

Перспективная методика управления полетом космических аппаратов одной орбитальной группировки с применением межспутниковых радиолиний

И. Н. Пантелеймонов, *panteleymonov_in@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена проблеме повышения оперативности системы управления полетом космического аппарата в составе орбитальной группировки. Предлагается применение современных способов передачи с использованием стека протоколов TCP/IP и применение современных способов удаленного управления. Концепция создания орбитальных группировок, КА которых связаны межспутниковыми радиолиниями, позволит управлять всей орбитальной группировкой в режиме квазиреального времени. Таким образом, орбитальная группировка будет представлять собой цифровую сеть передачи данных, каждый КА которой будет выступать в роли спутника-ретранслятора для передачи информации управления на любые КА, а также в роли объекта управления. Дано обоснование применения указанных выше технологий, а также отражены графовые и сетевые схемы организации связи при управлении полетом КА.

Ключевые слова: связь, космический аппарат, орбитальная группировка системы управления полетом, радиолиния, командно-измерительная станция, бортовая аппаратура, антенная система

Advanced Technique of Spacecraft Flight Control of One Orbital Constellation Using Intersatellite Radio Links

I. N. Panteleymonov, *panteleymonov_in@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper is devoted to the problem of boosting the effectiveness of a flight control system of spacecraft in the orbital constellation. The paper offers to apply modern transferring methods using the protocol stack TCP/IP and to employ up-to-date avenues of remote control. The concept of creating orbital constellations with spacecraft related to intersatellite radio links will allow one to control the entire orbital constellation in quasi-real time. Thus, an orbital constellation will be a digital network of data transfer where each spacecraft will be as a relay satellite to transfer control data to any spacecraft as well as will serve as an object to be controlled. The article gives a justification to use the above-mentioned technologies and graph and network schemes for linkage to control a spacecraft flight.

Keywords: communication, spacecraft, orbital constellation, flight control system, radio link, command and measurement station, onboard equipment, antenna system

Введение

Одним из основных требований к системе управления полетом космического аппарата (КА) является оперативность. Традиционные в нашей стране системы управления полетом КА позволяют передавать на борт или принимать с борта информацию управления, только когда КА находится в зоне радиовидимости (ЗРВ) одного из наземных командно-измерительных комплексов (КИК) и поэтому большую часть полетного времени связь с КА отсутствует. Одним из вариантов решения этой проблемы является организация двухъярусной схемы управления и связи с применением трех-четырёх геостационарных спутников-ретрансляторов (ГСР) [1–5]. При наличии межспутниковой радиолинии (МРЛ) между ГСР можно обеспечить круглосуточную линию связи одного КИК с любым КА (с одним, несколькими или всеми сразу КА). Данное направление развития систем управления полетом КА является современным и перспективным, однако ему присущ такой недостаток, как большие задержки передачи информации, обусловленные большими высотами орбит ГСР (около 36 000 км) и, как следствие, большими расстояниями между орбитальными точками.

Орбитальный сегмент схемы организации связи с КА через четыре ГСР изображен на рис. 1.

Обобщенная схема организации связи с КА через три ГСР изображена на рис. 2.

1. Топологическая модель системы связи и управления полетом орбитальной группировки по межспутниковым радиолиниям

1.1. Схема организации связи и сетевая архитектура

Орбитальное построение одной орбитальной группировки (ОГ) часто представляет собой определенное количество КА, размещенных в нескольких орбитальных плоскостях (ОП). Примером такого построения могут служить ОГ дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), системы спутниковой связи (ССС) на среднеорбитальных (СОСР)

или низкоорбитальных спутниках-ретрансляторах (НОСР), навигационные спутниковые системы.

Соседние КА одной ОГ предлагается связать МРЛ таким образом, что каждый КА будет иметь связь с четырьмя соседними КА, находящимися как в одной ОП, так и в соседних ОП. Тем самым ОГ будет представлять собой полносвязанную спутниковую сеть передачи данных, где каждый КА представляет собой спутниковый маршрутизатор, имеющий следующие порты ввода-вывода информации:

– 1 порт в глобальной сети — для связи с командно-измерительной станцией (КИС) — радиолиния (РЛ) Земля–борт;

– 4 порта в глобальной сети — для ретрансляции информации соседним КА по МРЛ;

– 1 порт в локальной сети — для передачи информации управления на собственную бортовую аппаратуру (БА) КА.

Такая архитектура сети применяется в СПерСС Iridium и обладает следующими преимуществами:

1) позволяет создать гибкую сеть, в которой с помощью адаптивных протоколов маршрутизации можно строить любые маршруты передачи данных:

а) с минимальной длиной пути для трафика реального времени;

б) с оптимальной пропускной способностью с учетом загрузки бортового ретрансляционного комплекса (БРК) — для широкополосного трафика;

в) маршруты в обход неисправных КА или КА, находящихся в особых зонах (например, в зонах неосвещенной части орбиты или зонах стихийных или боевых действий);

2) обладает высокой живучестью и адаптивностью;

3) позволяет с одной командно-измерительной станции (КИС) иметь доступ в режиме реального времени к любому КА группировки.

Схема организации связи при управлении полетом ОГ СССР на НОСР, состоящую из шести ОП по двенадцать КА в каждой ОП, изображена на рис. 3.

Сетевая архитектура сети управления полетом ОГ изображена на рис. 4.

1.2. Межспутниковая радиолиния

Для связи в МРЛ наиболее целесообразно применять диапазоны К, Ка, V или Q, а в перспективе

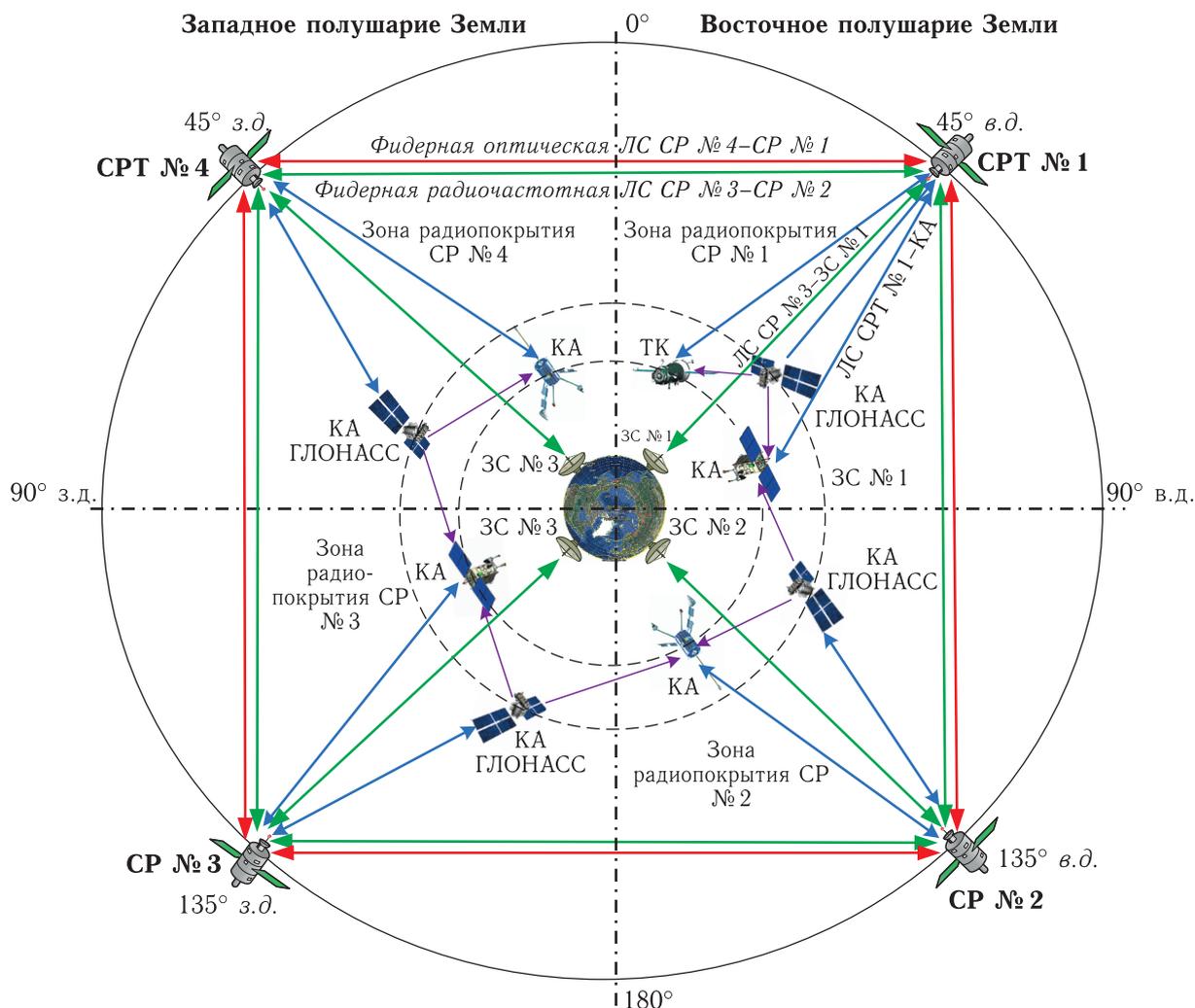


Рис. 1. Орбитальный сегмент схемы организации связи с КА через четыре ГСР

перейти на передачу данных в оптическом диапазоне излучения.

Применение диапазонов К, Ка, V или Q позволит [10]:

- уменьшить габариты антенно-фидерных устройств (АФУ) и СВЧ-оборудования;
- уменьшить энергетические затраты на электропитание систем наведения АФУ и СВЧ-оборудования;
- увеличить полосу пропускания и скорость передачи информации (от 300 Мбит/с до 1 Гбит/с);
- снять ограничения по энергетике радиолинии, имеющиеся в более низких диапазонах частот из-за большой загруженности.

Таким образом, для связи в межспутниковой радиолинии в диапазонах К, Ка, V или Q наи-

более целесообразно применять 4 остронаправленные зеркальные антенные системы (АС) небольшого диаметра (до 0,3–1 м) [10], расположенные по осям симметрии КА X и Z.

Применение оптического диапазона излучения позволит:

- уменьшить в перспективе в 4 раза габариты АС и СВЧ-оборудования;
- уменьшить энергетические затраты на электропитание систем наведения АС и СВЧ-оборудования;
- значительно увеличить полосу пропускания и скорость передачи информации (до 10 ГГбит/с);
- снять ограничения по энергетике радиолинии, имеющиеся в радиодиапазонах частот.

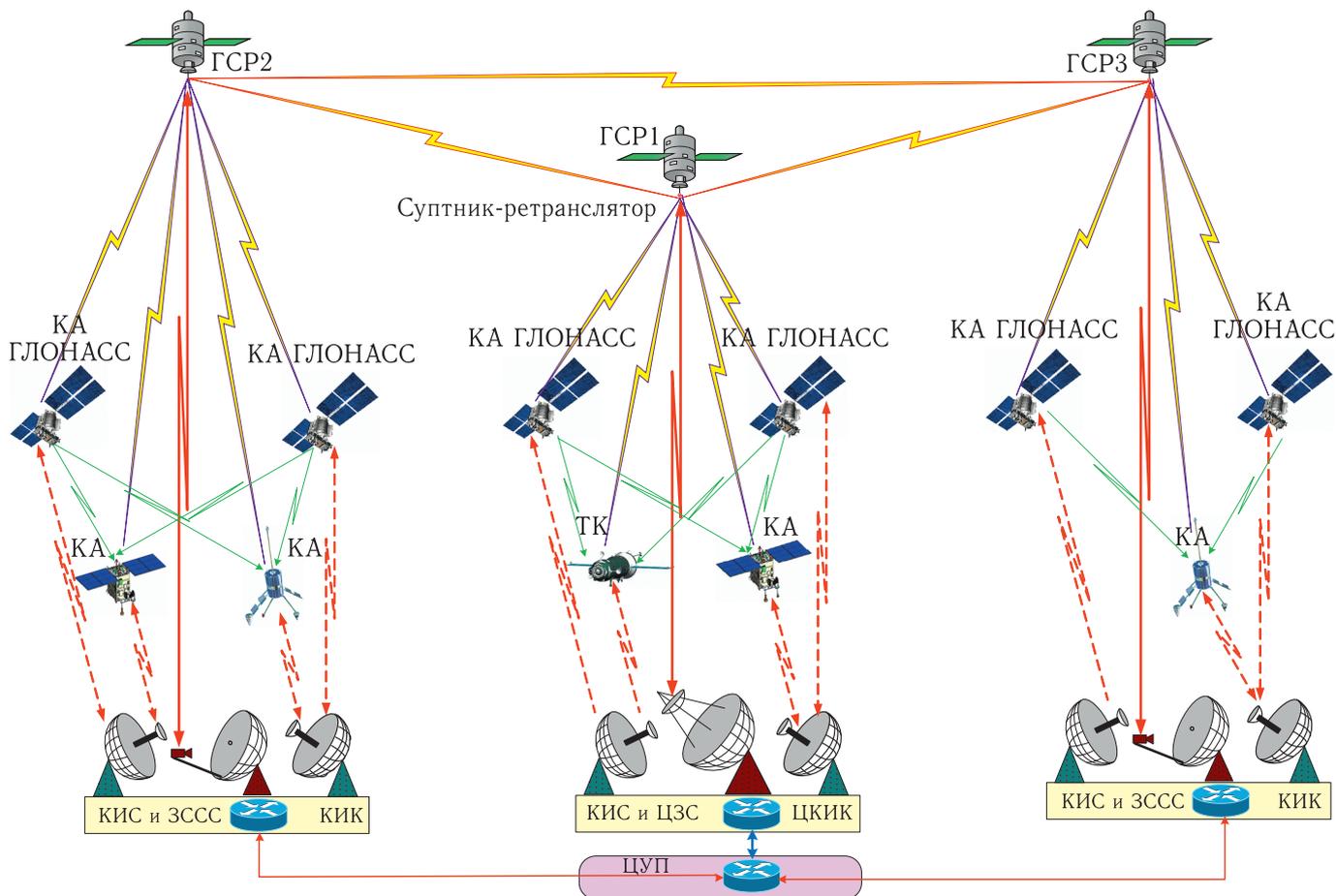


Рис. 2. Обобщенная схема организации связи с КА через ГСП

Оптические системы связи в МРЛ первое время можно использовать параллельно с системами связи, работающими в радиодиапазонах.

Лазерные приемные и передающие АС должны быть расположены по осям X и Z КА.

1.3. Радиолиния Земля–борт

Для связи в РЛ Земля–борт наиболее целесообразно применять диапазоны Ка, V или Q, а в перспективе можно будет дублировать радиоканал передачи данных в оптическом диапазоне радиоволн. Так как каждый КА имеет значительную зону радиопокрытия (ЗРП), редко бывает, чтобы везде в ЗРП были плохие погодные условия, влияющие на светопрозрачность атмосферы, то потоки данных в оптическом диапазоне будут передаваться на КИС, расположенные в хороших условиях светопрозрачности атмосферы. И даже если

окажется, что во всей ЗРП связь в оптическом диапазоне невозможна, то можно связываться с КИС, расположенными в других ЗРП, используя МРЛ.

Таким образом, для связи в РЛ Земля–борт в диапазонах Ка, V или Q также наиболее целесообразно применять 1-остронаправленные зеркальные антенные системы (АС) небольшого диаметра (до 0,3–1 м). Зеркальные АС, лазерные приемные и передающие АС также должны быть расположены по оси минус Y КА и ориентированы на Землю.

1.4. Топологическая схема организации связи

Для детального рассмотрения схемы организации связи КИС–КА изобразим топологическую модель этой схемы в виде графа. Схема организации межспутниковых каналов связи в виде графа

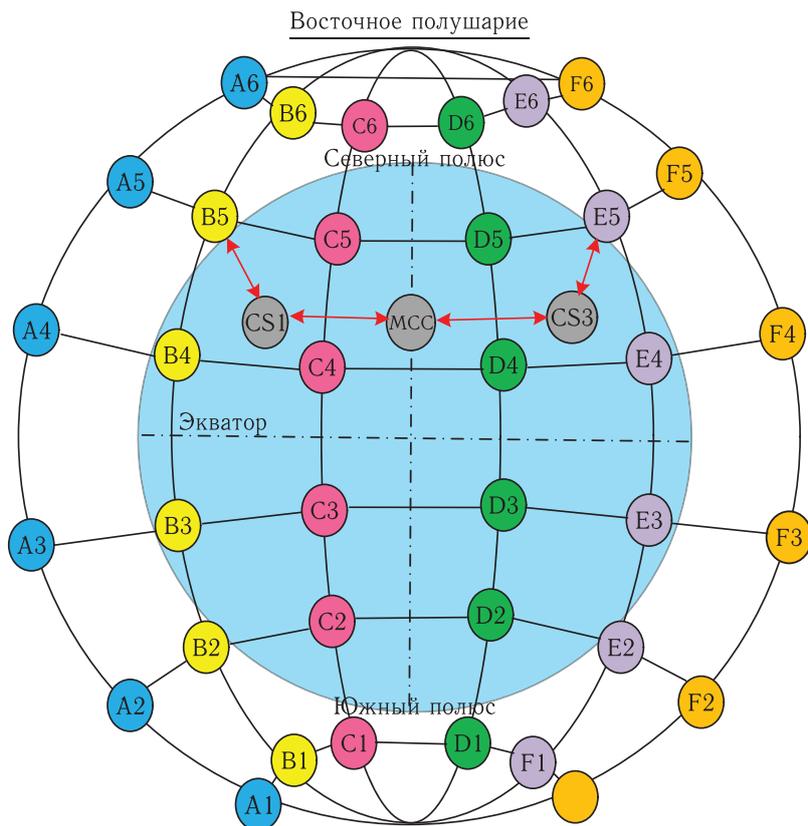


Рис. 3. Схема организации связи при управлении полетом ОГ ССС на НОСР.

MCC — центр управления полетом (ЦУП);

CS 1–CS 2 — КИС № 1–КИС № 3;

A1–A6 — низкоорбитальные КА ОП № 1, имеющей условное обозначение А;

B1–B6 — низкоорбитальные КА ОП № 2, имеющей условное обозначение В;

C1–C6 — низкоорбитальные КА ОП № 1, имеющей условное обозначение С;

D1–D6 — низкоорбитальные КА ОП № 1, имеющей условное обозначение D;

E1–E6 — низкоорбитальные КА ОП № 1, имеющей условное обозначение E;

F1–F6 — низкоорбитальные КА ОП № 1, имеющей условное обозначение F

изображена на рис. 5. На рис. 4 видно, что при наличии межспутниковых связей в канале связи КА–КА граф приобретает вид полностью связанного. Характеристика полностью связанности свидетельствует о том, что от исходной вершины КИС-1 до конечной вершины КА-N существует несколько маршрутов. Это повышает гибкость и отказоустойчивость системы связи, а применение протоколов динамической маршрутизации позволит решать задачи прокладки маршрутов и установления соединения в автоматическом режиме [7–9].

Логическая топология схемы связи КА–КА — «каждый с каждым соседним», а логическая топология схемы связи КА–КИС — «точка-точка».

Данное утверждение вытекает из логики установления связи с КА, которая будет рассмотрена ниже.

Топологическая схема организации связи ЦУП с КА ОГ ССС на НОСР по МРЛ в виде графа изображена на рис. 5.

1.5. Способ IP-адресации КА и КИС

Для адресации в сети ОГ применяется протокол IP v.6.

Первые 48 бит IP-адреса (числа в первом, втором и третьем октете) являются адресом сети ОГ и присваиваются международным комитетом всей ОГ.

Таблица 1. Структура IP-адреса КА

1				2				3				4				5				6				7				8			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Сеть ОГ												Заре- зерви- ровано	При- ори- тет		№ КА	Радиолиния								Заре- зерви- ровано		№ оборудования КА					
КА		трафика		вид РЛ	радио/оптич.	№ АС	прм/прд	№ комплекта	диапазон	поддиапазон	Заре- зерви- ровано		№ оборудования КА																		

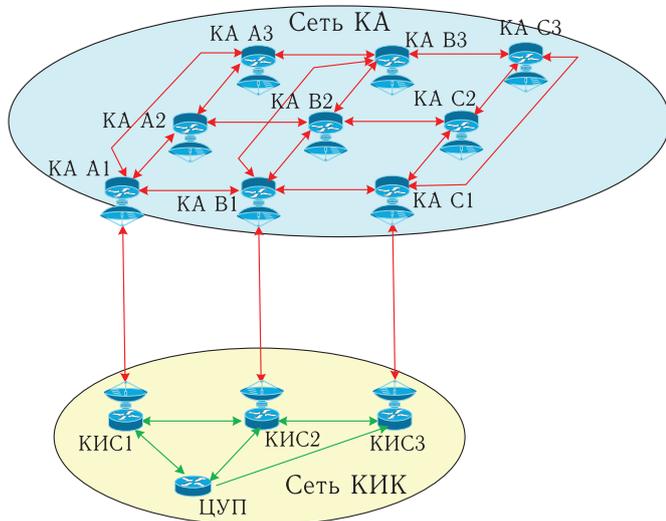


Рис. 4. Сетевая архитектура сети управления полетом ОГ

Последние 48 бит IP-адреса (четвертый квартал) являются адресом узла.

Средние 32 бит IP-адреса являются адресом подсети и зарезервированы для решения специальных задач.

Структура IP-адреса КА и КИС для наглядности представлена в табл. 1.

Первое число в пятом октете обозначает приоритет КА, второе число в пятом октете — приоритет трафика.

Третье и четвертое числа в пятом квартете символизируют номер КА, в котором буква обозначает орбитальную плоскость, а число обозна-

чает номер КА в орбитальной плоскости, например: А2.

Для КИС в этом поле указывается номер КИС.

В шестом и седьмом октетах прописаны идентификаторы РЛ.

Первое число в шестом квартете символизирует вид РЛ и принимает следующие значения:

- 1 — для РЛ Земля-борт;
- 2 — для межспутниковой РЛ (МРЛ).

Второе число в шестом квартете символизирует диапазоны, которые могут быть радиочастотными или оптическими:

- число 1 символизирует оптический диапазон,
- число 2 символизирует радиодиапазон.

Третье число в шестом квартете означает номер АС, четвертое число в шестом квартете — вид приемо-передающего оборудования:

- число 1 — приемник,
- число 2 — передатчик.

Первое число в седьмом квартете символизирует номер комплекта приемо-передающего оборудования, второе число в седьмом квартете — диапазон частот, а третье и четвертое — поддиапазон.

Первое и второе числа восьмого октета означают тип оборудования КА:

- число 1 — служебное,
- число 2 — специальное.

Третье и четвертое числа восьмого октета — номер оборудования КА.

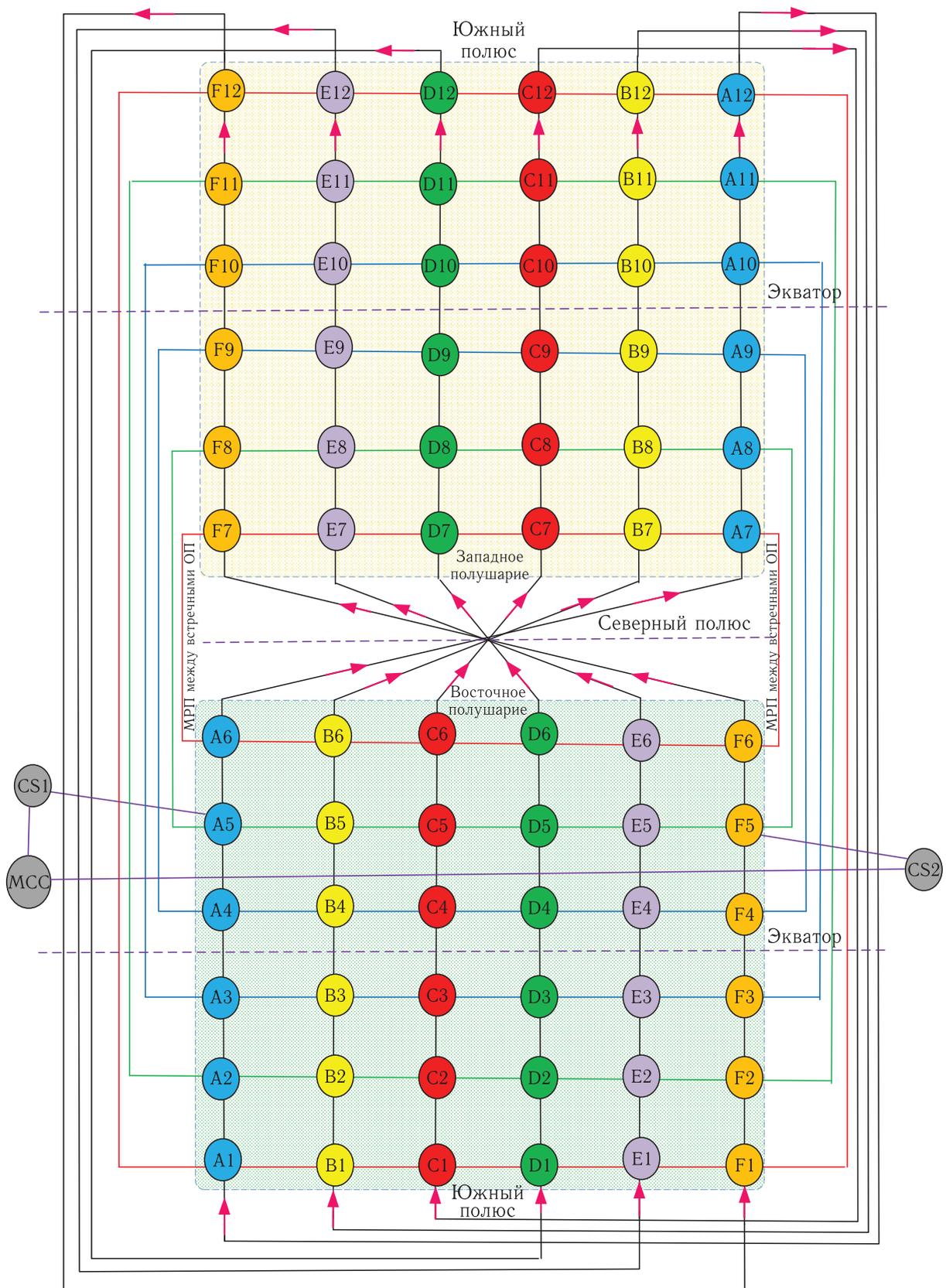


Рис. 5. Схема организации связи ЦУП с КА ОГ ССС на НОСР по МРЛ в виде графа

2. Алгоритмы работы системы управления полетом КА ОГ

2.1. Применение МРЛ для управления полетом КА в режиме реального времени

Соединенные посредством МРЛ КА ОГ представляют собой глобальную спутниковую сеть передачи данных. КИС, устанавливая связь с одним из КА ОГ, находящимся в ее ЗРВ, имеет доступ к любому КА ОГ. Переходя с одного КА на другой, можно обеспечить круглосуточную связь с любыми КА, применяя одну или несколько КИС.

Для представления, обработки и передачи информации в бортовой аппаратуре (БА) КА, наземных сетях проводной и спутниковой связи перспективным направлением является использование стека протоколов TCP/IP, широко применяемого в современных системах локальных и распределенных сетях связи [1, 2].

Основным режимом управления полетом является удаленный доступ к центральной управляющей машине (ЦУМ) БА КА посредством установления VPN-туннелей между локальной вычислительной сетью (ЛВС) ЦУП и ЛВС КА через проводные и межспутниковые каналы связи [7–9]. Таким образом, специалисты ЦУП со своих компьютеров имеют удаленный доступ на серверы (контролеры) управления систем КА и могут оперативно управлять системами БА КА, используя специальное программное обеспечение. Удобный оконный интерфейс с отображением в виде рисунков, графиков и таблиц упростит систему управления, улучшит ее наглядность, эргономичность и управляемость, уменьшит время принятия решений [1, 2]. Применение стека протоколов TCP/IP позволяет передавать в одной РЛ трафик канала управления полетом и трафик информационного канала специальной аппаратуры КА. Для этих целей ЛВС КА можно разделить на два VLAN (Virtual Local Area Network): VLAN служебной аппаратуры КА и VLAN специальной аппаратуры КА, при этом для VLAN служебной аппаратуры КА необходимо назначить высший приоритет [7–9]. Передача общего трафика КА через единую РЛ позволяет унифицировать наземные станции приема информации (шлюзовые станции) и КИС.

Применение стека протоколов TCP/IP позволяет использовать известные протоколы удаленного доступа для управления работой БА КА:

- 1) в текстовом режиме работы — tenet, SSH;
- 2) в графическом режиме работы:
 - а) доступ к WEB-интерфейсу — с применением протоколов HTTP;
 - б) доступ к рабочему столу — с применением системы VNC (Virtual Network Computing), построенной на основе протокола RFB (Remote Frame Buffer), с применением протокола RDP (Remote Desktop Protocol), например программное обеспечение Remmina Remote Desktop Client;
 - в) удаленное управление — с применением протоколов управления в компьютерных сетях, таких как SNMP (Simple Network Manager Protocol);
 - г) удаленное управление — с применением протоколов управления SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных), применяющихся для управления работой особо критических наземных объектов.

При работе с применением протоколов удаленного доступа компьютер сотрудника ЦУП выполняет функции клиента, а ЦУМ или другое оборудование БА КА, имеющее контроллеры или серверы управления, выполняет функцию сервера.

Требования к скорости передачи информации управления в канале связи отображены в табл. 2.

Исходя из данных табл. 2 при реально возможной скорости передачи информации в каналах связи Земля–борт и по МРЛ на остроуправляемые АС от 300 Мбит/с можно обеспечить управление всей ОГ через один или несколько КИС.

Логическая схема доступа оператора ЦУП к системе управления БА изображена на рис. 6.

Сетевая архитектура БА КА показана на рис. 7.

2.2. Применение традиционных технологий управления полетом КА при возникновении нештатных ситуаций

Основной проблемой управления полетом по МРЛ является точность поддержания ориентации КА в полете и точность наведения остроуправляемых антенных систем (АС). При выходе

Таблица 2. Требования к скорости передачи информации управления в канале связи

Режим работы	Протокол доступа	
Текстовый	Удаленное управление — с применением протокола Telnet	От 9,6 кбит/с
Графический	Доступ к WEB-интерфейсу	От 64 кбит/с
	Получение ТМИ, отображение и выдача команд управления — с применением протоколов управления SNMP	От 64 кбит/с
	Доступ к рабочему столу — с применением системы VNC, с применением протокола RDP	От 128–256 кбит/с
	Получение ТМИ, отображение и выдача команд управления — с применением системы SCADA	От 9,6 кбит/с

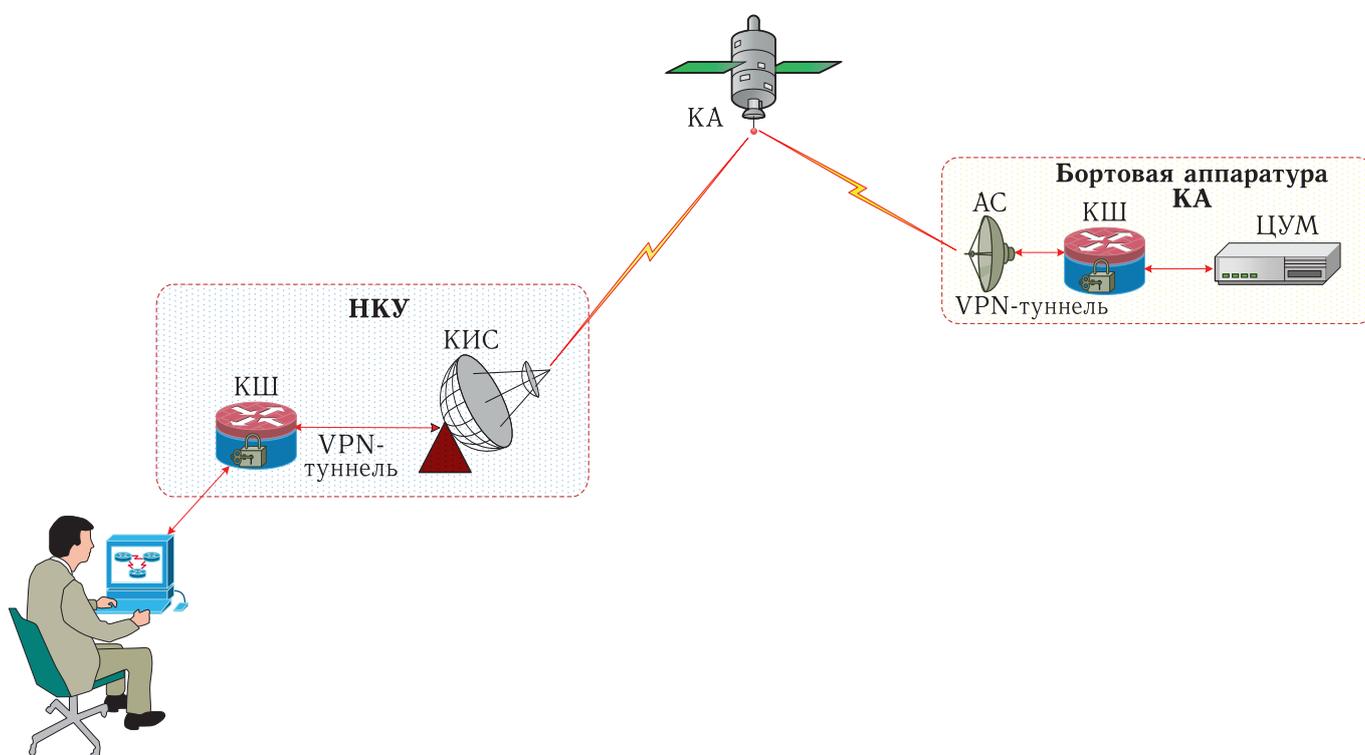


Рис. 6. Логическая схема доступа оператора ЦУП к системе управления БА

из строя одного и нескольких КА ОГ их можно обойти за счет применения протоколов динамической маршрутизации [7–9], но при этом возникает проблема доступа к потерявшему ориентацию КА. Для этих целей на борту предусматривается наличие не менее двух малонаправленных АС, расположенных по осям симметрии КА +Y и –Y и обеспечивающих низкоскоростной канал аварийной связи с КИС.

В нештатных ситуациях, например при потере ориентации КА, а также на этапе выведения и штатного спуска с орбиты, КИС может осуществлять связь с КА на малонаправленные АС КА по МРЛ или по РЛ Земля–борт. При этом скорость передачи в канале связи будет низкой (от 4,8 до 12 кбит/с) и поэтому необходимо переходить в режим традиционной системы управления полетом КА, т. е. выдачи команд управления на БА

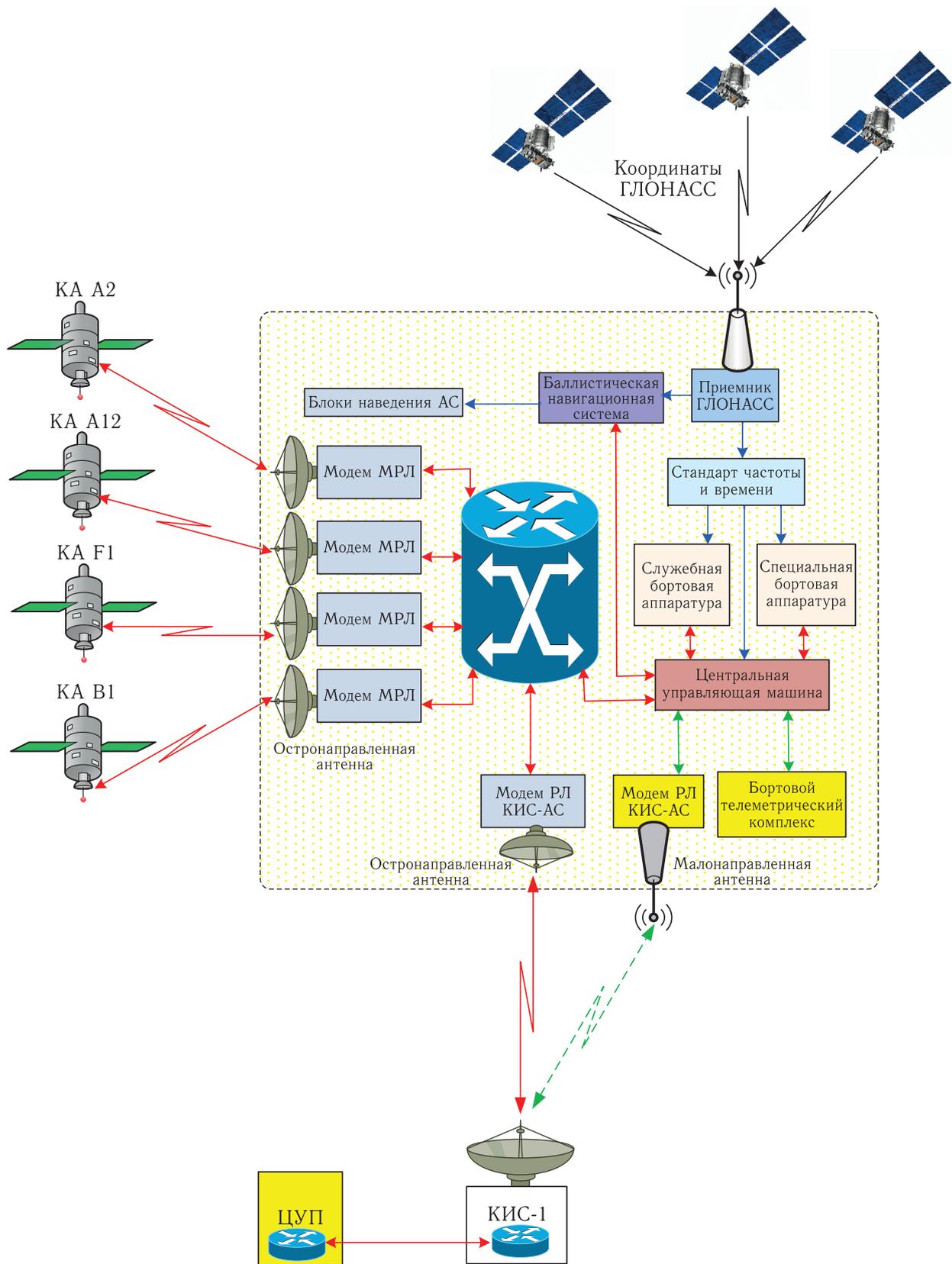


Рис. 7. Сетевая архитектура БА КА

и получения от БА квитанций и телеметрической информации. Тем самым режим традиционной системы управления полетом КА будет являться резервным режимом работы для нештатных ситуаций и позволит повысить отказоустойчивость системы управления полетом.

Заключение

Данный алгоритм управления обладает следующими преимуществами:

- гибкость и оперативность управления,
- высокая надежность работы системы управления,
- высокая степень эргономичности и современный подход к решению задачи управления.

Применение стандартных для компьютерных сетей протоколов передачи информации (TCP/IP) позволит применить стандартное сетевое оборудование (в специальном исполнении) и типовое программное обеспечение как для построения БА КА, так и для построения НКУ, что значительно упростит систему управления, схему построения и стоимость производства.

Отмеченные в настоящем докладе алгоритмы управления полетом и архитектурные решения построения НКУ и БКУ позволяют создать универсальную и надежную, динамичную и эффективную систему связи и управления в полете с КА в составе одной ОГ.

Список литературы

1. *Пантелеймонов И.Н.* Перспективные алгоритмы управления полетом космического аппарата // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2014, т. 1, вып. 4. С. 57–68.
2. *Пантелеймонов И.Н., Корниенко В.И.* Архитектурные решения построения бортовой аппаратуры космического аппарата и перспективная методика управления полетом космического аппарата с применением сетевых технологий. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные*

технологии. 2015. Сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (2–4 июня 2015 г.) / Под ред. д.т.н., проф. А.А. Романова. М.: АО «РКС», 2015. 584 с.

3. *Булгаков Н.Н., Алыбин В.Г., Кривошеин А.А.* Особенности построения бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата для управления им как в зоне его радиовидимости с наземной станции, так и вне ее. 24-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 7–13 сентября 2014 г. Севастополь: Вебер, 2014, т. 1, с. 6–9.
4. *Булгаков Н.Н., Алыбин В.Г., Кривошеин А.А.* Особенности построения двухконтурной бортовой аппаратуры командно-измерительной системы для управления космическим аппаратом на этапе его вывода на ГСО // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2014, т. 1, вып. 2. С. 74–80.
5. *Лиманская Т.В., Сергеев А.С.* Однопунктное управление группировкой малоразмерных космических аппаратов // *Успехи современной радиоэлектроники*, 2013, вып. 1. С. 78–82.
6. *Гуцин В.Н.* Основы устройства космических аппаратов: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
7. *Уэнделл О.* Официальное руководство по подготовке к сертифицированным экзаменам CCNA ICND1. 2-е изд. / Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2009. 672 с.
8. *Уэнделл О.* Официальное руководство по подготовке к сертифицированным экзаменам CCNA ICND2. 2-е изд. / Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2009. 736 с.
9. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е изд. СПб.: Питер, 2006. 958 с.
10. *Султанов А.С., Пантелеймонов И.Н., Корниенко В.И.* Оценка перспектив применения К/Ка-диапазона в отечественных системах спутниковой связи // *Новый университет, сер. «Технические науки»*, 2014, вып. 1. С. 10–20.