

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 621.314.5 EDN NUVHQL

Концептуальные вопросы создания системы управления перспективной орбитальной космической инфраструктурой

Ю. А. Тимофеев, к. т. н., с. н. с., timofeev_in@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Ю. Потюпкин, д. т. н., проф., potyupkin_in@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Исследуются вопросы создания автоматизированной системы управления перспективной орбитальной космической инфраструктурой как совокупности многоспутниковых орбитальных группировок космических аппаратов различного целевого назначения. Проводится анализ существующих возможностей, и предлагаются базовая концепция управления и пути ее реализации с учетом особенностей отечественного наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, многоспутниковая орбитальная группировка, космическая инфраструктура, наземный комплекс управления

Для цитирования: Тимофеев Ю. А., Потюпкин А. Ю. Концептуальные вопросы создания системы управления перспективной орбитальной космической инфраструктурой. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2024. Т. 11. № 3. С. 3–13.

Conceptual Issues of Creating a Control System for Advanced Orbital Space Infrastructure

Yu. A. Timofeev, *Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, timofeev_in@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. Yu. Potyupkin, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., potyupkin_in@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article studies the issues of creating an automated control system for promising orbital space infrastructure as a set of multi-satellite orbital constellations of spacecraft for various purposes. The analysis of the existing capabilities is carried out and the basic concept of the control system and methods of its implementation are proposed, taking into account the peculiarities of the domestic ground-based automated spacecraft control complex.

Keywords: automated control system, multi-satellite orbital constellation, space infrastructure, ground control complex

For citation: Timofeev Yu. A., Potyupkin A. Yu. Conceptual Issues of Creating a Control System for Advanced Orbital Space Infrastructure. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 3–13. (in Russian)

Введение

В настоящее время объективной тенденцией в мировой космонавтике является создание многоспутниковых орбитальных группировок (МОГ). Если в начале XXI века многоспутниковыми считались группировки, насчитывающие десятки КА, то сегодня очередной групповой запуск космических аппаратов (КА) Starlink для пополнения собственной орбитальной группировки, насчитывающей более 6000 КА, уже не вызывает интереса. Эта тенденция объективна, основана на возможностях производства, так, например, в США производственные мощности позволяют создавать около 3 тыс. аппаратов в год, в Китае созданы шесть производств, которые сегодня в состоянии производить около 1200–1500 аппаратов в год, а РФ — только 40. Такое положение дел привело к высокой зависимости РФ от иностранных поставщиков космических услуг и необходимости импортозамещения в области информационно-космического обеспечения.

В связи с этим поставлены задачи кратного наращивания состава орбитальной группировки, перехода на конвейерный способ производства КА. По словам генерального директора Роскосмоса Ю. Борисова, «перед космической промышленностью стоит задача создать к рубежу 2025–2026 гг. мощности по выпуску 200–250 аппаратов в год, а к 2030 г. — нарастить их выпуск до 400 в год. К 2030 г. российская космическая группировка должна насчитывать не менее 1,2 тыс. спутников, к 2035–2036 гг. приблизится к 3 тыс., мировая космическая группировка к этому периоду прогнозируется в составе около 60–70 тыс.» [1]. Примером позитивных перемен является начало реализации федерального проекта «Сфера», включающего от 10 совместно функционирующих космических систем (КС), часть из которых состоит из десятков и сотен КА.

Специалисты космической отрасли, в том числе и АО «Российские космические системы», уже вовлечены в реализацию этих масштабных проектов и начинают осознавать многоплановость проблем создания МОГ, включающих вопросы не только производства, но и эксплуатации, восполнения и применения по целевому назначению уже

не десятков, но сотен и тысяч КА, что неоднократно обсуждалось, в том числе и на страницах нашего журнала [2–6].

Сфера ответственности АО «РКС» традиционно включает вопросы управления КА и КС в целом практически всеми составляющими космической инфраструктуры — наземной и орбитальной, но в рамках настоящей статьи будут рассматриваться вопросы управления перспективной *орбитальной космической инфраструктурой (ОКИ) как новым космическим объектом, под которым понимается система многоспутниковых орбитальных группировок различного назначения — ДЗЗ, связи и передачи данных, находящихся, например, в введении Роскосмоса.*

Выбор ОКИ в качестве основного компонента обусловлен пониманием того, что именно объект управления определяет специфику системы управления, хотя очевидно, что наземная составляющая космической инфраструктуры является не менее важной.

Главной особенностью МОГ является возможность реализации новых *общесистемных сервисов* для потребителя, являющихся результатом совместного применения отдельных КА. Например, система Planet обеспечивает ежедневный мониторинг для актуализации цифрового двойника Земли, Starlink реализует глобальный непрерывный Интернет для массового потребителя, ГЛОНАСС предоставляет глобальное непрерывное координатно-временное обеспечение массового потребителя.

Исходя из этого в настоящей статье под *многоспутниковой орбитальной группировкой понимается динамическая многоагентная система КА, обеспечивающая потребителя сервисами высокого уровня, основанными на групповом применении КА.*

Реализация целевого предназначения любого космического объекта, независимо от его сложности, предполагает дистанционное управление посредством автоматизированной системы управления (АСУ), сложность и функции которой во многом определяются типом управляемого объекта. Сегодняшний опыт управления МОГ в РФ ограничивается только КНС ГЛОНАСС, насчитывающей менее 30 КА. В связи с этим анализ вопросов

создания АСУ перспективной отечественной ОКИ, включающей несколько МОГ, с выработкой предложений по ее реализации представляется актуальным.

Общие замечания

Управление КА в полете — «это комплекс работ (процессов, операций), обеспечивающих достижение целей, задач и программы полета КА. Руководство работами по управлению КА определенного типа осуществляется Центром управления полетом (ЦУП), реализующим технологический цикл управления (ТЦУ), включающий решение следующих задач информационного обеспечения управления КА:

- разработку и передачу на борт текущих программ и управляющих команд, контроль их прохождения и исполнения, корректировку текущих задач и программ в ходе полета — в рамках командно-программного обеспечения (КПО);
- измерение текущих параметров движения КА, определение и прогнозирование параметров орбит и при необходимости их коррекцию — в рамках навигационно-баллистического обеспечения (НБО);
- телеметрический контроль и техническое диагностирование систем и агрегатов КА — в рамках информационно-телеметрического обеспечения (ИТО);
- синхронизацию наземных и бортовых шкал времени — в рамках частотно-временного обеспечения (ЧВО);
- восстановление работоспособности и обеспечение максимального срока активного существования КА (оптимизация режимов работы приборов, рациональное расходование энергоресурсов и их восполнение и др.);
- взаимодействие ЦУП КА с внешними системами и абонентами» [7].

Существующая технология управления основана на реализации установленного разработчиком КА ТЦУ при нахождении в зонах радиовидимости наземных средств управления — командно-измерительных пунктов (КИП), структурно входящих в наземный комплекс управления (НКУ) данным типом КА, образующим АСУ КА вместе

с бортовым комплексом управления (БКУ). Исходя из предназначения к НКУ в целом предъявляются требования обеспечения оперативности, глобальности, непрерывности и надежности управления КА, а также производительности, пропускной способности и точности прогноза движения на момент решения целевых задач.

Основными элементами (составными частями) НКУ автоматическими КА являются: ЦУП; наземные станции (НС) КИП; система связи и передачи данных, объединяющая территориально-разнесенные элементы НКУ.

Учитывая то, что управление КА с помощью НКУ производится, как правило, после отделения его от разгонного блока, важной задачей является также контроль за функционированием ракетносителей (РН) в процессе предстартовой подготовки, пуска и полета РН, а также управления (при необходимости) самими разгонными блоками, осуществляемый средствами измерительного комплекса космодрома и средствами измерительных пунктов, находящихся на трассе их полета. Совокупность средств, привлекаемых к информационному обеспечению пусков РН, образует комплекс средств измерений, сбора и обработки информации (КСИСО РН).

Находящаяся в ведении ГК «Роскосмос» совокупность средств различных НКУ КА научного, социально-экономического назначения, а также средства КСИСО РН, объединенные общим организационно-техническим руководством, образуют НАКУ КА научного и социально-экономического назначения (НСЭН) и измерений.

Организационно-техническое руководство в НАКУ КА НСЭН и измерений осуществляется:

- автоматизированной системой оперативно-технических пунктов управления;
- центром координации эксплуатации и развития, предназначенным для координации работ по эксплуатации наземных средств;
- центром системного анализа, координации и планирования, предназначенным для распределения средств общего пользования в интересах различных НКУ КА и КСИСО РН.

Размещение средств НАКУ КА НСЭН ограничено территорией России. Это затрудняет осуществление непрерывного контроля и управления

как низкоорбитальными, так и высокоэллиптическими КА. Для увеличения глобальности и оперативности управления такими КА создана многофункциональная космическая система ретрансляции (МКСР) «Луч». Спутники-ретрансляторы этой системы предназначены для ретрансляционного управления КА-абонентами, находящимися на орбитах с высотой не более 2000 км, а также могут ретранслировать с РН телеметрическую информацию (ТМИ), и в настоящее время в основном применяются в пилотируемых программах и при контроле пуска РН. Использование их для управления другими типами КА сдерживается ограниченными возможностями СР «Луч» и отсутствием заинтересованности главных конструкторов КС в установке на КА-абонентах БА межспутниковых радиолиний. Как вывод отметим, что СР типа «Луч» для работы с абонентами в межспутниковых радиолиниях имеют существенные ограничения по производительности, а МКСР «Луч» не предназначалась и не способна обеспечивать управление многоспутниковыми орбитальными группировками.

Анализ зарубежного опыта управления КА свидетельствует о схожести основных подходов в создании АСУ КА. Отличие заключается в более широких возможностях по обеспечению глобальности и непрерывности управления за счет глобального размещения наземных средств и наличия развитых систем ретрансляции на различных типах орбит. Кроме того, для МОГ решаются задачи оперативного обеспечения доступности потребителей связью и сервисами ДЗЗ. Следует также отметить высокий уровень автоматизации процессов управления КА. В частности, в настоящее время известны примеры вариантов автоматизации процесса анализа и управления КА, основанных на использовании моделей предметной области, правил вывода и принятия решений и организованных в виде баз данных и знаний с соответствующим человеко-машинным интерфейсом, позволяющие значительно снизить затраты на управление полетом КА и уменьшить численность персонала [8].

Технология управления отечественными одноканальными КА также хорошо отработана и основана на проведении определенного числа сеансов связи с каждым КА. Нарастивание орбитальной группировки в разы при существующей технологии управ-

ления очевидно вызовет аналогичный рост числа сеансов связи с КА, что ставит вопрос о способности существующего НАКУ и входящих в него НКУ решать задачи управления многоспутниковой группировкой КА. Потребуется решать все большее число задач управления в условиях ограниченных ресурсов. В связи с этим разработка эффективной технологии управления низкоорбитальными МОГ и проектирование соответствующих НКУ являются первоочередными задачами для специалистов отрасли.

Исследование любой системы управления целесообразно проводить по следующей схеме: 1) определение цели управления; 2) анализ свойств объекта управления; 3) обоснование технологии управления как способа достижения цели; 4) определение средств управления для реализации выбранной технологии управления; 5) определение содержания видов обеспечения процесса управления.

В дальнейшем будем придерживаться указанной схемы с выявлением проблемных вопросов и поиском путей их решения.

1. Первым шагом является *определение цели управления* ОКИ. Как правило, цели управления для таких сложных систем формулируются вербально, иногда даже на уровне деклараций, но при создании технической системы целесообразно иметь конкретные формулировки, которые в дальнейшем могут быть формализованы с отображением в соответствующие показатели степени их достижения. Исходя из того, что в ГОСТ Р56526-2015 указано, что каждая КС должна обладать соответствующим дифференциальным и интегральным выходными эффектами, будем считать, что для многофункциональной ОКИ *общая цель функционирования* может быть сформулирована как *обеспечение массового потребителя космическими информационными сервисами с требуемым качеством*. Следовательно, *общей задачей управления ОКИ является обеспечение устойчивого функционирования МОГ с целью поддержания требуемого уровня вероятностно-временных характеристик доступности космических сервисов для потребителя*.

Например, для *космической навигационной системы доступность* характеризуется возможностью получения потребителем в рабочей зоне сис-

темы достоверной информации о своем местоположении в определенный период времени и с требуемой точностью.

Для космических систем связи доступность рассматривается как способность систем связи обеспечивать абонентам систем связи доступ к радиоресурсу при сохранении назначенных приоритетов и способов установления связи. Оценивается она вероятностью санкционированного доступа абонента независимо от его местоположения к радиоресурсу системы связи.

Показатель доступности как вероятность предоставления сервисов с требуемым качеством за заданное время уже известен и активно применяется в КНС ГЛОНАСС и ряде глобальных систем космической связи. Например, для КС связи в первом приближении оценка вероятности доступа P_d оценивается как

$$P_d = \frac{S_n T_a}{S_a T_0},$$

где S_n — площадь пересечения района расположения абонента с площадью зоны обзора радиопараметры; S_a — площадь района расположения абонента; T_a — время, в течение которого абонент находится в зоне радиоприема во время цикла обращения КА; T_0 — период обращения КА.

Для систем ДЗЗ понятие доступности в настоящий момент практически не используется. Однако значительное возрастание возможностей орбитальных группировок ДЗЗ в связи с созданием МОГ позволяет утверждать, что такое положение временно. Поэтому под *доступностью систем ДЗЗ* будем понимать способность систем ДЗЗ обеспечивать потребителей требуемыми сервисами ДЗЗ по выбранным районам наблюдения земной поверхности с заданным качеством. Примерами таких сервисов являются как традиционные базовые и тематические продукты, предоставляемые НЦ ОМЗ, так и вновь разрабатываемые, основанные на концепции «от данных к решениям».

Исходя из того, что показатель доступности как вероятность предоставления сервисов с требуемым качеством за заданное время уже известен, *общей целью управления МОГ является обеспечение указанной вероятности условиях ее реального функционирования.* При этом доступность

определяется орбитальным построением системы, количеством функционирующих КА, их назначением, параметрами АСУ КА и рядом других параметров.

Частными целями управления являются обеспечение требуемых показателей качества управления, к числу которых относятся глобальность, непрерывность, оперативность управления, пропускная способность и производительность системы управления, а также точность прогноза вектора положения КА на момент решения целевых задач.

2. Следующим шагом является *моделирование объекта управления.* Проведенный анализ показал, что в настоящее время существует множество разнообразных моделирующих комплексов, позволяющих отобразить те или иные стороны функционирования отдельных КС и их характеристики, например баллистическое построение, однако моделирование ОКИ как системы МОГ в целом не проводилось. Создание такой модели позволит не только учитывать динамику функционирования создаваемых отдельных КС инфраструктуры, но и исследовать динамику их взаимосвязей, выявить внутренние закономерности, связанные с нестабильностью параметров орбитальных структур, возникновением массовых отказов КА и влиянием на выходные параметры как отдельных КС, так и ОКИ в целом. При этом целесообразно перейти на другой уровень представления ОКИ — уровень динамической телекоммуникационной системы, включающей множество оконечных устройств — источников и потребителей информации — и сеть информационного обмена.

3. Изменение объекта управления диктует и необходимость *разработки новой технологии управления* — от традиционного управления отдельным КА с «жестким» контролем его состояния, необходимо переходить к технологии управления системой КА — множеством взаимодействующих КА, где ТЦУ одного КА будет зависеть от ТЦУ другого КА. Это потребует реализации технологий *мультиагентного* управления, которое в настоящий момент в космической сфере деятельности в основном рассматривается как обеспечение многостанционного доступа. В рамках концепции мультиагентного управления возникнут задачи управления структурами элементов — КА,

их взаимодействием, устранением конфликтов, новое содержание получают задачи *целераспределения*, планирования; неважно, какой именно КА будет выполнять целевую задачу, важно, чтобы она была выполнена. Появится класс задач верхнего уровня — управления ресурсами, когда для получения требуемого уровня выходного эффекта или отдельных сервисов потребуется варьировать ресурсами разных КС.

Новые задачи отобразятся в структуре ТЦУ системой и отдельными КА, и традиционные виды информационного обеспечения получают новое содержание. Все вышесказанное приведет к потребности разработки ТЦУ нового уровня — уровня ОКИ как системы МОГ. Это позволит в значительной степени регламентировать процесс управления с дальнейшей его автоматизацией.

Представляется, что в основе новых технологий должен лежать переход от управления отдельными КА к управлению целевым эффектом всей КС в условиях ограниченности ресурсов управления. Сложность объекта управления — системы КА, с одной стороны, и ресурсные ограничения, с другой стороны, потребуют новых подходов, основанных на *гомеостазе* — системной адаптации ко всему спектру факторов воздействия с целью установления динамического равновесия и сохранения целостности системы и способности достижения требуемого уровня выходного эффекта с учетом ограничений на ресурсы АСУ МОГ.

Как показано в [3], требование системной адаптации «предполагает наличие своеобразных “уступок” антагонистам: с одной стороны, допускается определенное снижение показателей упорядоченности, например отказ от жесткой баллистической структуры, понижение требований к точности занятия орбитальной позиции КА, допускается стохастический вывод КА на орбиту, предполагаются также отказ от резервирования части подсистем, перенос функций управления на борт КА, использование элементной базы с менее строгими требованиями по надежности — коммерческой электроники; использование “наземных” решений для обработки и проведения испытаний из опыта других отраслей промышленности и др.; с другой стороны, разрабатываются способы компенсации влияния факторов разрушения, например варианты

управления системой с нарушенной баллистической структурой, множественного выбора КА для выполнения целевой задачи», создание орбитального резерва и т. д.

Условием реализации системной адаптации для устойчивого управления МОГ является учет внутренних закономерностей функционирования МОГ как сложной системы и отражение состояния МОГ в актуальном альманахе системы по аналогии с КНС ГЛОНАСС.

Важным фактором является создание избыточности ресурсов на орбите для обеспечения решения целевой задачи как по количеству КА, так и по их функциональному предназначению, определяемому полезной нагрузкой КА.

Отдельным вопросом является распределение функций БКУ и НКУ в АСУ КА. Для повышения автономности функционирования КА в рамках ОКИ представляется целесообразным развитие концепции режимов функционирования применительно не к отдельным КА, а к функционированию групп КА и КС в целом [4]. В этом случае возможна разработка содержания новых алгоритмов и операций системного уровня как составляющих режимов функционирования, с последующей разработкой программно-математического обеспечения (ПМО) для БКУ, что позволит сократить информационный обмен НКУ–БКУ и тем самым снизить нагрузку на НКУ.

4. Реализация новых технологий управления должна опираться на технические возможности АСУ КА, определяемые в первую очередь НАКУ РФ. Существующий НАКУ, включающий множество НКУ для уже функционирующих КС, не обеспечивает выполнения требований по глобальности, непрерывности и оперативности управления. Но кратное увеличение численности ОКИ выносит вопрос о пропускной способности НАКУ, включающего ограниченное число средств управления, на первый план. Однако разработчики АСУ создаваемых КС по привычке уповают на «безграничные» ресурсы существующих НКУ, даже не согласовывая друг с другом свои предложения.

Очевидным выходом из сложившейся ситуации является согласование предложений по использованию средств НАКУ для создаваемых в рамках ОКИ отдельных КС, своеобразная «инвен-

таризация» ресурсов с последующим определением путей повышения как пропускной способности НАКУ, так и в его характеристик в целом. К числу таких путей можно отнести следующие:

- 1) разработка НС многостанционного доступа с использованием технологий временного, частотного, пространственного, кодового, поляризованного разделения каналов и их комбинаций;
- 2) создание на отечественной элементной базе модема с программно-определяемой структурой сигнала, позволяющего работать с любыми сигналами, используемыми в БА КИС, как с существующими, так и с новыми;
- 3) расширение сети наземных станций с созданием КИП в северных широтах, в том числе и автономных, работающих без операторов с дистанционным управлением из ЦУП, позволяющим, в том числе, оперативно устанавливать нужную структуру сигнала в модеме;
- 4) возрождение на новой основе мобильных КИП различного базирования;
- 5) развитие системы информационного обмена в рамках НАКУ с возможностью оперативного подключения новых средств управления;
- 6) внедрение абонентского (сквозного) шифрования информации в местах ее формирования и использования (в ЦУП и в БА КИС), что связано с переносом средств защиты из НС КИС в ЦУП КА. Это не только обеспечит закрытие информации в радиолиниях при непосредственном и ретрансляционном управлении КА, но и облегчит доведение информации по трактам ССПД, в том числе при работе перебазируемых (мобильных) НС КИС на необорудованных площадках;
- 7) стандартизация требований по управлению КА, согласование форматов управляющей и измерительной информации;
- 8) привлечение для управления КА наземного специального комплекса — средств приема специальной информации для МОГ ДЗЗ, шлюзовых станций для МОГ спутниковых систем связи, использования целевых радиолиний в интересах управления КА, включая передачу по ним в составе ТМИ данных бортовой навигационной аппаратуры потребителя (БНАП) и сигнала «Вызов НКУ»;
- 9) внедрение технологий искусственного интеллекта в процессы управления в ЦУП, построение ЦУП из унифицированных средств с минимальным использованием импортного оборудования при полностью отечественном программном обеспечении, максимальная автоматизация процессов обработки телеметрии, планирования и реализации сеансов управления.

Создание глобальной системы ретрансляции для обеспечения требуемых характеристик по глобальности, непрерывности и оперативности управления МОГ также является очевидным, но наиболее проблемным вопросом для обеспечения реализации технологий управления КА. Основная причина заключается в ее экономической целесообразности. Сегодня внимание разработчиков КА связи сосредоточено на предоставлении услуг информационного обмена массовому потребителю, в основном наземному, способному обеспечить экономическую эффективность проектов. Система ретрансляции, в свою очередь, ориентирована на ограниченный круг потребителей, в основном потребителей информации ДЗЗ, и в силу этого не является экономически рентабельной. В связи с этим решение о создании глобальной системы ретрансляции должно приниматься на уровне ГК «Роскосмос» с отдельным обоснованием требований к ней со стороны возможных заказчиков.

Возможна реализация предложенной в работе [3] концепции «орбитальных сот» путем формирования динамической сети базовых станций по типу наземных сетей сотовой связи, на основе выделенных из состава МОГ КА связи и ретрансляции. В этом случае «в составе группировки выделяются КА, выполняющие роль базовых станций космических «сот» и оснащенные БА для организации связи как с абонентами, так и с соседними базовыми станциями и наземной инфраструктурой. Остальные КА МОГ выступают в качестве абонентов, оснащенных модемами сети, они регистрируются при нахождении в зоне действия конкретной «соты» и пользуются ее ресурсами как для передачи специальной информации для потребителей, так и для решения задач информационного обмена в процессе управления. Таким образом, предлагается функциональная специализация КА в сети и создание сети «базовых станций-ретрансляторов»

на основе выбранных КА внутри многоспутниковой группировки» [3]. Представляется, что с учетом энергомассогабаритных ограничений подсистема информационного обмена может быть создана как на базе низкоорбитальных (НО), так и среднеорбитальных (СО) КА. Таким образом, в составе ОКИ предполагается наличие двух подсистем: целевой, реализующей функции мониторинга, связи и навигации, и информационной как обеспечивающей обмен целевой и управляющей информацией.

Примерная схема взаимодействия перспективного НАКУ с вновь разрабатываемыми автономными и НС многостанционного доступа для управления МОГ без учета средств НКПОР и шлюзовых станций приведена на рис. 1.

Предлагается на начальном этапе размещение автоматизированных НС с дистанционным управлением осуществлять на удаленных измерительных пунктах (ИП), имеющих базовую инфраструктуру, в первую очередь в северных широтах для повышения производительности НАКУ. В то же время НС многостанционного доступа с АФАР, ввиду новизны применяемых технологий и необходимости тесного взаимодействия с промышленностью, целесообразно развернуть на базе больших КТС и КИП.

Вместе с тем даже с использованием системы ретрансляции количество каналов информационного обмена ЦУП–КА не уменьшится, что ставит вопрос о пропускной способности АСУ ОКИ более остро. Очевидным выходом является сокращение числа сеансов информационного обмена за счет повышения автономности функционирования КА на основе известных технологий:

- повышения автономности полета КА путем использования БНАП глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС, BeiDou, GPS), координатного метода управления и реконфигурации БА по результатам анализа в БКУ данных ТМИ («умный борт»);
- сетевых технологий управления на основе автоматической маршрутизации и децентрализация управления при наличии межспутниковой связи;
- использования идеологии режимов функционирования как обобщенных алгоритмов функционирования КА и МОГ в целом, реализованных в виде соответствующего ПМО в БКУ КА и требующих для своей активации исходных данных в составе рабочих программ при решении задач КПО.

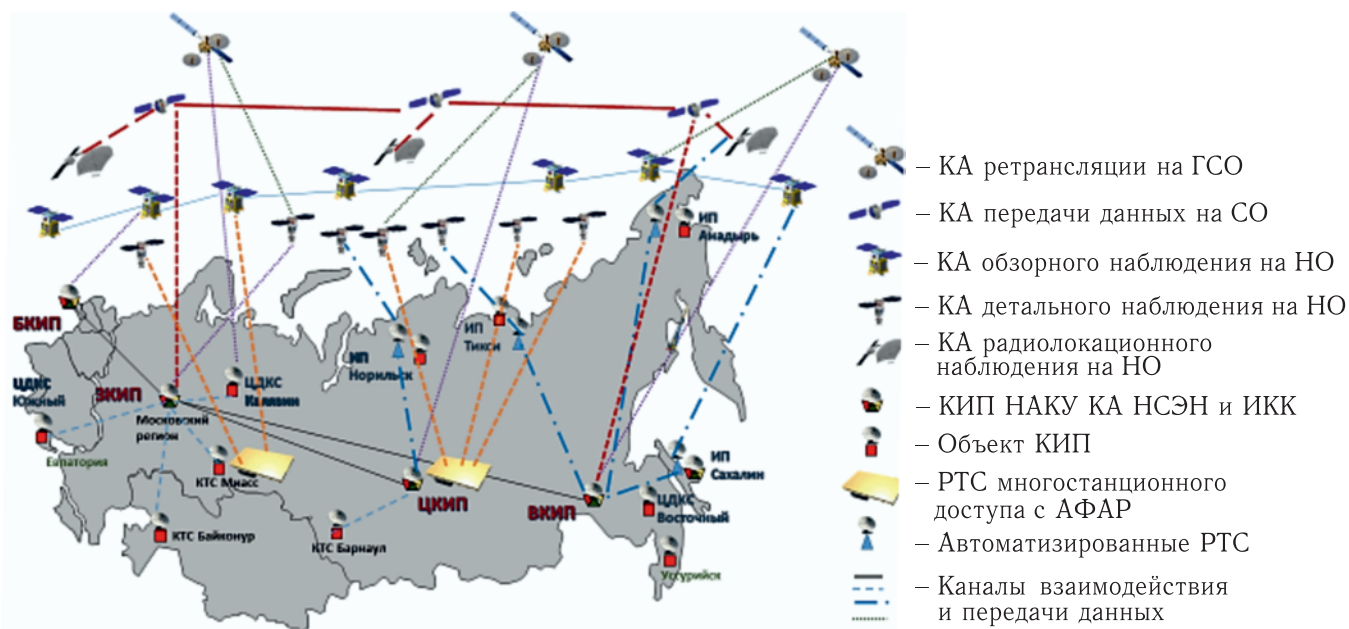


Рис. 1. Схема взаимодействия перспективного НАКУ с объектами ОКИ

Fig. 1. Diagram of interaction of an advanced ground control complex with orbital space infrastructure objects

Важнейшим элементом АСУ КА является Центр управления полетом. Очевидно, что создание КИ выводит вопрос о взаимодействии ЦУП отдельных КС на новый уровень — требуется создание ЦУП всей ОКИ, выполняющего координирующие функции, включающего основной и резервный компоненты, являющегося центром распределенной системы отдельных ЦУП КС с соответствующими центрами обработки данных.

Обобщенные схемы взаимодействия МОГ ДЗЗ и связи (передачи данных) с единым Центром координации представлены на рис. 2.

5. Заключительным этапом является определение содержания видов обеспечения для вновь создаваемой АСУ ОКИ, к числу которых относят математическое, алгоритмическое, программное, информационное, лингвистическое, техническое, метрологическое и ряд других. При этом наиболее

значимыми являются математическое, алгоритмическое, программное обеспечения, подразумевающие разработку математических моделей объектов и процессов, алгоритмов и соответствующих программ для автоматизации процессов управления КА, без которой невозможно выполнение требований по обеспечению пропускной способности и производительности АСУ.

В настоящее время известны примеры удачных вариантов автоматизации процесса анализа и управления КА, основанных на использовании моделей предметной области, правил анализа и принятия решений, организованных в виде баз данных и знаний с соответствующими человеко-машинными интерфейсами [8]. Естественным шагом на пути автоматизации ЦУП является внедрение интеллектуальных систем как систем, способных как решать штатные задачи известными

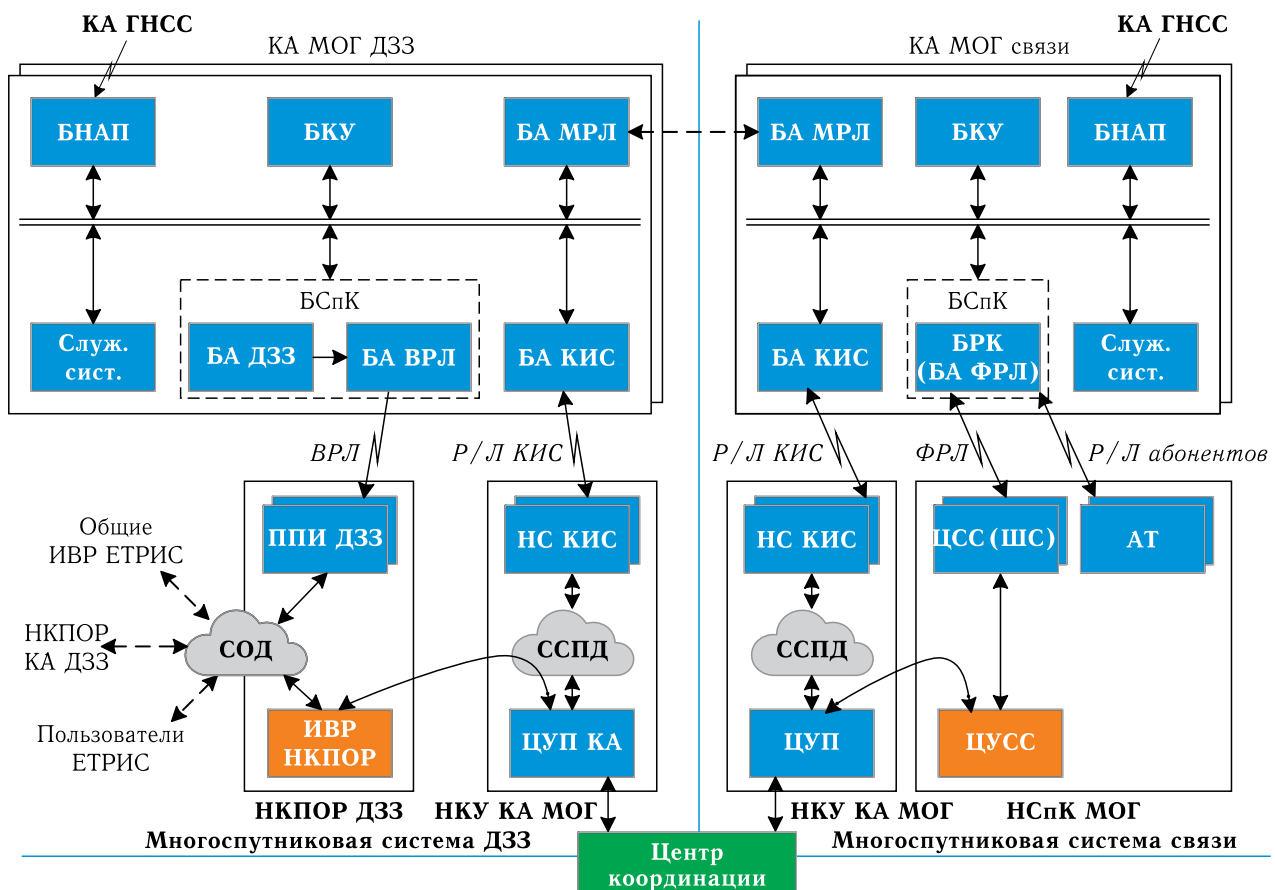


Рис. 2. Обобщенная схема взаимодействия МОГ ДЗЗ и связи с единым Центром координации
 Fig. 2. Generalized diagram of interaction between a ERS constellation and communication with a unified Coordination Center

алгоритмами, так и порождать новые алгоритмы для выбора действий в возникшей нештатной ситуации [9]. Технологии интеллектуализации известны, но их внедрение носит пока что ограниченный характер и связано в первую очередь с крайне высокими требованиями по надежности АСУ КА и обоснованности принимаемых решений.

Следует отметить, что внедрение технологий интеллектуализации для управления КА получило новый импульс в связи с развитием концепции цифровых двойников как систем, состоящих из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и/или его составными частями [10]. Цифровой двойник является текущим образом объекта управления и позволяет решать задачи анализа его состояния и предназначен «не только для хранения информации об объекте и процессе его разработки, но и для определения рисков и предсказания последствий принятия тех или иных решений или возникновения неисправностей, осуществляемых за счет хранения накопленного опыта создания и эксплуатации различных объектов» [11].

Особую значимость цифровые двойники приобретают при управлении и анализе состояния многоспутниковых КС, являющихся системами сложными, с высокой неопределенностью функционирования. Вследствие этого резко возрастают требования не только к качеству проектирования системы, но и к качеству управления МОГ в целом и ее составляющими. В связи с этим моделирование многоспутниковых многофункциональных КС и космической инфраструктуры в целом на этапе их проектирования и эксплуатации и разработка соответствующих программных продуктов является необходимым.

Выводы

Рассмотренные выше пути развития АСУ перспективной орбитальной космической инфраструктурой позволяют внести ряд практических предложений по развитию тематики МОГ в проводимых и планируемых научно-исследовательских работах.

Представляется, что внимание разработчиков должно быть сосредоточено на следующих направлениях деятельности:

1. Исследованиях общесистемных задач управления МОГ.

2. Исследованиях в области объединения ресурсов наземной инфраструктуры для разных КС, согласования проектов развития и использования НКУ для различных КС, образующих МОГ и ОКИ.

3. Разработке постоянно актуализируемого цифрового двойника ОКИ для ЦУП, учитывающей динамику движения и состояние всех КА орбитальной группировки, а также средств НКУ и в максимальной степени отражающей происходящие на КА процессы при различных воздействиях.

4. Исследованиях в области новых технологий управления общесистемного уровня, разработке ТЦУ системного уровня.

5. Разработке проекта глобальной системы ретрансляции на базе низкоорбитальных и среднеорбитальных КА.

6. Освоении более высокочастотных диапазонов, включая оптический, для передачи целевой информации и управления.

7. Разработке проектов наземных систем с многостанционным доступом.

8. Разработке проектов автономных средств управления КА.

9. Разработке проектов мобильных средств управления КА различного базирования.

10. Разработке комплекса технических и организационных мероприятий, повышающих помехозащищенность радиолиний в условиях действия помех.

11. Разработке содержания режимов функционирования общесистемного уровня для БКУ КА и соответствующих «автоматических сценариев» обработки информации в ЦУП КА.

12. Проведении ряда практических экспериментов по отработке технологий группового управления КА.

Очевидно, что в условиях ограниченности ресурсов, и не только финансовых, проведение исследований в области создания системы управления новым космическим объектом — орбитальной космической инфраструктурой как системы многоспутниковых группировок различного назначения — не только целесообразно, но и необходимо. Для решения указанных задач целесообразно задать техническое задание на комплексную НИР,

в рамках которой провести обоснование создания АСУ, обеспечивающей совместное функционирование отдельных МОГ, образующих ОКИ, с учетом предлагаемых в настоящей статье направлений исследования. При этом облик АСУ перспективной ОКИ нужно формировать с учетом имеющегося научно-технического задела и опыта эксплуатации КС на основе существующей структуры НАКУ КА НСЭН [12, 13], что соответствует критерию минимума затрат при условии выполнения целевых задач, и соблюдению дополнительных требований потенциального Заказчика, связанных с т. н. «конъюнктурной оптимизацией».

В заключение авторы хотели бы выразить глубокую признательность доктору технических наук, профессору А. И. Жодзишскому за конструктивное обсуждение материалов статьи и ценные замечания, направленные на достижение общей цели — успешной реализации проектов создания отечественных многоспутниковых группировок КА.

Список литературы

1. <https://ria.ru/20230210/borisov-1850850429.html> (Дата обращения 20.10.2023)
2. Жодзишский А. И., Жидкова С. К., Нагорных Д. Н. Построение единого наземного комплекса управления многоспутниковой группировки КА ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. Вып. 4. С. 45–56.
3. Потюпкин А. Ю., Волков С. А., Пантелеймонов И. Н., Тимофеев Ю. А. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. Вып. 3. С. 61–70.
4. Потюпкин А. Ю., Волков С. А., Тимофеев Ю. А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. Вып. 3. С. 11–19.
5. Ватутин С. И., Гвардин Р. М., Курков И. К. Межорбитальная система передачи данных для управления группировкой малых КА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. Т. 9. Вып. 3. С. 65–75.
6. Потюпкин А. Ю., Волков С. А., Тимофеев Ю. А. Обеспечение устойчивости функционирования многоспутниковых космических систем на основе концепции гомеостаза // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2023. Т. 10. Вып. 1. С. 21–30.
7. <https://vunivere.ru/work62102> (Дата обращения 07.06.2024)
8. Эволюция и тенденции развития комплексов управления КА за рубежом. <https://www.poznovatelno.ru/space/8350.html> (Дата обращения 20.10.2023)
9. Искусственный интеллект в военно-космической деятельности / Под ред. М. М. Пенькова, И. В. Сахно, А. В. Назарова. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского. 2022 г. 543 с.
10. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. № 979-ст: введен впервые: разработан ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого. М.: Стандартинформ, 2021. 10 с.
11. Рябогин Н. В., Ерохин Г. А., Пронина Е. Б., Кочелев А. Ю. Модельно-ориентированный системный инжиниринг как основа обеспечения разработки и создания перспективных космических систем и комплексов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. Вып. 3. С. 51–60.
12. Вокин Г. Г., Насибулин М. Ш., Хапаев О. А., Старовойт С. С. Концептуальные основы максимизации эффективности перспективных систем управления важнейших ракетно-космических летательных аппаратов на всех этапах их жизненного цикла // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2024. Т. 11. Вып. 1. С. 48–59.
13. Жодзишский А. И., Круглов А. В., Леонов М. С., Якутин С. А. Системный подход к проектированию радиолиний низкоорбитальных многоспутниковых систем передачи данных // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2023. Т. 10. Вып. 3. С. 60–69.

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.05.2024
Дата принятия рукописи
в печать 26.08.2024