

# Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 004.722

## МОДЕЛЬ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ СЕТИ СВЯЗИ С ИЕРАРХИЧЕСКИМ ПРИНЦИПОМ РЕТРАНСЛЯЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

**Аганесов Артур Валерьевич**

помощник начальника учебного отдела ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Минобороны РФ.  
E-mail: aganesov.artur@yandex.ru.

**Макаренко Сергей Иванович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского Минобороны РФ.  
E-mail: mak-serg@yandex.ru.

Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

**Аннотация:** Необходимость обеспечения глобальности информационного обеспечения полетов авиации различного назначения привела к обоснованию создания объединенных воздушно-космических сетей связи. Создание таких сетей актуализирует вопросы решения задач маршрутизации и ретрансляции сообщений в них. При этом необходимо обеспечить заданное качество обслуживания мультимедийного трафика, доля которого в сетях авиационной радиосвязи постоянно растет. В статье рассматривается модель воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков. При этом в сети воздушной радиосвязи используется протокол CSMA/CA, а в сети спутниковой связи - протокол S-Aloha. Результаты моделирования, представленные в работе, позволяют сделать вывод о низкой пропускной способности воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков, а также о необходимости внедрения децентрализованных принципов информационного обмена.

**Ключевые слова:** сеть радиосвязи, система спутниковой связи, CSMA/CA, S-Aloha.

### Актуальность

Анализ развития сетей связи [1-4] показал, что одним из направлений обеспечения глобальности информационного обеспечения полетов авиации различного назначения является создание объединенных воздушно-космических сетей связи (ВКСС). При этом использование ВКСС в интересах обслуживания абонентов передающих мультимедийный трафик (речь, видео, изображения), повышает требования к качеству его обслуживания (QoS - Quality of Service).

Рассмотрен вопрос создания модели объединенной ВКСС, построенной на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков. Схема такой ВКСС представлена на рис. 1. 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 [4, 5], в которых рассматриваются модели сети воздушной радиосвязи (СВРС), а именно: модель на основе протокола CSMA/CA и модель отдельной сети спутниковой связи (ССС) на основе протокола S-Aloha. Предлагается исследовать качество обслуживания трафика и количества обслуживаемых абонентов на основе модели ВКСС.

### Постановка задачи

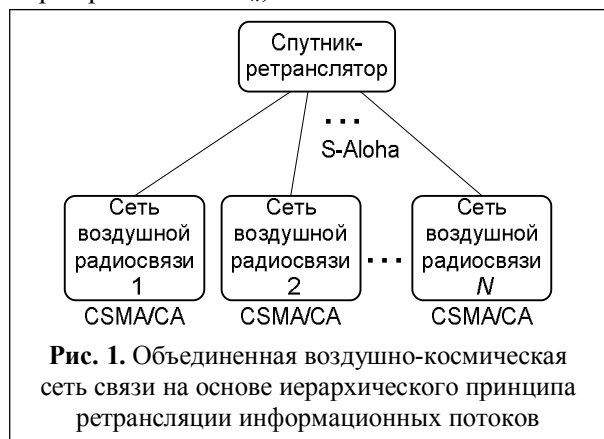
Для формализации процесса информационного обмена в ВКСС с иерархическим принципом ретрансляции введем следующие обозначения:

$M_n$  – количество абонентов  $n$ -ой СВРС;

$C_n$  – пропускная способность канала множественного доступа  $n$ -ой СВРС [бит/с];

$C_{CCC}$  – пропускная способность канала множественного доступа CCC [бит/с];

$S_n$  – относительная пропускная способность канала множественного доступа  $n$ -ой СВРС нормированная к  $C_n$ ;



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

$S_{CCC}$  – относительная пропускная способность канала множественного доступа CCC 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 CCC [бит/с];

$C_{eИНС}$  – эффективная пропускная способность ИНС [бит/с];

$D_{mes n}$  – объем пакета в  $n$ -ой СВРС [бит];

$D_{mes CCC}$  – объем пакета в CCC [бит];

$D_{mes ИНС}$  – объем пакета в ИНС [бит];

$d_{max n}$  – радиус сети  $n$ -ой СВРС [км];

$d_{sor}$  – расстояние до СР образующего CCC [км]. Для низкоорбитальных CCC  $d_{sor}=500..1500$  км, для геостационарных CCC  $d_{sor}=40000$  км, для высокоэллиптических CCC  $d_{sor}>40000$  км;

$c$  – скорость распространения электромагнитных волн [км/с];

$K_n$  – настойчивость протокола множественного доступа  $n$ -ой СВРС, определяется как число попыток передачи пакета в случае если предыдущие попытки оканчиваются неудачей;

$K_{CCC}$  – настойчивость протокола множественного доступа S-Aloha, используемого в CCC;

$\lambda_{m,n}$  – интенсивность трафика, поступающего от  $m$ -го абонента  $n$ -ой СВРС [бит/с];

$k_{вн n}=0..1$  – коэффициент внешнего трафика  $n$ -ой СВРС, определяется как доля трафика СВРС, передаваемого через CCC;

$k_{вн n,j}=0..1$  – коэффициент внешнего трафика направляемого из  $n$ -ой СВРС в  $j$ -ую СВРС через CCC;

$k_{кв}=0..1$  – 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 1 пакет квитанции об их успешном приеме;

$\Lambda_n$  – 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 CCC 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 CCC [с];

$T_{зад ИНС}$  – задержка передачи пакета по ИНС [с].

Рамки исследования: протокол связи в СВРС – CSMA/CA; протокол связи в CCC – S-Aloha; все СВРС соединены через CCC по принципу «звезды», причем каждая СВРС доступна из другой сети за один шаг ретрансляции через CCC; 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 ВКСС, использующей иерархический принцип ретрансляции информационных потоков.

### Решение задачи

Для получения начальных условий с целью расчета временных параметров ВКСС и про-

пусковых способностей информационных направлений связи (ИНС) сформируем начальные расчетные значения интенсивностей трафика в различных сегментах сети.

В каждой  $n$ -ой СВРС от абонентов в сеть поступает поток с интенсивностью:

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

Из  $n$ -ой сети СВРС в другие СВРС через ССС отправляется поток с интенсивностью, определяемой коэффициентом  $k_{вн n}$ :

$$k_{вн n} \Lambda_n, \quad (2)$$

где  $k_{вн n} = \sum_{j=1}^N k_{вн n, j}$ , при этом в данной сумме  $k_{вн n, n} = 0$ .

Также в  $n$ -ую сеть СВРС из других  $j$ -ых СВРС через ССС отправляется поток внешнего трафика, равный:

$$\sum_{j=1}^N k_{вн j, n} \Lambda_j, \quad (3)$$

при этом в данной сумме  $k_{вн n, n} = 0$ .

Таким образом, интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной  $n$ -ой сети СВРС, будет равна

$$\Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N k_{вн j, n} \Lambda_j. \quad (4)$$

Рассмотрим трафик, поступающий в ССС. Интенсивность данного трафика с учетом того, что при иерархической системе обмена информацией все межсетевые соединения «СВРС-СВРС» идут через ССС, будет равно:

$$\sum_{n=1}^N k_{вн n} \Lambda_n. \quad (5)$$

Общая схема распределений интенсивности информационного трафика, циркулирующего в ВКСС без учета квитирования, представлена на рис. 2.

Если учесть, что на каждые  $v$  пакетов в ВКСС отправляется 1 пакет квитанции об успешном приеме этих пакетов, то коэффициент дополнительного трафика квитанций будет

равен  $k_{кв} = 1/v$ . С учетом этого, выражения (4) и (5) примут окончательный вид:

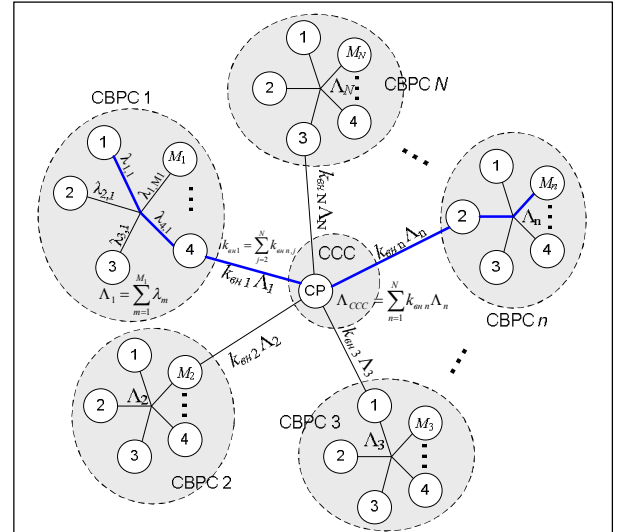


Рис. 2. Общая схема распределения интенсивностей информационного трафика, циркулирующего в ВКСС без учета квитирования

- интенсивность трафика, циркулирующего в произвольной  $n$ -ой СВРС:

$$\Lambda_{СВРС n} = (1 + k_{кв}) \left( \Lambda_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N k_{вн j, n} \Lambda_j \right), \quad (6)$$

- интенсивность трафика в ССС:

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

Рассмотрим время передачи сообщений в такой сети. Общий вид ИНС в иерархической ВКСС представлен на рис. 3.

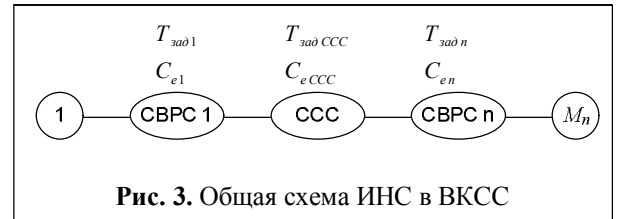


Рис. 3. Общая схема ИНС в ВКСС

В ИНС, представленной на рис. 3, время задержки передачи пакета между абонентами  $n$ -ой и  $j$ -ой СВРС будет являться суммой задержек пакета на всех звеньях ИНС:

$$T_{зад ИНС} = T_{зад n} + T_{зад ССС} + T_{зад j}.$$

при этом, как показано в работах [4, 5], время задержки пакета при передаче по всем отдельным звеньям с учетом выражений (6) и (7) будет определяться как:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA [4]:

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

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

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

2) для ССС на основе протокола S-Aloha [5]:

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

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

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

при этом, как показано в работах [4, 5], эффективные пропускные способности для отдельных звеньев с учетом выражений (6) и (7) будут определяться как:

1) для СВРС на основе протокола CSMA/CA [4]:

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

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

2) для ССС на основе протокола S-Aloha [5]:

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

Показатели  $T_{\text{зад ИНС}}$  и  $C_{e \text{ ИНС}}$  формируют показатели качества обслуживания ВКСС. Общая схема аналитических вычислений для модели ВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков представлена на рис. 4.

### Моделирование

Для численной оценки показателей качества функционирования ВКСС проведем предварительное упрощение модели ВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков. Дополнительно введем следующие допущения:

- информационный трафик, циркулирующий во всех СВРС, имеет равную интенсивность  $\Lambda_1$ ;

- все СВРС имеют одинаковые параметры: объем пакета, радиус сети, настойчивость 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:  $k_{\text{вн } i, j} = k_{\text{вн}} / (N-1)$ .

В результате данных упрощений схема аналитических вычислений для модели ВКСС на основе иерархического принципа ретрансляции информационных потоков примет вид, представленный на рис. 5.

Проведем исследование возможностей по обслуживанию абонентов для ВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков при ограничениях, которые соответствуют техническим характеристикам реальных средств связи [1, 4, 5]:

- базовая интенсивность информационного потока в СВРС составляет  $\lambda = 1, 2$  кбит/с;

- количество абонентов СВРС  $M = 1 \dots 20$ , при этом каждый из абонентов генерирует трафик  $\lambda$ ;

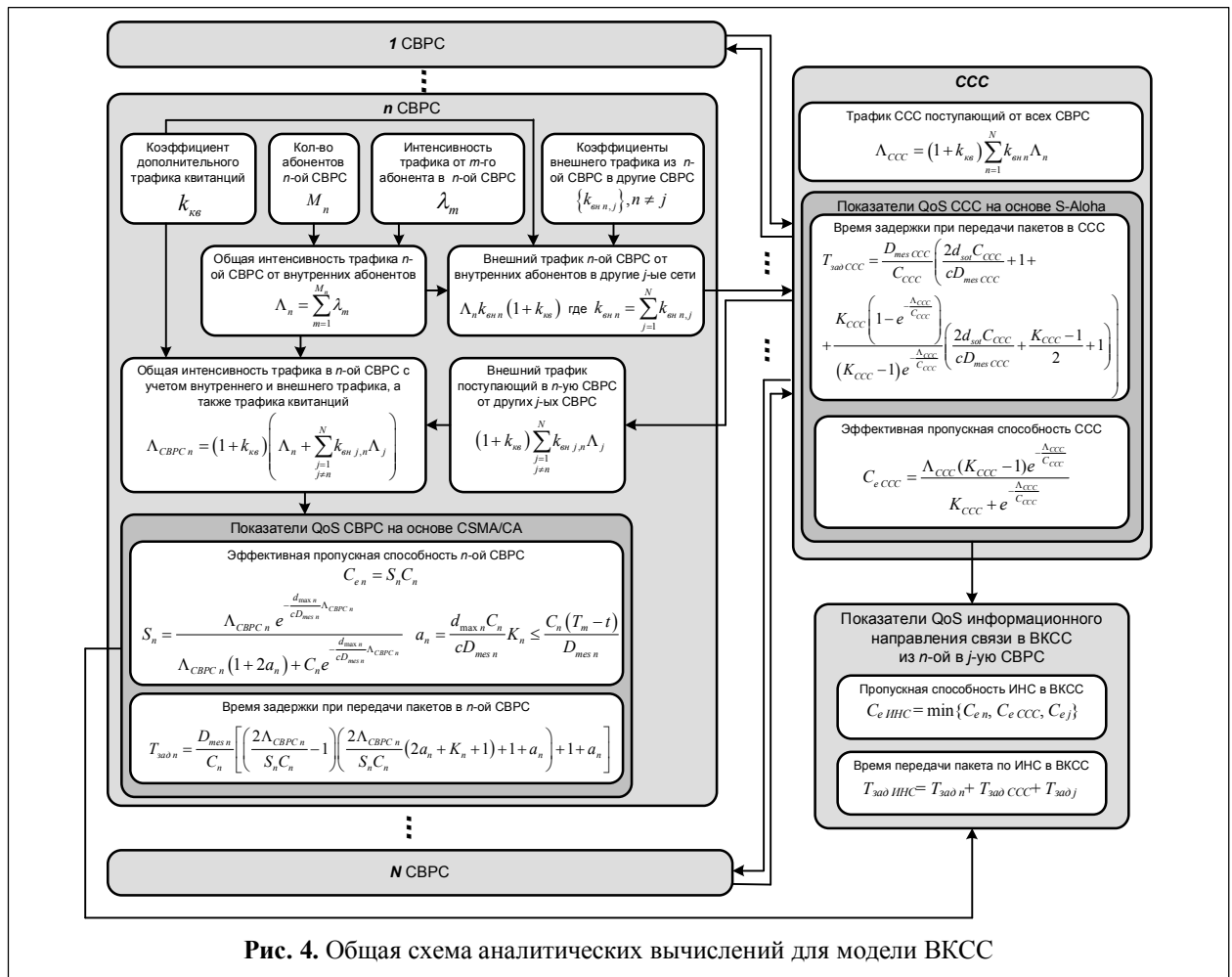


Рис. 4. Общая схема аналитических вычислений для модели ВКСС

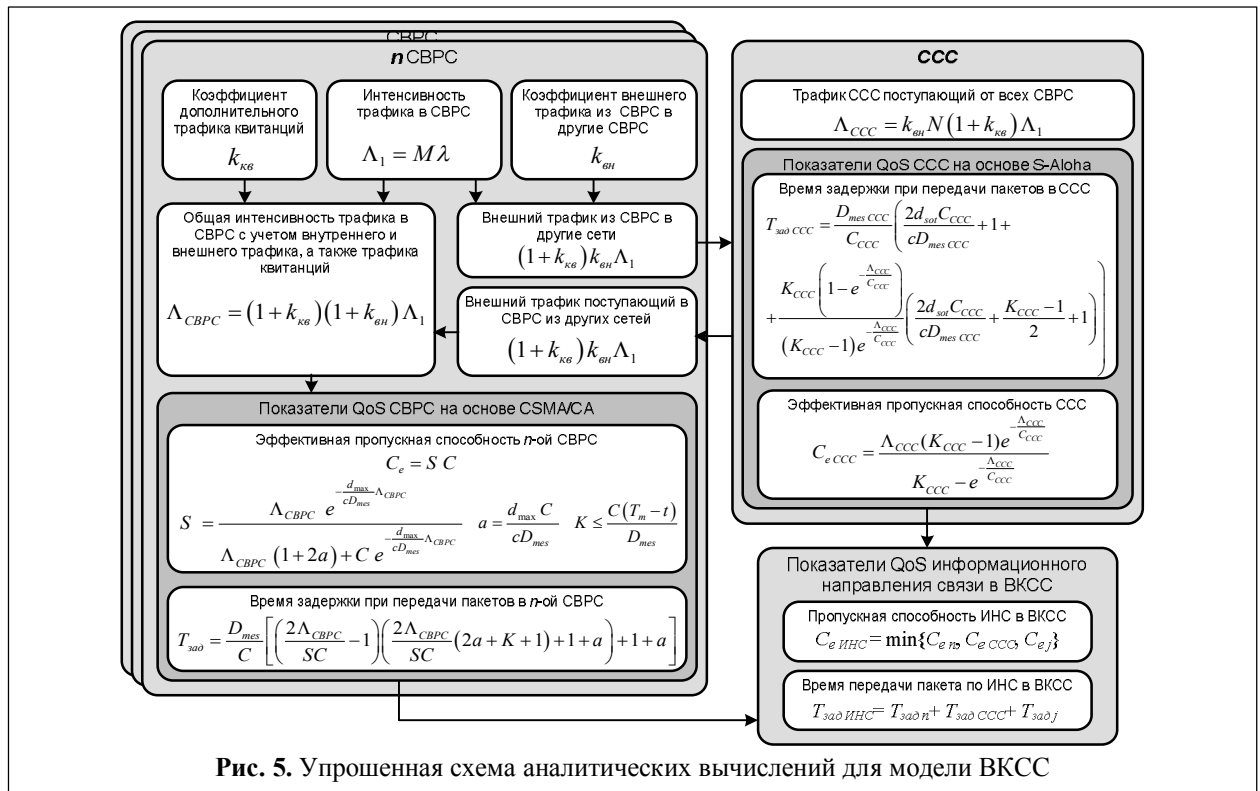


Рис. 5. Упрощенная схема аналитических вычислений для модели ВКСС

- пропускная способность каналов множественного доступа для СВРС равна  $C=48$  кбит/с, для ССС - 13,3 кбит/с;
- объемы пакетов в СВРС ( $D_{mes}$ ) и ССС ( $D_{mes\ ССС}$ ) имеют равные значения - 256 бит;
- коэффициенты настойчивости протокола множественного доступа в СВРС и ССС равны и имеют значения  $K=K_{ССС}=16$ ;
- радиус СВРС равен  $d_{max}=250$  км.

Как показали результаты моделирования, ввиду того, что пропускная способность спутникового сегмента ВКСС существенно ниже пропускной способности СВРС (рис. 6), общая пропускная способность системы определяется пропускной способностью именно ССС сегмента (рис. 8). Такой же вывод можно сделать и о времени задержки передачи сообщений в ИНС (рис. 7, рис. 9) – именно спутниковый сегмент ВКСС определяет задержку передачи по ИНС.

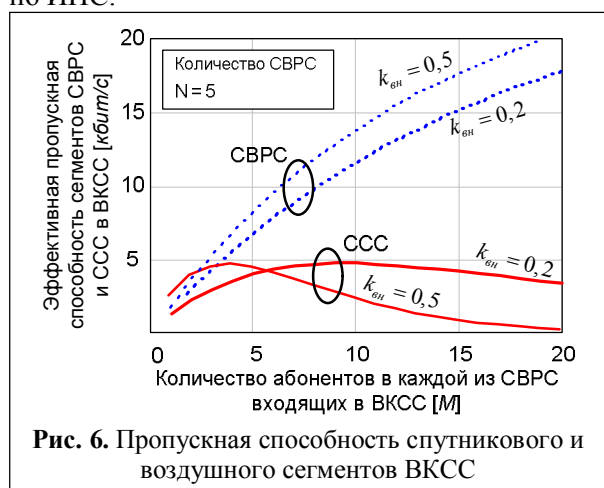


Рис. 6. Пропускная способность спутникового и воздушного сегментов ВКСС

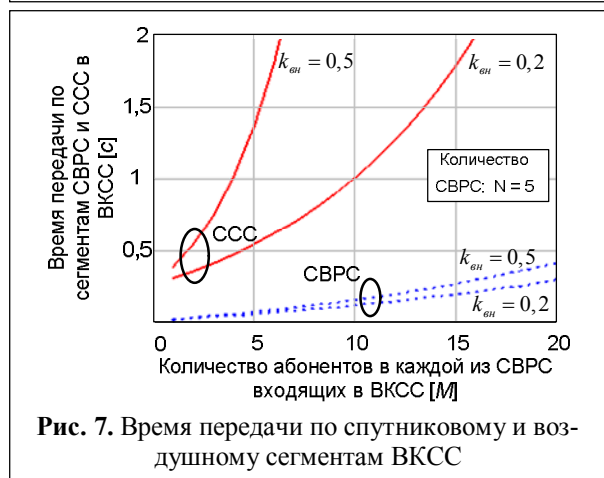


Рис. 7. Время передачи по спутниковому и воздушному сегментам ВКСС

Наиболее существенным фактором, определяющим QoS в ВКСС, является коэффициент внешнего трафика  $k_{вн}$ . По мере роста доли тра-

фика, ретранслируемого в другие СВРС, нагрузка на ССС увеличивается. С учетом того, что именно ССС является звеном в ИНС с наименьшей пропускной способностью, это приводит к резкому увеличению времени передачи сообщений по ИНС в ВКСС (рис. 9). В результате значения ВКСС не позволяют обслужить мультимедийный трафик (речь, видео, изображения, передаваемые в реальном времени), так как требуемое время задержки при его передаче не должно превышать 0,5-0,6 с.

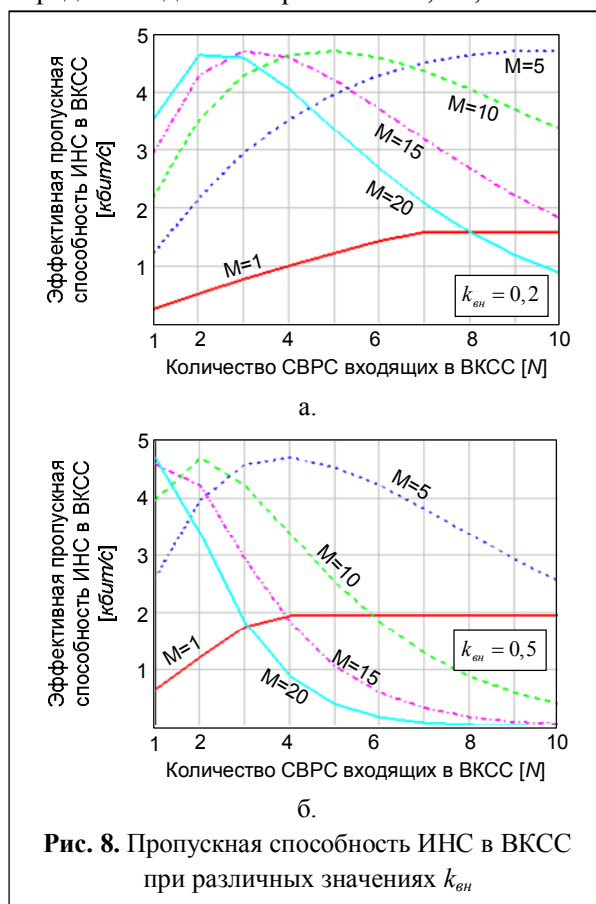


Рис. 8. Пропускная способность ИНС в ВКСС при различных значениях  $k_{вн}$

Решение задачи обеспечения QoS мультимедийного трафика в ВКСС может решаться двумя концептуальными способами:

- 1) расширение пропускной способности каналов связи, что потребует изменения регламента распределения частот авиационной радиосвязи, а также разработки новых средств авиационной связи с новыми информационно-ёмкими созвездиями сигналов и адаптивными схемами сигнально-кодовых конструкций;

2) разработкой рациональной структуры ретрансляции трафика в ВКСС, что потребует изменения только программного обеспечения средств авиационной связи.

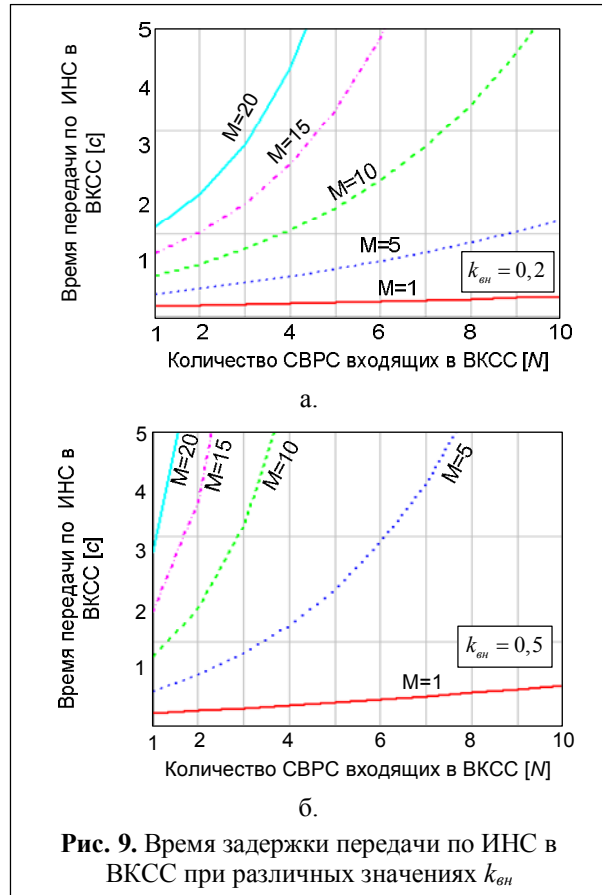


Рис. 9. Время задержки передачи по ИНС в ВКСС при различных значениях  $k_{вн}$

Второй способ обеспечения QoS трафика в ВКСС является более экономически целесообразным и может быть реализован за счет внедрения в СВРС Mesh-технологий децентрализованного обмена. Данные технологии могут быть реализованы в качестве дополнительного программного обеспечения средств авиационной связи в условиях перехода последних к технологии «программного радио» [6].

### Выводы

Предложенная модель ВКСС позволяет исследовать качество обслуживания абонентов в 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 [6-8]. К элементам новизны полученной модели относятся рассмотрение сложной многоуровневой сети связи, основу которой составляет ССС, а нижний уровень образован СВРС. В отличие от известных моделей многоуровневых сетей связи на основе ССС, представленная модель учитывает специфику протоколов информационного обмена в СВРС управления авиацией. Результаты моделирования, представленные в работе, позволяют сделать вывод о низкой пропускной способности ВКСС с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков, а также о необходимости разработки ВКСС на основе децентрализованных принципов. Таким образом, в дальнейшем планируется развитие представленной модели за счет учета возможностей межсетевых обмена в СВРС при внедрении в них Mesh-технологий.

### Литература

1. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы / Под общ. ред. С. Иванова. М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2006. 695 с.
2. Авиация ПВО России и научно технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография / под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 815 с.
3. Киткаев С.В. Концепция технической модернизации средств авиационной электросвязи России // Электросвязь. 2009. № 5. С. 29-33.
4. 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.
5. Аганесов А.В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha // Системы управления, связи и безопасности. 2015. №2. С. 99-134.
6. 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.
7. 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.

8. Гоцуцов С.Ю. Совершенствование автоматизированных систем управления воздушным движением на основе технологий коммутации пакетов. Дис. ... к.т.н. по спец. 05.22.13. М.: МИИГА, 2007, 211 с.

9. Chen C., Ekici E. A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks // *Wireless Networks*. 2005. no. 11. pp. 507–521.

10. Chen C., Ekici E., Akyildiz I. F. Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks // *Proceedings of the 5-th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia*. ACM, 2002. pp. 109-116.

11. Durresi 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.

12. Akyildiz I.F., Ekici E., Bender M.D. MLRS: A Novel Routing Algorithm for Multilayered Satellite IP Networks // *IEEE/ACM transactions on networking*.

Vol. 10. No. 3. 2002. pp. 411-424.

13. Мальцев Г.Н., Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмолов А.Ф., Ефимов С.Н., Косаревич Д.В., Викторов Е.А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2011. № 630. С. 5-10.

14. Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н., Викторов Е. А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: баллистическое построение // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2012. № 634. С. 45-55.

15. Цветков К. Ю., Родионов А. В., Акмолов А. Ф., Ефимов С. Н., Косаревич Д.В., Викторов Е. А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: пропускная способность межспутниковых и фидерных радиолиний // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2011. № 633. С. 108-123.

Поступила 10 июня 2015 г.

English

### Aerospace communications network model with traffic routing hierarchical principle

**Artur Valeryevich Aganesov** – Assistant Administrator Curriculum and Instruction Branch MAC Airforce "Air Force Academy named after prof. N. E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh) Ministry of Defence.

*E-mail:* aganesov.artur@yandex.ru.

**Sergey Ivanovich Makarenko** – Cand.Tech.Sci., Associate Professor, Department of networks and communications systems of space complexes "Military space academy named after A.F. Mozhaysky", Ministry of Defence.

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

*Address:* Zhdanovskaya Str., 13, St. Petersburg.

*Abstract:* Nowadays various options for development of integrated aerospace communications networks are considered to ensure comprehensive aircraft flight data support. Solving problems of routing and forwarding messages becomes vital when developing such networks. When solving these tasks it is necessary to ensure specified service quality of multimedia traffic, the proportion of which constantly grows in aircraft radio communication networks. The article examines aerospace communications network model with traffic routing hierarchical principle. Thus air radio communication network uses CSMA/CA protocol and satellite network communication uses S-Aloha protocol. The network under consideration is featured by topology "star", the center of which is communication satellite network. Analytical expressions for calculation of total transfer time and transmission capacity of information communications lines in network were obtained in this work. Performed model experiment showed that transmission capacity of such network is determined by transmission capacity of satellite communication system. The results of model experiment given in the work enable to make a conclusion about low transmission capacity of aerospace communications network with traffic routing hierarchical principle and also about need to implement decentralized principles in information exchange. Model and model experiment results provided in this work are proposed to use for justification of perspective aerospace communications networks structure and also for protocol and algorithmic solutions in routing multimedia traffic of aircraft flights information support.

*Key words:* radio communication network, satellite communication system, CSMA/CA, S-Aloha.



**References**

1. Weapons and technologies in Russia. Encyclopedia. The XXI century. Command, communication and radioelectronic warfare systems. - Ed. by S. Ivanov. M.: Pub. house M.: Izd. dom «Oruzhiye i tekhnologii», 2006. 695 p.
2. Air defense aviation in Russia and scientific and technological progress: warfare systems yesterday, today, tomorrow: monografiya. - pod red. Ye. A. Fedosova. - M.: Drofa, 2005. - 815 p.
3. Kitkayev S.V. <mailto:kitkaev\_sv@fana.ru> Technical modernization concept of aeronautical telecommunication in Russia. - Elektrosvyaz. 2009. No. 5. P. 29-33.
4. Aganesov A.V. Air radio communication network model based on CSMA/CA accidental multiple access protocol. - Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2015. No. 1. P. 67-97.
5. Aganesov A.V. Satellite communication network model based on S-Aloha accidental multiple access protocol. - Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2015. No. 2. P. 99-134.
6. Belousov E. L., Bryantsev V. F., Voytkovich K. L., Keystovich A. V., Sayfetdinov H. I. Development problems of aircraft radio communications equipment by principle "programmable radio" - Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva. 2012. No. 2 (95). P. 11-18.
7. Voytkovich K.L. Traffic control methods in ground and air based communications networks. Dis. ... d.t.n. po spets. 05.13.01. N.Novgorod: NPP «Polet», 1998. 375 p.
8. Gotsutsov S.Yu. Improvement of automated control systems for air traffic based on packet-switched technology. . Dis. ... k.t.n. po spets. 05.22.13. M.: MIIGA, 2007, 211 p.
9. Chen. C., Ekici E. A Routing Protocol for Hierarchical LEO/MEO Satellite IP Networks. - Wireless Networks. 2005. no. 11. pp. 507-521.
10. Chen C., Ekici E., Akyildiz I. F. Satellite Grouping and Routing Protocol for LEO/MEO Satellite IP Networks. - Proceedings of the 5-th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia. ACM, 2002. pp. 109-116.
11. Durresti 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.
12. 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. pp. 411-424.
13. Maltsev G. N., Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F., Yefimov S.N., Kosarevich D. V., Viktorov E.A. Development concept of multi-elevation multi-satellite communication system with mobile users. - Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhayskogo. 2011. No. 630. P. 5-10.
14. Tsvetkov K. Yu., Radionov A. V., Akmolov A. F., Yefimov S. N., Viktorov E. A. Development concept of multi-elevation multi-satellite communication system with mobile users: ballistic configuration. - Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhayskogo. 2012. No. 634. P. 45-55.
15. Tsvetkov K. Yu., Radionov A. V., Akmolov A. F., Yefimov S. N., Kosarevich D. V., Viktorov E. A. Development concept of multi-elevation multi-satellite communication system with mobile users: transmission capacity of inter-satellite and feeder radio lines. - Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhayskogo. 2011. No. 633. Page 108-123.