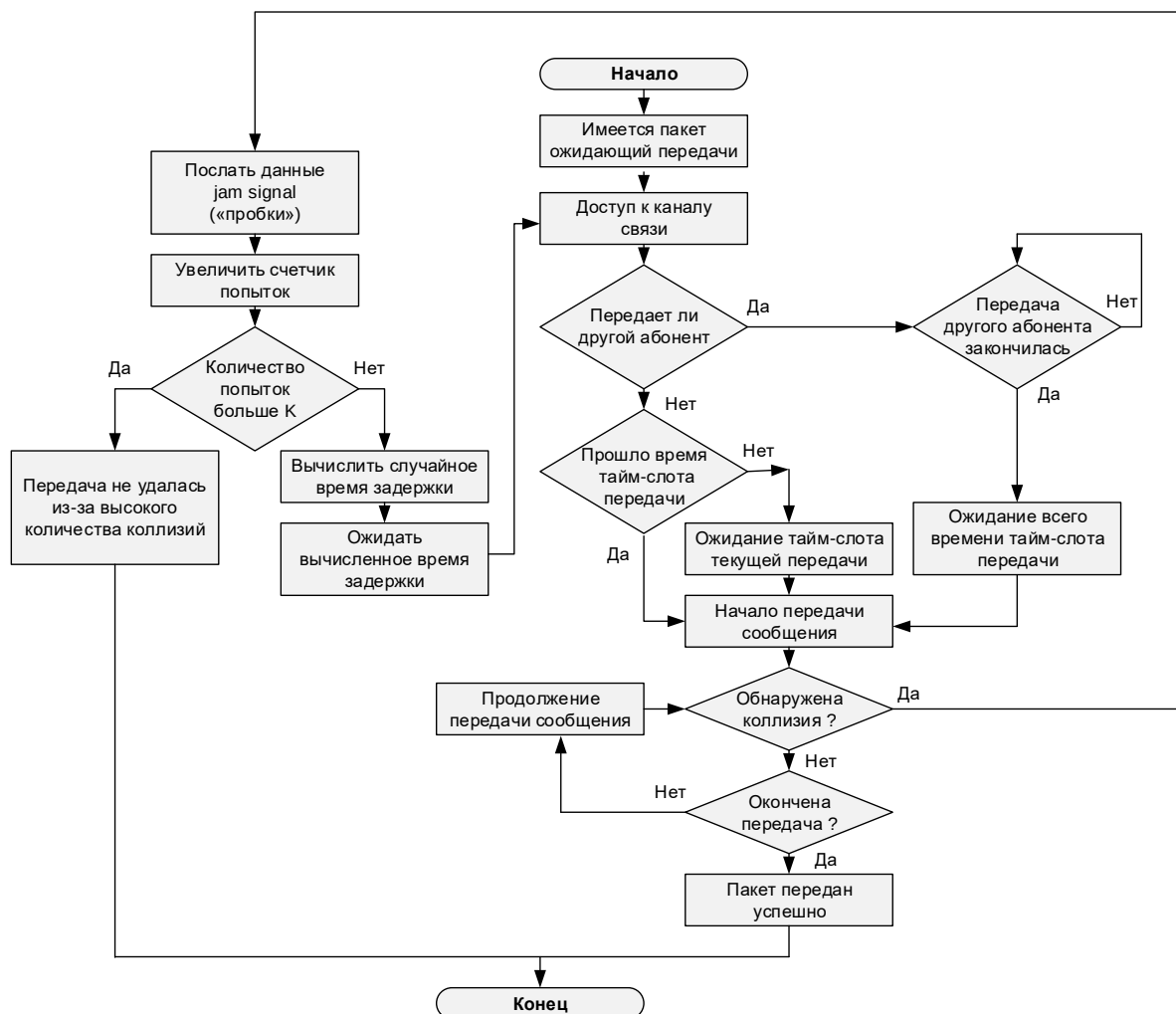


Рис. 3. Общая схема МДПН в СВРС

Исходными данными для формализации модели МДПН для СВРС являются:

M – количество абонентов, совместно использующих КМД СВРС;

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

S_m – вероятность, 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;

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

передач пакетов за время окна P_{win} ;

T_W – среднее время, выраженное в количестве окон, 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, выраженная в количестве окон, равномерно распределенная со средним значением K единиц на окно;

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

Ограничения модели МДПН: канал является «бесшумным»; все терминалы находятся в пределах прямой видимости; канал для передачи квитанций отделен от рассматриваемого канала и полагается, что квитанции прибывают надежно; рассматриваемая модель действительна при наличии большого числа равнозначных пользователей. Результаты модели получены в приближении, что нагрузка сети стремится к нулю.

Среднее число успешных передач за окно длиной P_{win} определяется как [3]:

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

а средняя задержка пакета, выраженная в количестве окон:

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

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

D_{mes} – длина пакета в битах;

C – пропускная способность КМД СВРС в бит/с;

C_e – эффективная скорость КМД СВРС в бит/с;

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

T – время задержки пакета в КМД СВРС в секундах;

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

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

Параметр a в (2) зависит от радиуса СВРС и определяется максимальным расстоянием между самыми удаленными абонентами (ЛА) в СВРС:

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

$$C_e = S \frac{D_{mes}}{P_{win}} = S \frac{D_{mes}}{D_{mes}/C} = SC. \quad (6)$$

Подставляя (1), (3), (4) в (6), 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:

$$C_e = SC = C \frac{\frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m e^{-\frac{d_{max}C}{cD_{mes}} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m}}{\frac{1}{C} \left(1 + 2 \frac{d_{max}C}{cD_{mes}} \right) \sum_{m=1}^M \lambda_m + e^{-\frac{d_{max}C}{cD_{mes}} \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M \lambda_m}} = \frac{C e^{-\frac{d_{max}C}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_m}}{\left(1 + 2 \frac{d_{max}C}{cD_{mes}} \right) \sum_{m=1}^M \lambda_m + C e^{-\frac{d_{max}C}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M \lambda_m}}. \quad (7)$$

Определим время задержки при передаче в СВРС в секундах из выражения (3). Параметр $t_{кв}$, отвечающий за доставку квитанции, не зависит от параметров канала в модели МДПН, что определяется введенными в эту модель ограничениями. Если убрать ограничение о том, что квитанции доставляются надежно по отдельному каналу и без затрат, и учесть специфику КМД СВРС, получим, что квитанции доставляются по тому же каналу; m -й абонент в ответ

на приходящий трафик генерирует ответный трафик с интенсивностью $\lambda_{m\text{кв}}$ бит/с. В этом случае из (5) получим:

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

тогда:

$$G = \frac{P_{win}}{D_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}}) = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}}). \quad (8)$$

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

$$t_{\text{кв}} = \left(\frac{S}{G} - 1 \right) (2a + 1 + K) + 1 + a. \quad (9)$$

Тогда выражение для времени задержки, выраженной в секундах будет определяться из (2) и (9):

$$T = P_{win} T_W = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{G}{S} - 1 \right) \left(\frac{G}{S} (2a + K + 1) + 1 + a \right) + 1 + a \right], \quad (10)$$

где: G – определяется из выражения (8), а S определяется равенством:

$$S = \frac{e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})}{\left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \right) \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}}) + C e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})}}. \quad (11)$$

Отметим, что на системы управления ЛА, как для системы реального времени, накладывается ограничение на максимальное время доставки пакета по СВРС – $T_{\max}$. Для выражения (10) параметр K является варьируемым, однако необходимо выбрать условия, при котором передача пакета в СВРС имеет смысл. При превышении времени нахождения в сети T_{liv} максимально допустимого значения $T_{\max}$ передача пакета становится нецелесообразной, так как обработка устаревшей информации в процессе наведения ЛА может привести к ошибочно принятому решению. Поэтому на параметр K накладывается ограничение:

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

откуда с учетом (5) получим:

$$K \leq \frac{C(T_{\max} - T_{liv})}{D_{mes}}. \quad (12)$$

Дополнительный трафик квитанций будет влиять на эффективную скорость канала и выражение (7) с учетом (8) примет вид:

$$C_e = \frac{C e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})}{\left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{mes}} \right) \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}}) + C e^{-\frac{d_{\max}}{cD_{mes}} \sum_{m=1}^M (\lambda_m + \lambda_{m\text{кв}})}}. \quad (13)$$

Рассмотрим случай, когда в ответ на каждые несколько принятых пакетов абонент генерирует один пакет квитанции. Длина информационного пакета и

пакета квитанции совпадают. 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:

$$k_{кв} = \lambda_{m кв} / \lambda_m \quad (14)$$

Введем обозначение: Λ – общая интенсивность исходящего трафика ко всем абонентам (ЛА) в КМД СВРС, выраженная в бит/с:

$$\Lambda = (1 + k_{кв}) \sum_{m=1}^M \lambda_m. \quad (15)$$

В итоге получим систему уравнений для определения значений эффективной пропускной способности КМД и задержки в нем.

$$\begin{cases} S = \frac{\Lambda e^{-\Lambda \frac{d_{\max}}{cD_{\text{mes}}}}}{\Lambda \left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{cD_{\text{mes}}} \right) + C e^{-\Lambda \frac{d_{\max}}{cD_{\text{mes}}}}}; \\ C_e = CS; \\ T = \frac{D_{\text{mes}}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(\frac{\Lambda}{SC} \left(2 \frac{d_{\max} C}{cD_{\text{mes}}} + K + 1 \right) + 1 + \frac{d_{\max} C}{cD_{\text{mes}}} \right) + 1 + \frac{d_{\max} C}{cD_{\text{mes}}} \right]; \\ K \leq \frac{C(T_{\max} - T_{\text{liv}})}{D_{\text{mes}}}. \end{cases} \quad (16)$$

Система (16) определяет характеристики качества обслуживания в КМД СВРС при пакетной коммутации в условиях, когда надежность передачи обеспечивается передачей квитанций об успешном приеме по этому же каналу. Такие КМД характерны для СВРС, обслуживающих группу ЛА и наземный ПУ.

Процесс формализации проведен с учетом следующих допущений: все абоненты находятся в зоне видимости друг от друга, скрытые абоненты отсутствуют; все абоненты статистически одинаковы, доминирующие источники отсутствуют; трафик в КМД представляет собой независимый процесс; источники образуют суммарный независимый процесс, который является пуассоновским; нагрузка сети стремится к нулю.

2.3. Расчет необходимой скорости канала управления летательными аппаратами

Время запаздывания передачи команд и данных воздушной обстановки с ПУ на ЛА определяется временем передачи пакетов в канале управления ЛА СВРС. Своевременность передачи 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 (2) с учетом (3), (8) и (11) составит:

$$T_{\text{зад}} = \frac{D_{\text{mes}}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{\max} C}{cD_{\text{mes}}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{\max} C}{cD_{\text{mes}}} \right]. \quad (17)$$

А для случая с квитированием заявок из (10) с учетом (3), (8) и (11) время задержки сообщения составит:

$$T_{зад} = \frac{D_{mes}}{C} \left[\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \left(2 \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} + \left(\left(\frac{\Lambda}{SC} - 1 \right) \times \left(2 \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} \right) + 1 + K \right) + 1 + \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} \right] \quad (18)$$

и из (7):

$$S = \frac{\Lambda e^{-\Lambda \frac{d_{max}}{c D_{mes}}}}{\Lambda \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{c D_{mes}} \right) + C e^{-\Lambda \frac{d_{max}}{c D_{mes}}}}. \quad (19)$$

Так как выразить $T_{зад}$ в явном виде нельзя, примем допущение об отсутствии маневра цели по курсу ($m_Q=0$). В этом случае:

$$P_{nn} = \Phi \left(\frac{T_n \Delta Q_{дон}}{2 T_{зад}} \right), \quad (20)$$

откуда

$$T_{зад} = \frac{T_n \Delta Q_{дон}}{2 \arg \Phi(P_{nn})}, \quad (21)$$

где: $\Delta Q_{дон}$ допустимые ошибки по курсу; $\arg \Phi(P_{nn})$ – такое значение аргумента функции $\Phi(P_{nn}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{P_{nn}} e^{-t^2} dt$, при котором функция Φ принимает значение P_{nn} .

Вычислим необходимую скорость канала управления (C) для КМД для обеспечения заданной вероятности наведения P_{nn} , в случае если прочие переменные заданы. Подставляя (19) в (17), обозначая $A = \frac{d_{max}}{c D_{mes}}$, приравнявая выражения (17) и (21) получим:

$$\left(AD_{mes} - \frac{T_n \Delta Q_{дон}}{2 \arg \Phi(P_{nn})} + \frac{4 \Lambda A^2 D_{mes}}{e^{-\Lambda A}} \right) + \frac{1}{C} \left(D_{mes} + \frac{2 \Lambda A D_{mes} (K+2)}{e^{-\Lambda A}} \right) + \frac{\Lambda D_{mes} (K+1)}{C^2 e^{-\Lambda A}} = 0. \quad (22)$$

Умножая все части уравнения (22) на C^2 , получим квадратное уравнение относительно переменной C :

$$a_c C^2 + b_c C + g_c = 0, \quad (23)$$

где:

$$a_c = AD_{mes} - \frac{T_n \Delta Q_{дон}}{2 \arg \Phi(P_{nn})} + \frac{4 \Lambda A^2 D_{mes}}{e^{-\Lambda A}};$$

$$b_c = D_{mes} + \frac{2 \Lambda A D_{mes} (K+2)}{e^{-\Lambda A}};$$

$$g_c = \frac{\Lambda D_{mes} (K+1)}{e^{-\Lambda A}}.$$

Найдем дискриминант уравнения (23):

$$D = \Lambda D_{mes} \Delta Q_{дон} \frac{2 T_n e^{\Lambda A} (K+1)}{\arg \Phi(P_{nn})} + D_{mes}^2 (4 A^2 K^2 \Lambda^2 e^{2 \Lambda A} + 4 \Lambda e^{\Lambda A} + 1). \quad (24)$$

Так как в выражении (24) все входящие в него переменные больше 0 и присутствуют только операции сложения, следовательно $D > 0$. Таким образом, квадратное уравнение (23) имеет два корня:

$$C_{1,2} = \frac{D_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(-4\lambda A(K+2) - e^{-\lambda A})}{4AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(e^{-\lambda A} + 4\lambda A) - 2T_H \Delta Q_{don} e^{-\lambda A}} \pm \sqrt{\frac{D_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))e^{-\lambda A} [4\lambda AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH})) + 2\lambda T_H \Delta Q_{don} (K+1)]}{4AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(e^{-\lambda A} + 4\lambda A) - 2T_H \Delta Q_{don} e^{-\lambda A}}}. \quad (25)$$

Искомым значением скорости КМД для обеспечения заданной вероятности наведения ЛА на цель будет минимальное значение $C_{1,2}$. А искомым значением скорости канала управления ЛА, обеспечивающим вероятность наведения не ниже P_{HH} , будет такое $C_{необ}$, принадлежавшие множеству дискретных значений $\{C_i\}$ допустимых каналообразующей аппаратурой СВРС, а разность между C_i и наименьшим из корней $C_{1,2}$ будет минимальной:

$$\begin{cases} C_{необ} = C_i | \min(\min(C_{1,2}) - \{C_i\}); \\ \min(C_{1,2}) - \{C_i\} > 0. \end{cases} \quad (26)$$

Исследование корней (25) показало, что

$$\left[C_1 = \frac{D_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(-4\lambda A(K+2) - e^{-\lambda A})}{4AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(e^{-\lambda A} + 4\lambda A) - 2T_H \Delta Q_{don} e^{-\lambda A}} + \sqrt{\frac{D_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))e^{-\lambda A} [4\lambda AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH})) + 2\lambda T_H \Delta Q_{don} (K+1)]}{4AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(e^{-\lambda A} + 4\lambda A) - 2T_H \Delta Q_{don} e^{-\lambda A}}} \right] < 0 \quad (27)$$

для всего диапазона допустимых в СВРС варьируемых параметров D_{mes} , λ , K , P_{HH} . При этом использовались следующие ограничения на диапазон исследуемых значений: $D_{mes} = 256 \dots 2048$ бит; $\lambda = 0 \dots 2000$ бит/с; $K = 1 \dots 5$; $P_{HH} = 1 \dots 0,5$.

Таким образом, конечная функция, количественно описывающая необходимую скорость канала управления ЛА ($C_{необ}$) при заданных ограничениях на параметры СВРС (D_{mes} , λ , K) и допустимый минимум вероятности наведения (P_{HH}), будет иметь вид:

$$C_{необ} = \frac{D_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(-4\lambda A(K+2) - e^{-\lambda A})}{4AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(e^{-\lambda A} + 4\lambda A) - 2T_H \Delta Q_{don} e^{-\lambda A}} - \sqrt{\frac{D_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))e^{-\lambda A} [4\lambda AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH})) + 2\lambda T_H \Delta Q_{don} (K+1)]}{4AD_{mes}(\arg \Phi(P_{HH}))(e^{-\lambda A} + 4\lambda A) - 2T_H \Delta Q_{don} e^{-\lambda A}}}, \quad (28)$$

где: $A = \frac{d_{\max}}{cD_{mes}}$;

$$\lambda = \lambda(t_{N+1}) = (1 + k_{\kappa\theta}) [\lambda_{\det} + \lambda_{\text{var}}(t_{N+1}) + \Delta \lambda_{\text{var}}(t_{N+1})]. \quad (29)$$

Подстановка (29) в (28) обусловлена тем, что (28) будет использоваться для расчета пропускной способности канала наведения в момент t_{N+1} на основе экстраполированного значения $\lambda(t_{N+1})$, определяемого по выражению:

$$\lambda(t_k) = \lambda_{\det}(t_k) + \lambda_{\text{var}}(t_k) + \Delta \lambda_{\text{var}}(t_k).$$

Общая схема получения решения для необходимой скорости канала управления ЛА приведена на рис. 4.

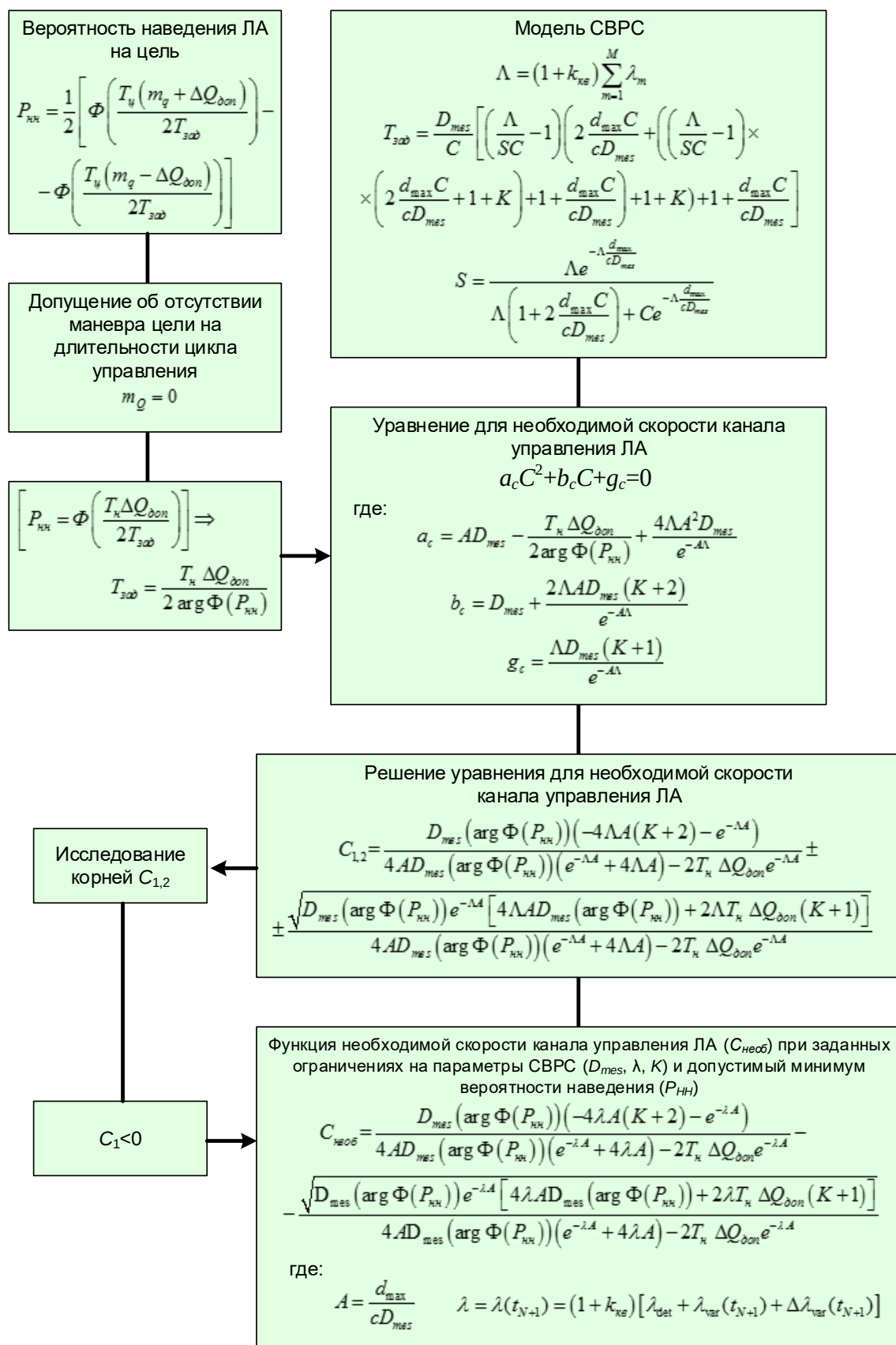


Рис. 4. Общая схема получения решения для необходимой скорости канала управления ЛА

Необходимо отметить, что основное допущение полученных расчетных соотношений состоит в том, что маневр цели по курсу отсутствует. В реальности цель обязательно маневрирует, что внесет ошибку в решение. Однако так же как нельзя в явном виде выразить время задержки $T_{\text{зад}}$, то получить решение вида (28) в аналитическом виде для случая маневра цели невозможно. Именно в связи с этим вводится допущение о ничтожно малом отклонении по курсу и/или углу атаки от прямолинейного полета цели на длительности каждого цикла управления.

2.4. Адаптивное распределение временного ресурса канала множественного доступа сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами

Адаптивное изменение скоростей каналов управления ЛА в СВРС с учетом интенсивности передаваемого трафика достигается путем адаптивного распределения частотно-временного ресурса КМД СВРС.

В данном подразделе рассмотрен вариант адаптивного распределения временного ресурса общего КМД в СВРС в соответствии с выражением (28). Данное выражение определяет количественную меру скорости отдельного канала управления ЛА при организации доступа абонентов к КМД, как разделяемой во времени среде СВРС.

Согласно рамок исследования адаптивное распределение скоростей каналов управления ЛА не должно формировать новые тактико-технические требования к средствам связи СВРС. Таким образом, необходимо предусмотреть механизм адаптивного распределения скоростей каналов с учетом их совокупных требований к общему ресурсу пропускной способности СВРС в целом и получить эффективную пропускную способность КМД в целом (C_e) из (7):

$$C_e = \frac{C_e \cdot e^{-\frac{d_{\max} \cdot \lambda}{c D_{\text{mes}}}}}{\left(1 + 2 \frac{d_{\max} C}{c D_{\text{mes}}}\right) \lambda + C_e \cdot e^{-\frac{d_{\max} \cdot \lambda}{c D_{\text{mes}}}}}, \quad (30)$$

где: C – пропускная способность КМД в целом; λ – суммарная интенсивность всех входных в КМД потоков; $d_{\max}$ – максимальное расстояние между самыми удаленными терминалами сети; D_{mes} – длина пакета в битах; $c = 300\,000$ км/с – скорость распространения электромагнитных волн.

По условию постоянства пропускной способности КМД:

$$\sum_{m=1}^M C_{\text{необ},m} = C_e = \text{const}, \quad (31)$$

то есть сумма скоростей всех M каналов управления ЛА должна быть равна общей эффективной пропускной способности КМД.

Кроме того, необходимо ввести условие доступа всех M абонентов СВРС к КМД как к общей среде передачи данных:

$$\sum_{m=1}^M P_m = 1, \quad (32)$$

то есть сумма вероятностей доступа к КМД равна единице.

Из (31) и (32) получим тождество, верное для всех вариантов адаптивного доступа к КМД как к среде передачи СВРС:

$$\frac{1}{C_e} \sum_{m=1}^M C_{необ,m} = \sum_{m=1}^M P_m = 1. \quad (33)$$

Равенство (33) устанавливает связь между требованиями к скорости передачи по каждому из m каналов управления ЛА и вероятностью доступа к среде передачи СВРС.

В условиях, когда требования по скорости каналов управления ЛА в СВРС равны $C_{необ,1} = C_{необ,2} = \dots = C_{необ,M}$, вероятности доступа абонентов к КМД СВРС также равны, т.е. имеет место неадаптивное назначение скоростей каналов:

$$P_m = \frac{1}{M}. \quad (34)$$

Выражение (34) определяет то, что каждый из M абонентов СВРС получает доступ к КМД равновероятно и независимо от интенсивности передаваемого трафика. Такая схема полностью согласуется с алгоритмом МДПН, используемым в современных СВРС.

В случае, рассматриваемом в данном исследовании, $C_{необ,1} \neq C_{необ,2} \neq \dots \neq C_{необ,M}$, и с учетом того, что требования по скорости каждого из M каналов управления в СВРС ($C_{необ,m}$) определяются выражением (28), получим:

$$P_m = \frac{C_{необ,m}}{C_e}. \quad (35)$$

Выражение (35) определяет вероятность доступа каждого из абонентов СВРС с учетом адаптивных требований по скорости канала ($C_{необ,m}$), которые рассчитываются на основе прогнозируемой интенсивности трафика по выражению (28), а общая скорость КМД C_e определяется выражением (10).

Для практической реализации адаптивного доступа абонентов СВРС к КМД потребуется изменение параметров протокола управления доступом и захвата канала в МДПН. Анализ МДПН, используемого в современных СВРС, показал, что захват КМД осуществляется за счет генерации случайной (равномерно распределенной по длительности паузы) паузы захвата канала. При этом длительность паузы захвата канала у всех абонентов в СВРС одинакова. Предлагается осуществить адаптивное распределение временного ресурса СВРС путем адаптивного управления длительностью паузы захвата канала в каждом из каналов управления в СВРС на каждом цикле управления ЛА. При этом адаптивная длительность паузы захвата канала в m -ом канале СВРС ($T_{захв m}$) с учетом выражения (35) будет определяться как:

$$T_{захв,m} = T_{захв} \frac{C_e}{C_{необ,m}} \quad (36)$$

где: $T_{захв}$ — длительность паузы захвата канала в классическом протоколе случайного доступа. Таким образом, использование соотношения (36) для формирования нового правила захвата КМД позволяет применить его ко всему классу протоколов МДПН с постоянной длительностью паузы захвата.

Порядок вывода соотношений для адаптивного распределения временно-го ресурса СВРС путем управления доступом абонентов к среде передачи КМД за счет варьирования длительности паузы захвата канала (с учетом ограничений на количество одновременно управляемых ЛА в СВРС) представлен на рис. 5.

На рис. 6 приведены эпюры, поясняющие порядок изменения длительности паузы захвата КМД.

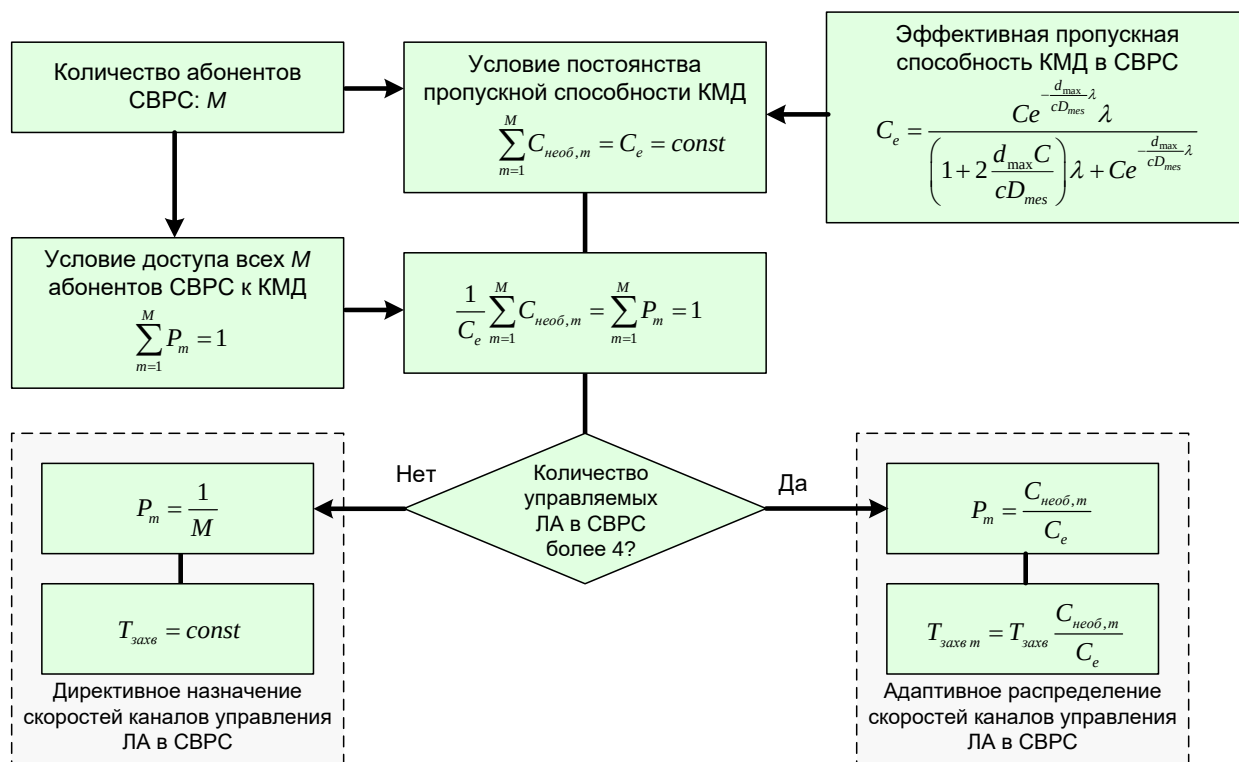


Рис. 5. Порядок вывода соотношений для адаптивного распределения временного ресурса КМД СВРС путем управления доступом абонентов к среде передачи КМД за счет варьирования длительностью паузы захвата канала

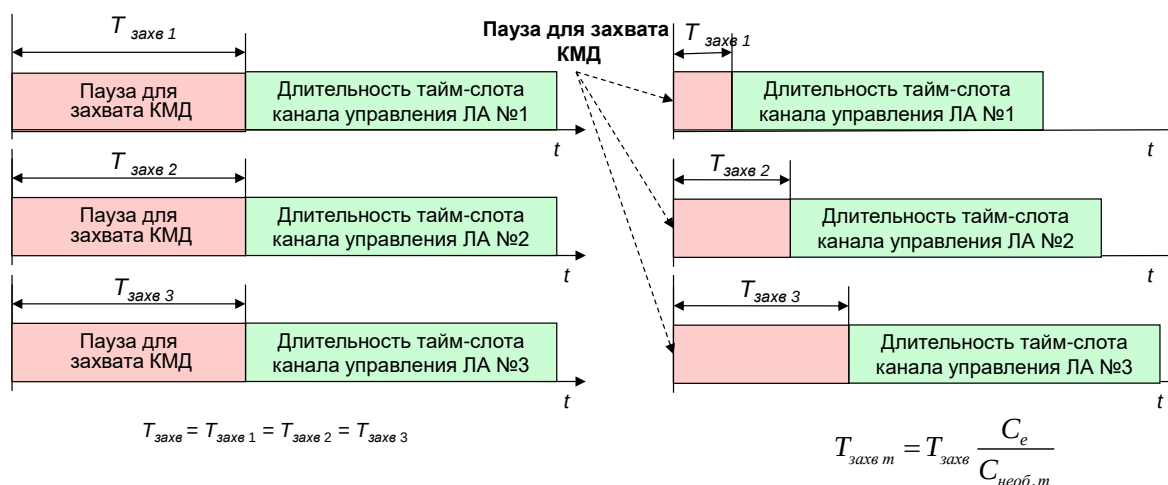


Рис. 6. Порядок изменения длительности паузы захвата КМД

Проведенное исследование результатов применения адаптивного распределения временного ресурса СВРС для повышения эффективности управления

ЛА (по критерию обеспечиваемой вероятности наведения ЛА на цель) показало, что такое адаптивное распределение эффективно при большом количестве ЛА. При заданной вероятности наведения ЛА в $P_{HH} = 0,75$ существующий способ назначения скоростей каналов управления ЛА более эффективен по критерию обеспечиваемой вероятности наведения ЛА на цель при управлении в СВРС до 6 ЛА, то есть обеспечивает ($P_{HH} > 0,75$). А при $P_{HH} = 0,85$ – при управлении до 4 ЛА (обеспечивает $P_{HH} > 0,85$). Таким образом, предлагаемое адаптивное распределение скоростей каналов управления ЛА обеспечивает преимущества только при определенных ограничениях на количество одновременно управляемых ЛА в СВРС. Данные ограничения формируют границы целесообразного применения методики повышения скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами.

2.5. Адаптивное распределение частотного ресурса сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами

В предыдущем подразделе сформулирован подход к адаптивному распределению временного ресурса СВРС путем управления доступом абонентов к среде передачи КМД. Однако данный подход справедлив только при условии:

$$\frac{1}{C_e} \sum_{m=1}^M C_{необ, m} = \sum_{m=1}^M P_m = 1. \quad (37)$$

В случае если совокупные требования по необходимой скорости всех каналов управления в СВРС превысят полную эффективную пропускную способность СВРС C_e , то в этом случае будет иметь место неравенство:

$$\frac{1}{C_e} \sum_{m=1}^M C_{необ, m} > 1. \quad (38)$$

а с учетом того, что $P_m = \frac{C_{необ, m}}{C_e}$ получим:

$$\sum_{m=1}^M P_m > 1. \quad (39)$$

На практике реализация такого случая приведет к следующему: при последовательном принятии решения о назначении доступа абонентам к среде передачи КМД распределение доступа будет вестись до случая $\sum_{m=1}^{M_1} P_m = 1$, то есть M_1 абонентов получат доступ в соответствии с запрошенными ресурсами, а остальные $M - M_1$ абонентов СВРС не получат доступ к среде передачи КМД вообще.

При одновременном принятии решения о назначении доступа абонентам к среде передачи КМД все M абонентов получают доступ с запрошенной вероятностью, но несовпадение назначенного и доступного ресурса приведет к снижению вероятности доступа к среде передачи СВРС за счет роста количества «коллизий». В этом случае вероятность наведения P_{HH} в каждом из M каналов будет снижаться относительно заданной на величину, пропорциональную $C_{необ, m} / C_e$, для $C_{необ, m} / C_e > 1$.

В качестве одного из путей предотвращения такой ситуации является выделение в СВРС с высокой интенсивностью трафика абонентов дополнительной пропускной способности путем предоставления дополнительного частотного ресурса (дополнительных КМД).

В настоящее время распределение частотных ресурсов СВРС основано на директивном выделении фиксированной полосы частот (как правило, на одной из 20 несущих), внутри которой абоненты разделяются по времени (рис. 7).

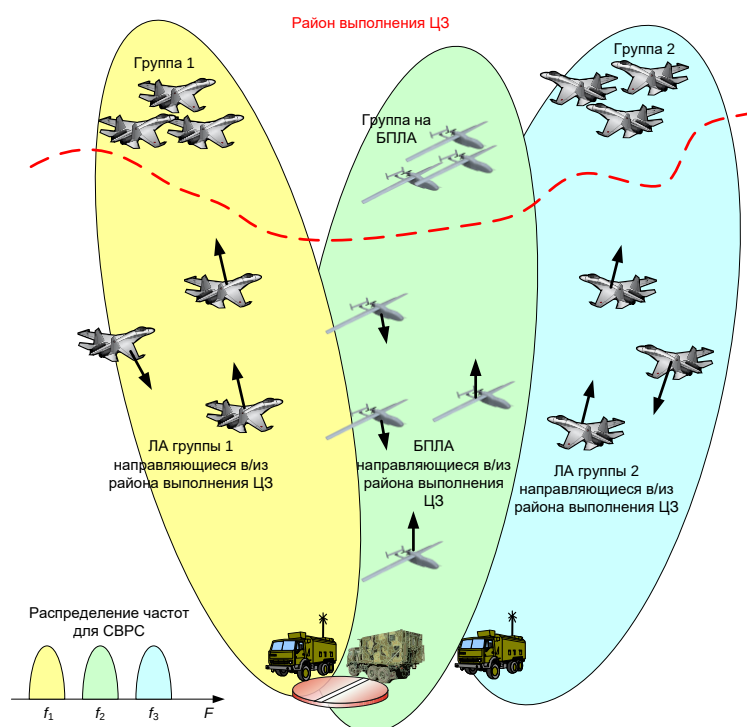


Рис. 7. Существующий подход к распределению частотных ресурсов в СВРС

Однако переход к адаптивному распределению временных ресурсов СВРС, как показано выше, может привести к тому, что выделенной полосы частот окажется недостаточно для обеспечения необходимой абонентам скорости передачи данных. В этом случае целесообразным является выделение дополнительных частотных ресурсов (частотных каналов) двумя основными способами:

- 1) выделение дополнительных частотных каналов (которые соответствуют дополнительным КМД) для СВРС с повышенной интенсивностью передачи трафика;
- 2) адаптивное распределение частотных каналов между СВРС с учетом различной интенсивности передачи трафика на разных этапах полета ЛА.

Данные варианты адаптивного распределения частотного ресурса СВРС при управлении ЛА представлены на рис. 8 и 9.

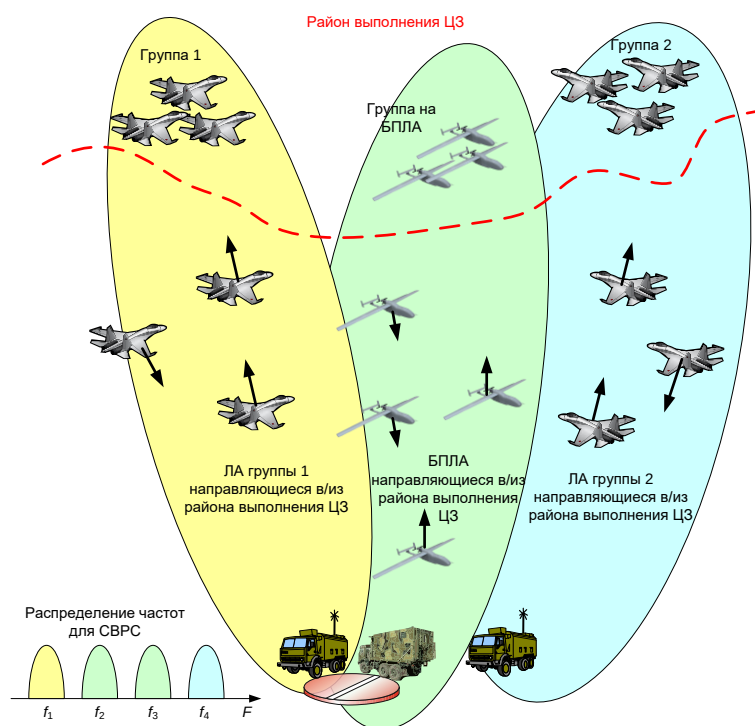


Рис. 8. Адаптивное выделение дополнительных частотных каналов для СВРС с повышенной интенсивностью передачи трафика

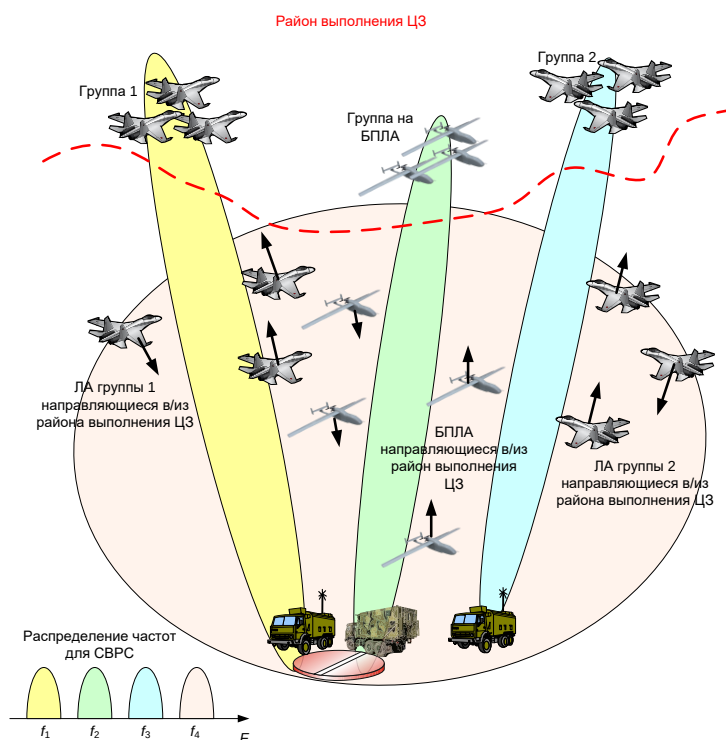


Рис. 9. Адаптивное распределение частотных каналов между СВРС с учетом различной интенсивности передачи трафика на различных этапах полета ЛА

Выводы

В работе представлена методика повышения скорости передачи данных в каналах управления ЛА СВРС за счет адаптивного распределения временного и

частотного ресурсов с учетом интенсивности передаваемого трафика при управлении летательными аппаратами.

Разработка данной методики проходила в несколько этапов: на первом этапе проводилась формализация процесса случайного множественного доступа ЛА к частотным каналам в составе СВРС; на втором этапе рассчитывалась необходимая скорость канала управления; на третьем этапе производилась адаптивное распределение временного ресурса КМД СВРС; на четвертом этапе адаптивное распределение частотного ресурса СВРС.

Элементами новизны представленного решения является двухэтапное распределение сетевого ресурса, на первом этапе временного путем адаптивного изменения паузы захвата КМД СВРС, на втором этапе частотного ресурса в случае если суммарные требования по скоростям всех каналов управления ЛА не могут быть обеспечены распределением временного ресурса СВРС, при этом адаптивное распределение частотно-временного ресурса СВРС основано на прогнозируемом уровне интенсивности передаваемого по каналам управления ЛА трафика, а также требованиях по вероятности наведения ЛА на цель. При этом модель трафика в канале управления ЛА СН и формализация процесса прогнозирования его интенсивности представлена в предыдущих работах авторов [1, 2], а вероятность процесса наведения ЛА на цель и оценка ее зависимости от своевременности передачи трафика – в работе авторов [63].

Разработанная методика может быть использована организациями, ведущими военно-научное сопровождение работ в оборонно-промышленном комплексе при разработке технических и тактико-технических заданий на перспективные НИОКР в области авиационной радиосвязи, а также главными конструкторами перспективных бортовых комплексов связи и управления ЛА, БПЛА, АК РЛДН, а также АСУ авиацией.

Отдельные результаты данной работы получены в рамках госбюджетной темы НИР СПИИРАН № 0073-2019-0004.

Литература

1. Иванов М. С., Понаморов 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.
2. Иванов М. С., Понаморов 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.

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

4. Меркулов В. Н., 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.

5. 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.

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

7. 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., Федунев 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.

8. 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.

9. Макаренко С. И., Федосеев В. Е. Системы многоканальной связи. Вторичные сети и сети абонентского доступа: учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 179 с.

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

11. Бреслер И. Б., Горбач А. Н., Ланчев В. М., Полушин К. В., Пшеницын А. А., Смирнова Е. В., Угловский Е. П. Средства связи противовоздушной обороны ВВС / Под ред. В.М. Ланчева. – Тверь: ВУ ПВО, 2003.

12. 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.

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

14. Комяков А. В., Войткевич К. Л., Сулима А. А. Инновационные решения для перспективных летательных аппаратов // Деловая слава России. 2013. № 3 (41). С. 26-27.

15. 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.

16. 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.
17. 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.
18. Кейстович А. В., Комяков А. В. Системы и техника радиосвязи в авиации: учебное пособие для студентов специальности "Радиотехника". – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2012. – 235 с.
19. 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.
20. 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.
21. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Организация управления силами и средствами авиации региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры № 100. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2003.
22. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Задачи боевого управления единой системы воздушной радиосвязи в комплексе пунктов управления авиационной группировкой региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры № 100. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2003.
23. Гимбицкий В. А., Сныткин И. И. Функциональная модель процесса управления авиации региона // Вопросы тактики и оперативного искусства. Сборник научно-методических материалов кафедры №100. – М.: ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2003.
24. Гимбицкий В. А. Анализ системы воздушной радиосвязи в частях истребительной авиации // Тематический научно-технический сборник филиала ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Ставрополь). – 2005. – № 26.
25. Гимбицкий В. А., Бакум А. Н. Совершенствования боевого управления авиацией ПВО // Тезисы докладов 18 НТК курсантов СВВАИУ. – Ставрополь: СВВАИУ, 1996.
26. Калинин В. И. Методика оценки вероятности обслуживания абонентов с требуемой достоверностью в зоне обслуживания станции радиодоступа [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.
27. Калинин В. И. Пространственные модели зон обслуживания систем связи с подвижными объектами [Доклад] // 66 НТК СПбНТОРЭС имени А.С. Попова, посвященный Дню радио. 26 апреля 2011.

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

29. 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.

30. 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.

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

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

33. 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.

34. 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.

35. 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.

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

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

38. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной

воздушно-космической сети связи построенной на основе Mesh-технологий // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Том 8. № 1. С. 17-25.

39. 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. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10304.

40. 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

41. Аганесов А. В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 1. С. 67-97. – URL: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. Смирнов С. В. Модель сети воздушной радиосвязи для управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. №2. С. 165-181. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/06-Smirnov.pdf> (дата обращения 14.11.2017).

46. Головченко Е. В., Федюнин П. А., Афанасьев А. Д. Обобщенная модель функционирования авиационной инфокоммуникационной сети // Вестник Воронежского института МВД России. 2019. № 2. С. 49-56.

47. Головченко Е. В., Федюнин П. А., Баев К. С. Многоуровневая модель структуры авиационной инфокоммуникационной сети // Вестник Воронежского института МВД России. 2020. № 1. С. 65-76.

48. Головченко Е. В., Афанасьев А. Д., Першин А. А. Динамическая модель функционирования авиационной инфокоммуникационной сети // Вестник Воронежского института МВД России. 2020. № 2. С. 98-107.

49. Афанасьев А. Д., Головченко Е. В., Дьяченко В. А. Особенности распределения пакетов в авиационной информационно-телекоммуникационной

сети с неоднородной тороидальной топологической структурой // Информатика: проблемы, методология, технологии. Сборник материалов XVIII Международной научно-методической конференции: в 7 томах. – Воронеж, 2018. – С. 41-45.

50. Федюнин П. А., Головченко Е. В., Дьяченко В. А., Афанасьев А. Д. Обоснование модели входного трафика в авиационной информационно-телекоммуникационной сети // Информатика: проблемы, методология, технологии. Материалы XVII Международной научно-методической конференции: в 5 томах. – Воронеж, 2017. – С. 484-489.

51. Федюнин П. А., Юрченко С. П., Головченко Е. В., Блинов П. В., Эсаулов С. А. Программа расчета вероятности обнаружения цели бортовыми средствами самолета в зависимости от задержки информации на пункте управления о воздушной обстановке // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019662107, 17.09.2019.

52. Косяков Е. Н., Новиков Е. А. Метод оперативного управления радиоресурсом спутника-ретранслятора на основе динамического резервирования каналов с запаздыванием // Информация и космос. 2014. № 3. С. 9-13.

53. 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.

54. Топорков И. С., Ковальский А. А., Зиннуров С. Х. Модель и алгоритм управления процессом резервирования ресурса сети спутниковой связи при обслуживании разнородного нестационарного трафика // Известия Института инженерной физики. 2016. Т. 1. № 39. С. 37-47.

55. 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.

56. 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.

57. Зиннуров С. Х., Ковальский А. А., Митряев Г. А. Решение задачи оптимального планирования радиоресурса спутниковой системы связи для сеансов управления орбитальной группировкой космических аппаратов // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 67-74.

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

59. Понамореv А. В. Анализ исследований и обоснование задач развития авиационных сетей воздушной радиосвязи боевого управления авиацией за счет адаптации каналов управления летательными аппаратами к параметрам

передаваемого в них трафика // Экономика и качество систем связи. 2018. № 2 (8). С. 42–52.

60. Пономарев А. В. Повышение эффективности функционирования сети воздушной радиосвязи боевого управления авиацией путем адаптации каналов управления к интенсивности передаваемого в них трафика // Экономика и качество систем связи. 2018. № 3 (9). С. 29–46.

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

62. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.

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

References

1. 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 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-120-147.

2. 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 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-148-172.

3. 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).

4. Merkulov V. N., 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).

5. 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.

6. Merkulov V. I. Nauchno-tekhnicheskie 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).

7. 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).

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

9. Makarenko S. I., Fedoseev V. E. *Multichannel communication systems. Secondary networks and subscriber access networks*. Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2014, 179 p. (in Russian).

10. 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).

11. Bresler I. B., Gorbach A. N., Lanchev V. M., Polushin K. V., Pshenitsyn A. A., Smirnova E. V., Uglovskii E. P. *Sredstva svyazi protivovozdushnoi oborony VVS* [Means of communication, air defense, air force]. Tver, Military Academy of aerospace defense named after Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov, 2003.

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

13. 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).

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

15. 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).

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

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

18. Keistovich A. V., Komiakov A. V. *Sistemy i tehnika radiosvazi v aviatsii* [Systems and technics of a radio communication in aircraft]. Nizhniy Novgorod,

Nizhniygorodskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2012. 235 p. (in Russian).

19. 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.

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

21. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Organizatsiia upravleniia silami i sredstvami aviatsii regiona [Organization Management of Forces and Means of Air in the Region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Pabl., 2003 (in Russian).

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

23. Gimbitskii V. A., Snytkin I. I. Funktsional'naia model' protsessa upravleniia aviatsii regiona [Functional model of the process control aviation in the region]. *Voprosy taktiki i operativnogo iskusstva. Sbornik nauchno-metodicheskikh materialov kafedry №100*. Moscow, Military Aviation Engineering Academia named N. E. Zhukovskogo Pabl., 2003 (in Russian).

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

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

26. 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).

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

28. Kalinin V. I. Potokovye setevye modeli v sistemakh sviazi 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).

29. 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 ustroistv», 2002 (in Russian).

30. 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 ustroistv», 2002 (in Russian).

31. 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 ustroistv», 2002 (in Russian).

32. 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).

33. Makarenko S. I. Osobennosti raspredeleniia resursov radio seti upravleniia aviatsionnymi kompleksami perekhvata v usloviiakh 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 po aviatsii, posviashchennye pamiati N.E. Zhukovskogo"* [Proceedings of the 8nd All-Russian Cientific 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).

34. Makarenko S. I. Zadacha adaptivnogo upravleniia propusknoi sposobnost'iu kanalov seti vozdushnoi radiosviasi 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).

35. Makarenko S. I. Raschet parametrov algoritma adaptivnogo raspredeleniia propusknoi sposobnosti kanalov navedeniia v seti vozdushnoi radiosviasi. [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).

36. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Aerospace communications network model with traffic routing hierarchical principle. *Radio and telecommunication systems*, 2015, no. 4, pp. 43-51 (in Russian).

37. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Model of united air-space network with decentralized traffic routing based on Mesh technology. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2016, no. 1, pp. 7-16 (in Russian).

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

39. 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). DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10304.

40. 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.

41. Aganesov A. V. Model of Radio Network with CSMA/CA Protocol. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 1, pp. 67-97. Available at: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/06-Aganesov.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

42. 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. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2016, no. 2, pp. 12-16 (in Russian).

43. 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. *Okhrana, bezopasnost, sviaz*, 2017, no. 1-1, pp. 196-203 (in Russian).

44. 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. *Radiotekhnika*, 2013, no. 8, pp. 81-85 (in Russian).

45. Smirnov S. V. Air radio network model for AWACS-controlled aircraft. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 165-181. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/06-Smirnov.pdf> (accessed 14 November 2017) (in Russian).

46. Golovchenko E. V., Fedyunin P. A., Afanfs'ev A. D. Generalized model of functioning of the aviation network information and communication. *Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of Interior of Russia*, 2019, no. 2, pp. 49-56 (in Russian).

47. Golovchenko E. V., Fedyunin P. A., Baev K. S. Multilevel structure model of the aviation network information and communication. *Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of Interior of Russia*, 2020, no. 1, pp. 65-76 (in Russian).

48. Golovchenko E. V., Afanfs'ev A. D., Pershin A. A. The dynamic model of functioning of the aviation network information and communication. *Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of Interior of Russia*, 2020, no. 2, pp. 98-107 (in Russian).

49. Afanasev A. D., Golovchenko E. V., Djachenko V. A. Osobennosti raspredelenija paketov v aviacionnoj informacionno-telekommunikacionnoj seti s neodnorodnoj toroidal'noj topologicheskoy strukturoj [Features of packet distribution in an aviation information and telecommunication network with an inhomogeneous toroidal topological structure]. *Informatika: problemy, metodologija, tehnologii*. Sbornik materialov XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii: v 7 tomah [Computer science: problems, methodology, technologies. Collection of materials of the XVIII International Scientific and Methodological Conference: in 7 volumes]. Voronezh, 2018, pp. 41-45 (in Russian).

50. Fedjunin P. A., Golovchenko E. V., Djachenko V. A., Afanasev A. D. Obosnovanie modeli vhodnogo trafika v aviacionnoj informacionno-telekommunikacionnoj seti [Substantiation of the input traffic model in the aviation information and telecommunication network]. *Informatika: problemy, metodologija, tehnologii*. Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii: v 5 tomah [Computer science: problems, methodology, technologies. Materials of the XVII International Scientific and Methodological Conference: in 5 volumes]. Voronezh, 2017, pp. 484-489 (in Russian).

51. Fedjunin P. A., Jurchenko S. P., Golovchenko E. V., Blinov P. V., Jesaulov S. A. *Programma rascheta verojatnosti obnaruzhenija celi bortovymi sredstvami samoleta v zavisimosti ot zaderzhki informacii na punkte upravlenija o vozdushnoj obstanovke* [The program for calculating the probability of target detection by the aircraft's onboard means, depending on the delay of information at the control point about the air situation]. Patent RU 2019662107, 17.09.2019.

52. Kosyakov E. N., Novikov E. A. Metod operativnogo upravleniya radioresursom sputnika-retranslyatora na osnove dinamicheskogo rezervirovaniya kanalov s zapazdyvaniem [Method of operational management of radio resource of the satellite-repeater on the basis of dynamic reservation of channels with delay]. *Informatsiia i kosmos*, 2014, no. 3, pp. 9-13 (in Russian).

53. 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).

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

55. 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).

56. 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).

57. Zinnurov S. H, Kovalsky A. A., Mitryaev G. A. Task's solution of satellite communication system's optimal radio resource planning for the sessions of space appliance's orbital group managing. *Proceedings of Educational Institutes of Communication*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 67-74 (in Russian).

58. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi 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).

59. Ponamarev A. V. Analysis of research and justification of problems of the development of aviation radio communication networks for combat control of aviation by adapting the control channels of aircraft to the parameters of the traffic transmitted in them. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 42–52 (in Russian).

60. Ponamarev A. V. Improving the efficiency of functioning the air radio communication network of a combat aviation management by adapting the control channels to the intensity of the transferable traffic. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 29–46 (in Russian).

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

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

63. Makarenko S. I., Ponamarev A. V. Study of the Impact of Timeliness of Command Transmission in an Air Radio Communication Network on the Guidance

Quality of an Aircraft at a Target. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 126-131 (in Russian) DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-2-126-131.

Статья поступила 20 января 2022 г.

Информация об авторах

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

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

Понамореv Алексей Валерьевич – преподаватель кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования. Краснодарское высшее авиационное училище летчиков. Область научных интересов: сети и системы авиационной радиосвязи. E-mail: dimalex25@bk.ru

Адрес: 350090, Россия, Краснодар, Дзержинского, д. 35.

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

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

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

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

Relevance. The intensity of the use of the Russian Air Force increased significantly at the beginning of the XXI century. At the same time, problematic technical aspects of the operation and management of combat aircraft began to be identified more often. One of these aspects is the discrepancy between the high requirements for operational control of a combat aircraft and the truly timely teletraffic (commands and data on the air situation) transmission on an aircraft board. Preliminary studies have shown that when transmitting teletraffic, changes in the of transmitted teletraffic intensity on various flight stages and the gist of aircraft tasks are not taken into account. This leads to a decrease of the teletraffic timeliness and, as a result, to a decrease in the efficiency of combat aircraft control. **The goal of the article** is to develop the 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. **Novelty.** The novelty elements of the presented technique are to add new operations implementing two-stage distribution of network resources. At the first stage, a temporary network resource is distributed due to an adaptive change in the capture pause of a multiple access channel in the aerial network. At the

second stage, a frequency network resource is distributed if the total requirements for the speeds of all aircraft control channels cannot be provided with the distribution of the temporary network resource. At the same time, the adaptive distribution of the time-frequency resource of the aerial network is based on forecast of the traffic intensity transmitted through the aircraft control channels. **The practical significance of the article** lies in the fact that the developed technique can be used to increase efficiency of combat aircraft control when aircraft is pointing at an aerial target.

Keywords: aerial radio communication network, communication organization, military aviation, aircraft control.

Information about Authors

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

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

Aleksey Valereevich Ponamarev – Lecturer of the Department of Aviation and Radio-electronic equipment. Krasnodar Higher Aviation School. Field of research: systems and networks aero-nautical radio communication. E-mail: dimalex25@bk.ru

Address: 350090, Russia, Krasnodar, Dzerzhinsky str. 35.

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

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