

УДК 004.72

Модель сети воздушной радиосвязи для управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения

Смирнов С. В.

Постановка задачи. Применение авиации на удаленных театрах военных действий (ТВД) сопряжено с определенными трудностями в связи с тем, что такие ТВД не оборудованы наземной инфраструктурой связи и управления. В таких случаях для управления авиацией используется авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН). Вместе с тем, пропускной способности единой сети воздушной радиосвязи ТВД зачастую недостаточно при управлении большим количеством объектов с АК РЛДН. Это актуализирует вопросы повышения пропускной способности такой единой сети. **Целью работы** является разработка модели сети воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН, в которой передача данных ведется по алгоритму случайного множественного доступа. В основу данной модели положена известная модель ненастойчивого множественного доступа. На основе данной модели предполагается провести исследование эффективной пропускной способности сети и времени передачи пакетов в ней. **Используемые методы.** При разработке модели использовались методы теории вероятности и теории связи. **Новизна.** Элементами новизны представленной модели являются учет нагрузки транзитного трафика при использовании децентрализованного принципа ретрансляции трафика в единой сети ТВД. **Результат.** Исследование модели показало, что транзитный трафик существенно влияет на показатели единой сети ТВД, так при возрастании количества транзитного трафика соединений эффективная пропускная способность сети повышается на 10-20%, однако это происходит за счет роста задержки пакетов в сети в 2-2,5 раза. Такой рост задержки делает актуальным разработку новых подходов по дальнейшему повышению пропускной способности сети. **Практическая значимость:** представленную модель в дальнейшем предполагается использовать для обоснования возможностей по повышению пропускной способности единой сети воздушной радиосвязи ТВД, за счет внедрения децентрализованного принципа маршрутизации трафика и использования Mesh-технологий.

Ключевые слова: сеть воздушной радиосвязи, ретрансляция, маршрутизация, авиация, авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения.

Введение

В настоящее время существует определенная вероятность боевого применения авиации Воздушно-космических сил (ВСК) Российской Федерации (РФ) на удаленных театрах военных действий (ТВД). Вместе с тем такое боевое применение авиации сопряжено с определенной сложностью, а именно – отсутствие наземной инфраструктуры обеспечивающей управление авиацией. В этом случае основным способом управления авиацией является использование воздушных пунктов управления (ПУ) на основе авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН). Вышесказанное подтверждает

Библиографическая ссылка на статью:

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>.

Reference for citation:

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> (in Russian).

опыт использования АК РЛДН А-50 в Сирии при проведении там операции ВКС России.

Как показал анализ, представленный в работе [1], наиболее перспективным направлением совершенствования системы управления АК РЛДН является переход ее к сетевым принципам. При этом единая сеть воздушной радиосвязи (ЕСВРС) которая будет являться информационной инфраструктурой такого управления должна обладать развитой сетевой топологией и обеспечивать высокую скорость информационного обмена между всеми абонентами сети – пилотируемыми летательными аппаратами (ЛА), беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и АК РЛДН.

Анализ фундаментальных работ в области организации управления авиацией [2-6], а также отдельных работ по организации СВРС [7-15] показывают, что ЕСВРС будет состоять из отдельных СВРС увязанных между собой в единую сеть, центром которой будет являться воздушный пункт управления – АК РЛДН. При этом возможно два подхода к построению такой сети:

- 1) централизованный – когда отдельные управляемые группы ЛА образуют отдельные СВРС, которые в свою очередь, за счет объединения ведущих групп в отдельную СВРС сопрягаются с АК РЛДН и через него ведут обмен информацией (рис. 1);
- 2) децентрализованный – когда отдельные управляемые группы ЛА образуют отдельные СВРС, которые ведут информационный обмен как через СВРС объединяющей ведущих групп и АК РЛДН, так и через смежные СВРС находящиеся в зоне электромагнитной доступности (рис. 2).

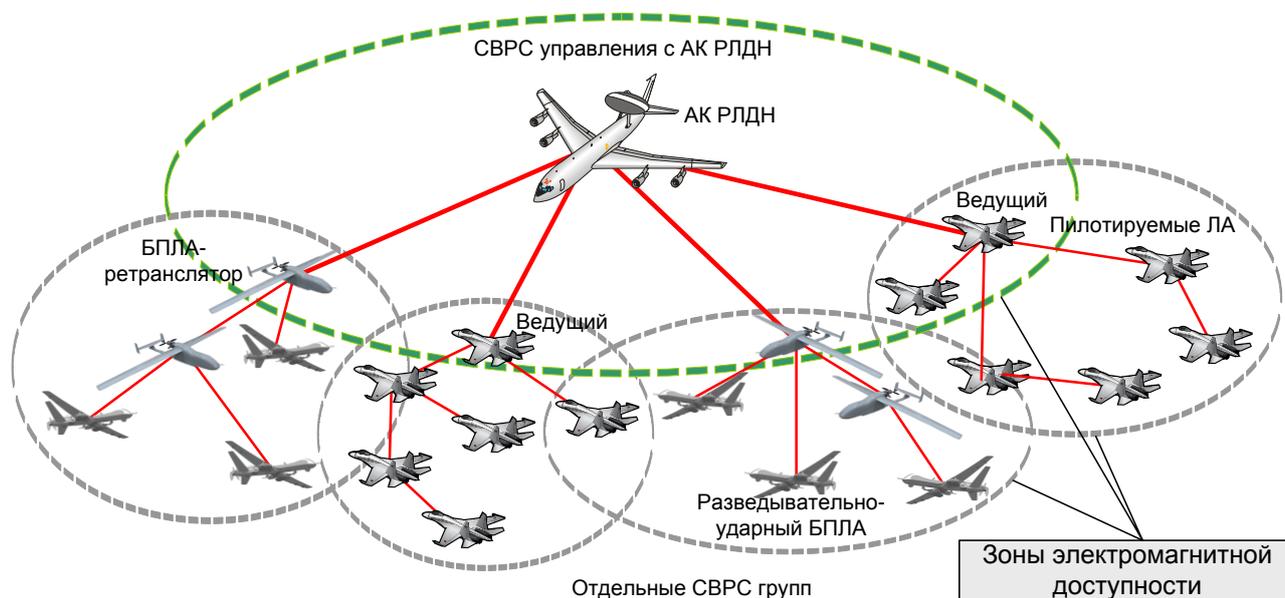


Рис. 1. Централизованный подход к построению ЕСВРС на ТВД

Децентрализованное построение ЕСВРС имеет неоспоримые преимущества перед централизованной структурой. Такое построение позволяет, во-первых, организовать сетевый принцип управления авиацией с АК РЛДН, во-вторых, такое построение позволяет обеспечить непрерывное и

устойчивое управление авиацией за счет увеличения топологической связности сети [20-23].

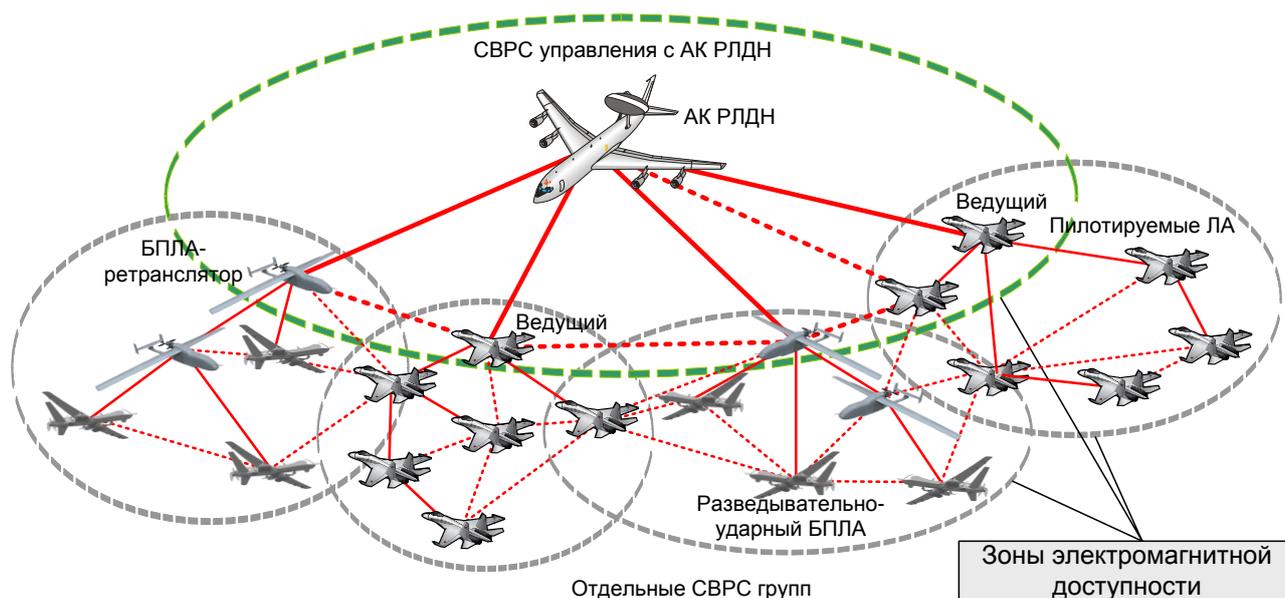


Рис. 2. Децентрализованный подход к построению ЕСВРС на ТВД

Вместе с тем создание ЕСВРС на основе децентрализованного принципа ретрансляции сообщений в настоящее время сопряжено с рядом технических сложностей. Так бесшовная ретрансляция трафика между отдельными СВРС, потребует создания новых технологических решений по маршрутизации трафика в этих сетях, и как следствие увеличит нагрузку на промежуточные СВРС за счет передачи транзитного трафика. Для обеспечения заданного качества обслуживания трафика абонентов (ЛА, БПЛА и АК РЛДН) в ЕСВРС потребуется выработать единые протоколы ретрансляции трафика в СВРС и в ЕСВРС с учетом дополнительной нагрузки создаваемой транзитным трафиком. Данная задача особенно актуальна для СВРС в УКВ диапазоне. Такие СВРС помимо высокой пропускной способности, как показано в работах [24-26], подвержены воздействию наземных и авиационных средств радиоэлектронного подавления (РЭП), что существенно затрудняет ретрансляцию информационных потоков с заданным качеством. Это при том, что согласно работ [7, 27] подавляющий объем передаваемых данных по СВРС составляют мультимедийные данные (видео и фото данные оптической и радиоэлектронной разведки) от разведывательно-ударных БПЛА к которым предъявляются требования своевременности в масштабе времени близком к реальному. Кроме того, именно для разведывательно-ударных БПЛА разрывы связи при воздействии средств РЭП являются наиболее критичными и, как показано в работе [28], в большинстве случаев ведет к потере управления ими.

Обобщая вышесказанное можно сделать вывод, что СВРС является основным элементом ЕСВРС управления авиацией с АК РЛДН, и разработка ее модели, учитывающей как особенности сетецентрического управления с АК РЛДН, так и уровень транзитного трафика при организации ЕСВРС по децентрализованному принципу, является актуальной научной задачей. Таким

образом, цель данной работы – разработка модели СВРС как основного элемента ЕСВРС управления авиацией с АК РЛДН, с учетом нагрузки транзитного трафика. В основу данной модели положено развитие ранее известных моделей СВРС, представленных в работах [7, 12, 29].

Постановка задачи

Анализ работ в области организации СВРС [4-7, 12-19, 30-34] показал, что в основу перспективных СВРС будут положены технологии организации высокоскоростных каналов связи до 34 МБит/с в СМВ-диапазоне, с использованием алгоритма случайного множественного доступа абонентов к каналу (АСМД).

Алгоритм работы абонента (ЛА, БПЛА, АК РЛДН) с СВРС представляет собой следующую последовательность действий:

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

Общая схема функционирования АМСД в СВРС приведен на рис. 3 [7].

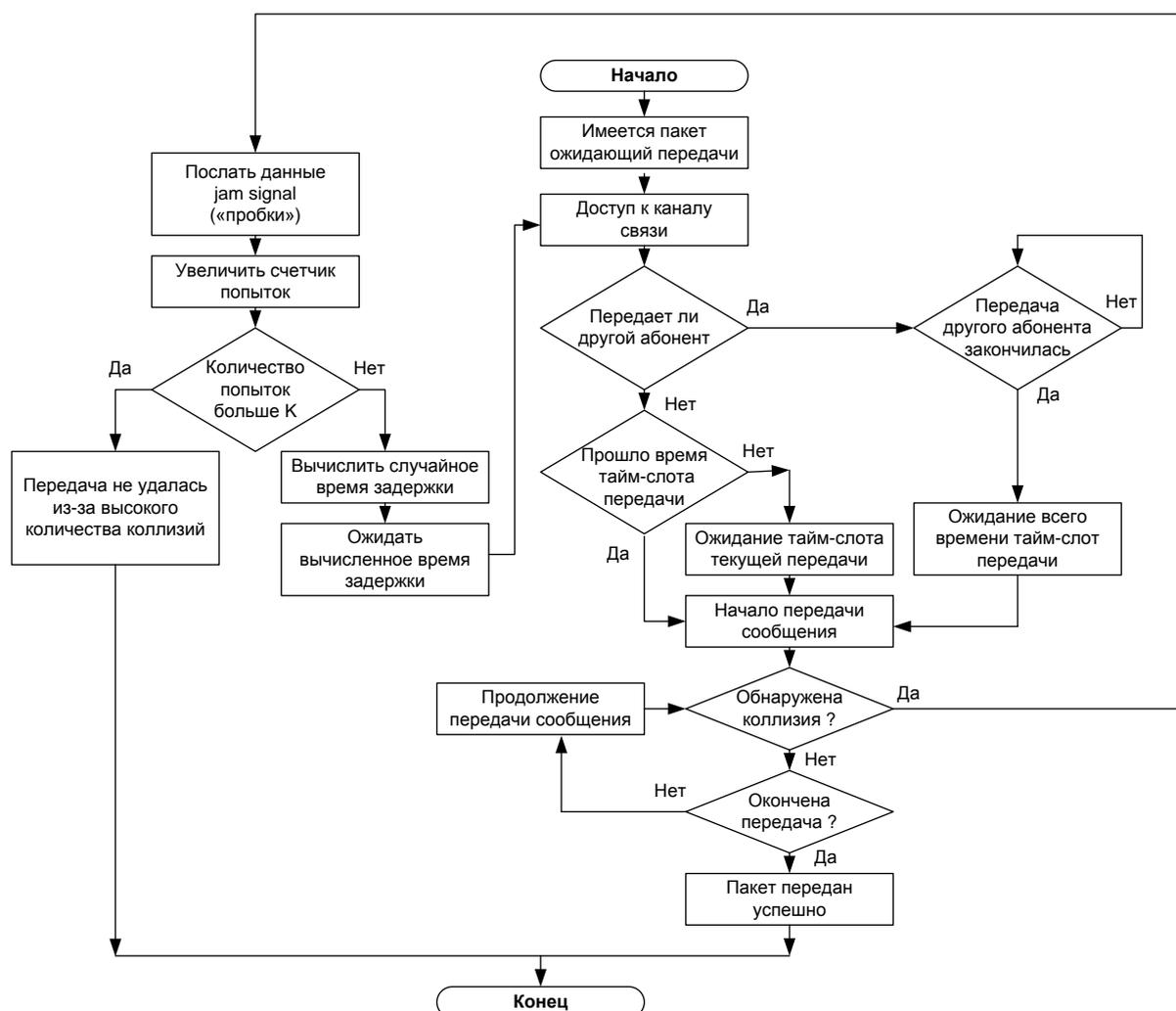


Рис. 3. Общая схема функционирования АМСД в СВРС

Модель сети воздушной радиосвязи управления авиацией с АК РЛДН использующая алгоритм случайного множественного доступа

Исходными данными для построения модели являются:

M – количество абонентов совместно использующих канал множественного доступа;

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

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

$S = \sum_{m=1}^M S_m$ – вероятность успешных передач на окно, приходящееся на всех абонентов;

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

$G = \sum_{m=1}^M G_m$ – общее число передач пакетов за время окна P_{win} ;

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

S/G – вероятность успешной передачи абонента в СВРС;

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

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

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

β – нормированное время до получения квитанции об успешной доставке пакета. Предполагается, что заблокированный пакет или потерпевший наложение пакет задерживается в буфере абонента на время до получения квитанции;

D_{mes} – длина пакета в битах;

C – максимально возможная пропускная способность канала множественного доступа в бит/с;

C_e – эффективная пропускная способность канала множественного доступа в бит/с с учетом функционирования его по алгоритму АМСД;

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

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

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

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

Λ_1 – общая интенсивность трафика в одной СВРС;

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

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

Ограничения модели:

- на канал множественного доступа не воздействуют средства РЭП;
- все абоненты СВРС находятся в пределах прямой радиовидимости;
- квитанции об успешной доставке пакетов прибывают надежно и без потерь;
- в СВРС присутствует большое число равномерно «слабых» абонентов, ни один из которых не вносит весомый вклад в нагрузку сети.

Как показано в работе [29], среднее число успешных передач за окно длиной P_{win} определяется как:

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

Средняя задержка пакета, выраженная в количестве окон [29]:

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

Выразим параметры СВРС через абсолютные величины. Параметр a в (1) и (2) зависит от радиуса электромагнитной доступности СВРС (максимальное расстояние между самыми удаленными абонентами сети) [29]:

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

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

Получим зависимости для C_e и T_a от λ_m , C . Длительность окна зависит от длины пакета и пропускной способности канала:

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

Интенсивность поступления пакетов от абонента эквивалентна количеству порождаемых этим абонентом пакетов, длиной D_{mes} бит, за время длительности окна. То есть:

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

откуда следует

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

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

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

В случае, когда в СВРС используется передача квитанций (квитирование) об успешном получении пакетов, и доля трафика квитанций составляет k_{kv} ($k_{kv}=0\dots 1$) от информационного трафика, то суммарный трафик в СВРС будет:

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

тогда

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

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

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

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

$$\begin{aligned} C_e = SC &= C \frac{\frac{1}{C} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv}) e^{-\frac{d_{max} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}{cD_{mes}}}}{\frac{\Lambda_1}{C} \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}}\right) (1+k_{vn})(1+k_{kv}) + e^{-\frac{d_{max} C}{cD_{mes}} \frac{1}{C} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}} = \\ &= \frac{\Lambda_1 C (1+k_{vn})(1+k_{kv}) e^{-\frac{d_{max} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}{cD_{mes}}}}{\Lambda_1 \left(1 + 2 \frac{d_{max} C}{cD_{mes}}\right) (1+k_{vn})(1+k_{kv}) + C e^{-\frac{d_{max} \Lambda_1 (1+k_{vn})(1+k_{kv})}{cD_{mes}}}} \quad (9) \end{aligned}$$

Определим время задержки передачи пакета в секундах из выражения (2). Параметр β , отвечающий за доставку квитанции не зависит от параметров канала в модели, рассмотренной в [29], что определяется введенными в модель ограничениями. Если из модели, представленной в работе [29] убрать ограничение, что квитанции доставляются надежно по отдельному каналу и без затрат, получим, что квитанции доставляются по тому же каналу. В этом случае из (2) с учетом выражения (6) получим β , как задержку пакета квитанции, который, в свою очередь уже не требует пакета-квитанции:

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

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

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

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

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

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

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

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

Для систем управления в реальном масштабе времени накладывается ограничение на «время жизни» пакета в СВРС – T_m . Так как для выражения (10) параметр K является варьируемым, в этом случае необходимо наложить условие, при котором соблюдается требования к «времени жизни» пакета. При превышении времени нахождения в сети t максимально допустимой «времени жизни» T_m передача пакета теряет смысл:

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

Учитывая выражение (4) сформируем критерий соответствия своевременности доставки пакетов трафика в СВРС ее оперативной ценности:

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

Окончательно, запишем выражения для эффективной пропускной способности и задержки передачи трафика в СВРС со АСМД.

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

Система (14) описывает поведение СВРС управления авиацией с АК РЛДН с учетом коэффициента трафика k_{vn} поступающего в/из другие смежные СВРС.

Примем допущение о том, что трафик квитанций об успешной доставке много меньше трафика данных циркулирующего в сети $k_{kv} \rightarrow 0$. В этом случае систему расчетных соотношений для вывода показателей качества СВРС управления авиацией с АК РЛДН можно представить в виде схемы на рис. 4.

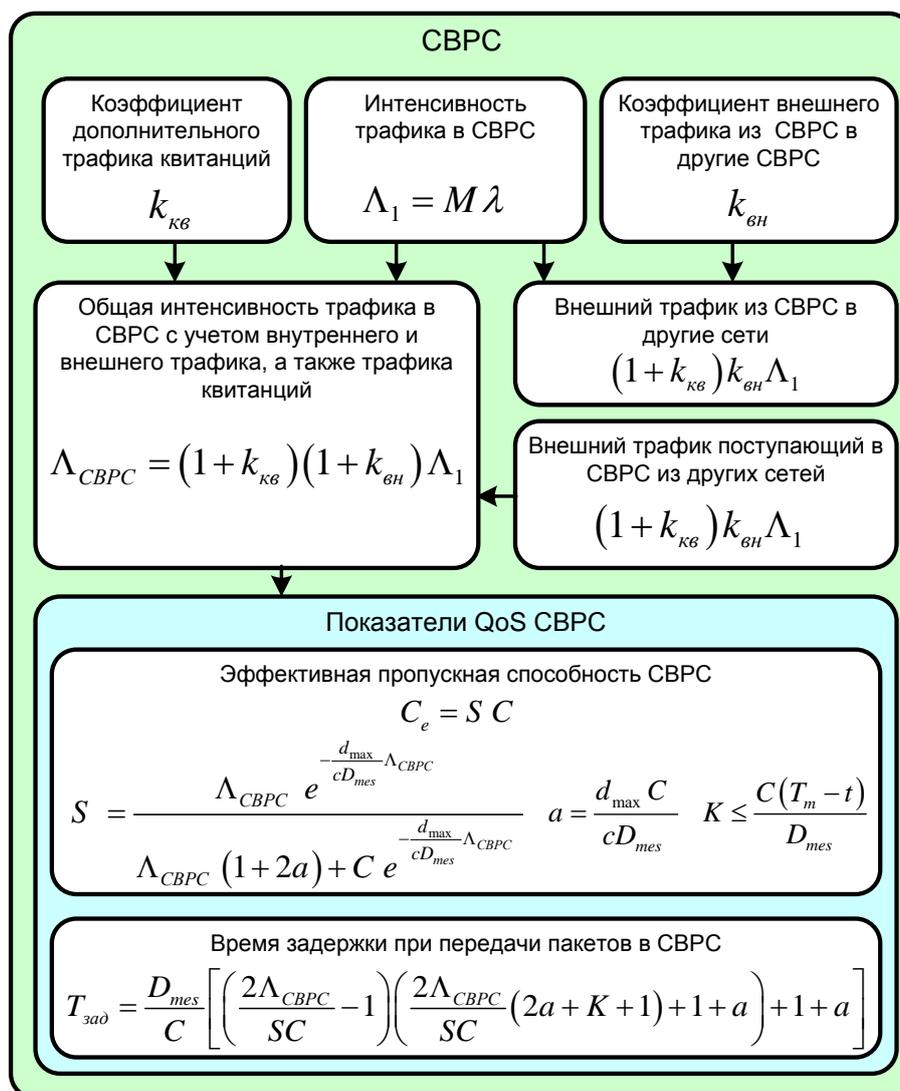


Рис. 4. Система расчетных соотношения для вывода показателей качества СВРС управления авиацией с АК РЛДН

Проведенное моделирование показало, что транзитный трафик существенно влияет на СВРС управления авиацией с АК РЛДН: при росте эффективной пропускной способности на 10-20%, своевременность передачи пакетов в СВРС снижается в 2-2,5 раза. Такое снижение своевременности передачи пакетов делает актуальным разработку научно обоснованных технических решений по ретрансляции трафика в ЕСВРС на ТВД, а также внедрения децентрализованных принципов информационного обмена в ЕСВРС.

Выводы

В работе показано, что актуальным направлением развития способов управления авиацией на необорудованных в отношении связи ТВД является управление пилотируемых и беспилотных авиационных средств с АК РЛДН. При этом основная нагрузка по передачам команд и информационному обеспечению авиации ложиться на ЕСВРС ТВД, которая может быть организована по иерархическому или децентрализованному принципу. При этом основным элементом ЕСВРС являются отдельные СВРС. В работе предложена базовая

модель СВРС управления авиацией с АК РЛДН на основе АСМД. В дальнейшем данная модель СВРС планируется к использованию при обосновании технологических решений ЕСВРС на ТВД с централизованным и децентрализованным принципами передачи информации.

Литература

1. Смирнов С. В. Анализ способов и средств управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 69-100. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/03-Smirnov.pdf> (дата обращения 28.10.2017).

2. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П., Гиндранков В. В., Гришин В. К., Горощенко Л. Б., Зинич В. С., Карпеев В. И., Левитин В. Ф., Максимович В. А., Полушкин Ю. Ф., Слатин В. В., Федосов Е. А., Федунов Б. Е., Широков Л. Е. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е.А. Федосова. Монография. – М.: Дрофа, 2004. — 816 с.

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

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

6. 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.

7. 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).

8. 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.

9. 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.

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

11. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно-космической сети связи построенной на основе Mesh-технологий // Научно-технические проблемы в космических исследованиях Земли. 2016. Том 7. № 1. С. 17-25.

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

13. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов / под общ. ред. С. И. Макаренко. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.

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

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

16. Назаров С. Н. Подход к решению задачи определения топологии сети радиосвязи декаметрового диапазона при ее интеграции в систему авиационной электросвязи // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 152. С. 36-39.

17. Назаров С. Н. Принципы реализации пространственного ресурса декаметровой радиосвязи в системе авиационной электросвязи при решении задач управления воздушным движением // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2010. № 152. С. 40-44.

18. Назаров С. Н., Шагарова А. А. Анализ применения зон вынесенных ретрансляторов для беспроводной авиационной электросвязи // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1. № 2. С. 213-214.

19. Назаров С. Н., Шагарова А. А. Совместное использование вынесенных зон ретрансляторов для обмена сообщениями с воздушными судами на различных авиатрассах // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1. № 2. С. 215-217.

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

21. Макаренко С. И., Бережнов А. Н. Перспективы использования сетевых технологий управления боевыми действиями и проблемы их внедрения в вооруженных силах Российской Федерации // Вестник Академии военных наук. 2011. № 4 (37). С. 64-68.

22. Макаренко С. И., Квасов М. Н. Модифицированный алгоритм Беллмана-Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Том 14. № 3. С. 264-274.
23. Цветков К. Ю., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационно-управляющие системы. № 2 (69). 2014. С. 71-78.
24. Макаренко С. И. Исследование влияния преднамеренных помех на возможности по ретрансляции сообщения и показатели качества обслуживания канального уровня модели OSI для системы связи со случайным множественным доступом абонентов // Информационные технологии моделирования и управления, 2010, № 6 (65). С. 807-815.
25. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века. Монография. — СПб.: Научно-технические технологии, 2017. — 546 с.
26. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: – Свое издательство, 2013. – 166 с.
27. Макаренко С. И., Бородинов Р. В. Анализ технологий обеспечения качества обслуживания в мультисервисных АТМ сетях // Информационные технологии моделирования и управления. 2012. № 1 (73). С. 65-79.
28. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (дата обращения: 16.10.2017).
29. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер с англ. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
30. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Оценка эффективности сетей воздушной радиосвязи при использовании различных алгоритмов многостанционного доступа // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.
31. Дмитриев А. Н., Максимов А. В., Мотин О. В. Модели сетей радиосвязи, использующие различные алгоритмы множественного доступа // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Калуга: ОАО «КНИИТМУ», 2002.
32. Дмитриев А. Н., Мотин О. В. Модель авиационного УКВ канала обмена данными // Тезисы докл. науч. техн. конференции. – Калуга: ФГУП «КНИИТМУ», 2002.
33. Дмитриев А. Н., Максимов А. В. Оптимизация авиационных сетей обмена данными // Сборник трудов X НТК «Проблемы радиосвязи». Н.Новгород: ГУП НПП «Полет», 1999.

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

References

1. Smirnov S. V. The Analysis of Ways and Means to Control the Aircrafts from AWACS. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 2, pp. 69-100. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-02/03-Smirnov.pdf> (accessed 28 October 2017) (in Russian).

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

3. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniia. Printsipy postroeniia, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniia. Monografiia* [Aircraft radar patrol and guidance. Principles, problems of development and peculiarities of functioning. Monograph]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (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., Konashenkov A. I., Chernov V. S., Dragalin V. V., Antipov V. N., Antsev G. V., Kulabukhov V. S., Lepin V. N., Sarychev V. A., Sablin V. N., Samarin O. F., Tupikov V. A., Turnetskii L. S., Khar'kov V. P. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia. Tom 3. Sistemy komandnogo radioupravleniia. Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniia* [Aviation radio system. Volume 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).

6. 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.

7. 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).

8. 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).

9. 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).

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

11. 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).

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

13. Makarenko S. I., Sapozhnikov V. I., Zakharenko G. I., Fedoseev V. E. *Sistemy sviasi* [Communication systems]. Voronezh, Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, 2011. 285 p. (in Russian).

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

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

16. Nazarov S. N. Approach to the solution of the problem of determining the topology of the network of the radio communication of decametric range with its integration into the system of the aviation electrical communication. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2010, no. 152, pp. 36-39 (in Russian).

17. Nazarov S. N. Principles of the realization of the three-dimensional resource of decametric radio communication in the system of aviation electrical communication with the solution of the problems of the air traffic control. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2010, no. 152, pp. 40-44 (in Russian).

18. Nazarov S. N., Shagarova A. A. The analysis of application of areas of the taken out repeaters for wireless aviation telecommunication. *Digital Signal Processing*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 213-214 (in Russian).

19. Nazarov S. N., Shagarova A. A. Sovmestnoe ispol'zovanie vynesennykh zon retransliatorov dlia obmena soobshcheniiami s vozdushnymi sudami na razlichnykh aviatrassakh [Sharing made areas of repeaters for communicating with the aircraft on various routes]. *Digital Signal Processing*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 215-217 (in Russian).

20. Verba V. S., Polivanov S. S. Organizatsiia informatsionnogo obmena v setetsentricheskikh boevykh operatsiiah [Organization of information exchange in

network-centric combat operations]. *Radiotekhnika*, 2009, no. 8, pp. 57-62 (in Russian).

21. Makarenko S. I. Berezhnov A. N. Perspektivy ispol'zovaniia setetsentricheskikh tekhnologii upravleniia boevymi deistviiami i problemy ikh vnedreniia v vooruzhennykh silakh Rossiiskoi Federatsii [Prospects of using network-centric technologies for the management of the fighting and problems of their implementation in the armed forces of the Russian Federation]. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2011, vol. 37, no. 4, pp. 64-68 (in Russian).

22. Makarenko S. I., Kvasov M. N. Modified Bellman-Ford Algorithm with Finding the Shortest and Fallback Paths and its Application for Network Stability Improvement. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2016, vol. 14, no. 3, pp. 264-274 (in Russian).

23. Tsvetov K.U., Makarenko S.I., Mikhailov R.L. Forming of Reserve Paths Based on Dijkstra's Algorithm in the Aim of the Enhancement of the Stability of Telecommunication Networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, vol. 69, no. 2, 2014, pp. 71-78 (in Russian).

24. Makarenko S. I. Issledovanie vliianiia prednamerennykh pomekh na vozmozhnosti po retransliatsii soobshcheniia i pokazateli kachestva obsluzhivaniia kanal'nogo urovniia modeli OSI dlia sistemy sviazi so sluchainym mnozhestvennym dostupom abonentov [The Study of the Influence of Intentional Interference at the Relay Capabilities of the Message and the Quality of Service Link Layer of the OSI Reference Model for Communication Systems with Random Multiple Access Subscribers] *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniia i upravleniia*, 2010, vol. 65, no. 6, pp. 807-815 (in Russian).

25. Makarenko S. I. *Informatsionnoe protivoborstvo i radioelektronnaia borba v setetsentricheskikh voinakh nachala XXI veka. Monografiia* [Information warfare and electronic warfare to network-centric wars of the early XXI century. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2017. 546 p. (in Russian).

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

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

28. Makarenko S. I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (accessed 16 October 2017) (in Russian).

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

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

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

32. Dmitriev A. N., Motin O. V. Model' aviatsionnogo UKV kanala obmena dannymi [Model aviation ultrashort-waves communication channel]. *Tezisy dokladov nauchno tekhnicheskoi konferentsii (Proceedings of the Conference)*, Kaluga, JSC «Kaluzhskii nauchno-issledovatel'skii institut telemekhanicheskikh ustroystv», 2002 (in Russian).

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

34. 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).

Статья поступила 1 ноября 2017 г.

Информация об авторе

Смирнов Сергей Владимирович – соискатель ученой степени кандидата 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: маршрутизация трафика, воздушные сети радиосвязи, Mesh-технологии.
E-mail: web-shark@mail.ru

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

Air radio network model for AWACS-controlled aircraft

S. V. Smirnov

Statement of the problem. Aviation of Aerospace forces Russia is used in remote theatres of combat operations which are not equipped with stationary control and communication system. For this reason the airborne warning and control system (AWACS) is used as an air command post to control the aircrafts. **Purpose of paper:** development and research of model radio network of control aviation from AWACS with the data transmission based on algorithm of random access. In the radio network model study an effect of transit traffic on effective network bandwidth. **Methods used.** Probability theory and the theory of Markov processes are used in the article for develop the radio network model. **Novelty.** The radio network model takes into account traffic of transition connections from other networks. **The results of the study.** Transit traffic significantly affects the performance of the network. The increase in the number of transit connections makes the growth of the effective bandwidth of 10-20%, and the time delay of messages in the radio network increases in 2-2.5 times. This increase in the transmission delay of messages not allows you to send traffic to sensitive delay. **Practical relevance:** the author proposes to use paper results for relay of traffic through the radio networks of control aviation from AWACS on based Mesh-technology.

Keywords: communications network, relay traffic, routing, radio networks, AWACS.

Information about Author

Sergei Vladimirovich Smirnov – Doctoral Student. 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 Ju. A. Gagarin”. Field of research: traffic routing, air communication networks, Mesh-networks. E-mail: web-shark@mail.ru

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