

Предложения по созданию и функционированию многоспутниковой системы связи на основе разновысотной орбитальной группировки

А.Ф. Акмоллов¹, А.А. Ковальский^{1*}, С.Н. Ефимов¹

¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

*Адрес для переписки: sake636@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 29.11.2019

Принята к публикации 20.03.2020

Ссылка для цитирования: Акмоллов А.Ф., Ковальский А.А., Ефимов С.Н. Предложения по созданию и функционированию многоспутниковой системы связи на основе разновысотной орбитальной группировки // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 22–31. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-22-31

Аннотация: Статья посвящена особенностям построения и функционирования многоспутниковой системы связи (МСС) с мобильными абонентами на основе орбитальной группировки разновысотных спутников-ретрансляторов. В рамках проводимых исследований в статье изложены следующие ключевые научно-технические решения по разработке разновысотной многоспутниковой системы связи (РМСС): концепция создания, баллистическое построение, анализ информационной нагрузки, организация информационного обмена, модель сети. Показано, что данный подход в построении РМСС не только не уступает таким зарубежным МСС как «Иридиум», но и по отдельным показателям превосходит ее.

Ключевые слова: концепция создания, баллистическое построение, организация информационного обмена, модель сети, основной и резервный канал управления, матрица распределения информационной нагрузки, межспутниковая радиолиния, разновысотная многоспутниковая система связи.

1. Введение

В настоящее время развитие и эффективное использование многоспутниковых низкоорбитальных космических систем является одним из перспективных направлений информационного обеспечения потребителей различных классов [1–4].

Обеспечение телекоммуникационными услугами северных территорий России, организации воздушного движения по кроссполярным трассам, обеспечения обмена информацией с воздушными, морскими платформами и космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли является областью возможного эффективного применения низкоорбитальной многоспутниковой системы связи (МСС) и приоритетным направлением развития телекоммуникационной инфраструктуры [5–8].

Низкоорбитальные МСС предназначены для передачи коротких сообщений на сравнительно низких скоростях пакетной передачи данных, но с возможностью покрытия своими услугами всей поверхности Земли. В соответствии с функциональными возможностями каждая из систем име-

ет определенный круг потенциальных пользователей и определяет пути своего дальнейшего развития. Основными областями применения МСС являются [9–11]:

- оказание персональных услуг связи в глобальной зоне обслуживания;
- создание административных сетей связи и передачи данных общего пользования в регионах с неразвитой инфраструктурой наземных сетей;
- создание выделенных ведомственных и корпоративных сетей, независимых от сетей общего пользования;
- обеспечение связью, контроль состояния и местоположения подвижных транспортных средств (наземных, морских, воздушных);
- экологический и промышленный мониторинг, сбор геодезической, гидрологической, метеорологической и других видов информации.

2. Баллистическое построение и организация информационного обмена РМСС

Альтернативой использования низкоорбитальных систем является разработка МСС на основе

разновысотной орбитальной группировки (ОГ). Основным назначением проектируемой разновысотной многоспутниковой системы связи (РМСС) является обеспечение оперативного и глобального обмена по высокоскоростным каналам связи между мобильными абонентами различного базирования [12].

Создание РМСС предполагает решение ряда основных задач связи, изложенных в концепции [12]. Анализ существующих подходов к построению орбитальной группировки КА-ретрансляторов показывает ограниченность известных решений, основанных на применении геостационарных и высоковытянутых эллиптических орбит. Вследствие этого требуется разработка новой концепции построения МСС, базовые принципы которой были приведены в работе [2].

Структурно РМСС состоит из космического и наземного сегментов (рисунок 1). В состав космического сегмента РМСС входят 32 КА, размещенные на разновысотных околополярных круговых орбитах высотой 5700 и 1070 км, образующих верхний и нижний уровни спутников-ретрансляторов, соответственно. При этом на нижнем уровне находятся 24 КА-1 первого уровня, а на верхнем уровне – восемь КА-2 второго уровня [3]. Наземный сегмент МСС содержит шлюзовые станции (ШС), центр управления системой и биллинговый центр МСС, а также спутниковые терминалы мобильных абонентов воздушного, морского и наземного базирования [13].

ОГ КА нижнего уровня содержит четыре орбитальные плоскости со сдвигом в 45° по 6 КА-1 в каждой. В свою очередь построения ОГ КА второго уровня имеет 2 варианта:

вариант № 1 – орбитальная группировка КА второго яруса содержит 8 КА в одной плоскости;

вариант № 2 – то же, но в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по 4 КА в каждой плоскости.

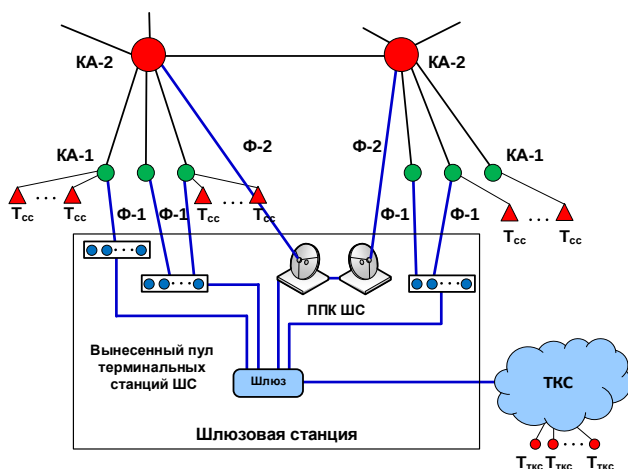


Рис. 1. Структурная схема сегментов сети РМСС

Fig. 1. Structural Scheme of Network Segments DMSCS

Построение орбитальных группировок КА первого и второго уровней РМСС позволяет выделить следующие тракты информационного обмена межспутниковых радиолиний [13].

1) Постоянные цифровые высокоскоростные тракты, полученные путем кроссмультимплексирования постоянных межспутниковых радиолиний между КА второго уровня в соответствии с используемым вариантом построения группировки КА верхнего уровня (рисунок 2):

вариант № 1 – постоянные радиолинии фиксированной длины между 8 КА одной плоскости (рисунок 2а): построение обеспечивает для каждого КА прямую видимость одновременно четырех соседних с ним КА, что позволяет получить структуру избыточного кольца и обеспечить высокую вероятность покрытия территории Российской Федерации, даже в случае выхода из строя отдельных КА; при этом между КА второго уровня организуются постоянные цифровые высокоскоростные тракты фиксированной длины;

вариант № 2 – постоянные радиолинии фиксированной длины между 4 КА одной плоскости и переменной длины между КА в каждой из двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рисунок 2б): структура орбитальной группировки КА верхнего яруса обеспечивает двукратное покрытие всей территории Российской Федерации, а также обеспечивает однократное покрытие зон экваториального пояса; при этом, как и в варианте № 1 между КА второго уровня также организуются постоянные цифровые высокоскоростные тракты, в каждом кольце из 4 КА цифровые тракты имеют фиксированную длину, а наличие между кольцами постоянных цифровых высокоскоростных трактов переменной длины обеспечивает как возможность обмена информацией между КА, так и связность двух кольцевых фрагментов РМСС между собой.

2) Временные цифровые среднескоростные тракты – временные межспутниковые радиолинии КА первого и второго уровней и фидерные радиолинии между КА второго уровня и приемно-передающими комплексами шлюзовых станций (ППК ШС) (рисунок 2с), полученные путем кроссмультимплексирования временных радиолиний, организуемых в пятне покрытия между КА первого и второго уровней, а также фидерные радиолинии между КА второго уровня и ППК ШС.

Передача информационных потоков по межспутниковым радиолиниям между КА первого и второго уровня, а также по кроссмультимплексированным радиолиниям между КА второго уровня предлагается осуществлять с помощью технологии асинхронного режима передачи (АТМ, от англ. Asynchronous Transfer Mode). Для этого в состав КА обоих уровней включены АТМ-мультиплексоры, проводящие мультиплексирование/демультиплексирование цифровых АТМ-потоков временных и постоянных межспутниковых радиолиний [14, 15].

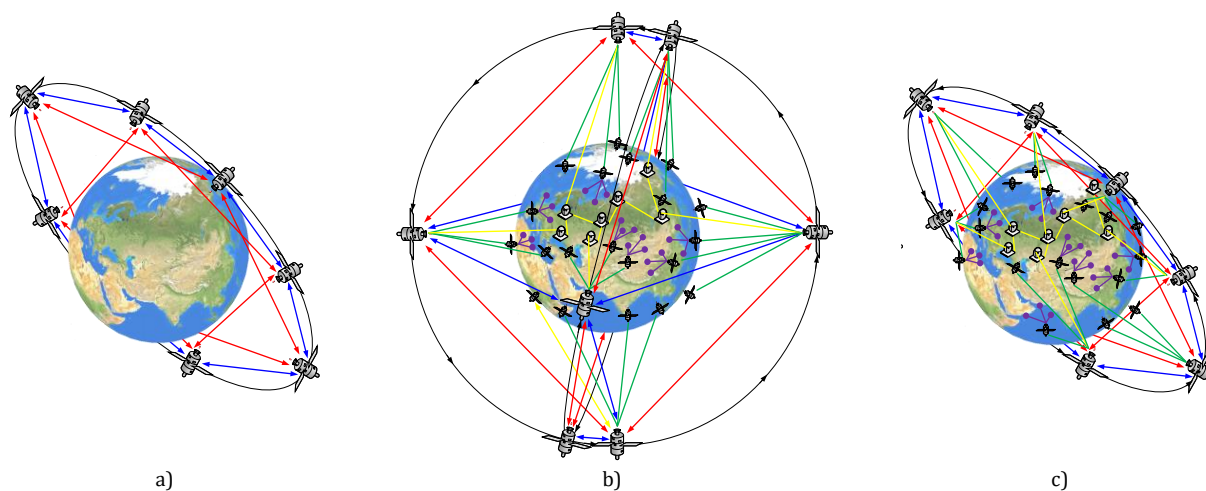


Рис 2. Межспутниковые радиолинии между КА в РМСС

Fig. 2. Inter-Satellite Radio Links Between S and DHMSCS

Кроме того, в состав бортовой коммуникационной аппаратуры КА предлагается включить кросс-мультиплексор, в состав которого входят АТМ-мультиплексоры и АТМ-коммутатор, который обеспечивает коммутацию и передачу АТМ-ячеек в соответствии с протоколами обмена информацией, используемыми в сетях с АТМ технологией [14, 15]. Для решения задач управления информационным обменом в кластере второго уровня реализуются каналы управления между связными процессорами КА второго уровня по принципу «каждый с каждым» [16, 17]. Данные каналы предлагается ор-

ганизовать за счет основных и резервных постоянных виртуальных каналов. Резервные виртуальные каналы указанного типа реализуются в целях повышения надежности функционирования РМСС.

Реализация основного канала управления осуществляется по кратчайшему пути между взаимодействующими связными процессорами КА второго уровня. Резервные каналы используют обходной путь, который не должен иметь совпадающих ветвей в графе сети с основным каналом управления. Граф сети второго высотного уровня ОГ РМСС по варианту № 1 приводится на рисунке 3.

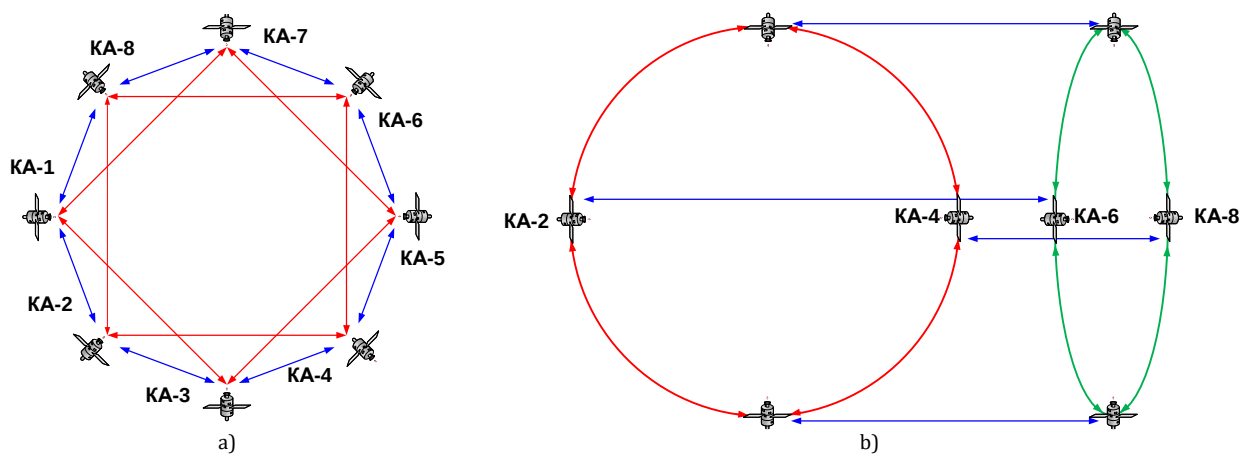


Рис 3. Граф сети высотного уровня на базе КА второго уровня орбитального построения РМСС: а) вариант № 1; б) вариант № 2

Fig. 3. High-Level Network Graph Based on Spacecraft of the Orbital Construction Second Level DHMSCS: a) Variant 1; b) Variant 2

Основные и резервные каналы управления между связными процессорами КА второго уровня для графа сети второго высотного уровня (рисунок 3а) проходят по путям, представленным в таблице 1. Данные пути включают в свой состав не более одного транзитного КА второго уровня. Нижняя часть таблицы 1 симметрична верхней относительно главной диагонали в части данных касательно варианта № 1.

Граф сети второго высотного уровня ОГ РМСС по варианту № 2 приводится на рисунке 3б. В таблице 1 представлены основные и резервные каналы управления между КА второго уровня для данного графа. Представленные маршруты включают в свой состав до 2 транзитных КА второго уровня. Нижняя часть таблицы 1 также симметрична относительно главной диагонали в части данных касательно варианта № 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные и резервные пути прохождения постоянных виртуальных каналов управления между связными процессорами КА второго уровня по варианту № 1 / № 2

TABLE 1. The Main and Backup Passage Paths of Permanent Virtual Control Channels Between the Communication Processors of the Second-Level SC According to the Variant 1 / 2

Номер КА	1	2	3	4	5	6	7	8
Маршрут передачи информации	осн./ осн.	1-2/1-2	1-3/1-2-3	1-3-4/1-4	1-7-5/1-5	1-7-6/1-2-6	1-7/1-2-3-7	1-8/1-4-8
	рез./ рез.	1-3-2/1-4-3-2	1-2-3/1-4-3	1-2-4/1-2-3-4	1-3-5/1-4-8-5	1-8-6/1-5-6	1-8-7/1-5-6-7	1-7-8/1-5-8
	1-2/1-2	осн./ осн.	2-3/2-3	2-4/2-1-4	2-4-5/2-1-5	2-4-6/2-6	2-8-7/2-3-7	2-8/2-1-5-8
	1-3-2/1-4-3-2	рез./ рез.	2-4-3/2-1-4-3	2-3-4/2-3-4	2-3-5/2-6-5	2-8-6/2-3-7-6	2-1-7/2-6-7	2-1-8/2-3-7-8
	1-3/1-2-3	2-3/2-3	осн./ осн.	3-4/3-4	3-5/3-2-1-5	3-5-6/3-7-6	3-5-7/3-7	3-1-8/3-7-8
	1-2-3/1-4-3	2-4-3/2-1-4-3	рез./ рез.	3-5-4/3-2-1-4	3-4-5/3-7-8-5	3-4-6/3-2-6	3-1-7/3-4-8-7	3-2-8/3-4-8
	1-3-4/1-4	2-4/2-1-4	3-4/3-4	осн./ осн.	4-5/4-8-5	4-6/4-1-5-6	4-6-7/4-8-7	4-6-8/4-8
	1-2-4/1-2-3-4	2-3-4/2-3-4	3-5-4/3-2-1-4	рез./ рез.	4-6-5/4-1-5	4-5-6/4-3-7-6	4-5-7/4-3-7	4-2-8/4-3-7-8
	1-7-5/1-5	2-1-5	3-5/3-2-1-5	4-5/4-8-5	осн./ осн.	5-6/5-6	5-7/5-6-7	5-7-8/5-8
	1-3-5/1-4-8-5	2-3-5/2-6-5	3-4-5/3-7-8-5	4-6-5/4-1-5	рез./ рез.	5-7-6/5-8-7-6	5-6-7/5-8-7	5-6-8/5-6-7-8
	1-7-6/1-2-6	2-4-6/2-6	3-5-6/3-7-6	4-6/4-1-5-6	5-6/5-6	осн./ осн.	6-7/6-7	6-8/6-5-8
	1-8-6/1-5-6	2-8-6/2-3-7-6	3-4-6/3-2-6	4-5-6/4-3-7-6	5-7-6/5-8-7-6	рез./ рез.	6-8-7/6-5-8-7	6-7-8/6-7-8
	1-7/1-2-3-7	2-8-7/2-3-7	3-5-7/3-7	4-6-7/4-8-7	5-7/5-6-7	6-7/6-7	осн./ осн.	7-8/7-8
	1-8-7/1-5-6-7	2-1-7/2-6-7	3-1-7/3-4-8-7	4-5-7/4-3-7	5-6-7/5-8-7	6-8-7/6-5-8-7	рез./ рез.	7-1-8/7-6-5-8
	1-8/1-4-8	2-8/2-1-5-8	3-1-8/3-7-8	4-6-8/4-8	5-7-8/5-8	6-8/6-5-8	8-7/7-8	осн./ осн.
	1-7-8/1-5-8	2-1-8/2-3-7-8	3-2-8/3-4-8	4-2-8/4-3-7-8	5-6-8/5-6-7-8	6-7-8/6-7-8	8-7-6/7-6-5-8	рез./ рез.

Представляется целесообразным унифицировать скорость передачи информации в межспутниковых радиолниях второго уровня. При этом встает задача правильного распределения потоков трафика, передаваемого между соседними КА второго уровня с учетом матрицы распределения информационной нагрузки и путей передачи (маршрутов) транзитного трафика. Поэтому уровень загрузки, создаваемыми потоками информации, должен быть одинаковым в каждой из 16 межспутниковых радиолний ОГ КА второго уровня.

3. Анализ информационной нагрузки в РМСС

Сравнительный анализ маршрутов передачи информации (см. таблицу 1) позволяет сделать вывод, что более предпочтительной представляется организация основных и резервных путей прохождения постоянных виртуальных каналов по варианту № 1, когда в одном кольце второго высотного уровня присутствуют восемь КА, при этом все существующие маршруты включают в свой состав не более 1 транзитного КА второго уровня. Ввиду этого в дальнейшем рассматривается орбитальное построение КА второго уровня по варианту № 1.

С учетом ожидаемого информационного тяготения абонентов РМСС для расчетов пропускной способности (ПС) межспутниковых радиолний кластера второго уровня принято допущение о том, что 60 % устанавливаемых соединений приходится на абонентов, находящихся в зоне покрытия одного КА второго уровня [16]. При этом информационная

нагрузка остальных 40 % соединений между абонентами зоны покрытия КА второго уровня распределяется в соответствии с рисунком 4.

С учетом динамики изменений зон покрытия КА второго уровня можно предположить симметричность матрицы распределения (таблица 2 в клетках слева от «/»), построенной согласно рисунку 4.

Межспутниковые линии связи обеспечивают передачу информации, относящуюся только к внешнему трафику КА второго уровня. С учетом последнего замечания приведенная матрица распределения, выраженная в процентах, представлена в таблице 2 в клетках справа от «/».

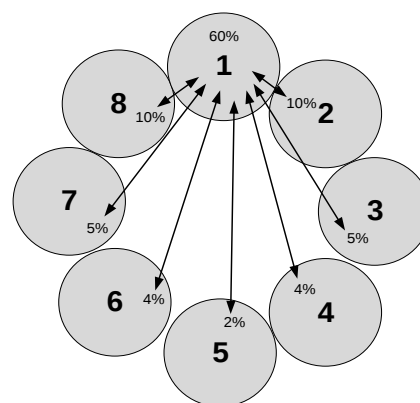


Рис. 4. Анализ информационной нагрузки, организуемых из зоны обслуживания одного КА второго уровня к абонентам зон других КА

Fig. 4. Information Load Analysis, Organized From the Service Area of the Second Level S to Subscriber's Zone of Other SC

В соответствии с первой строкой матрицы распределения на рисунке 5а в процентах представлена доля нагрузки, передаваемая по соответствующим межспутниковым радиолиниям от КА № 1 к остальным КА второго уровня. Общая нагрузка на каждую ветвь получается путем суммирования со-

ставляющих потоков, аналогичным образом создаваемых от других КА второго уровня в соответствии с «симметричной матрицей тяготения», представленной в таблице 2 (в клетках справа от «/»). Окончательный вид процентной загрузки ветвей представлен на рисунке 5б.

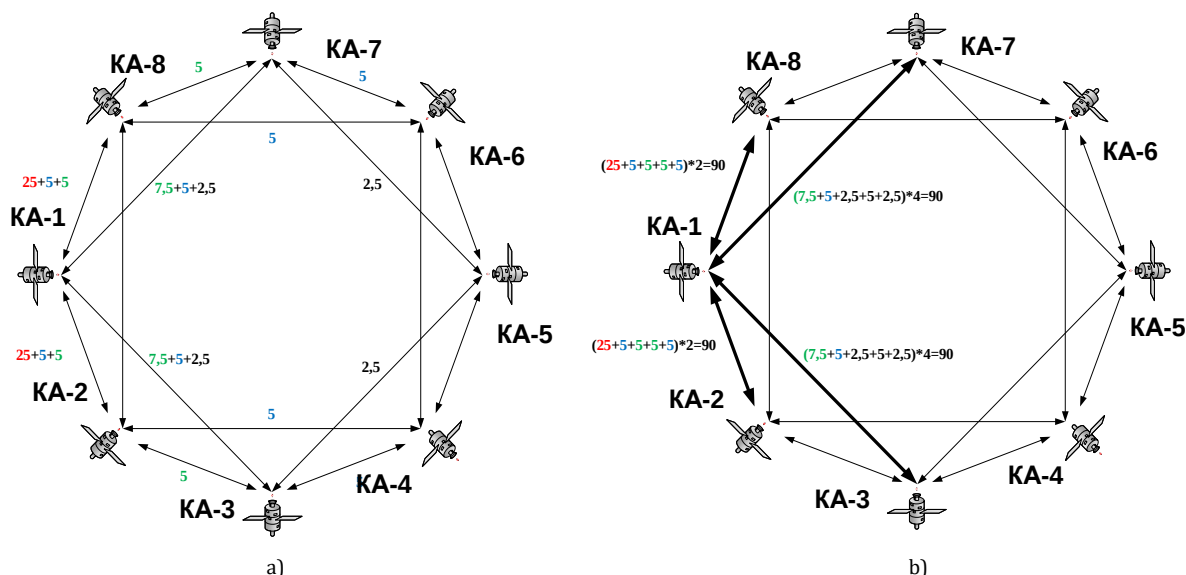


Рис. 5. Распределение нагрузки: а) от КА № 1 к остальным КА второго уровня; б) сети КА второго уровня

Fig. 5. Load Distribution a – from SC No. 1 to Other Second Level S; b – to the Second Level S Network

ТАБЛИЦА 2. Матрица распределения орбитальной группировки / нагрузки внешнего трафика (для второго высотного уровня)

TABLE 2. Orbital Constellation Distribution Matrix / External Traffic Loads (for the Second High Altitude Level)

Номер КА	1	2	3	4	5	6	7	8
1	60 / 0	10 / 25	5 / 12,5	4 / 10	2 / 5	4 / 10	5 / 12,5	10 / 25
2	10 / 25	60 / 0	10 / 25	5 / 12,5	4 / 10	2 / 5	4 / 10	5 / 12,5
3	5 / 12,5	10 / 25	60 / 0	10 / 25	5 / 12,5	4 / 10	2 / 5	4 / 10
4	4 / 10	5 / 12,5	10 / 25	60 / 0	10 / 25	5 / 12,5	4 / 10	2 / 5
5	2 / 5	4 / 10	5 / 12,5	10 / 25	60 / 0	10 / 25	5 / 12,5	4 / 10
6	4 / 10	2 / 5	4 / 10	5 / 12,5	10 / 25	60 / 0	10 / 25	5 / 12,5
7	5 / 12,5	4 / 10	2 / 5	4 / 10	5 / 12,5	10 / 25	60 / 0	10 / 25
8	10 / 25	5 / 12,5	4 / 10	2 / 5	4 / 10	5 / 12,5	10 / 25	60 / 0

4. Модель сети РМСС

Построим математическую модель сети РМСС. Для этого введем следующие обозначения:

L_1 – количество орбитальных плоскостей первого уровня РМСС;

K_1 – количество КА-1 в каждой плоскости первого уровня РМСС;

L_2 – количество орбитальных плоскостей второго уровня РМСС;

K_2 – количество КА-2 в каждой плоскости второго уровня РМСС.

Величины L и K определяют общее количество КА в орбитальной группировке МСС:

$$N = L \times K.$$

Тогда:

$N_1 = 24$ – количество КА-1 первого уровня РМСС;

$N_2 = 8$ – количество КА-2 второго уровня РМСС;

$N = 32$ – общее количество КА в ОГ РМСС,

$N = N_1 + N_2 = L_1 K_1 + L_2 K_2$;

$N_i = 66$ – общее количество КА в ОГ МСС «Иридиум», данный параметр вводится для возможности проведения сравнительного оценивания технических характеристик разрабатываемой РМСС и ее прототипа МСС «Иридиум» [18–21];

S_1 – количество вынесенных пулов ШС РМСС;

S_2 – количество ППК ШС в РМСС;

D – доля внутреннего трафика зоны покрытия КА (одинакова для КА-1 и КА-2);

d – доля внешнего трафика зоны покрытия КА (одинакова для КА-1 и КА-2).

Примем следующие допущения:

1) $D = 0,6$; $d = 0,4$ и $d = d_{cc} + d_{шс}$;

2) количество вынесенных пулов ШС не может быть больше количества КА-1, и количество ППК ШС не может быть больше количества КА-2 в МСС, т. е. должны выполняться неравенства:

$$0 \leq S_1 \leq N_1, \quad (1)$$

$$0 \leq S_2 \leq N_2 \quad (2)$$

В предлагаемую модель информационного обмена РМСС входят следующие компоненты, которые подробно описаны в работе [20–23], поэтому остановимся только на основных элементах.

1) Граф сети, в котором имеется два типа радиолиний: межспутниковые КА-1 – КА-2 и КА-2 – КА-2, а также фидерные радиолинии двух типов (рисунок 6):

$тип \Phi 1$ – соответствует КА-1 – пул ШС;

$тип \Phi 2$ – соответствует КА-2 – ППК ШС.

2) Матрица информационной нагрузки подсети первого уровня $G1$:

$$G1_{(N_1+1) \times (N_1+1)} = \|bg_{ij}\|, \quad (3)$$

где b – коэффициент, учитывающий изменение зоны покрытия КА (за счет высоты орбиты) при вариации количества КА в РМСС, $b = N_H/N$, $N = N_1$.

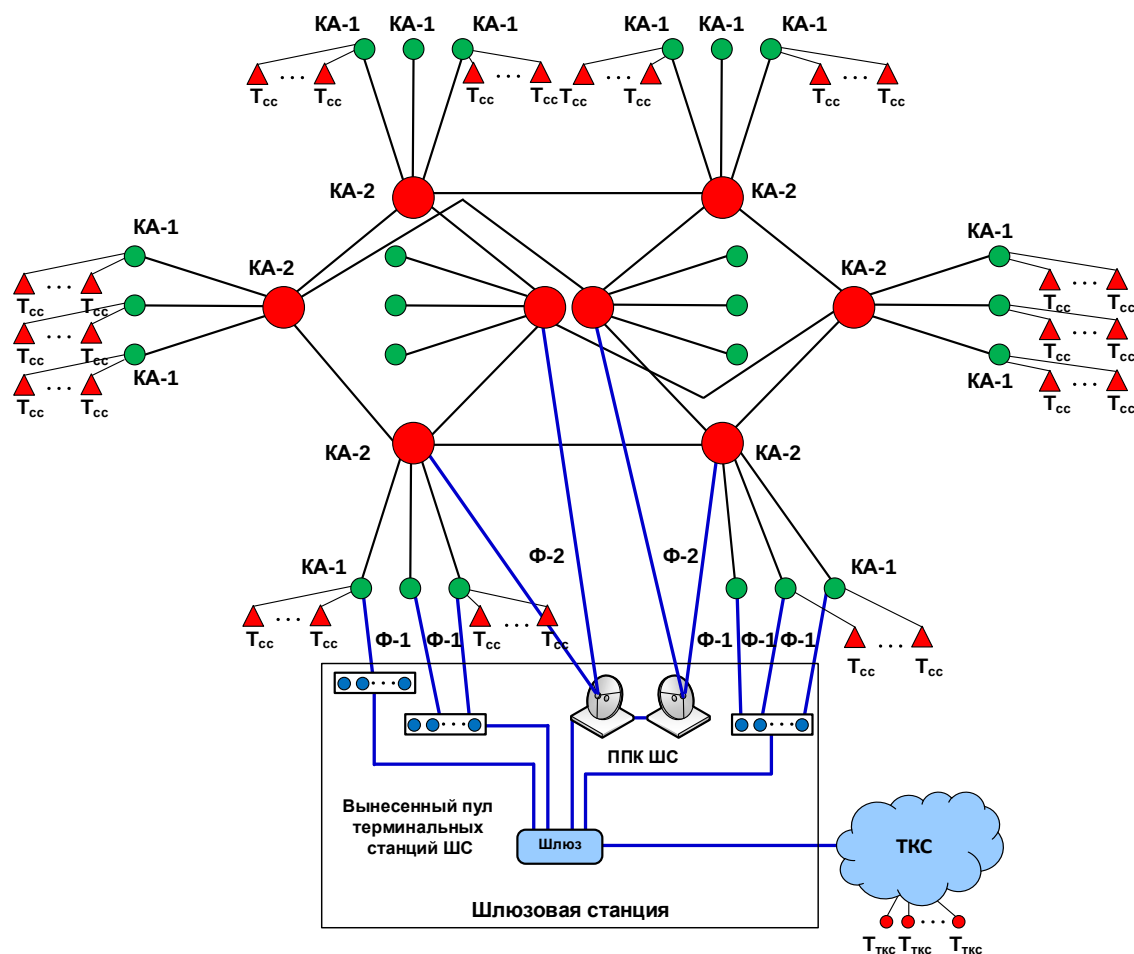


Рис. 6. Граф сети разновысотной многоспутниковой системы связи

Fig. 6. Network DHMCS Graph

3) Вероятностная матрица связности подсети первого уровня $P1$ с учетом возможности установления связи по фидерной линии типа $\Phi 1$ в зоне покрытия КА-1:

$$P1_{N_1 \times N_1} = \|p_{ij}\|, \quad (4)$$

где 1 – наличие связи между КА-1 через межспутниковую радиолинию КА-1 – КА-2 и сеть второго уровня на базе ОГ КА-2; $\frac{S_1}{N_1}$ – вероятность наличия фидерной линии типа $\Phi 1$ (КА-1 – пул ШС).

4) Вероятностная матрица канальной емкости подсети первого уровня $V1$:

$$V1_{N_1 \times N_1} = \|v_{ij}\|, \quad (5)$$

где v_{c1} – требуемая ПС радиолинии КА-1 – КА-2; $v_{\Phi 1}$ – требуемая ПС линии пул ШС – КА-1.

5) Матрица информационной нагрузки межспутниковой подсети второго уровня $G2$:

$$G2_{(N_2+1) \times (N_2+1)} = \|bg_{ij}\|. \quad (6)$$

6) Вероятностная матрица связности подсети второго уровня $P2$ с учетом возможности установления связи по фидерной линии в зоне покрытия КА-2:

$$P2_{N_2 \times N_2} = \|p_{ij}\|, \quad (7)$$

где 1 – наличие межспутниковой радиолинии между КА-2; 0 – отсутствие межспутниковой радиолинии между КА-2; S_2/N_2 – вероятность наличия фидерной линии типа Ф2 между КА-2 и ППК ШС, где $0 \leq S_2 \leq N_2$.

7) Вероятностная матрица канальной емкости подсети второго уровня $V2$:

$$V2_{N_2 \times N_2} = \|p_{ij}v_{ij}\|, \quad (8)$$

где v_{c2} – требуемая ПС радиолинии КА-2 – КА-2; $v_{\phi 2}$ – требуемая ПС фидерной линии ППК ШС – КА-2.

На рисунке 7 представлены графические зависимости требований к ПС межспутниковых и фидерных радиолиний РМСС, полученные с использованием выражений в [18–21]. Анализ зависимостей показывает, что структура РМСС при наличии в системе трех ШС позволяет обеспечить требования к ПС межспутниковых и фидерных радиолиний, которые в 3–5 раз меньше требований МСС «Иридиум» для того же количества ШС. Даже для 13 ШС, используемых в настоящее время в наземном сегменте системы «Иридиум», требования к ПС остаются более высокими, чем для случая трех ШС в РМСС.

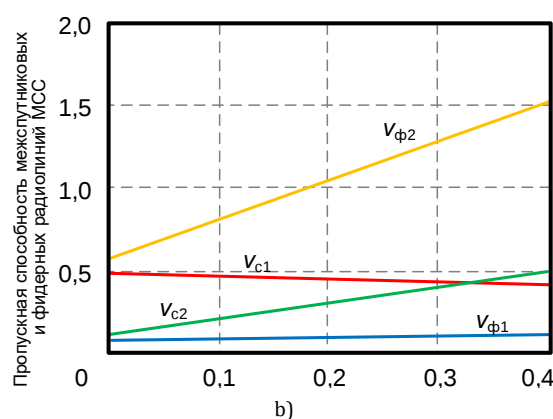
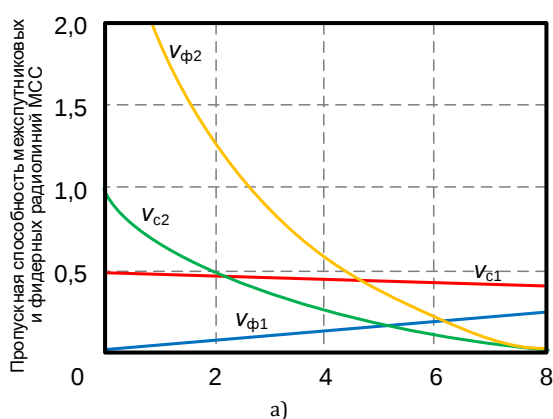


Рис. 7. Зависимость требуемой пропускной способности межспутниковых и фидерных радиолиний МСС: а) от количества ШС; б) от величины внешнего трафика к ЦС

Fig. 7. Dependence of the Required Throughput of Inter-Satellite and Feeder Radio Links MSCS: a) on the Number of GS; b) on the Value of External Traffic to CS

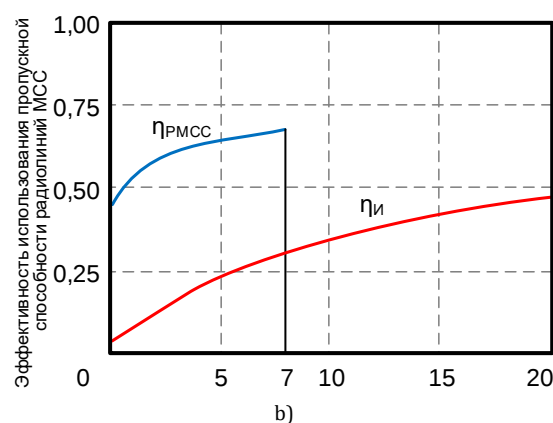
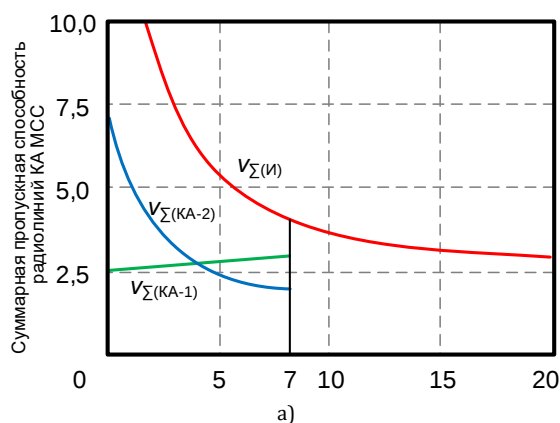


Рис. 8. Зависимость характеристик радиолиний МСС от количества ШС: а) суммарная пропускная способность радиолиний V_{Σ} одного КА МСС; б) эффективность использования пропускной способности радиолиний η МСС

Fig. 8. Dependence of the Radio Links Characteristics MSCS on GS Number: a) Total Throughput Radio Link V_{Σ} of GH MSCS; b) Bandwidth Radiolink Efficiency Usage η MSCS

Анализ данных (рисунок 8а) показывает, что использование трех ШС позволяет достичь более чем трехкратного выигрыша в снижении требований к ПС радиоресурса КА предлагаемой РМСС по сравнению с системой типа «Иридиум» для случая $d_{cc} = 0,2$ и $d_{цс} = 0,2$. При увеличении с трех ШС до

семи ШС (в случае появления возможности размещения ШС на территориях других государств, например, на основе аренды) требования к радиоресурсу КА-2 снижаются в два раза, в то время как требования к радиоресурсу КА-1 остаются без изменений.

Эффективность использования ПС РМСС выражается с учетом формул, представленных в работе [13] в виде:

$$\eta_{\text{РМСС}} = \frac{N_{II}(D + d_{\text{це}}) + Y_{\text{св}}}{24v_{\Sigma(\text{КА}-1)} + 8v_{\Sigma(\text{КА}-2)}}. \quad (9)$$

Полученные зависимости коэффициента использования ПС радиотрасс МСС «Иридиум» и РМСС представлены на рисунке 8а. Анализ зависимостей, представленных для случая трех ШС, показывает пятикратный выигрыш степени использования ПС радиотрасс предлагаемой разноразностной МСС по сравнению с прототипом (см. рисунок 8б). Даже для 25 ШС в случае прототипа и трех ШС для разноразностной МСС последняя имеет 30-процентный выигрыш в значении коэффициента использования радиоресурса МСС.

Подводя итог, возможно сделать вывод об эффективности применения МСС на основе разноразностной ОГ по сравнению с традиционными низкоразностными МСС.

5. Заключение

Полученные результаты позволяют рекомендовать использование двухуровневого подхода к построению ОГ отечественной РМСС с наземным сегментом, содержащим лишь три ШС, что соот-

ветствует существующим геополитическим ограничениям. При этом характеристики предлагаемой РМСС будут сравнимы с системой «Иридиум».

Предложенный подход к построению основных и резервных путей прохождения постоянных виртуальных каналов управления между ретрансляторами РМСС с мобильными абонентами, на основе матрицы распределения информационной нагрузки ОГ второго высотного уровня, обеспечит глобальное и непрерывное покрытие земной поверхности. Показано, что межспутниковые радиотрассы второго уровня иерархии должны обладать одинаковой ПС, при этом резерв ПС межспутниковых радиотрасс обеспечивает возможность реализации канала управления на основе постоянных виртуальных каналов и компенсации всплесков информационной нагрузки, обусловленной пульсацией трафика.

Таким образом, в рамках проводимых исследований сформированы следующие ключевые научно-технические решения по разработке РМСС: концепция создания, баллистическое построение, анализ информационной нагрузки, организация информационного обмена, модель сети. Показано, что данный подход в построении РМСС не только не уступает таким зарубежным МСС как «Иридиум», но и в отдельных показателях превосходит ее.

Список используемых источников

1. Аболищ А.И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность. М.: ИТИС, 2004. 426 с.
2. Иносе Х. Интегральные цифровые сети связи: пер. с англ. М.: Мир, 1982. 320 с.
3. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: учеб. пособие. М.: «Альбина Паблишер», 2004. 536 с.
4. Кириенко И.Е., Замарин А.И. Организация связи в низкоразностной многоспутниковой системе связи "Teledesic" (Часть 2) // Информация и космос. 2003. № 1-2. С. 41-46.
5. Замарин А.И., Кириенко И.Е. Новые горизонты спутниковой связи: низкоразностная многоспутниковая система связи "Teledesic" // Информация и космос. 2002. № 1-2. С. 17-21.
6. Анпилогов В., Фуркан М., Донианц В., Эйдуз А., Шестаков А., Кулк К. Многоспутниковые системы LEO HTS: "Подрывная инновация" в области спутниковой связи или мыльный пузырь? // Технологии и средства связи. 2015. № 6-2(111). С. 32-36.
7. Аболищ А.И. Другая парадигма спутниковой связи // Электросвязь. 2014. № 8. С. 15-19.
8. Кузовников А.В., Косенко В.Е., Головкин В.В., Леонов С.Н., Зимин И.И. Предложения по созданию многоспутниковой системы связи на низких орбитах с учетом имеющихся средств группового выведения на околоземную орбиту // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 8. С. 25-29.
9. Невдяев Л.М., Смирнов А.А. Персональная спутниковая связь. М.: ТЭК, 1998. 216 с.
10. Катунин Г.П., Мамчев Г.В., Носов В.И., Шувалов В.П. Телекоммуникационные системы и сети: учебное пособие. В 3 томах. Том 2. Радиосвязь, радиовещание, телевидение М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 672 с.
11. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: учебное пособие. Ч.1. Таганрог: ТРТУ, 1997. 95 с.
12. Мальцев Г.Н., Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф., Ефимов С.Н., Косаревищ Д.В. и др. Концепция построения разноразностной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2011. № 630. С. 5-10.
13. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф., Ефимов С.Н., Викторов Е.А. Концепция построения разноразностной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: баллистическое построение // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2012. № 634. С. 45-56.
14. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф., Ефимов С.Н., Викторов Е.А. Концепция построения разноразностной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: варианты реализации бортового коммуникационного оборудования спутника-ретранслятора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2012. № 635. С. 5-13.
15. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф. Динамическое перераспределение пропускной способности коммутируемого спутникового моноканала при использовании протоколов множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 47-50.

16. Цветков К.Ю., Акмоллов А.Ф., Викторов Е.А. Модель канала управления передачей смешанного трафика речи и данных в разнорысотной системе спутниковой связи // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 63–70.
17. Цветков К.Ю., Осташов И.Т., Косяков Е.Н. Радиорелейные и спутниковые системы передачи информации специального назначения: учебник. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012. 447 с.
18. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов 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 радиолоний // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2011. № 633. С. 121–136.
19. Анпилов В., Гриценко А. Результаты моделирования многоспутниковых систем связи на низких и высокоэллиптических орбитах и оценка помеховой обстановки при совместном использовании полос радиочастот // Технологии и средства связи. 2017. № 6(122). С. 42–47.
20. Дарнопых В.В. Применение единого методического подхода к оперативному планированию целевого функционирования спутниковых систем мониторинга и связи // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 118–137.
21. Иванкович М.В., Шевчук Д.В. Оценка измерения интегральной доступности связи для абонентов потребителей негеостационарной спутниковой системы Глобалстар, при изменении орбитальной группировки // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 2. С. 26–28.

* * *

Creation and Functioning Suggestions for the Multi-Satellite Communication System Based on Different Height Orbital Grouping

A.F. Akmolov¹, A.A. Kovalsky¹, S.N. Efimov¹

¹Military space academy of A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-22-31

Received 5th March 2020

Accepted 20th March 2020

For citation: Akmolov A., Kovalsky A., Efimov S. Creation and Functioning Suggestions for the Multi-Satellite Communication System Based on Different Height Orbital Grouping. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(1):22–31. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-22-31

Abstract: This article is devoted to the creation features and functioning of a multisatellite communication system (MSCS) with mobile subscribers based on the orbital grouping of multi-altitude satellite-repeaters (SR) used on different heights. In the course of the investigations the article outlines the following key scientific and technical solutions for the development of a different height multi-satellite communication system (DHMSCS): creation concept, ballistic construction, analysis of information load, organization of information exchange, network model. It is shown that this approach to the construction of the proposed communication system does not only concede to such foreign MSCS as Iridium, but also surpasses them according to some indicators.

Keywords: concept of creation, ballistic construction, organization of information exchange, model of network, main and alternative channel of management, matrix of distribution of information loading, inter-satellite radio link, multisatellite communication system.

References

1. Abolitic A.I. *Satellite Communications Systems. Fundamentals of Structural-Parametric Theory and Efficiency*. Moscow: ITIS Publ.; 2004. 426 p. (in Russ.)
2. Inose H. *An introduction to digital integrated communications systems*. Moscow: Mir Publ.; 1982. 320 p. (in Russ.)
3. Kamnev V.E., Cherkasov V.V., Chechin G.V. *Satellite Communications Networks*. Moscow: Albina Publ.; 2004. 536 p. (in Russ.)
4. Kirienko I.E., Zamarin A.I. Organization of Communication in the Low-Orbit Multi-Satellite Communication System *Tele-desic* (Part 2). *Information and Space*. 2003;1-2:41–46. (in Russ.)

5. Zamarin A.I., Kiriyeenko I.E. New Horizons in Satellite Communications: Low-Orbit Multi-Satellite Communication System *Teledesic. Information and Space*. 2002;1-2:17–21. (in Russ.)
6. Anpilogov V., Furqan M., Doniants V., Eydus A., Shestakov A., Kuk K. Are multisatellite systems LEO-HTS: “disruptive innovation” in the field of satellite communications or bubble? *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2015;6-2(111):32–36. (in Russ.)
7. Abolitc A.I. Another Paradigm of Satellite Communication. *Elektrosviaz*. 2014;8:15–19. (in Russ.)
8. Kyzovnikov A.V., Kosenko V.E., Golovkov V.V., Leonov S.N., Zimin I.I. Offering for creating low orbit multi-satellite communication in system subject to available group launch vehicle on near-earth orbit. *Science Intensive Technologies*. 2016;17(8):25–29. (in Russ.)
9. Nevdyayev L.M., Smirnov A.A. *Personal Satellite Communications*. Moscow: TEK Publ.; 1998. 216 p. (in Russ.)
10. Katunin G.P., Mamchev G.V., Nosov V.I., Shuvalov V.P. *Telecommunication Systems and Networks. Radio Communications, Broadcasting, Television*. Moscow: Goriachaya liniya – Telekom Publ.; 2004. 672 p. (in Russ.)
11. Dyatlov A.P. *Systems of Satellite Communications with Mobile Objects*. Taganrog: Taganrog Radio Engineering Institute Publ.; 1997. 95 p. (in Russ.)
12. Maltsev G.N., Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F., Efimov S.N., Kosarevich D.V. et al. The Concept of Building a Multi-Height Multi-Satellite Communication System with Mobile Subscribers. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2011;630:5–10. (in Russ.)
13. Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F., Efimov S.N., Viktorov E.A. The concept of building a multi-satellite multi-satellite communication system with mobile subscribers: ballistic construction. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2012;634:45–56. (in Russ.)
14. Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F., Efimov S.N., Viktorov E.A. The concept of building a multi-altitude multi-satellite communication system with mobile subscribers: options for the implementation of on-board communication equipment of a relay satellite. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2012;635:5–13. (in Russ.)
15. Tsvetkov K.Y., Rodionov A.V., Akmolov A.F. Dynamic capacity relocation of switched satellite monochannel with the use of multiple access protocols. *Information and Control Systems*. 2006;5:47–50. (in Russ.)
16. Tsvetkov K.Y., Akmolov A.F., Viktorov E.A. Mathematical Modeling of Management Channel Organization for Speech and Data Mixed Traffic in Multitude of Satellites at Miscellaneous Height. *Information and Control Systems*. 2012;3:63–70. (in Russ.)
17. Tsvetkov K.Yu., Ostashov I.T., Kosyakov E.N. *Radio-Relay and Satellite Systems for Transmitting Information of a Special Purpose*. St. Petersburg: Military Space Academy of A.F. Mozhaisky Publ.; 2012. 447 p. (in Russ.)
18. Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F., Efimov S.N., Kosarevich D.V., Viktorov E.A. The Concept of Building a Multi-Satellite Multi-Satellite Communication System with Mobile Subscribers: Throughput of Inter-Satellite and Feeder Radio Links. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2011;633:121–136. (in Russ.)
19. Anpilogov V., Gritsenko A. Results of modeling of multisatellite communication systems on low and highly elliptical orbits and estimation of interference situation in the joint use of radio frequency bands. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2017;6(122):42–47. (in Russ.)
20. Darnopykh V.V. Application of unified methodical approach to online planning of target operation of satellite monitoring and communication systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2010;49(1):115–134. DOI:10.1134/S1064230710010132
21. Ivankovic M., Shevchuk D. Assessment of changes in the integrated availability of communications for non-geostationary satellite subscribers of Globalstar system, when orbital group is changing. *T-Comm*. 2012;6(2):26–28. (in Russ.)

Сведения об авторах:

Акмолов
Алексей Феликсович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, akm78@mail.ru

Ковальский
Александр
Александрович

кандидат технических наук, начальник лаборатории военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, sake636@mail.ru

Ефимов
Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, swerf321@mail.ru