

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

УДК 004.722

## МОДЕЛЬ ОБЪЕДИНЕННОЙ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ ПРИНЦИПОМ РЕТРАНСЛЯЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ MESH-ТЕХНОЛОГИЙ

Аганесов А.В.<sup>1</sup>, Макаренко С.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, РФ

<sup>2</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

E-mail: mak-serg@yandex.ru

Представлена модель воздушно-космической сети связи. Ядром сети является спутниковая сеть связи на основе протокола S-Aloha, которая соединяет воздушные сети CSMA/CA. Особенностью модели является дополнительный учет объединения воздушных сетей на основе Mesh-технологий. Проведено исследование поведения модели в зависимости от основных параметров воздушных и спутниковой сетей. Показано приложение модели к модернизации систем авиационной связи специального назначения.

**Ключевые слова:** авиационная система связи, спутниковая система связи, маршрутизация, ретрансляция, Mesh-сеть, MANET, CSMA, S-Aloha.

### Введение

Анализ развития систем авиационной связи показал, что одним из направлений обеспечения глобальности информационного обеспечения полетов авиации различного назначения является создание объединенных воздушно-космических сетей связи (ВКСС) [1-2]. При этом использование ВКСС в интересах обслуживания абонентов, передающих мультимедийный трафик (речь, видео, изображения), повышает требования к качеству его обслуживания (QoS – Quality of Service). Кроме того, предлагаемые к использованию в настоящее время технологические решения по созданию ВКСС основаны на иерархическом принципе ретрансляции информационных потоков (см. рис. 1).

Вместе с тем в соответствии с перспективными планами развития систем авиационной связи [3-6] предусматривается внедрение Mesh-технологий, которые позволят ретранслировать часть информационных потоков между сетями воздушной радиосвязи (СВРС) в случае, если у этих сетей имеются общие абоненты (см. рис. 2). Рассмотрен вопрос создания модели объединенной ВКСС, построенной на основе Mesh-технологии ретрансляции информационных потоков. Схема такой ВКСС представлена на рис. 2. Данная сеть предназначена для ретрансляции команд управления летательными аппаратами (ЛА), а также их информационного обеспечения в условиях отсутствия наземной инфраструктуры связи. В

основу модели ВКСС были положены работы [7-8], в которых рассматриваются модели СВРС, а именно модель на основе протокола CSMA/CA и модель отдельной сети спутниковой связи (ССС) на основе протокола S-Aloha. На основе модели ВКСС предлагается исследовать QoS трафика и возможности такой сети по количеству одновременно обслуживаемых абонентов.

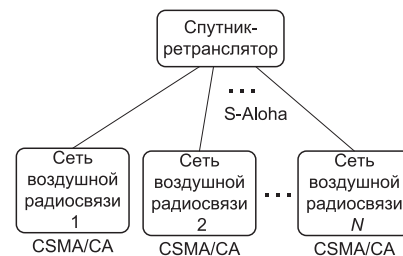


Рис. 1. Объединенная воздушно-космическая сеть связи на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков

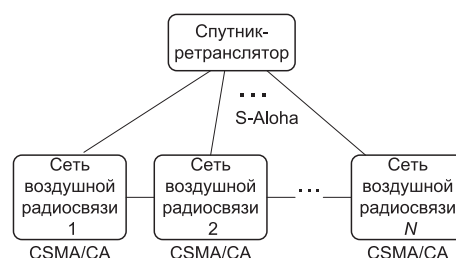


Рис. 2. Объединенная воздушно-космическая сеть связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

### Постановка задачи

Для формализации процесса информационного обмена в ВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции введем следующие обозначения:  $M_n$  – количество абонентов  $n$ -ой СВРС;  $C_n$  – пропускная способность канала множественного доступа  $n$ -ой СВРС [бит/с];  $C_{CCC}$  – пропускная способность канала множественного доступа ССС [бит/с];  $S_n$  – относительная пропускная способность канала множественного доступа  $n$ -ой СВРС, нормированная к  $C_n$ ;  $S_{CCC}$  – относительная пропускная способность канала множественного доступа ССС, нормированная к  $C_{CCC}$ ;  $C_{en}$  – эффективная пропускная способность канала множественного доступа  $n$ -ой СВРС [бит/с];  $C_{eCCC}$  – эффективная пропускная способность канала множественного доступа ССС [бит/с];  $C_{eИНС}$  – эффективная пропускная способность информационного направления связи (ИНС) [бит/с];  $D_{mes\ n}$  – объем пакета в  $n$ -ой СВРС [бит];  $D_{mes\ CCC}$  – объем пакета в ССС [бит];  $D_{mes\ CCC}$  – объем пакета в ССС [бит];  $d_{max\ n}$  – максимальный радиус сети  $n$ -ой СВРС [км];  $d_{sot}$  – расстояние до спутника-ретранслятора (СР), образующего ССС [км]. Для низкоорбитальных ССС  $d_{sot} = 500 \dots 1500$  км, для геостационарных ССС  $d_{sot} = 40000$  км, для высокоэллиптических ССС  $d_{sot} > 40000$  км;  $c$  – скорость распространения электромагнитных волн [км/с];  $K_n$  – настойчивость протокола множественного доступа  $n$ -ой СВРС, определяемая как число попыток передачи пакета, в случае если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;  $K_{CCC}$  – настойчивость протокола множественного доступа S-Aloha, используемого в ССС;  $\lambda_m$  – интенсивность трафика, поступающего от  $m$ -го абонента в  $n$ -ой СВРС [бит/с];  $k_{вн\ n} = 0 \dots 1$  – коэффициент внешнего трафика  $n$ -ой СВРС, определяется как доля трафика СВРС, передаваемого как через ССС, так и через смежные СВРС, объединенные по Mesh-технологии;  $k_{вн\ n, j} = 0 \dots 1$  – коэффициент внешнего трафика, направляемого из  $n$ -ой СВРС в  $j$ -ю СВРС как через ССС, так и через смежные СВРС, объединенные по Mesh-технологии;  $k_{вн\ CCC\ n} = 0 \dots 1$  – коэффициент, определяющий долю внешнего трафика  $n$ -ой СВРС, передаваемого только через ССС;  $k_{вн\ CCC\ n, j} = 0 \dots 1$  – коэффициент, определяющий долю внешнего трафика из  $n$ -ой СВРС в  $j$ -ю СВРС, передаваемого только через ССС;  $k_{кв} = 0 \dots 1$  – коэффициент дополнительного трафика квитанций, определяется как доля от основного трафика содержания квитанции об успешном приеме пакета. Значение  $k_{кв} = 0,1$  соответствует случаю, когда на 10 пакетов основного трафика отправляется один пакет квитанции об их успешном приеме;  $z_n$  – ко-

личество исходящих Mesh-каналов из  $n$ -ой СВРС в смежные СВРС;  $k_{св\ n} = 0 \dots 1$  – коэффициент связности  $n$ -ой СВРС со смежными СВРС, с которыми имеются Mesh-каналы;  $k_{св} = 0 \dots 1$  – среднесетевой коэффициент связности СВРС со смежными СВРС по Mesh-каналам;  $R$  – среднесетевое количество ретрансляций через СВРС, объединенных на основе Mesh-технологий, при доставке пакета из СВРС-источника в СВРС-получатель;  $\Lambda_n$  – интенсивность трафика в  $n$ -ой СВРС без учета трафика квитанций об успешной доставке и внешнего трафика, поступающего в СВРС [бит/с];  $\Lambda_{CCC}$  – общая интенсивность трафика в ССС с учетом трафика квитанций об успешной доставке [бит/с];  $\Lambda_{СВРС\ n}$  – общая интенсивность трафика в  $n$ -ой СВРС с учетом внешнего трафика и трафика квитанций об успешной доставке [бит/с];  $T_{зад\ n}$  – задержка передачи пакета по  $n$ -ой СВРС [с];  $T_{зад\ CCC}$  – задержка передачи пакета по ССС [с];  $T_{зад\ ИНС}$  – задержка передачи пакета по ИНС [с];  $T_m$  – максимально допустимая задержка передачи пакета по СВРС [с].

Рамки исследования: протокол связи в СВРС – CSMA/CA; протокол связи в ССС – S-Aloha; все СВРС соединены через ССС по принципу «звезды», причем каждая СВРС доступна из другой сети за один шаг ретрансляции через ССС; все СВРС соединены между собой в соответствии с количеством исходящих Mesh-каналов; трафик представляет собой простейший пуассоновский поток событий, состоящих в поступлении отдельных пакетов. Целью разработки модели является оценка временных параметров задержки передачи сообщений и пропускной способности ИНС в ВКСС, использующей децентрализованный принцип ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологии.

### Решение задачи

Для получения начальных условий с целью расчета временных параметров ВКСС и пропускных способностей ИНС сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных сегментах сети. В произвольной  $n$ -ой СВРС от абонентов в сеть поступает поток с интенсивностью пропорциональной интенсивности отдельных абонентов  $\lambda_m$  и их количеству  $M_n$ :

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

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

$$k_{\text{вн } n} \Lambda_n, \quad (2)$$

где  $k_{\text{вн } n} = \sum_{j=1}^N k_{\text{вн } n, j}$ ,  $k_{\text{вн } n, j}$  – коэффициент трафика, направляемого из  $n$ -ой СВРС в  $j$ -ую СВРС, при этом  $k_{\text{вн } n, n} = 0$ . Данный трафик делится на отправляемый через ССС, доля которого во внешнем трафика определяется коэффициентом  $k_{\text{вн } \text{ССС } n}$  и составляет значение

$$k_{\text{вн } n} (k_{\text{вн } \text{ССС } n}) \Lambda_n, \quad (3)$$

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

$$k_{\text{вн } n} (1 - k_{\text{вн } \text{ССС } n}) \Lambda_n. \quad (4)$$

Если учесть, что на каждые  $v$  пакетов в ВКСС отправляется один пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов, то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет равен  $k_{\text{кв}} = 1/v$ . С учетом этого выражения (3) и (4) примут окончательный вид:

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

$$k_{\text{вн } n} (k_{\text{вн } \text{ССС } n}) (1 + k_{\text{кв}}) \Lambda_n; \quad (5)$$

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

$$k_{\text{вн } n} (1 - k_{\text{вн } \text{ССС } n}) (1 + k_{\text{кв}}) \Lambda_n; \quad (6)$$

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

На основе (5) можно определить суммарный трафик, поступающий в ССС от  $N$  СВРС:

$$\Lambda_{\text{ССС}} = (1 + k_{\text{кв}}) \sum_{n=1}^N k_{\text{вн } n} k_{\text{вн } \text{ССС } n} \Lambda_n, \quad (7)$$

а из выражения (6) – суммарный внешний трафик, ретранслируемый между всеми СВРС, объединенными по Mesh-технологии (без учета количества повторных ретрансляций):

$$(1 + k_{\text{кв}}) \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{\text{вн } i, j} (1 - k_{\text{вн } \text{ССС } i, j}) \Lambda_i \right); \quad (8)$$

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

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

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

$$k_{\text{св } n} = z_n / (N - 1). \quad (9)$$

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

$$k_{\text{св}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_{\text{св } i} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N z_i. \quad (10)$$

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

$$R = 1/k_{\text{св}}. \quad (11)$$

Такое допущение является дискуссионным, но обусловлено необходимостью подбора функции, удовлетворяющей следующим условиям. В случае несвязной сети достичь узла назначения невозможно, то есть  $R(k_{\text{св}} = 0) = \infty$ , а в случае полностью связной сети любой узел достигается за один шаг:  $R(k_{\text{св}} = 1) = 1$ . С учетом допущения (11) можно оценить среднесетевое количество ретрансляций  $R$ , которое необходимо произвести в воздушном сегменте СВРС с учетом его коэффициента связности  $k_{\text{св}}$  (10):

$$R = \begin{cases} \infty, & \text{при } k_{\text{св}} < \frac{1}{N-1}; \\ \frac{1}{k_{\text{св}}}, & \text{при } k_{\text{св}} \geq \frac{1}{N-1}. \end{cases} \quad (12)$$

Условие  $k_{\text{св}} < 1/(N - 1)$  в данном выражении определяет минимальный уровень связей  $(N - 1)$  между СВРС, после которого воздушный сегмент ВКСС будет распадаться на несвязанные кластеры и отдельные группы узлов окажутся недоступными (что соответствует значению  $R = \infty$ ). Значение среднесетевого числа ретрансляций  $R$  определяет рост уровня транзитного трафика в воздушном сегменте ВКСС, проходящего через отдельные СВРС. Причем с увеличением длины пути  $R$  пропорционально растет нагрузка и в воздушном сегменте ВКСС. В связи с этим из выражения (7) получим суммарный внешний трафик, ретранслируемый между всеми СВРС, объединенными по Mesh-технологии, с учетом числа ретрансляций  $R$ :

$$R(1 + k_{KB}) \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{BH\ i,j} (1 - k_{BH\ CCC\ i,j}) \Lambda_i \right). \quad (13)$$

При этом средняя доля транзитного трафика (13), приходящаяся на конкретную СВРС, определяется как

$$\frac{R(1 + k_{KB})}{N} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{BH\ i,j} (1 - k_{BH\ CCC\ i,j}) \Lambda_i \right). \quad (14)$$

Выражения (5)-(6) и (14) позволяют определить общую интенсивность трафика в произвольной  $n$ -ой СВРС с учетом внутреннего и внешнего (от CCC и смежных СВРС) трафика:

$$\Lambda_{CBVP\ n} = (1 + k_{KB}) \times \left( \Lambda_n + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{BH\ i,j} (1 - k_{BH\ CCC\ i,j}) \Lambda_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N (k_{BH\ j,n} \cdot k_{BH\ CCC\ j,n} \cdot \Lambda_j) \right). \quad (15)$$

Выражения (7) и (15) позволяют определить интенсивность трафика, циркулирующего в CCC и в отдельной СВРС, и являются исходными для расчета пропускной способности и времени задержки передачи пакетов в ИНС ВКСС.

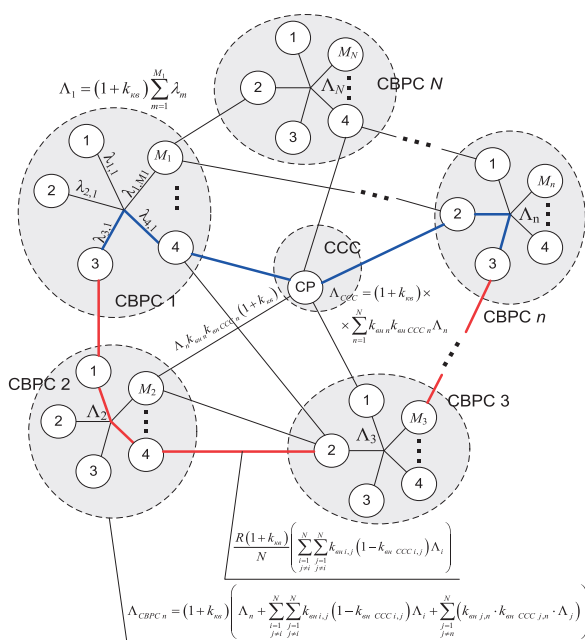


Рис. 3. Объединенная воздушно-космическая сеть связи с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

Рассмотрим передачу сообщений в децентрализованной ВКСС (см. схему на рис. 3). В такой сети для соединения абонентов возможно построить два вида ИНС:

- через CCC (см. рис. 4а);
- через СВРС, соединенных на основе Mesh-технологий, когда ретрансляция происходит через абонентов, принадлежащих разным сетям, но находящимся в зоне радиовидимости друг друга (см. рис. 4б).

В ИНС, представленных на рис. 4, время задержки передачи пакета между абонентами  $n$ -ой и  $j$ -ой СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

- при передаче через CCC:

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

- при передаче через СВРС соединенные по Mesh-технологии:

$$T_{\text{зад ИНС}} = \sum_{i \in R} T_{\text{зад } i}.$$

Как показано в [7-8], время задержки пакета при передаче по отдельным звеньям ИНС с учетом выражений для интенсивности трафика  $\Lambda_{CCC}$  (7) и  $\Lambda_{CBVP\ n}$  (15) будет определяться следующим образом:

- для СВРС на основе протокола CSMA/CA [7]:

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

где  $S_n = \frac{\Lambda_{CBVP\ n} e^{-\frac{d_{\text{max } n}}{cD_{\text{mes } n}} \Lambda_{CBVP\ n}}}{\Lambda_{CBVP\ n} (1 + 2a_n) + C_n e^{-\frac{d_{\text{max } n}}{cD_{\text{mes } n}} \Lambda_{CBVP\ n}}};$

$$a_n = \frac{d_{\text{max } n} C_n}{cD_{\text{mes } n}}; K_n \leq \frac{C_n (T_m - t)}{D_{\text{mes } n}}.$$

- для CCC на основе протокола S-Aloha [8]:

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

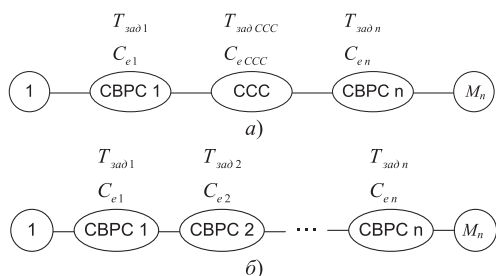


Рис. 4. Общие схемы ИНС в ВКСС: а) через ССС; б) ретрансляция через СВРС, соединенные по Mesh-технологии

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

- при передаче через ССС:

$$C_{e \text{ ИНС}} = \min\{C_{e n}, C_{e \text{ ССС}}, C_{e j}\};$$

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

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

При этом, как показано в работах [7-8], эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений для интенсивности трафика  $\Lambda_{\text{ССС}}$  (7) и  $\Lambda_{\text{СВРС } n}$  (15) будут определяться как

- для СВРС на основе протокола CSMA/CA [7]:

$$C_{e n} = S_n C_n,$$

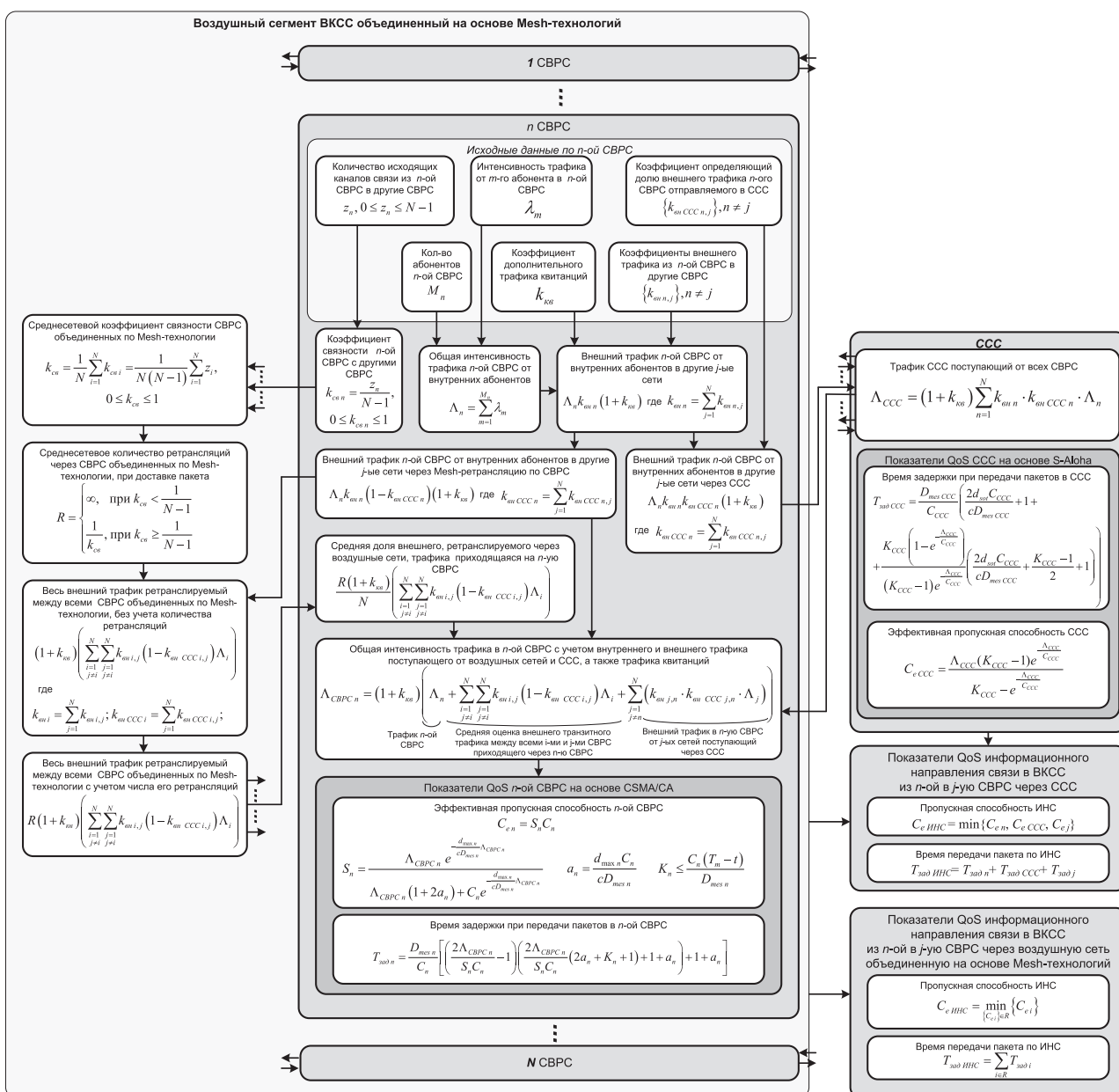


Рис. 5. Общая схема аналитических вычислений для модели ВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

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

- для CCC на основе протокола S-Aloha [8]:

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

Показатели  $T_{\text{зад инс}}$  и  $C_{e\text{инс}}$  формируют показатели качества обслуживания ВКСС. Общая схема аналитических вычислений для модели ВКСС на основе децентрализованного принципа ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий представлена на рис. 5.

### Моделирование

Для численной оценки показателей качества функционирования ВКСС проведем предварительное упрощение модели ВКСС на основе де-

централизованного принципа ретрансляции информационных потоков. Дополнительно введем следующие допущения:

- информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС, имеет равную интенсивность  $\Lambda_1$ ;
- все СВРС имеют одинаковые параметры объема пакета, радиуса сети, настойчивости протокола CSMA/CA, равные, соответственно,  $D_{\text{mes}}, d_{\text{max}}, K$ ;
- коэффициент внешнего трафика у всех СВРС одинаков и равен  $k_{\text{вн}}$ , причем внешний трафик равномерно распределен по СВРС и коэффициенты трафика по всем межсетевым направлениям СВРС<sub>i</sub> → СВРС<sub>j</sub> имеют равные значения:  $k_{\text{вн } i,j} = k_{\text{вн}} / (N - 1)$ ;
- коэффициент доли внешнего трафика, направляемого в CCC, у всех СВРС одинаков и равен  $k_{\text{вн CCC}}$ , при этом трафик через CCC так же равномерно распределен по всем межсетевым направлениям СВРС<sub>i</sub> → СВРС<sub>j</sub>;

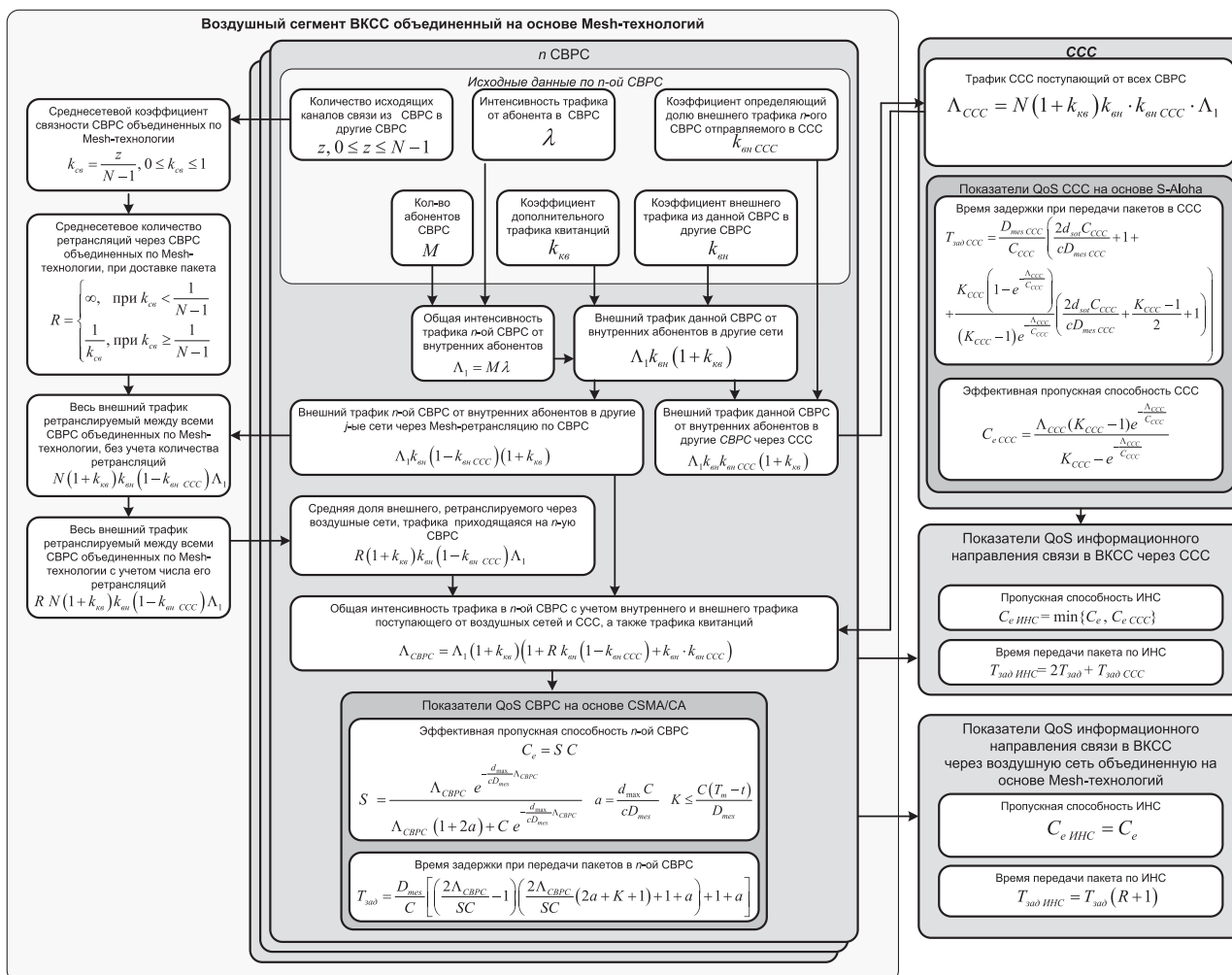


Рис. 6. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков на основе Mesh-технологий

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

В результате данных упрощений схема аналитических вычислений для модели ВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков примет вид, представленный на рис. 6.

Проведем исследование возможностей по обслуживанию абонентов для ВКСС с децентрализованным принципом ретрансляции информационных потоков при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам реальных средств связи [1; 7- 8]:

- базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет  $\lambda = 1,2$  кбит/с;
- количество абонентов СВРС  $M = 20$ , при этом каждый из абонентов генерирует трафик  $\lambda$ ;
- количество сетей СВРС:  $N = 5$ ;
- пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна  $C = 48$  кбит/с, для CCC - 13,3 кбит/с;
- объемы пакетов в СВРС ( $D_{mes}$ ) и CCC ( $D_{mes CCC}$ ) имеют равные значения: 256 бит;
- коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и CCC равны и имеют значения  $K=K_{CCC}=16$ ;
- радиус СВРС равен  $d_{max}=250$  км;
- коэффициент дополнительного трафика квитанций  $k_{kb}=0,1$ ;
- коэффициент связности воздушного сегмента ВКСС по умолчанию  $k_{cb}=0,5$ .

Результаты моделирования пропускной способности ИНС, проходящих через CCC и через воздушный сегмент ВКСС, объединенный на основе Mesh-технологий, в зависимости от параметров  $k_{cb}$ ,  $k_{вн CCC}$  для значений  $k_{вн} = 0,2; 0,5; 0,8$  представлены на рис. 7.

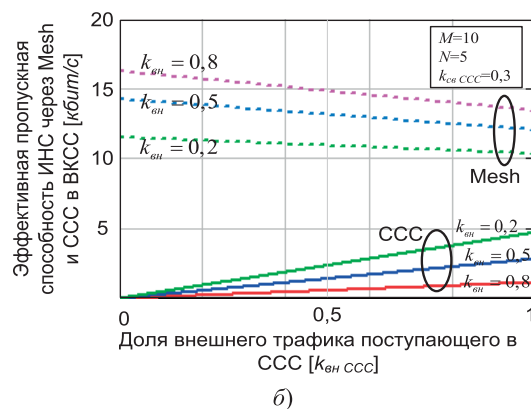
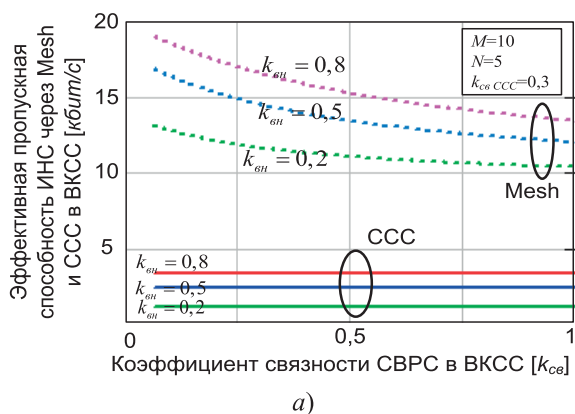


Рис. 7. Зависимость эффективной пропускной способности ИНС через CCC и через Mesh-сеть от параметров  $k_{вн}$ ,  $k_{вн CCC}$  и  $k_{cb}$

Результаты моделирования времени задержки пакета при передаче в этих же ИНС в зависимости от этих же параметров представлены на рис. 8. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о более низкой пропускной способности спутникового сегмента ВКСС. Это ведет к большей задержке сообщений в CCC, чем в воздушном Mesh-сегменте. Существенными факторами, определяющими качество обслуживания в ВКСС, являются коэффициенты  $k_{вн}$ ,  $k_{вн CCC}$  и  $k_{cb}$ .

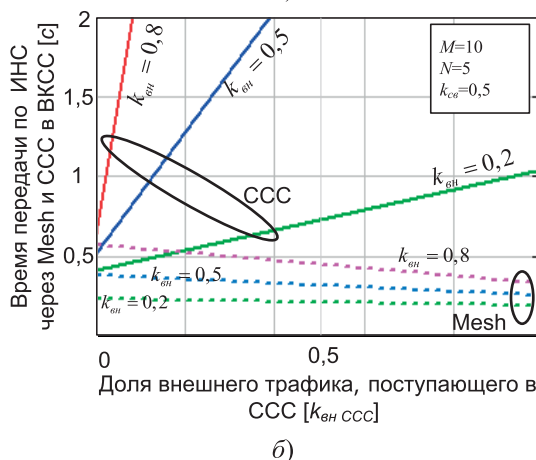
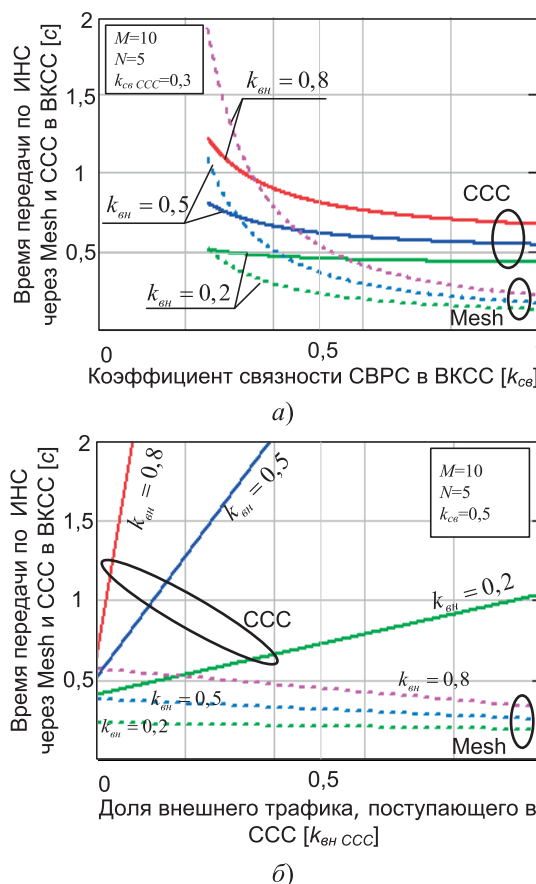


Рис. 8. Зависимость времени задержки при передаче по ИНС через CCC и через Mesh-сеть от параметров  $k_{вн}$ ,  $k_{вн CCC}$  и  $k_{cb}$

Интересным результатом является инвариантность уровня пропускной способности и времени передачи в воздушном Mesh-сегменте от числа сетей  $N$  (см. рис. 7а). Это связано с тем, что в качестве параметра моделирования используется значение связности  $k_{св}$ . Для сохранения того же значения  $k_{св}$  при увеличении сетей  $N$  нужно пропорционально нарастить и количество связей в графе Mesh-сегмента ВКСС.

Анализ временных задержек, представленных на рис. 8, показывает, что ССС и СВРС, построенные на современном оборудовании, не способны обеспечить ретрансляцию мультимедийного трафика (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном масштабе времени), так как требуемое время задержки при его передаче не должно превышать 0,5 ... 0,6 с. Таким образом, решение задачи глобальной передачи мультимедийного трафика требует не только внедрения Mesh-технологий в средства авиационной радиосвязи, но и существенного увеличения пропускной способности каналов, а также разработки протоколов гибкой балансировки нагрузки в ВКСС между ее спутниковым и воздушным Mesh-сегментом [9].

### Выводы

Предложенная модель ВКСС позволяет исследовать качество обслуживания данной сети, а также оценить предельные возможности ВКСС по количеству обслуживаемых абонентов и подсетей СВРС при заданных ограничениях на пропускные способности каналов. Результаты, представленные в статье, предлагается использовать для развития подсистемы маршрутизации и ретрансляции информационных потоков управления авиацией, представленных в работах [5-7; 10-12]. К элементам новизны полученной модели относится рассмотрение сложной многоуровневой сети связи, ядро которой составляет ССС, а нижний уровень образован СВРС, объединенными на основе Mesh-технологии. В отличие от известных моделей многоуровневых сетей связи на основе ССС, например представленных в работах [13-16], представленная модель учитывает специфику Mesh-технологии в СВРС управления авиацией. Результаты моделирования, представленные в работе, позволяют сделать вывод о преимуществах децентрализованного принципа информационного обмена перед иерархическим, а также о необходимости разработки методики балансировки информационной нагрузки для ВКСС. Данная методика, основанная на представленной модели, позволит на основе известных значений интен-

сивностей трафика абонентов ( $\lambda$ ), их количества ( $M$ ), количества сетей ( $N$ ), коэффициента их связности ( $k_{св}$ ) и коэффициента внешнего трафика ( $k_{вн}$ ) обеспечить выбор коэффициента трафика, поступающего в ССС ( $k_{вн ССС}$ ), с учетом ограничения на требуемое время доставки информации.

### Литература

1. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы. М.: ИД «Оружие и технологии», 2006. – 695 с.
2. Коновалов О.А., Буслаев А.И., Маликов С.В. Актуальные направления развития перспективной системы связи вооруженных сил // Материалы РНТК III научные чтения им. А.С. Попова «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией», посвященной 95-летию со Дня образования войск связи. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. – С. 42-44.
3. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
4. Легков К.Е. Методы повышения производительности беспроводных mesh-сетей специального назначения // Т-Comm. №3, 2011. – С. 46-48.
5. Кулаков М.С. Анализ особенностей функционирования мобильных самоорганизующихся сетей MANET на уровне доступа к среде MAC // Т-Comm. №10, 2014. – С. 39-42.
6. Кулаков М.С. Применение алгоритмов самоорганизации для режима VDL-2 // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Т. 5. № 5, 2012. – С. 58-62.
7. Аганесов А.В. Модель сети воздушной радиосвязи на основе протокола случайного множественного доступа CSMA/CA // Системы управления, связи и безопасности. №1, 2015. – С. 67-97.
8. Аганесов А. В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha // Системы управления, связи и безопасности. №2, 2015. – С. 99-134.
9. Аганесов А.В. Анализ качества обслуживания в воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. №3, 2015. – С. 92-121.



10. Алехин С.В., Войткевич К.Л. Моделирование протокола маршрутизации для беспроводных мобильных сетей // Электросвязь. №7, 2014. – С. 7-8.
11. Абилов А.В., Васильев Д.С. Повышение качества передачи потоковых данных в сетях БПЛА с помощью PULL-PUSH-подхода // ИКТ. Т. 12, № 4, 2014. – С. 45-50.
12. 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. № 2 (95), 2012. – С. 11-18.
13. Мальцев Г.Н., Цветков К.Ю., Родионов А.В. и др. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. №630, 2011. – С. 5-10.
14. Chen. C., Ekici E. A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks // Wireless Networks. No. 11, 2005. – P. 507-521.
15. Duresi A., Dash D., Anderson B.L., Kannan R., Kota S., Jain R. Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture // Aerospace Conference, IEEE. 2004. Vol. 2, 2004. – P. 1086-1104.
16. Akyildiz I.F., Ekici E., Bender M.D. MLSR: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks // IEEE/ACM transactions on networking. Vol. 10, No. 3, 2002. – P. 411-424.

*Получено 15.12.2015*

**Аганесов Артур Валерьевич**, помощник начальника учебного отдела Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж). Тел. 8-919-233-98-86. E-mail: aganesov.artur@yandex.ru

**Макаренко Сергей Иванович**, к.т.н., доцент Кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). Тел. 8-981-820-49-90. E-mail: mak-serg@yandex.ru

## MODEL OF UNITED AIRSPACE NETWORK WITH DECENTRALIZED TRAFFIC ROUTING BASED ON MESH TECHNOLOGIES

*Aganesov A.V.<sup>1</sup>, Makarenko S.I.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Military Air Academy Named After Prof. N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin, 54A Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russian Federation*

<sup>2</sup>*A.F. Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya str., Saint-Petersburg 197198, Russian Federation*

*E-mail: mak-serg@yandex.ru*

Nowadays aviation requires global information support that is practical problem. We propose to solve it by using satellite systems in aircraft telecommunications that will provide connection of separate aircraft network to united airspace network. This work presents developed model of de-scribed network solution to estimate its potentiality. Here satellite telecommunication system based on S-Aloha protocol is network core that unites aircraft networks CSMA/CA. Proposed model takes into account network interconnection by Mesh technologies. We tested model behavior dependence on the main parameters of airspace and satellite telecommunication networks. Simulation results showed that Mesh technologies provide network bandwidth enhancement over ten times and reduce message delay during transmission. Effectiveness of Mesh technologies using depends on ratio of connectivity of the airspace network segments and external traffic parameter. We demonstrated application of developed model for solution of aircraft special telecommunication network upgrading and modernization problem.

**Keywords:** *aircraft telecommunication system, satellite telecommunication system, traffic routing, relaying, Mesh networking, MANET, CSMA, S-Aloha*

**DOI:** 10.18469/ikt.2016.14.1.01

**Aganesov Artur Valer'evich**, Military Air Academy Named After Professor N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin, 54A Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russian Federation; Assistant of the Head of Training Department; Tel. +79192339886, E-mail: aganesov.artur@yandex.ru

**Makarenko Sergey Ivanovich**, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya str., Saint-Petersburg 197198, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems; PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel. +79818204990. E-mail: mak-serg@yandex.ru

## References

1. Ivanov S. *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopediia. XXI vek. Sistemy upravleniia, svyazi i radioelektronnoi bor'by* [Weapons and Technology of Russia. Encyclopedia. XXI Century. Control Systems, Communications and Electronic Warfare]. Moscow, Oruzhie i tekhnologii Publ., 2006. 695 p.
2. Konovalov O.A., Buslaev A.I., Malikov S.V. Aktual'nye napravleniia razvitiia perspektivnoi sistemy svyazi vooruzhennykh sil [Current Trends in the Development of Advanced Communication Systems of the Armed Forces]. *Materialy RNTK III nauchnye chteniya im. A.S. Popova «Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem svyazi i radiotekhnicheskogo obespeche-niya v upravlenii aviatsiye», posvyashchennoy 95-letiyu so Dnya obrazovaniya voysk svyazi*. [Proceedings of 3rd Russian scientific and technical conference behalf of the A.S. Popov]. Voronezh, Military Training and Scientific Center of the Air Force Academy Named after Professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, 2014, pp. 42-44.
3. Makarenko S.I., Ivanov M.S., Popov S.A. *Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi s psevdosluchainoi perestroikoi rabochei chastity. Monografija* [Interference Resistance Communication Systems with Frequency-Hopping Spread Spectrum. Treatise]. St.Petersburg, Svoe Izdatel'stvo Publ., 2013. 166 p.
4. Legkov K.E. Metody povysheniya proizvoditel'nosti besprovodnykh mesh-setey spetsial'nogo naznacheniya [Methods of increase of productivity of wireless mesh-networks of a special purpose]. *T-Comm*, 2011, no. 3, pp. 46-48.
5. Kulakov M.S. Analiz osobennostey funktsionirovaniya mobil'nykh samoorganizuyushchikhsya setey MANET na urovne dostupa k srede MAC [Analysis of functioning of mobile self-organizing networks MANET on the media access control layer MAC]. *T-Comm*, 2014, no. 10, pp. 39-42.
6. Kulakov M.S. The application of self-organization algorithms for VDL-2 mode [Primenenie algoritmov samoorganizatsii dlia rezhima VDL-2]. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*, 2012, vol. 5, no. 5, pp. 58-62.
7. Aganesov A.V. Model' seti vozduшной radiosvyazi na osnove protokola sluchaynogo mnozhestvennogo dostupa CSMA/CA [Model of Radio Network with CSMA/CA Protocol]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2015, no. 1. pp. 67-97.
8. Aganesov A.V. Model' seti sputnikovoy svyazi na osnove protokola sluchaynogo mnozhestvennogo dostupa S Aloha [Model of Satellite Network with S-Aloha Protocol]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2015, no. 2, pp. 99-134.
9. Aganesov A.V. Analiz kachestva obsluzhivaniya v vozduшно-kosmicheskoy seti svyazi na osnove ierarkhicheskogo i detsentralizovannogo printsipov retranslyatsii informatsionnykh potokov [Quality of Service of Aerospace Network Based on Hierarchical and Decentralized Routing Protocols]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2015, no. 3, pp. 92-121.
10. Alekhin S.V., Voitkevich K.L. Modelirovanie protokola marshrutizatsii dlia besprovodnykh mobil'nykh setei [Routing Protocol's Simulation for Wireless Mobile Networks]. *Elektrosvyaz'*, 2014, no. 7, pp. 7-8.
11. Vasiliev D.S., Abilov A.V. Povyshenie kachestva peredachi potokovykh dannykh v setyakh BPLA s pomoshch'yu PULL-PUSH-podkhoda [Improving Quality of Video Streaming in Fanets Using Pull-Push Approach]. *Infokommunikatsionnye tehnologii*, 2014, vol. 12, no 4, pp. 45-50.
12. Belousov Ye.L., Bryantsev V.Ph., Voytkovich K.L., Keystovich A.V., Sayphetdinov Kh.I. Voprosy sozdaniia aviatsionnogo radiosviaznogo oborudovaniia po printsipu «programmiruemoie radio» [Issues of Developing Aviation Radio Communication Equipment on "Software-Defined Radio" Principle]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2012, vol. 95, no. 2, pp. 11-18.
13. Mal'tsev G.N., Tsvetkov K.Iu., Rodionov A.V., Akmolov A.F., Efimov S.N., Kosarevich D.V., Viktorov E.A. Kontsepsiya postroeniya raznovysotnoy mnogosputnikovoy sistemy svyazi s mobil'nymi abonentami [The concept of building different multisatellite communications system with mobile subscribers]. *Trudy Voenno-Kosmicheskoi Akademii Imeni A. F. Mozhaiskogo*, 2011, no. 630, pp. 5-10.
14. Chen. C., Ekici E. A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks. *Wireless Networks*, 2005, no. 11, pp. 507–521. doi: 10.1007/s11276-005-1772-1.
15. Durrezi A., Dash D., Anderson B.L., Kannan R., Kota S., Jain R. Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture. *Aerospace Conference, IEEE*, 2004, vol. 2, pp. 1086-1104. doi: 10.1109/AERO.2004.1367710.
16. Akyildiz I. F., Ekici E., Bender M. D. MLSR: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks. *IEEE/ACM transactions on networking*, 2002, vol. 10, no. 3, pp. 411-424. doi: 10.1109/TNET.2002.1012371.

Received 15.12.2015