

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 621.314.5 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.2.80.89

Пути повышения эффективности системы управления полетом космического аппарата

И. Н. Пантелеймонов, *panteleymonov_in@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена проблеме повышения эффективности системы управления полетом космических аппаратов. Рассмотрены различные варианты организации систем управления полетом космических аппаратов. Сетевые решения передачи информации управления в едином потоке с целевой информацией с применением стека протоколов TCP/IP позволят автоматизировать процесс получения и передачи информации, а также приведут к уменьшению количества бортового радиотехнического оборудования. Применение SCADA-системы послужит для повышения эргономичности. Объединение спутников-ретрансляторов в единую сеть передачи данных межспутниковыми линиями связи позволит принимать информацию от космического аппарата, даже когда он находится в западном полушарии без размещения там командно-измерительных и шлюзовых станций. Решение использовать в качестве спутников-ретрансляторов низкоорбитальную орбитальную группировку приведет к уменьшению задержек в передаче информации и уменьшению энергетического бюджета радиолинии, связывающей космический аппарат со спутником-ретранслятором.

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

Ways to Improve the Efficiency of the Spacecraft Flight Control System

I. N. Panteleymonov, *panteleymonov_in@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the problem of increasing the efficiency of the spacecraft flight control system. Various options for the organization of the spacecraft flight control systems are considered. Network solutions for the transmission of control information in a single stream with target information using the TCP/IP Protocol stack will automate the process of receiving and transmitting information as well as lead to the reduction in the number of onboard radio equipment. The use of the SCADA-system will serve to improve ergonomics. Combining relay satellites into a single network of inter-satellite communication lines will enable receiving information from the spacecraft even when it is in the Western Hemisphere without placing there command and measurement and gateway stations. The decision to employ a low-orbit constellation as relay satellites would reduce delays in the transmission of information and reduce the energy budget of the radio link between the spacecraft and relay satellite.

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

Введение

Одно из основных требований к системе управления — оперативность, определяемая временем, затраченным на получение информации о состоянии (телеметрии) объекта управления τ_c (временем реагирования системы), временем принятия решения τ_p и временем доведения управляющих воздействий до объекта управления τ_d :

$$\tau_y = \tau_c + \tau_p + \tau_d. \quad (1)$$

Следующим не менее важным требованием к системе управления является надежность, определяемая гарантированностью своевременного и достоверного приема телеметрической информации (ТМИ) q_c от объекта управления, качеством принятия решения q_p , и гарантированностью своевременного и достоверного доведения управляющих воздействий до объекта управления q_d :

$$q_y = q_c + q_p + q_d. \quad (2)$$

Надежность системы управления q_y также зависит от гибкости системы связи и обработки информации.

Следовательно, основная задача построения системы управления — снижение времени реагирования τ_y и повышение надежности q_y .

Необходимо отметить, что для коммерческих систем важным фактором повышения рентабельности является снижение затрат на систему управления.

Использование геостационарных спутников для повышения эффективности системы управления полетом КА

Традиционный путь повышения эффективности системы управления полетом космических аппаратов (КА) — организация двухъярусной схемы управления и связи с применением трех–четырех геостационарных спутников-ретрансляторов (ГСР) [1–4].

Для увеличения количества одновременно установленных каналов связи с КА, для уменьшения времени перехода с одного КА на другой,

а также для повышения надежности антенных систем (АС), обусловленной отсутствием механических частей, предлагается использование в качестве антенных систем ГСР двух активных фазированных антенных решеток (АФАР): приемной и передающей, каждая из которых состоит из трех–четырёх расположенных под углом модулей, формирующих одновременно множество следящих ортонаправленных лучей.

При наличии межспутниковой линии связи (МЛС) между ГСР можно обеспечить круглосуточную линию связи одной командно-измерительной (КИС) или шлюзовой станции (ШС) сразу со всеми КА, находящимися на разных участках траектории.

Применение связанных между собой межспутниковым радиопередачами ГСР в качестве ретрансляторов позволит:

1) одновременно принимать информацию от всех КА в любой точке траектории полета, что приведет к повышению оперативности управления;

2) уменьшить количество КИС и тем самым уменьшить стоимость системы управления.

Данное направление развития систем управления полетом КА современно и перспективно, 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.

Обобщенная схема организации связи с КА через ГСР отображена на рис. 1. Примечание: КА ГЛОНАСС служат для передачи на борт других КА баллистической навигационной информации и сигналов синхронизации.

Использование спутниковой системы связи на низкоорбитальных спутниках-ретрансляторах для повышения эффективности системы управления полетом КА

Орбитальная группировка (ОГ) спутниковой системы связи (ССС) на низкоорбитальных спутниках-ретрансляторах (НСР) представляет собой

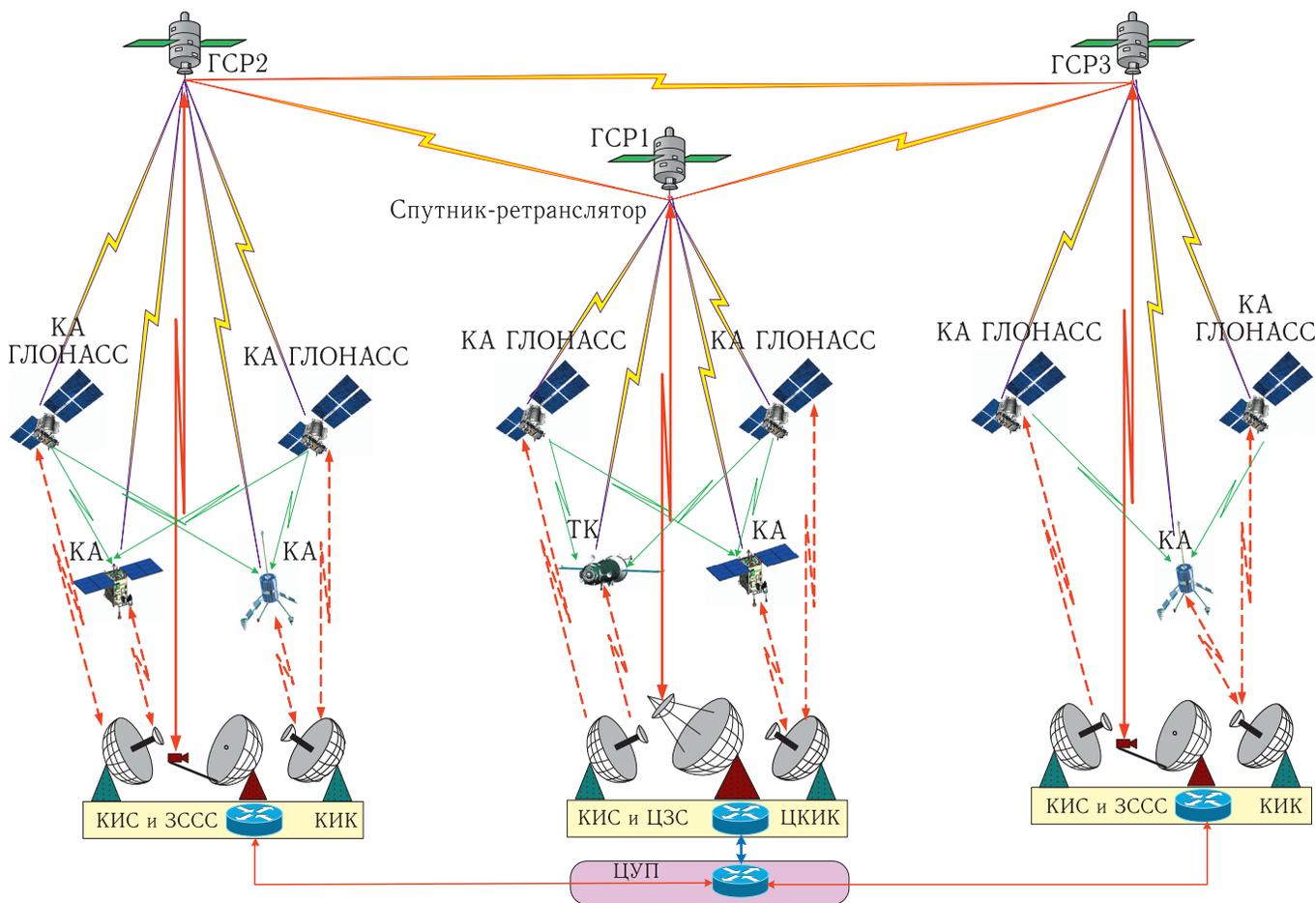


Рис. 1. Обобщенная схема организации связи с КА через ГСР

определенное количество КА, размещенных в нескольких орбитальных плоскостях (ОП). Соседние КА одной ОГ предлагается связать МЛС, таким образом, что каждый КА будет иметь связь с четырьмя соседними КА, находящимися как в одной ОП, так и в соседних ОП [5]. Такая архитектура сети применяется в сети подвижной персональной спутниковой связи (СППСС) Iridium [6], а также предлагалась в научно-исследовательской работе [7] и патентах по созданию телекоммуникационной низкоорбитальной системы на базе мало-размерных космических аппаратов [7, 8].

Применение стека протоколов TCP/IP позволит передавать информацию управления в едином потоке с целевой информацией на унифицированную ШС, выполняющую одновременно и функции КИС.

Тем самым ОГ образует полностью связанную спутниковую сеть передачи данных с применением стека протоколов TCP/IP, где каждый КА представ-

ляет собой спутниковый маршрутизатор, имеющий следующие порты ввода-вывода информации:

- 1 порт в глобальной сети-для связи с КИС-радиолиния (РЛ) Земля-борт в *S*-диапазоне;
- 1 порт в глобальной сети-для связи с ШС-радиолиния (РЛ) Земля-борт в *V*-диапазоне или в оптическом диапазоне;
- 4 порта в глобальной сети-для ретрансляции информации соседним КА по МЛС;
- 1 порт в локальной сети-для передачи информации управления на собственную бортовую аппаратуру (БА) КА.

Полностью связанная архитектура сети спутниковой связи, представляющая собой КА, связанные межспутниковыми линиями связи, обладает следующими преимуществами [5, 8, 9]:

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

– кратчайшие для трафика, особо критичного к задержкам;

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

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

2) обладает высокой живучестью и адаптивностью;

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

Технология применения ССС на низкоорбитальных спутниках-ретрансляторах для управления полетом КА впервые была применена и отработана при управлении полетом наноспутника ТНС-0 № 1, разработанного и созданного в АО «Российские космические системы» [10], использующего в качестве ретрансляторов КА ОГ Globalstar. В настоящий момент осуществляется программа полета КА ТНС-0 № 2.

В отличие от существующей ССС на НСР Globalstar спутники-ретрансляторы предлагаемой ССС дополнительно оснащаются четырьмя или шестью комплектами приемных и передающих малонаправленных АС, расположенных по двум или трем осям, например: 1-й вариант: $-Y$ и $+Y$, $-Z$ и $+Z$; 2-й вариант: $-Y$ и $+Y$, $-Z$ и $+Z$, $-X$ и $+X$. Для межспутниковой связи Регламентом радиосвязи распределена полоса частот в S -диапазоне: прямой канал связи 2025–2110 МГц и обратный канал связи 2200–2290 МГц. В данном диапазоне частот наиболее оптимальным является применение в качестве малонаправленных антенн рупорной, спиральной АС или системы спиральных АС, имеющих коэффициент усиления 6–8 дБ.

Соединенные посредством межспутниковых линий связи КА ОГ представляют собой глобальную спутниковую сеть передачи данных. ШС или КИС, установившие связь с одним из КА ОГ, находящимся в ее зоне радиовидимости (ЗРВ), имеет доступ к любому КА ОГ. Переходя с одного КА на другой, можно обеспечить круглосуточную связь с любыми КА, применяя одну или несколько ШС.

КА по отношению к КА представляет собой абонента сети подвижной спутниковой связи (СПСС). В отличие от абонентского терминала СПСС, каждому КА на постоянной основе назначается основная и резервная частоты, а также основная и резервная кодовые конструкции, необходимые для кодового доступа в МРЛ НСР–КА. КА постоянно принимает в служебном канале пилот-сигналы от различных НСР на все малонаправленные антенны. Решающее устройство КА выбирает антенну, принимающую сигнал с максимальной амплитудой. Выбираются пилот-сигналы, значение соотношения сигнал/шум которых превышает допустимый порог, а затем по доплеровскому сдвигу частоты определяется НСР, который приближается к КА, а не удаляется от него [11]. Определив оптимальный НСР для регистрации, КА отправляет запрос на регистрацию. После получения запроса на регистрацию осуществляет передачу данных через НСР. При ухудшении значения соотношения сигнал/шум в пилот-сигнале выбирает по этим же критериям другой НСР и отправляет запрос на регистрацию. После получения запроса на регистрацию осуществляет передачу данных через выбранный НСР, предварительно окончив сеанс связи с предыдущим НСР.

Работа ретрансляторов ССС на НСР с космическими аппаратами, являющимися объектами управления, осуществляется в режиме многостанционного доступа и выполняется в радиолинии (РЛ) НСР–КА (в прямом канале) по технологии МСРС (много станций на одной несущей) и в радиолинии КА–НСР (в обратном канале) — по технологии ССРС (одна станция на одной несущей).

Каждому КА предоставляются две фиксированные частоты в Ka -диапазоне и две кодовые комбинации расширения спектра для работы на прием и передачу. При пролете КА относительно НСР осуществляются процедуры эстафетной передачи (хэдовера) между лучами одного НСР и между НСР. Для установления связи с НСР осуществляются процедуры аутентификации, регистрации и установления VPN-туннелей для защиты информации.

Все КА прослушивают РЛ НСР–КА, читают заголовки IP-пакетов и если определяют свой IP-адрес, то направляют адресованные им IP-пакеты в обработку. НСР принимает и прослушивает все

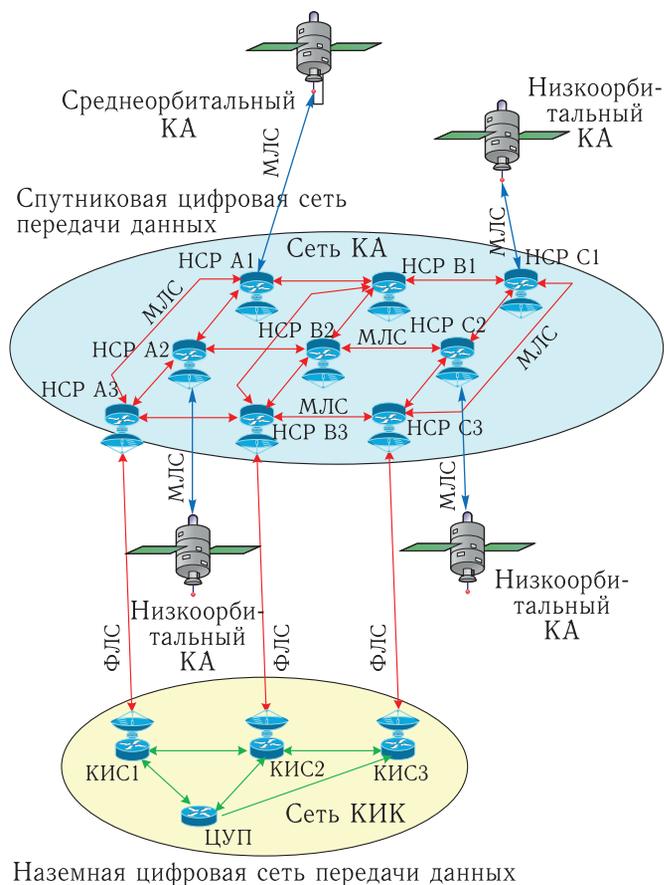


Рис. 2. Архитектура сети управления полетом КА с применением ССС на НСР

обратные частотные каналы связи и затем ретранслирует IP-пакеты по МРЛ и ФРЛ (при наличии ШС) в ЦУП.

Архитектура сети управления полетом КА с применением ССС на НСР изображена на рис. 2.

Функциональная схема НСР ССС изображена на рис. 3 [2].

Схема организации связи и управления с применением одного НСР изображена на рис. 4.

Схема организации связи и управления с применением двух НСР изображена на рис. 5.

Отмеченные преимущества повышают оперативность управления полетом τ_y и надежность системы управления q_y .

Таким образом, ССС на НСР представляет собой спутниковую цифровую транспортную сеть передачи данных, предназначенную для ретрансляции информации канала управления от центра управления полетом (ЦУП) через ШС и НСР на КА

и обратно. Применение ССС на НСР позволит с одной ШС иметь доступ одновременно ко всем КА различных ОГ, что обеспечит высокую надежность и оперативность системы управления.

Для связи в МЛС между НСР ССС наиболее целесообразно применять радиодиапазон V , а в перспективе перейти на передачу данных в оптическом диапазоне радиоволн.

Применение V -диапазона позволит [5, 9]:

- уменьшить габариты антенно-фидерных устройств (АФУ) и волноводного тракта СВЧ-оборудования;
- уменьшить энергетические затраты на электропитание систем наведения АФУ и СВЧ-оборудования;
- увеличить полосу пропускания и скорость передачи информации (от 1 ГГбит/с и более).

Таким образом, для связи в межспутниковой радиолнии в V -диапазоне наиболее целесообразно применять четыре остронаправленные зеркальные АС небольшого диаметра (до 0,3–0,6 м) [7, 11], расположенные по осям симметрии КА X и Z .

Применение оптического диапазона в МЛС между НСР ССС позволит [5, 6]:

- уменьшить в перспективе в 2–4 раза размеры и энергопотребление бортового оборудования межспутниковой линии связи (МЛС);
- значительно увеличить полосу пропускания и скорость передачи информации (до 10 ГГбит/с).

Оптические системы связи в МЛС на первом этапе эксплуатации системы можно использовать параллельно с системами связи, работающими в радиодиапазонах V -диапазона.

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

Для связи в РЛ Земля–борт (фидерная линия связи, ФЛС) наиболее целесообразно применять диапазоны C , X , Ku или Ka , а в перспективе можно будет дублировать радиоканал передачей данных в оптическом диапазоне радиоволн [5, 9]. Так как каждый КА имеет значительную зону радиопокрытия (ЗРП), редко бывает, чтобы везде в ЗРП были плохие погодные условия, влияющие на светопрозрачность атмосферы, следовательно, потоки данных в оптическом диапазоне будут передаваться на КИС, расположенные в хороших условиях светопрозрачности атмосферы. И даже если окажется,

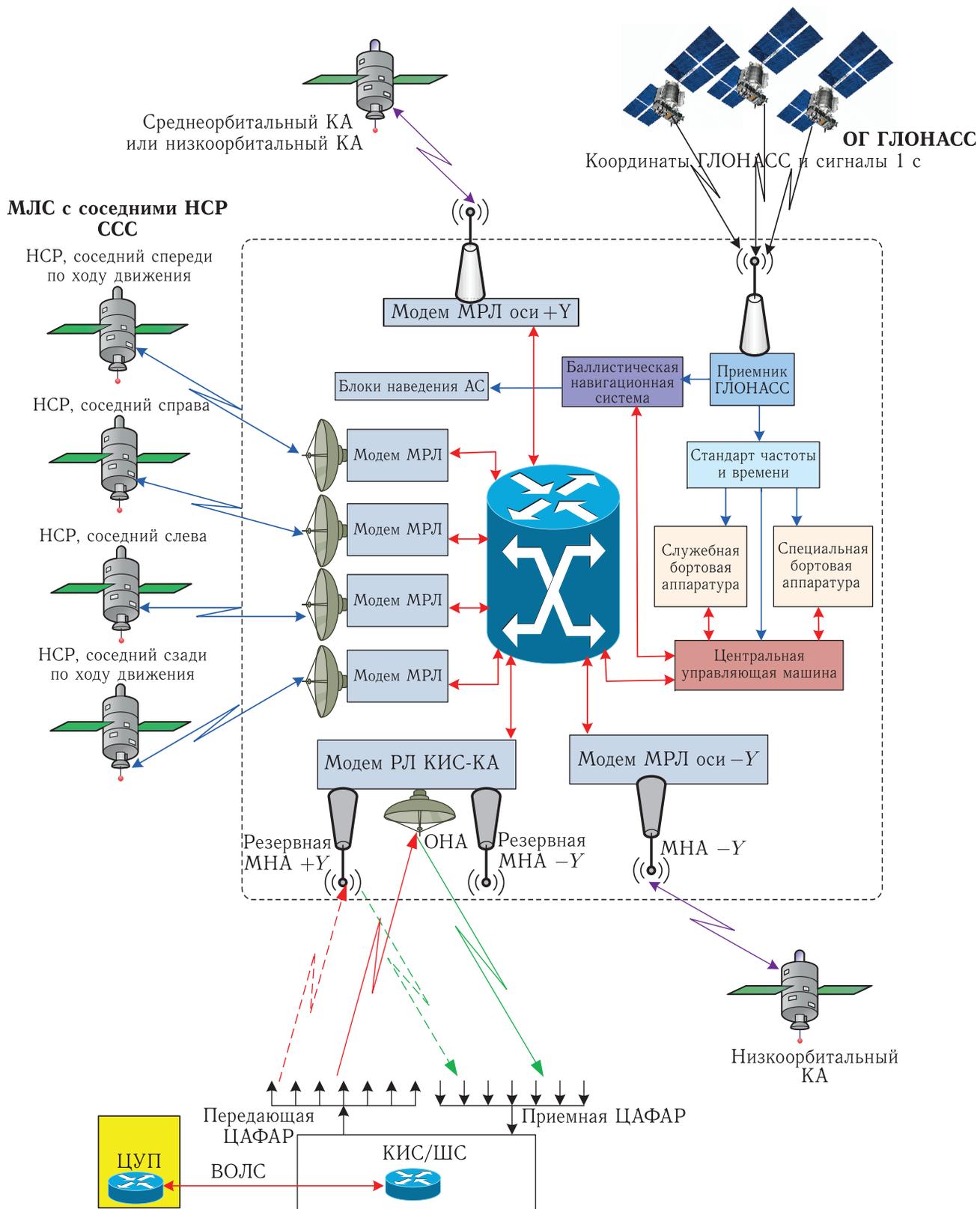


Рис. 3. Функциональная схема НСР СССР

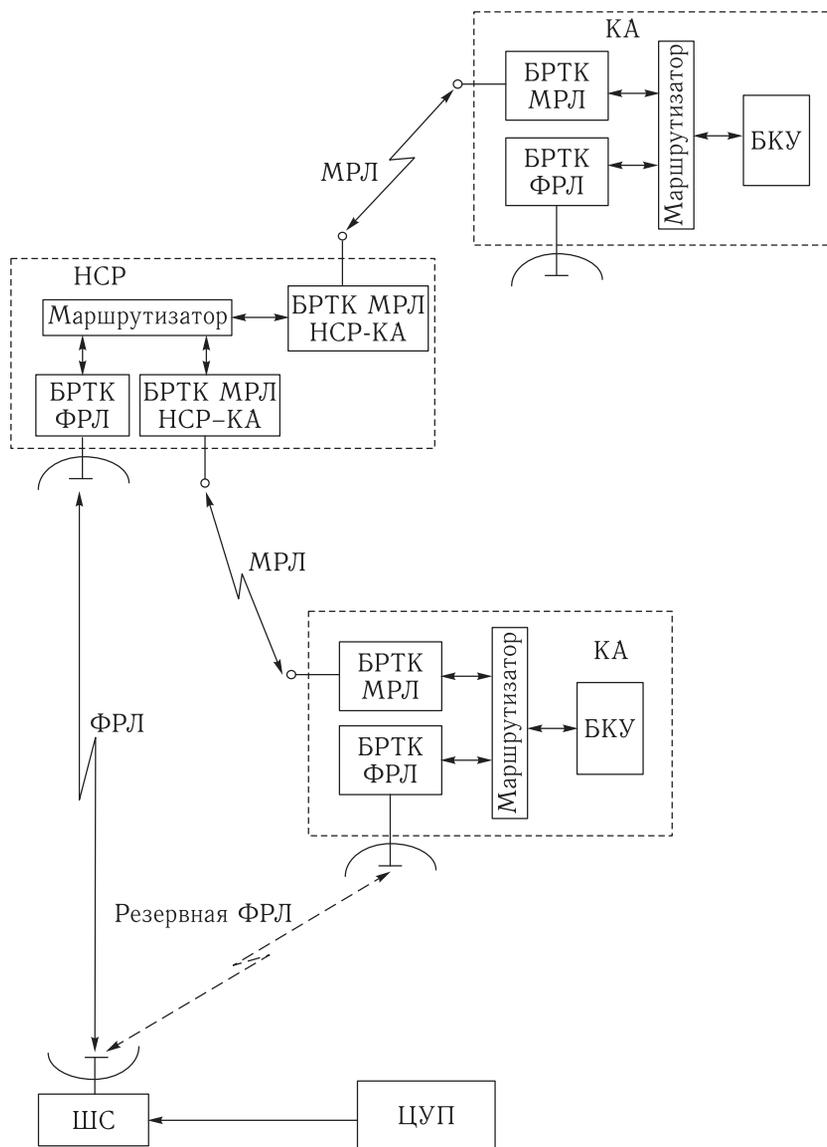


Рис. 4. Схема организации связи и управления с применением одного НСП: ФРЛ — фидерная радиолиния; МРЛ — межспутниковая радиолиния; КРЛ — командная радиолиния; ШС — шлюзовая станция; БРТК — бортовой радиотехнический комплекс; БКУ — бортовой комплекс управления

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

Таким образом, для связи в РЛ Земля–борт на борту КА наиболее целесообразно применять 1–2 остронаправленные зеркальные АС небольшого диаметра (до 0,6–1 м) или приемную и передающую АФАР [5, 9]. Зеркальные АС, АФАР, а также оптические приемные и передающие АС должны быть расположены по оси $-Y$ КА и должны быть ориентированы на Землю.

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 [1, 2, 5, 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

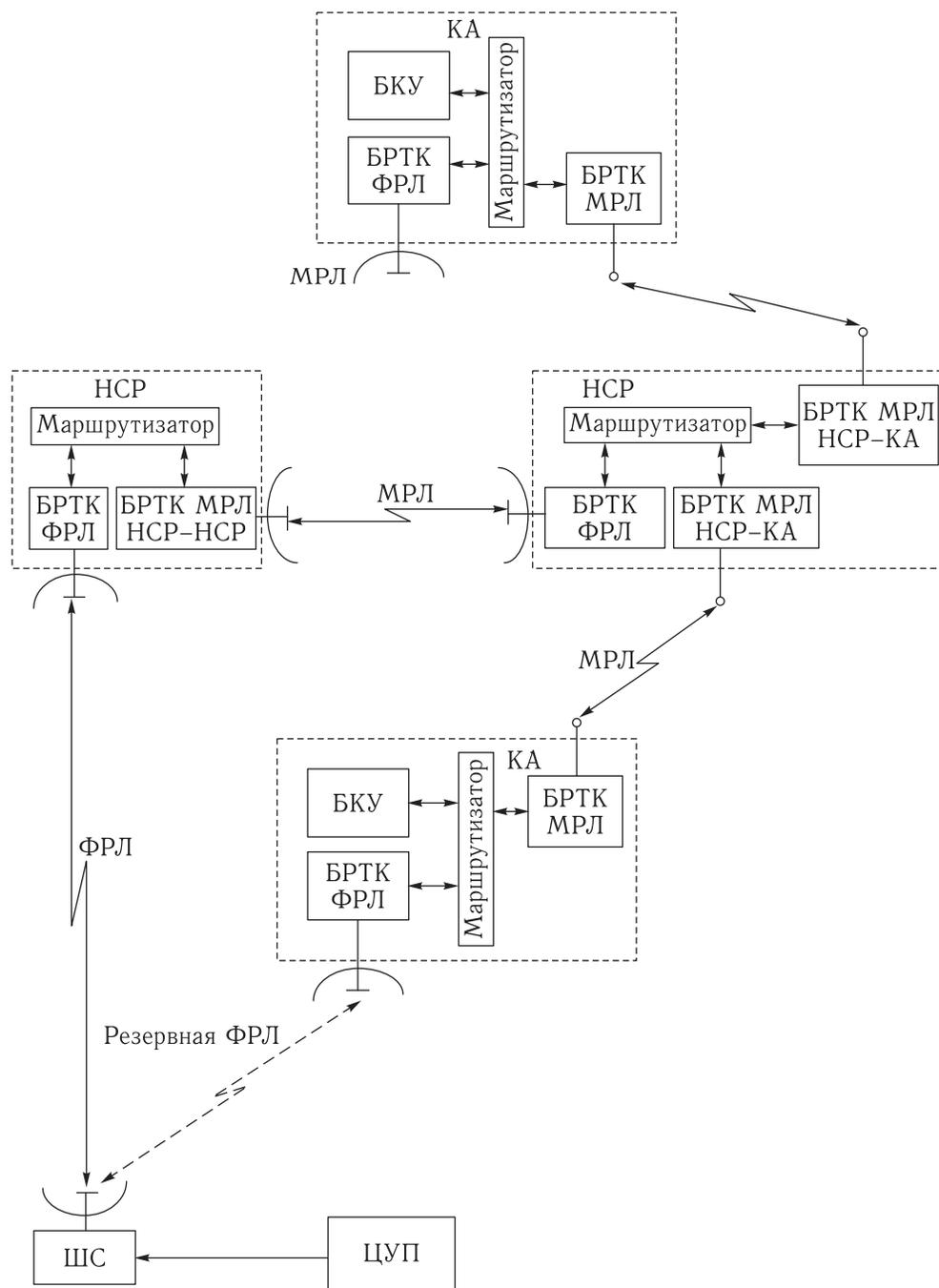


Рис. 5. Схема организации связи и управления с применением двух НСР

интерфейс с отображением в виде рисунков, графиков и таблиц упростит систему управления, улучшит ее наглядность, эргономичность и управляемость, уменьшит время принятия решений [5, 9].

Так как максимальная скорость передачи информации в канале управления полетом не превышает 64–128 кбит/с, то при реально возможной

скорости передачи информации в каналах связи Земля–борт и по МЛС можно обеспечить управление большим количеством КА низкоорбитальных ОГ через один или несколько КИС.

Логическая схема организации доступа оператора ЦУП к бортовой аппаратуре КА изображена на рис. 6 [1, 2, 5, 9].

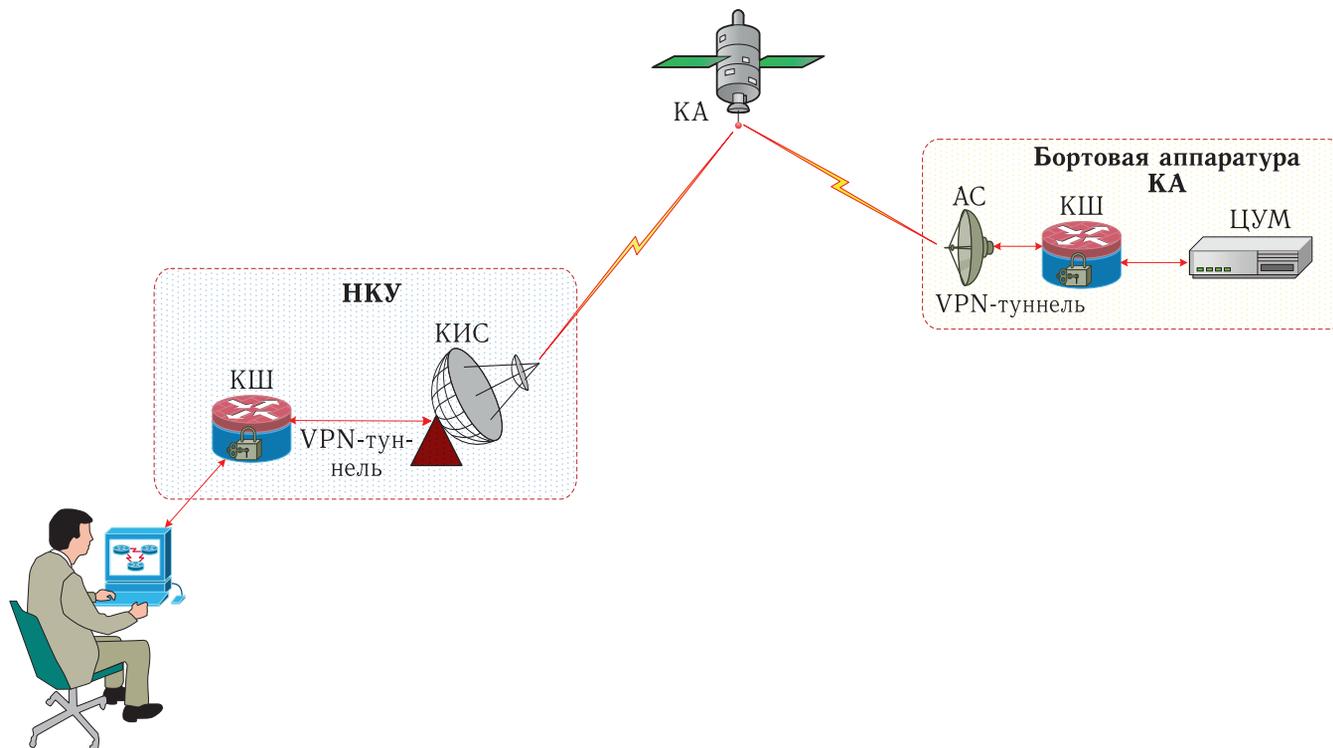


Рис. 6. Логическая схема организации доступа оператора ЦУП к бортовой аппаратуре КА

Основная проблема управления полетом с применением ССС на НСР, связанных по МЛС, — точность поддержания ориентации КА в полете и точность наведения остронаправленных антенных систем (АС). При выходе из строя одного и нескольких КА ОГ их можно обойти за счет применения протоколов динамической маршрутизации [5, 9], но при этом возникает проблема доступа к потерявшему ориентацию КА. Для этих целей на борту предусматривается наличие двух–четырёх–шести малонаправленных АС, обеспечивающих низкоскоростной канал аварийной связи с КИС НКУ.

В нештатных ситуациях, например при потере КА ориентации, а также на этапе выведения и штатного спуска с орбиты, КИС НКУ может осуществлять связь с КА на малонаправленные АС КА по МЛС или по РЛ Земля–борт.

Применение ССС на низкоорбитальных спутниках-ретрансляторах, связанных между собой МЛС, обладает всеми преимуществами способов, изложенных в разделе «Использование геостационарных спутников для повышения эффективности системы управления полетом КА», но, в отличие от ССС, на ГСР обладает следующими преимуществами:

1) имеет меньшее расстояние от КИС и ШС до КА и, как следствие, уменьшаются задержки передачи информации и тем самым повышается оперативность управления;

2) кроме того, по этой же причине уменьшаются энергетический бюджет в радиолинии бортоборт, что позволяет использовать на НСР и КА малонаправленные АС. Таким образом, открывается перспектива ретрансляции команд управления на большое количество КА, без сопровождения каждого из них остронаправленными АС;

3) имеет высокую избыточность и, как следствие, высокую надежность, так как выход из строя некоторого количества НСР, которые можно обойти по МЛС, никак не повлияет на своевременную доставку информации канала управления.

Заключение

Комплексное использование всех вышеуказанных путей решения задачи повышения эффективности системы управления полетом КА дает следующие преимущества:

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

Применение стандартных для компьютерных сетей протоколов передачи информации (ТСР/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 настоящей статье алгоритмы управления полетом и архитектурные решения построения НКУ и БКУ позволяют создать универсальную и надежную, динамичную и эффективную систему связи и управления полетом любых КА.

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: Сб. тр. 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.
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.: материалы конференции. Севастополь: Вебер, 2014. В 2 т. 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. *Пантелеймонов И.Н.* Перспективная методика управления полетом космических аппаратов одной орбитальной группировки с применением межспутниковых радиолоний // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 2. С. 73–83.
6. *Камнев В., Черкасов В., Чечин Г.* Спутниковые сети связи. М: Альпина Паблишер, 2004. 536 с.
7. *Пантелеймонов И.Н.* Спутниковая система, управляемая по межспутниковой радиолонии. Решение о выдаче патента на изобретение от 25.04.2019 на заявку № 2018125659/11(040586) от 12.07.2018.
8. *Урличич Ю.М., Гришмановский В.А., Селиванов А.С., Степанов А.А.* Космическая система глобальной служебной спутниковой связи. Патент на полезную модель № 47600 от 24.03.2005 г.
9. *Пантелеймонов И.Н.* Концепция создания системы персональной спутниковой связи на низкоорбитальных спутниках-ретрансляторах для широкополосного доступа к сетям передачи данных // Сб. тр. XXI Межведомственной научно-практической конференции «Научно-практические аспекты совершенствования управления космическими аппаратами и информационного обеспечения запусков космических аппаратов» (26–27 октября 2017 г.). Красноярск: ГИКЦ МО РФ, 2017. С. 206–223.
10. *Селиванов А.С.* Разработка и летные испытания первого российского наноспутника ТНС-0 № 1 // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 1, вып. 2. С. 74–90.
11. *Пантелеймонов И.Н.* Спутниковая система, управляемая по межспутниковой радиолонии. Патент на изобретение № 2690966 от 07.06.2019.