

УДК 629.783 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.4.14.21

Построение единого наземного комплекса управления многоспутниковой группировки КА ДЗЗ

А. И. Жодзишский, *д. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. К. Жидкова, *zhidkova.sk@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. Н. Нагорных, *к. ф.-м. н., contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Дальнейшее развитие российских наземных комплексов управления (НКУ) КА ДЗЗ с учетом возрастания числа космических аппаратов требует новых подходов при решении задач повышения оперативности и глобальности управления этими КА. В работе рассматривается возможность создания Единого НКУ КА ДЗЗ (ЕНКУ ДЗЗ), включающего существующие НКУ КА ДЗЗ и обеспечивающего управление перспективными вновь создаваемыми КА ДЗЗ. В составе ЕНКУ ДЗЗ должен быть создан единый центр управления, обеспечивающий моделирование, планирование, анализ и управление перспективной и существующей группировками КА и наземными средствами.

Используя зарубежный опыт управления многоспутниковыми группировками и реализуя собственные наработки при создании специального программного обеспечения ЦУП, для новых группировок КА предлагается максимально автоматизировать выполнение задач типового штатного цикла управления, автоматизировать периодические операции по техническому обслуживанию КА и локализацию нештатных ситуаций.

Для отечественной ОГ ДЗЗ с целью автоматизации процессов управления предлагается также создание цифровой математической модели орбитальной группировки и наземных средств. Модель, учитывающая и описывающая пространственно-временное положение КА ОГ, расположение средств НКУ, НКПОР, спутников-ретрансляторов, их техническое состояние, состав и работоспособность, должна лечь в основу выполнения сквозного планирования основных операций управления и целевого применения многоспутниковой ОГ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, наземный комплекс управления, многоспутниковые орбитальные группировки, навигационно-баллистическое обеспечение КА, пространственно-временное положение КА

Construction of a Unified Ground-based Control Complex for a Multi-satellite ERS Constellation

A. I. Zhodzishskiy, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. K. Zhidkova, *zhidkova.sk@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. N. Nagornykh, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. Taking into account the increasing number of spacecraft the further development of the Russian ground-based control systems (GCS) for Earth remote sensing spacecraft requires new approaches to solving the problems of increasing the efficiency and global control of these spacecraft. The paper considers the possibility of creating a unified ERS GCS (ERS UGCS), including the existing ERS GCS and providing control capabilities for promising, newly created ERS SC. As part of the ERS UGCS, a single control center should be created that provides modeling, planning, analysis and control of future and existing spacecraft constellations and ground-based facilities.

Using international experience in managing multi-satellite constellations and implementing our own experience in creating special software for the control centers, for new spacecraft constellations, it is proposed to automate the tasks of a typical regular control cycle, automate periodic maintenance operations of the spacecraft and localize emergency situations.

With the aim of automating control processes, the creation of a digital mathematical model of the orbital constellation and ground-based facilities is also proposed for Russian remote sensing constellations. A model that takes into account and describes the spatio-temporal position of the spacecraft constellations, the location of the GCS, ground based data receiving processing and distribution complexes, multifunctional relay stations (MFRS), their technical condition, composition and performance should form the basis for the implementation of end-to-end planning of the main control operations and the targeted use of multi-satellite constellations.

Keywords: Earth remote sensing, ground-based control complex, multi-satellite orbital constellations, navigation and ballistic support of the spacecraft, space-time position of the spacecraft

Наземный комплекс управления (НКУ) автоматическими космическими аппаратами (КА) — это совокупность технических средств и сооружений, предназначенных для управления функционированием КА с момента их выведения на орбиту [1]. НКУ создается для одного или нескольких однотипных КА и состоит из центра управления полетом (ЦУП), наземных станций (НС) командно-измерительных систем (КИС), обеспечивающих взаимодействие с КА, системы связи и передачи данных (ССПД), объединяющей элементы НКУ.

Большая часть отечественных НКУ КА гражданского назначения строится на базе средств наземного автоматизированного комплекса управления КА научного и социально-экономического назначения и измерений (НАКУ КА НСЭН). Особенностью указанных НКУ является использование средств коллективного доступа из состава НАКУ КА НСЭН [2]:

- мультисервисной системы связи и передачи данных (МССПД);
- центра ситуационного анализа, координации и планирования (ЦСАКП), обеспечивающего распределение ресурса НС КИС между КА;
- центра координации, эксплуатации и развития (ЦКЭР), отвечающего за техническую готовность средств НАКУ;
- НС КИС.

Обычно ЦУП при создании новых НКУ КА — единственное вновь создаваемое изделие, разрабатываемое под конкретный космический аппарат или тип космических аппаратов.

Задачи управления КА, выполняемые с помощью средств НКУ, решаются путем проведения сеансов связи с каждым КА в соответствии с долгосрочными и суточными планами управления. Планы составляются на основе разработанных технологических циклов управления (ТЦУ) КА и планов целевого использования аппаратуры КА. В сеансах связи на КА передаются управляющие воздействия, а НКУ принимает подтверждающие квитанции в составе диагностической информации и телеметрическую информацию (ТМИ), содержащую данные о состоянии обеспечивающих систем и целевой аппаратуры КА [3].

НКУ решает следующие основные задачи [4]:

- подготовка средств НКУ к запуску КА и к управлению КА в полете;

- управление КА в течение всего срока активного существования, в том числе в случае возникновения нештатных ситуаций;

- автоматизированное долгосрочное и оперативное планирование операций управления КА и работы средств НКУ;

- автоматизированная подготовка исходных данных и технологической информации для решения задач командно-программного обеспечения, навигационно-баллистического обеспечения полета КА, контроля состояния и функционирования КА;

- автоматизированная подготовка и проведение сеансов связи с КА;

- автоматизированный контроль выполнения КА программы полета по принятой ТМИ как при штатном функционировании, так и при отказах бортовой аппаратуры и возникновении нештатных ситуаций (НШС);

- автоматизированный сбор, обработка и анализ информации всех видов, формирование оперативного отображения и документирования результатов обработки с целью контроля выполнения технологического цикла управления КА, состояния бортовой аппаратуры КА и средств НКУ, учета ресурсов, а также накопления, систематизации и хранения текущей информации о состоянии КА;

- измерение текущих навигационных параметров (ИТНП) КА с помощью НС КИС, определение и прогнозирование движения КА по результатам ИТНП и/или данных аппаратуры спутниковой навигации КА с точностями, необходимыми для работы НКУ и наземного комплекса приема, обработки и распространения информации ДЗЗ (НКПОР);

- автоматизированный обмен баллистической, командно-программной, контрольной и оперативно-технической информацией внутри НКУ и с внешними абонентами.

Европейские и американские НКУ КА ДЗЗ отличаются от российских использованием наземных средств управления, расположенных по всему миру и принадлежащих различным странам и операторам, как правило, совмещенным с приемом информации ДЗЗ. Возможность привлечения средств различных операторов достигается унифици-

кацией протоколов всех уровней взаимодействия. Распределение средств по всему миру обеспечивает глобальность управления и оперативность доведения снимков до потребителей. Наиболее востребованными являются наземные станции, находящиеся в высоких северных и южных широтах, такие как SvalSat, TSS, TrollSat. Станция SvalSat, расположенная на Шпицбергене (оператор KSAT), предоставляет наземные услуги большему количеству спутников, чем любой другой наземный объект в мире. Норвежский оператор KSAT располагает крупнейшей сетью наземных средств, состоящей из более чем 140 антенн, расположенных на 21 площадке по всему миру. Наземный комплекс PlanetLab, используемый для управления группировками Dove, SkySat и RapidEye, расположен на 12 площадках и имеет 36 антенн [5, 6].

Необходимо отметить широкое использование, особенно в США, спутников-ретрансляторов для управления и оперативного получения снимков с КА ДЗЗ.

Дальнейшее развитие российских НКУ КА ДЗЗ с учетом возрастания числа космических аппаратов требует новых подходов при решении задач повышения оперативности и глобальности управления этими КА. Для решения указанных задач целесообразно рассмотреть возможность создания Единого НКУ КА ДЗЗ (ЕНКУ ДЗЗ), включающего существующие НКУ КА ДЗЗ и обеспечивающего управление перспективными вновь создаваемыми КА ДЗЗ. В ЕНКУ ДЗЗ должен быть создан единый центр управления, обеспечивающий моделирование, планирование, анализ и управление перспективной и существующими группировками КА ДЗЗ и наземными средствами. Существующие НКУ войдут в ЕНКУ как самостоятельные самостоятельные комплексы управления КА, но обеспечивающие реализацию планов единого центра.

Задачи ЦУП ЕНКУ ДЗЗ можно разделить на задачи по управлению отдельными КА и задачи по обеспечению функционирования орбитальной группировки КА ДЗЗ в целом.

В части управления отдельными КА ЦУП ЕНКУ ДЗЗ решают традиционные задачи:

1) навигационно-баллистического обеспечения (НБО);

2) командно-программного обеспечения (КПО), включая:

- выполнение типового цикла управления КА;
- обеспечение автоматической закладки рабочих программ (РП) через КИС на КА;
- обеспечение закладки РП по межспутниковой радиолинии;
- обеспечение НКПОР необходимой информацией для планирования целевых работ;
- дистанционный контроль и управление НС КИС из ЦУП;

3) информационно-телеметрического обеспечения (ИТО), включая интегральную оценку состояния КА.

Задачи по управлению ОГ в целом включают:

1) баллистическое моделирование всей ОГ КА ДЗЗ;

2) поддержание баллистического построения ОГ и разработку стратегии ввода в группировку новых КА ДЗЗ;

3) определение готовности КА ОГ и наземных средств к выполнению заявок потребителей.

Увеличение количества КА в орбитальной группировке приведет к увеличению и качественному изменению наземной инфраструктуры, используемой для управления КА и приема с них данных ДЗЗ. Для расширения суммарных зон радиовидимости наземных средств целесообразно создание новых площадок, размещенных преимущественно в высоких северных и южных широтах: на Шпицбергене, в Антарктиде, на территории РФ — в Мурманске, Дудинке, Анадыре и других северных пунктах, обладающих инфраструктурой для создания пунктов управления КА и приема с них данных ДЗЗ.

Размещение наземных станций КИС в высоких широтах даст наибольшее количество рабочих витков для КА на низких солнечно-синхронных полярных орбитах. С учетом НС КИС в Антарктиде возможны два сеанса управления КА на одном витке с интервалом в 40 минут.

Использование спутников-ретрансляторов (СР) для оперативной закладки рабочих программ на КА ДЗЗ и для приема с них ограниченного набора телеметрических параметров, включая квитанции на закладку РП, позволит обеспечить глобальность и оперативность управления. Для вновь

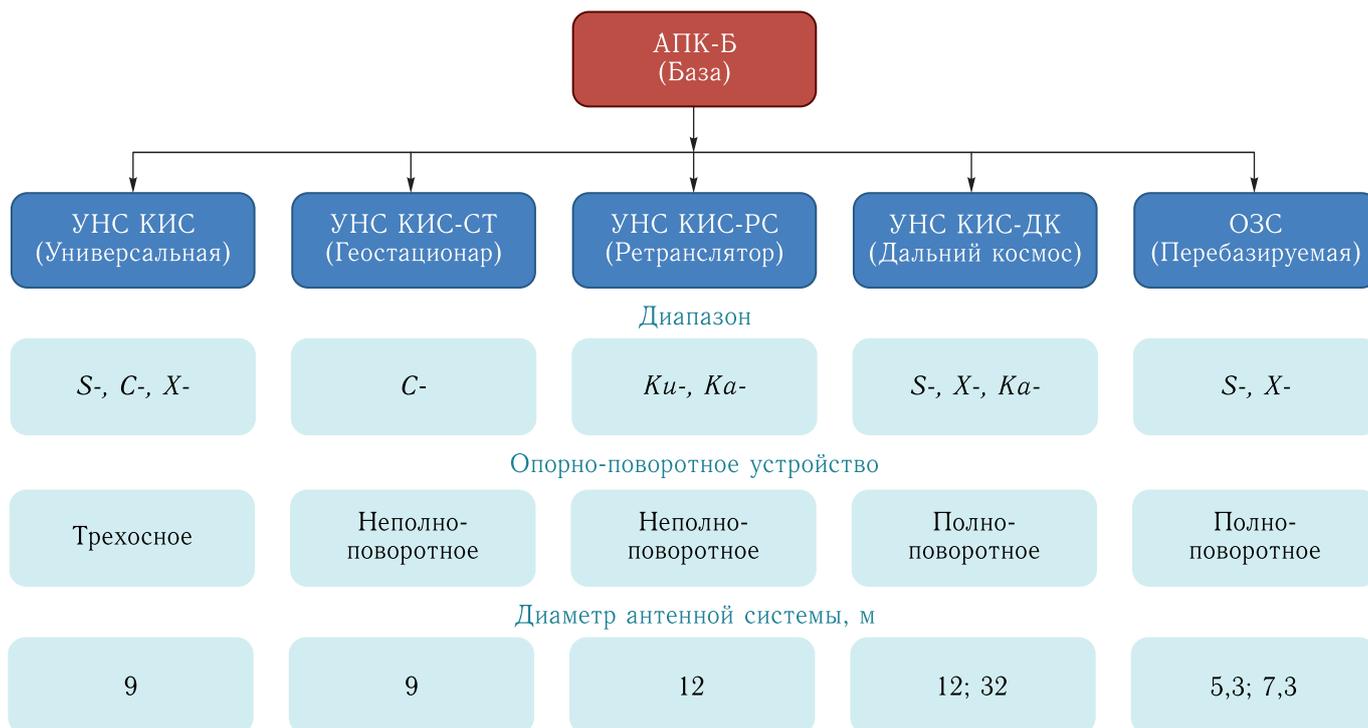


Рисунок. Ряд УНС КИС на базе общего АПК-Б (база) и набора ВЧ-оборудования

создаваемых КА ДЗЗ должна предусматриваться возможность управления по межспутниковой радиолинии, через спутники-ретрансляторы типа «Луч». При этом передача снимков по-прежнему будет производиться на наземные пункты при пролете над ними КА ДЗЗ.

Нормативными документами [7] предусмотрены мероприятия по защите телеметрической и командно-программной информации, циркулирующей в космических радиолиниях. Наиболее эффективным является абонентское закрытие указанной информации в местах ее возникновения и использования, т. е. на КА и в ЦУП. В документе [8] содержатся рекомендации по протоколу безопасности связи при передаче космических данных в трактах КА-ЦУП.

ЕНКУ ДЗЗ будет обеспечивать управление КА с использованием как существующих наземных станций («Клен», «Клен-Р»), так и перспективных унифицированных наземных станций (УНС) КИС. При работе с КА ДЗЗ эффективным является применение объединенных земных станций (ОЗС), совмещающих управление КА и прием с них информации ДЗЗ.

Ряды УНС КИС, включая ОЗС, предлагается создавать из унифицированных приборов со стандартными интерфейсами взаимодействия с КА, ЦУП и НКПОР. Стандартные протоколы всех уровней взаимодействия позволят существенно ускорить создание наземных средств НАКУ КА НСЭН. УНС КИС будут иметь программно-определяемые структуры сигналов, многодиапазонные антенные системы (АС) или наборы АС с матричными переключателями, универсальное программное обеспечение. Унификация станций упростит их последующую модернизацию, текущий ремонт и сократит количество обслуживающего персонала, обеспечит быстрое и надежное подключение новых абонентов.

Унифицированные НС КИС разрабатываются как в стационарном, так и в перебазируемом (контейнерном) исполнении. Контейнерное исполнение резко снижает затраты на капитальное строительство, позволяет устанавливать УНС КИС на кораблях и в местах временной эксплуатации.

На рисунке представлены рекомендованные к реализации варианты из ряда УНС КИС. Трехдиапазонный (S-, C-, X-) вариант УНС КИС

по существу является универсальной НС КИС. Универсальная НС КИС принципиально отличается от унифицированных КИС, широко применяемых в США и Европе. Командно-измерительные системы состоят из бортовой аппаратуры и наземных станций КИС. В унифицированных КИС БА и НС используют единые структуры сигналов и протоколы, определенные, например, стандартами CCSDS [9], в то время как универсальная НС КИС может работать с любой БА КИС, оперативно программным способом изменяя структуру сигнала.

Все наземные станции имеют одинаковый аппаратно-программный комплекс (АПК-Б (база)) и отличаются только высокочастотной частью. В состав АПК-Б входят: модуль цифровой обработки сигналов (МЦОС), навигационная аппаратура потребителя ГЛОНАСС, ПЭВМ, эталонный генератор, коммутатор и ряд вспомогательных устройств. Создание и серийное производство УНС КИС должно стать магистральным направлением модернизации средств НАКУ в данном сегменте.

Основной тенденцией развития ЦУП КА ДЗЗ является автоматизация управления КА и сокращение рабочих смен за счет создания «автоматического оператора», автоматического анализа ТМИ, автоматического планирования ТЦУ и сеансов связи, а также автоматической реакции на типовые НШС, приведенные в документации на КА.

Традиционные подходы к процессу управления КА сформировались в 60-х годах XX века и реализованы в подавляющем большинстве центров управления полетами российскими автоматическими КА. Причем эти подходы идентичны у основных разработчиков специального программного обеспечения ЦУП.

Решение задач управления представляет собой последовательность действий оператора, направленных на реализацию типового цикла управления каждого отдельного КА. При этом последовательно решаются задачи:

- расчет навигационных параметров КА на основе данных бортовой аппаратуры спутниковой навигации и/или ИТНП наземных средств;
- формирование заявок на задействование средств коллективного пользования;
- долгосрочное и оперативное планирование работы КА;

- интеграция в планы рабочих программ целевой аппаратуры;

- формирование сеанса управления и реализация его посредством УНС КИС;

- получение в процессе сеанса управления (или по завершению его) телеметрической информации, квитанционной информации, ИТНП, результатов сверки времени, информации функционального контроля НС КИС и других отчетных данных;

- анализ технического состояния бортовых систем и целевой аппаратуры КА по полученной телеметрии.

В настоящее время стандартные операции ТЦУ автоматизированы, но не выполняются автоматически и содержат достаточно большое количество ручных действий оператора даже при выполнении штатных, повторяющихся задач. Автоматизация процесса идет в основном за счет создания и хранения в базе данных типовых операций (ТО), объединяющих управляющие воздействия. Типовые операции подразделяются на штатные (ТО начала сеанса, ТО проведения ИТНП и т. д.) и типовые операции локализации НШС. Указанные ТО включаются в долгосрочные и оперативные планы или реализуются непосредственно в процессе сеанса управления.

В некоторых ЦУП автоматизировано создание типового сеанса и автоматическое выполнение сеанса управления на основе обратной связи по квитанционной информации. При таком подходе к организации управления рост количества КА в группировке неизбежно приведет к достижению предельных возможностей по обеспечению управления и целевого использования группировки КА. Увеличение количества персонала и автоматизированных рабочих мест не будет эффективным решением проблемы.

Используя зарубежный опыт управления многоспутниковыми группировками и реализуя собственные наработки при создании специального программного обеспечения ЦУП, для новых группировок КА необходимо максимально автоматизировать выполнение задач типового штатного цикла управления (операций НБО, ИТО, КПО), автоматизировать периодические операции по техническому обслуживанию КА и локализацию НШС,

приведенных в документации. Другими словами, необходимо создание автоматических сценариев управления КА на основе сценариев, приведенных в эксплуатационной документации.

Эти сценарии позволяют автоматизировать ТЦУ и автоматически реагировать на НШС, выявленные в процессе автоматического анализа ТМИ. При этом необходимо предъявлять повышенные требования к работам по максимально возможной автономизации КА с переносом на борт большего числа как периодических операций, так и операций по автоматической локализации отработанных НШС.

Для локализации неотработанных НШС или неописанных в документации целесообразно создать «пейджинговую» систему (СМС, e-mail) оповещения разработчиков КА, руководителей полета, разработчиков ЦУП и НС КИС. Реализация данного пути приведет к автоматизации управления КА и минимизации количества операторов. Кроме этого, такая система позволит свести к минимуму участие секторов главного конструктора в управлении КА как на этапе проведения летных испытаний (ЛИ), так и на этапе штатной эксплуатации.

Следует заметить, что переход к автоматическому управлению КА (создание «автоматического оператора») не может произойти одновременно. Процесс автоматизации требует достаточных усилий разработчиков при создании КА. На этапе ЛИ и эксплуатации к разработчикам КА и СПО ЦУП к совершенствованию автоматических процессов присоединяются операторы КА, которые предлагают к автоматизации периодические, повторяющиеся процессы, выявленные на стадии управления КА. Для отладки и реализации новых автоматических сценариев управления КА необходимы аппаратно-программные и(или) программные модели КА, на которых проверяется правильность автоматических сценариев перед внедрением их в процесс управления и СПО ЦУП.

Для отечественной ОГ ДЗЗ к вышеперечисленным путям автоматизации процессов управления предлагается также создание цифровой математической модели орбитальной группировки и наземных средств. Математическая модель должна содержать полную актуальную баллистическую информацию о каждом КА на любой момент времени, готовность КА к выполнению целевой

задачи (работоспособность обеспечивающих систем и целевой аппаратуры, свободные интервалы для съемки с учетом ограничений), актуальное состояние наземного комплекса управления с определением возможности закладки РП (координаты УНС КИС с учетом зон радиовидимости КА, состояние аппаратуры НС КИС с обобщенным признаком готовности к сеансу закладки, динамически обновляемые свободные временные интервалы) и актуальное состояние НКПОР с возможностью приема целевой информации (ЦИ).

Модель, учитывающая и описывающая пространственно-временное положение КА ОГ, расположение СР и средств НКУ, НКПОР, их техническое состояние, состав и работоспособность, должна лечь в основу выполнения сквозного планирования основных операций управления и целевого применения многоспутниковой ОГ.

Подобная модель должна состоять из объединенных через входные и выходные параметры математических моделей:

- орбитальной группировки;
- наземного комплекса управления;
- наземного комплекса приема, обработки и распространения информации;
- многофункциональной космической системы ретрансляции.

Заявка потребителя, подаваемая на вход модели, должна автоматически пройти стадию выбора оптимальных параметров реализации:

- КА, который произведет съемку;
- НС КИС (УНС КИС или ОСЗ), которая осуществит закладку РП;
- станцию приема ЦИ (ОЗС), которая получит результаты съемки.

При этом все последующие операции по планированию работы КА вплоть до закладки КПИ, РП на КА непосредственно с НС или через СР, выполняются в ЦУП в автоматическом режиме.

Для постепенного перехода всей группировки КА ДЗЗ к реализации заявок потребителя с помощью цифровой модели предлагается включить в нее уже функционирующие НКУ КА ДЗЗ. Целесообразно на фоне существующего типового цикла управления КА в действующих ЦУП выделить отдельно автоматическое прохождение оперативной заявки на съемку. Заявка, имеющая статус

«срочная», поступает в цифровую модель орбитальной группировки. По итогам работы цифровой модели определяются КА для закладки РП и средства закладки (НС КИС или СР «Луч»). Поступившая заявка в виде РП передается в соответствующий ЦУП или в единый ЦУП ДЗЗ и закладывается на КА в автоматическом режиме «над» текущими процессами управления (выполнения ТЦУ).

Выводы

Основными путями построения Единого НКУ многоспутниковой группировки КА ДЗЗ являются:

- использование унифицированного ряда НС КИС, в том числе ОЗС;
- размещение УНС КИС в высоких широтах;
- использование СР для оперативной закладки на КА рабочих программ и приема вектора состояния КА;
- реализация функции «автоматического оператора»;
- использование ЕЦУП для управления перспективными КА ДЗЗ и постепенная интеграция в него существующих КА ДЗЗ;
- переход на единую информационно-управляющую систему ЦУП КА, построенную на базе стандартов;
- применение абонентского закрытия информации для использования различных путей доступа к КА (через СР, непосредственно через УНС КИС).

Список литературы

1. ГОСТ Р 53802-2010 Системы и комплексы космические. Термины и определения.
2. *Левашко А.В., Осминин В.Н., Киселев К.В., Трегуб В.А.* Перспективы развития наземного комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2018, т. 164, № 3. С. 19–25.
3. *Леонов М.С., Круглов А.В.* Наземный комплекс управления КА «Канопус-В» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2015, т. 49, № 6. С. 24–29.
4. *Соколов Н.Л., Козлов В.Г., Соколов В.И., Литвиненко А.О.* Способ обеспечения управления полетами космических аппаратов // Патент на изобретение RU 2438941 С1, номер заявки: 2010128227/11. Дата регистрации: 08.07.2010, дата публикации: 10.01.2012.
5. <https://www.ksat.no/services/ground-station-services> (Дата обращения 10.11.2020.)
6. <https://storage.googleapis.com/planet-day-in-the-life/dist/index.html>
7. Федеральный закон от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации в части требования по категорированию».
8. CCSDS. Report Concerning Space Data System Standards. Space Data Link Security Protocol — Summary of Concept And Rationale. Informational Report CCSDS 350.5-G-1. Green Book, June 2018.
9. CCSDS. Draft Recommendation for Space Data System Standards. Unified Space Data Link Protocol. Draft Recommended Standard. CCSDS 732.1-R-3. Red Book, August 2017.