

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

УДК 621.314.5 DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70

## Управление многоспутниковыми орбитальными группировками

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

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

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

**С. А. Волков**, к. т. н., с. н. с., *volkov\_in@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассматривается задача управления многоспутниковыми орбитальными группировками в условиях ограниченности ресурсов управления. Предлагается иерархическая структура задач управления, на верхних уровнях которой вводятся задачи управления системным и целевым эффектами. Общая задача управления системным эффектом включает в себя следующие частные задачи: управление целевым эффектом, орбитальной структурой, численностью орбитальной группировки, ресурсами системы, сетью передачи данных, вычислительной сетью GRID. Предлагается решать задачи управления сложной многоспутниковой группировкой системой на основе принципов гомеостаза. Рассмотрены факторы, приводящие к деградации системы, и предложены варианты их парирования. Приводится содержание новых задач по видам информационного обеспечения управления. Сделан вывод о необходимости разработки практических методов управления системным эффектом многоагентной системы при ограниченности ресурсов управления.

**Ключевые слова:** орбитальная группировка, управление, многоагентная система, системный эффект, целевой эффект, гомеостатические методы управления

## Control of Multi-Satellite Orbital Constellations

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

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

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

**S. A. Volkov**, *Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, volkov\_in@spacecorp.ru*  
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The problem of controlling multi-satellite orbital constellations under conditions of limited resources is considered. A hierarchical structure of control problems is proposed, at the upper level of which management problems of systemic and target effects are introduced. The overall task of systemic effect management includes the following specific tasks: controlling target effects, orbital structure, orbital constellation size, system resources, the data transmission network, and the GRID computing network. It is proposed to solve multi-satellite orbital constellation control problems based on the principles of homeostasis. Factors leading to system degradation are considered and ways to counteract them are proposed. The contents of new tasks by type of information management is provided. Finally, a conclusion is drawn about the need to develop practical methods of systemic effect management for multi-agent systems with limited control resources.

**Keywords:** orbital constellations, control, space system, multi-agent system, systemic effect, target effect, homeostatic control methods

## Введение

В последнее время в отечественной и зарубежной космонавтике уделяется значительное внимание актуальным проектам, связанным с созданием многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ) — вплоть до нескольких сотен и тысяч космических аппаратов (КА). Помимо широко известной системы космического мониторинга компании Planet, насчитывающей более 120 КА, к развертыванию многотысячных ОГ системы спутниковой связи приступили компании OneWeb и SpaceX. Подобного рода проекты связаны в первую очередь с успехами в развитии технологий создания малоразмерных КА (МКА), которые условно делятся на миниспутники (масса 100–500 кг) и микроспутники (менее 100 кг). Микроспутники, в свою очередь, подразделяются на КА массой 20–100 кг и 1–20 кг (наноспутники); 0,1–1 кг (пикоспутники); менее 0,1 кг (фемтоспутники). В настоящее время технология производства МКА в ряде случаев достигла такого совершенства, что появился термин Leap-спутники, что предполагает массовое производство МКА, обеспечивающее требуемое качество при минимальных массогабаритных параметрах, малых временных и ресурсных затратах.

Такие спутники, с одной стороны, обладают определенными физическими ограничениями, касающимися целевой функции отдельного КА, но, с другой стороны, позволяют создавать многоспутниковые ОГ — вплоть до нескольких сотен и тысяч МКА, реализующих полную целевую функцию всей космической системы (КС). При этом акцент смещается от целевой функции отдельного КА к целевой функции всей системы. Неважно, какой именно КА (или группа КА) будет участвовать в реализации целевой функции КС, главное, чтобы она была реализована с требуемым качеством. Можно утверждать, что в мировой космонавтике явно прослеживается новая тенденция — развитие системного эффекта КС путем перехода от отдельных КА к многоспутниковым ОГ.

Эта тенденция является проявлением так называемого шестого технологического уклада, «ядро которого составят нано-, био-, инфо- и когнитивные технологии, обеспечивающие до 70% прироста в различных отраслях экономики. Базовыми

отраслями для его внедрения прогнозируются телекоммуникации, образование, химико-металлургический комплекс, ракетно-космический комплекс, а также растениеводство и здравоохранение» [1].

Смена технологических укладов вызвала к жизни IV промышленную революцию «Индустрия 4.0», основанную на массовом внедрении информационных технологий в промышленность и на распространении искусственного интеллекта. Достижение эффекта от воплощения концепции «Индустрия 4.0» возможно только при наличии хорошо налаженных процессов получения и анализа данных, а также обмена ими. В рамках указанной концепции появилась новая технологическая инфраструктура — «Интернет вещей» (англ. Internet of Things, IoT) — концепция вычислительной сети физических предметов («вещей»), оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой, рассматривающая организацию таких сетей как явление, способное перестроить экономические и общественные процессы, исключаящее из части действий и операций необходимость участия человека. Прогнозы только российского рынка «Интернета вещей» многообещающие: к 2021 году общее число IoT-устройств вырастет до 79,5 млн, а к 2026 году — до 164,7 млн. Общий потенциал российского рынка оценивается на уровне 0,5 млрд устройств.

Реализация IoT на практике предполагает наличие развитой телекоммуникационной системы, обеспечивающей взаимодействие устройств (машин) при помощи технологий связи как функции M2M/IoT (M2M от англ. machine-to-machine или mobile-to-machine). Составной частью такой системы должны стать космические глобальные информационные и телекоммуникационные системы. В связи с этим все большее внимание уделяется разработке проектов новых многоспутниковых систем, реализуемых на основе нано- и микроспутников с целевой функцией M2M/IoT [2,3]. В частности, на сегодняшний день известно более 10 проектов LEO/MEO телекоммуникационных систем, в том числе OneWeb (сеть L5) и SpaceX (сеть Stream) и проекты стран БРИКС «Звезда Счастья» (Китай) и Astome (Индия) [3].

В Российской Федерации в настоящее время анонсировано создание многоспутниковой много-

функциональной космической инфраструктуры под рабочим названием «Сфера», включающей ряд космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), навигации и связи и содержащей более 640 спутников, большая часть из которых будет относиться к классу МКА. Реализация такого амбициозного для нашей страны проекта, по-видимому, сродни качественному прорыву, подобному разработке орбитальных станций или первых многоспутниковых систем типа ГЛОНАСС. В связи с этим в настоящее время проводится анализ проблемных вопросов создания многоспутниковых группировок и предлагаются пути их решения [4].

Создание космических систем основывается на технологиях системного проектирования. Практическая их реализация определяется спецификой создаваемой системы, всесторонним учетом всех обстоятельств, что предполагает системный подход к созданию КС на базе МКА. Несмотря на тривиальность (кажущуюся) данного утверждения, следует учитывать, что опыт создания, целевого применения и эксплуатации многоспутниковых КС в нашей стране ограничен только космической навигационной системой (КНС) ГЛОНАСС, т. е. системой до 30 КА, одновременно находящихся на орбите, и реализующей только одну целевую функцию — обеспечения потребителей навигационной информацией. Однако даже частный анализ опыта КНС ГЛОНАСС позволяет предложить некоторые рекомендации, пригодные для систем большей размерности и функциональности.

Основной особенностью таких систем, по-видимому, будет многочисленность ОГ, налагающая требования на все остальные элементы КС. Такие системы будут относиться к так называемым избыточным системам, обладающим избыточным для класса решаемых задач ресурсом [5]. Известно, что изменение свойств одного из элементов КС с необходимостью вызовет и изменения остальных элементов. Учитывая то, что в соответствии с [6] КС — это совокупность одного или нескольких космических и специальных комплексов, предназначенная для решения различных задач в космосе и из космоса, включающих помимо ОГ и наземный специальный комплекс (НСК), ракетно-космический комплекс (РКК), наземный комплекс управления (НКУ), реализация системного эффекта эмер-

джентности, а проще говоря, успешная реализация проекта создания КС определенного назначения, возможна только при согласованном проектировании как отдельных элементов структуры КС, так и решении задач их взаимодействия. При этом сам процесс проектирования предполагает решение в первую очередь общесистемных задач.

К числу таких актуальных задач относится задача управления многоспутниковыми группировками. Как отмечалось в [11], «изменение подходов к управлению обусловлено изменением объекта управления — от одиночных КА наблюдается переход к дистанционно управляемым многоагентным системам с численностью от десятков до нескольких сотен и тысяч КА. В связи с этим возникает сложная задача разработки технологий управления интегрированными многоспутниковыми ОГ различного назначения и межспутникового взаимодействия в условиях ресурсных ограничений, в том числе ограничений по глобальности и непрерывности управления для существующего отечественного НАКУ КА».

### **Предложения по перспективной технологии управления многоспутниковой группировкой**

Всякая управленческая задача предусматривает задание модели объекта управления, множества управляющих воздействий, ограничений на управление, условий решения задачи, показателей и критериев, подтверждающих достижение цели управления. Основопологающим в рассматриваемом случае является определение модели объекта управления как интегрированной многофункциональной многоагентной дистанционно управляемой роботизированной системы, функционирующей в космическом пространстве и решающей задачи в интересах различных потребителей.

Рассмотрим общие подходы к созданию модели такой системы. При этом ввиду сложности системы моделирование будем проводить не в пространстве параметров системы, а в пространстве задач как по целевому предназначению, так и задач, обеспечивающих функционирование системы.

Будем исходить из того, что всякая многоспутниковая система создается для реализации некоторого системного эффекта, характеризующегося общесистемными показателями. Помимо общих показателей, таких как глобальность, непрерывность, оперативность и массовость, выделяют и показатели целевого предназначения. Например, для КНС — доступность и целостность системы, точность определения координат, для систем ДЗЗ — периодичность наблюдения, информативность, обзорность, вероятность получения информации с требуемым качеством, для спутниковых систем связи — множество предоставляемых сервисов, вероятность вхождения в связь за заданное время, задержка при передаче речи и т. д. Достижение заданных показателей предполагает переход от традиционных задач управления отдельным КА в полете к другому классу задач управления — управлению системой КА.

Анализ системы КА как объекта управления показывает, что системный эффект достигается за счет реализации ряда целевых эффектов (ЦЭ) многоспутниковой космической системы. Например, для КНС необходимым условием решения навигационной задачи является обеспечение требуемого геометрического фактора, для систем связи — наличие в зоне видимости абонента хотя бы одного КА связи, для систем ДЗЗ — требуется реализация ЦЭ непрерывности, многопозиционности, стереосъемки, комплексности наблюдения. В общем случае для сложной многоспутниковой многофункциональной КС основе КА возможно множество реализуемых ЦЭ, в силу чего возникает задача выбора ЦЭ и определение условий для его реализации — необходимой орбитальной структуры, обеспечения технической готовности КА и наличия требуемых ресурсов, возможности обмена информацией между КА и наземной инфраструктурой, включающей НСК и НКУ, а в случае реализации распределенной бортовой обработки информации — и управление вычислительной сетью на основе КА.

Представляется, что в целом структура комплекса задач управления будет выглядеть следующим образом (см. рис. 1). Приведем необходимые пояснения.

Общая задача будет рассматриваться как задача управления системным эффектом, включающая

#### Управление системным эффектом

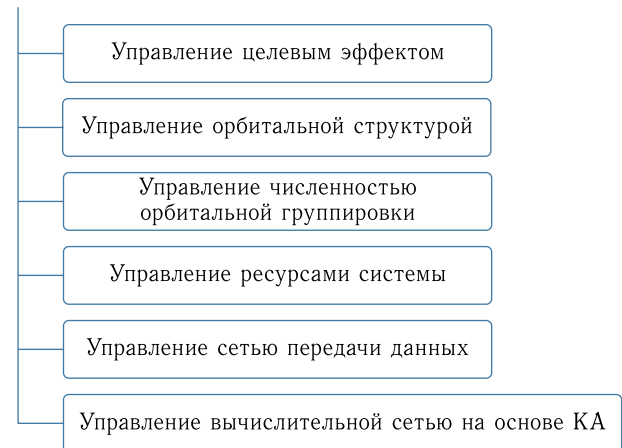


Рис. 1. Иерархия задач управления

в себя частные задачи: управление множеством ЦЭ, орбитальной структурой, численностью орбитальной группировки, ресурсами системы, сетью передачи данных (СПД), управление вычислительной сетью на основе КА [11].

Рассмотрим более подробно частные задачи управления. Управление целевыми эффектами предполагает задание множества ЦЭ, выбор ЦЭ для решения системных задач, определение исходных данных для реализации ЦЭ — требуемой баллистической структуры, требований по ресурсным возможностям КА, реализующих выбранный ЦЭ, наличие СПД и возможностей по обработке информации бортовой вычислительной сетью.

Управление орбитальной структурой предполагает синтез баллистической структуры всей КС, определение орбитальной структуры для реализации выбранных ЦЭ, решение задачи назначения КА для реализации ЦЭ, поддержание параметров баллистической структуры.

Управление численностью ОГ предполагает выведение на орбиту заданного числа КА и дальнейшее восполнение ОГ в случае необходимости, что в целом предусматривает управление возможностями РКК, включающего средства выведения различных классов, в том числе и конверсионных, для обеспечения гарантированного доступа в космическое пространство.

Управление ресурсами системы включает оценку технического состояния отдельных КА, учет

энергоресурса и запаса рабочего тела, выбор КА, способных реализовать ЦЭ с учетом баллистического построения и наличия необходимого ресурса. Ввиду особенностей отечественного НАКУ — его расположения только на территории РФ, ограниченной пропускной способности, отсутствия достаточного числа каналов ретрансляции для передачи управляющей информации процесс управления многоспутниковой КС для обеспечения требований по глобальности и непрерывности управления должен предполагать реализацию методов сетевого управления, обязательное наличие каналов межспутниковой связи, т. е. формирование СПД на основе КА [11]. В силу этого появляется новая задача управления — управление СПД, которая предполагает в соответствии с рекомендациями сектора телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) общие и прикладные задачи системы управления. Общие состоят в сборе, обработке, хранении и выдаче информации управления. Прикладные задачи определены по следующим функциональным направлениям: управление конфигурацией сети; управление устранением отказов; управление качеством; управление расчетами; управление защитой информации. При этом специфика ОГ накладывает ряд дополнительных особенностей, в частности при управлении конфигурацией сети представляет интерес динамическая маршрутизация, крайне важен учет эффекта Доплера.

Следует отметить, что задача создания СПД на основе КА не нова. Известны различные подходы с использованием спутников-ретрансляторов, находящихся на различных орбитах — от геостационарной до LEO/МЕО. Однако избыточность многоспутниковой группировки и опыт управления МКА ТНС-0 в АО «Российские космические системы» с использованием модемов низкоорбитальной сети космической связи Globalstar [7] позволяет предложить относительно новый подход путем формирования динамической сети базовых станций на основе выделенных КА по типу наземных сетей сотовой связи (рис. 2). В этом случае в составе ОГ выделяются КА, выполняющие роль базовых станций космических «сот» и оснащенные специальной аппаратурой для организации связи как с абонентами, так и с соседними базовыми станциями и наземной инфраструктурой. Осталь-

ные КА орбитальной группировки выступают в качестве абонентов сети, 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.

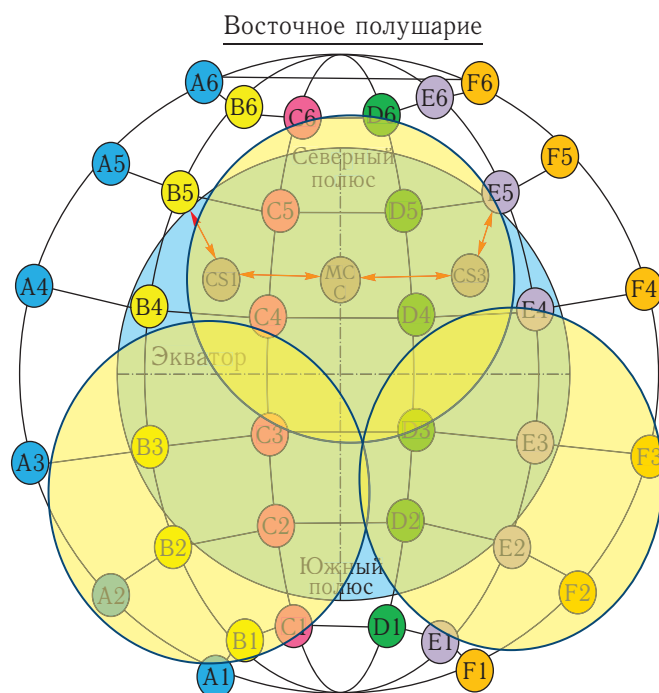


Рис. 2. Орбитальная сотовая сеть передачи данных

Формирование такой сети предусматривает решение задач баллистического проектирования всей системы с целью определения параметров сети (количества сот, их размеров, требуемых скоростей передачи информации), а также для реализации требований по управлению сетью, связанных, в том числе, с ограничениями на энергомассовые возможности отдельных КА: следует учитывать при создании бортовой аппаратуры, что, по оценкам специалистов, для современных технологий справедливо правило: «1 кг–1 л–1 Вт».

Специфика ряда многоспутниковых систем, в частности требование близкого к реальному

масштабу времени (РМВ) обеспечения потребителей информацией ДЗЗ, потребует также наличия системы бортовой обработки информации при ограниченных мощностях БЦВК отдельных КА. «С учетом возможностей БЦВК, а также ограничений на каналы связи предлагается технология GRID-систем как систем с распределением задач обработки по сети компьютеров» [11]. GRID-вычисления (англ. grid — решетка, сеть) — это форма распределенных вычислений, в которой «виртуальный суперкомпьютер» представлен в виде кластеров, соединенных с помощью сети слабосвязанных гетерогенных компьютеров, работающих вместе для выполнения множества заданий (операций).

С точки зрения сетевой организации GRID-система представляет собой согласованную, открытую и стандартизованную среду, которая обеспечивает гибкое, безопасное, скоординированное разделение вычислительных ресурсов и ресурсов хранения информации, которые являются частью этой среды в рамках одной виртуальной организации. Вследствие этого возникают «задачи управления вычислительной сетью GRID, предполагающие контроль состояния сети, распределение вычислительных задач, хранение данных, обработку данных и анализ результатов, передачу результатов потребителю» [11]. Следует отметить, что в настоящее время ведущие зарубежные компании проявляют интерес к созданию вычислительных сетей на основе КА. В частности, Lockheed Martin уже зарегистрировал две торговые марки для спутниковых облачных систем — HiveStar и SpaceCloud — и планирует применить этот подход к целому ряду космических миссий для проведения анализа информации в космосе [8].

Представленная модель в пространстве целевых задач является достаточно общей, но позволяет определить основные особенности управления системным эффектом всей КС. Отметим здесь же, что в настоящее время открытым остается вопрос о системном эффекте многофункциональной космической инфраструктуры под рабочим названием «Сфера». Не вполне ясно, какие новые сервисы могут появиться при интеграции отдельных КС в единое целое, каким будет порядок их формирования, возможные характеристики и т. д. Эти вопросы

предполагают проведение дополнительных исследований с участием заинтересованных потребителей. В частности, уже сегодня для КС ДЗЗ намечаются предпосылки перехода от существующей концепции отображения информации к концепции решений на основе информации, полученной путем создания тематических сервисов поддержки и принятия решений в заданной предметной области. Если сегодня потребителю предоставляется ответ на вопрос «что происходит на данный момент времени?» в интересующей его области геопространства, то в перспективе он получит ответ на вопрос «что делать в создавшейся ситуации?». При этом, по-видимому, целесообразно использовать хорошо зарекомендовавшие себя для системы ГЛОНАСС понятия доступности и целостности системы, позволяющие определить количественные показатели возможностей предоставления необходимых сервисов.

Следующей составной частью общей модели системы является модель в пространстве задач, обеспечивающих функционирование системы. Представляется, что модель функционирования системы КА по аналогии с «большими» КА типа «Ресурс-П» может быть представлена в виде совокупности так называемых режимов функционирования — управляющих программ функционирования, состоящих из ряда алгоритмов, операций и процессов, протекающих на борту как отдельных КА, так и орбитальных структур и системы в целом. К числу таких режимов относятся режим первоначального развертывания и формирования исходной структуры системы КА; дежурный режим; режим формирования рабочих структур для реализации целевых эффектов системы КА; автономный режим — индивидуальный для каждого КА; другие режимы.

Основой функционирования системы является формирование орбитальных структур для реализации выбранных ЦЭ. Такая структура может быть представлена в виде кластера КА как локализованной в пространстве и времени совокупности КА различного целевого назначения, совместно выполняющих общую задачу, воспринимаемых потребителем как единое целое и управляемых как единый космический объект. При этом КА — центр базовой «соты» может выступать также в качестве КА — «лидера» кластера, формируемого в рам-

ках орбитальной структуры для реализации выбранных ЦЭ, а остальные КА — в роли «ведомых». Подробно ЦЭ, реализуемые для кластеров ДЗЗ, вопросы управления кластерными структурами, а также примеры режимов функционирования кластера КА рассмотрены в работе [9].

В целом главной особенностью новых технологий управления в условиях ограниченности его ресурсов является переход от управления отдельными КА к управлению системным эффектом всей КС. Существующая технология управления основана на обслуживании каждого КА в отдельности с «жестким» контролем его работоспособности, занимаемой орбитальной позиции, требованием по возможности немедленного парирования возникающих отклонений. Даже при немногочисленной ОГ (в настоящее время в РФ более 150 КА на орбите) такой подход приводит к высокой загруженности НАКУ, выполняющего до 2 тыс. сеансов управления в сутки. Нарастание ОГ до нескольких сотен КА при традиционной технологии может привести к коллапсу системы управления.

При разработке предложений по новым технологиям управления будем исходить из следующих обстоятельств:

1) без глобального управления нет реализации системного эффекта многоспутниковой ОГ с заданным качеством. Так, для систем ДЗЗ могут быть предъявлены требования по оперативности получения информации в квазиреальном времени, что требует выработки оперативной закладки команд управления и рабочих программ на борт КА или группы КА;

2) ограниченные возможности НАКУ при «старой» технологии управления приведут к значительному повышению стоимости системы даже в условиях интеграции отдельных НКУ. Кроме того, пространственные ограничения НАКУ по размещению не позволят выполнить требования по глобальности и непрерывности управления;

3) целесообразен переход на сетевые методы управления;

4) однако ввиду ограниченных возможностей бортовой АСУ КА простая реализация сетевых методов не даст должного эффекта без увеличения степеней свободы КА, «жесткий» контроль его вектора состояния остается ресурсозатратным.

В связи с этим управление многочисленной группировкой потребует новых подходов, основанных на теории многоагентных систем. Учитывая сложность орбитальной группировки, ограниченность ресурсов системы управления, представляется целесообразным использование методов управления, основанных на понятии гомеостаза системы, позволяющего сохранить баланс между различными противоречивыми процессами деградации и упорядоченности, происходящими в системе, и обеспечить ее жизнедеятельность [11].

Понятие гомеостаза не очень широко распространено в инженерной практике. Обычно используют понятие адаптации как свойства системы, характеризующего ее способность проявлять целенаправленное приспособляющееся поведение в сложных средах (условиях). Кроме того, в понятие адаптации сложной технической системы входит и сам процесс такого приспособления. Как правило, адаптация происходит по отношению к одному или нескольким факторам воздействия. При этом зачастую опускается ресурсный фактор самой системы: сможет ли она реализовать процесс адаптации? Гомеостаз же предусматривает системную (или множественную) адаптацию ко всему спектру факторов воздействия с целью установления динамического равновесия и сохранения целостности системы с учетом ресурсных факторов.

Динамическое равновесие учитывает противоречие целей подсистем и позволяет достичь гармонизации их интересов с помощью так называемого гомеостата, для создания которого выделяют взаимодействующие в системе антагонисты. С одной стороны — это процессы нарастания упорядоченности системы, или так называемой негэнтропии. С другой стороны — процессы разрушения системы, или нарастания энтропии [12]. Гомеостаз системы и сохранение ее целостности предполагает определенный баланс между этими процессами. При этом известно, что любая изолированная система стремится к нарастанию энтропии, а увеличение негэнтропии возможно только путем обмена веществом, энергией и информацией с внешней средой. Следовательно, необходимо иметь арсенал средств воздействия на систему извне, то есть процессов управления. Следует учитывать, что в многоспутниковой системе интенсивность процессов

деградации значительно возрастет, изменится и их природа, следовательно, нужны новые методы компенсации.

Как отмечено в работах [4,11] и [12], «к числу процессов деградации, разрушения системы отнесем влияние факторов космического пространства, приводящее к нарушению баллистической структуры системы; физическое и моральное старение элементов системы, приводящее к отказам и сбоям в работе системы; влияние ресурсных ограничений, организационных факторов, а также их различных комбинаций». Важно отметить, что в многоагентной системе влияние указанных факторов будет связано не только с отдельными КА, но и с группами совместно взаимодействующих КА, что приведет к резкому нарастанию энтропии системы.

К числу процессов нарастания упорядоченности системы традиционно отнесем процессы реализации целевого предназначения КС, связанные с удовлетворением потребностей потребителей в связи, мониторинге, навигации и новых сервисах; процессы поддержания работоспособности всей КС и ее составных частей, а также реализацию технологического цикла управления (ТЦУ) системой с решением задач командно-программного (КПО), информационно-телеметрического (ИТО), навигационно-баллистического (НБО) и частотно-временного обеспечения (ЧВО), которые получают новое содержание, обусловленное изменением объекта управления.

Требование гомеостаза системы 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, отказ от резервирования части подсистем, осуществляется перенос функций управления на борт КА, увеличивается периодичность проведения сеансов связи, предполагается использование элементной базы с менее строгими требованиями по надежности — коммерческой электроники, допускается использование «наземных» решений для отработки и проведения испытаний из опыта автомобильной и электронной промышленности и т. д.; с другой стороны, разрабатываются способы ком-

пенсации влияния факторов разрушения, например способы управления системой с нарушенной баллистической структурой, создание избыточности КА на орбите, своевременное восполнение системы в случае отказа элементов, проведение мероприятий по восстановлению работоспособности системы и ее элементов», целенаправленное использование общесистемных ресурсов и т. д.

Таким образом, гомеостатические методы допускают возрастание степеней свободы отдельных КА в системе, отказ от «жесткого» индивидуального контроля и управления их состоянием, но одновременно предполагают создание избыточности ресурсов на орбите для обеспечения решения целевой задачи, в том числе по количеству КА, с реализацией методов управления ресурсами всей системы.

Следует отметить, что приведенные выше соображения частично уже реализуются на практике. Например, известная система космического мониторинга компании Planet, построенная на базе орбитальной группировки малых спутников типа Dove, SkySat и RapidEye, позволяет за счет высокой периодичности наблюдения осуществлять частые проходы над одним и тем же местом на Земле для мониторинга изменений поверхности в РМВ с разрешением от 0,72 до 6,5 м. Системным эффектом в данном случае служит глобальное наблюдение земной поверхности в квазиреальном масштабе времени с возможностью ежесуточного отслеживания динамики изменений. Целевые эффекты — непрерывность, оперативность и многопозиционность наблюдения.

При этом система построена как избыточная; так, в настоящее время на орбите насчитывается более 120 КА Dove, 15 SkySat и 5 RapidEye [10]. Всего же с 2013 года запускалось более 300 КА, из-за аварий ракет-носителей выведено на орбиту более 270 КА, из которых 40% уже сошло с орбиты. Конструктивно аппарат Dove представляет собой тройной CubeSat массой 5 кг со сроком активного существования 3 года, в котором реализуется идея планшетного построения. При этом резервирования не предполагается — есть избыточность по построению, испытания КА проводятся в космосе и широко используются «наземные» решения для отработки из опыта автомобильной и электрон-



ной промышленности. Что же касается элементной базы, то по критерию цена/качество выбор сделан в пользу коммерческой электроники.

Анализ функционирования указанной системы показывает, что в ней допускается снижение показателей упорядоченности и при этом обеспечиваются глобальность и непрерывность управления за счет глобальной наземной инфраструктуры, которая представляет собой 12 площадок со станциями на разных континентах. Средства управления расположены, например, в США, Великобритании, Новой Зеландии, Германии, Австралии. Управление осуществляется в УКВ- и S-диапазонах, прием изображения — в X-диапазоне в объеме до 6 Тбайт ежесуточно. Кроме того, данные аппараты достаточно просты, не являются перенацеливаемыми, что и определяет простоту технологического цикла управления.

В общем же случае в структуре ТЦУ, помимо традиционных задач, ориентированных на управление отдельным КА, появятся задачи системного уровня, направленные на поддержание гомеостаза и ориентированные на управление системным эффектом всей КС [2].

Например, для КПО появятся следующие задачи: выдача исходных данных для формирования рабочей структуры; управление конфигурацией системы; маршрутизация передачи служебной и специальной информации; формирование и поддержание альманаха системы по аналогии с системой ГЛОНАСС. В рамках ИТО возникнут задачи контроля состояния каналов связи и БЦВК отдельных КА; групповой оценки состояния системы в целом; оценки ресурсов как отдельных КА, так и орбитальных структур и системы в целом; оценки качества выполнения целевой задачи. Для НБО важным будет формирование орбитальных структур для реализации ЦЭ, расчет и поддержание их параметров, в частности баз в пространстве между КА при групповом выполнении целевых задач, прогнозирование баллистического существования целевых групп — выбранных орбитальных структур. Согласованное функционирование многоспутниковой ОГ потребует формирования, синхронизации и поддержания групповой шкалы времени системы в рамках ЧВО по аналогии с системой ГЛОНАСС [11].

## Заключение

Рассмотренные выше предложения по перспективной технологии управления многоспутниковой мультисервисной орбитальной группировкой соответствуют Перечню прорывных технологий (ТОП-10) ГК «Роскосмос», п. 1.3 «Группировки малоразмерных КА с возможностями больших спутников (включая технологии управления роом спутников). Многоспутниковая многофункциональная система». Практическая их реализация требует проведения дополнительных исследований при условии, что: 1) будет определено множество и содержание **общесистемных** сервисов, позволяющих определить общесистемные и целевые эффекты; 2) проведено **согласованное** баллистическое проектирование орбитальных группировок, входящих в единую систему; 3) определены ТЦУ для отдельных КА, входящих в специализированные ОГ; 4) определены информационные потоки управляющей и специальной информации; 5) обосновано число необходимых базовых станций в составе ОГ для реализации сетевых методов управления; 6) разработана общая модель поведенческой активности КА как агентов многоагентной системы.

В целом «реализация отечественных проектов создания многоспутниковых мультисервисных орбитальных группировок, в частности анонсированного проекта космической инфраструктуры «Сфера», возможна при условии успешного решения задачи управления нового класса — управления системным эффектом многоагентной системы при ограниченности ресурсов управления. Такое решение может быть получено на основе развития гомеостатического подхода, предполагающего, с одной стороны, увеличение степеней свободы отдельных КА, отказ от «жесткого» контроля, но, с другой стороны, реализующего возможность управления ресурсами всей системы путем создания избыточности по числу КА» [11].

## Список литературы

1. Романов А. А., Тюлин А. Е. Шестой технологический уклад в космическом приборостроении // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 4. С. 64–82.

2. *Урличич Ю. М.* Высокоинформативные системы связи и вещания HTS и LEO/МЕО-HTS: бумажные проекты или прорывное направление космической индустрии // *Технологии и средства связи*, 2016, № 6-2. С. 44–48.
3. *Эйдус А. Г.* Анализ действующих негеостационарных спутниковых систем на рынке M2M/IoT и оценка коммерческой перспективности планируемых многоспутниковых систем // *Технологии и средства связи*, 2017, № 6-2. С. 20–27.
4. *Бетанов В. В., Волков С. А., Данилин Н. С. и др.* Проблемные вопросы создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малоразмерных космических аппаратов // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2019, т. 6, вып. 3. С. 57–65.
5. *Потюпкин А. Ю., Чечкин А. В.* Искусственный интеллект на базе информационно-системной избыточности. М.: КУРС, 2019. 380 с.
6. ГОСТ 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения (Space systems and stations. Terms and definitions: национальный стандарт Российской Федерации). Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 июня 2010 г. № 127-ст, дата введения 2011-07-01. Разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш). Москва: Стандартинформ, 2011. 28 с.
7. *Селиванов А. С.* Разработка и летные испытания первого российского технологического наноспутника ТНС-0 № 1 // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2015, т. 2, вып. 2. С. 74–90.
8. Lockheed Martin studies how to use a cloud of satellites for space missions. <https://www.geekwire.com/2019/lockheed-martin-space-cloud-hivestarsatellites> (Дата обращения 15 июля 2020 г.)
9. *Потюпкин А. Ю., Данилин Н. С., Селиванов А. С.* Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4, вып. 4. С. 45–56.
10. <https://www.planet.com> (Дата обращения 15 июля 2020 г.)
11. *Волков С. А., Пантелеймонов И. Н., Потюпкин А. Ю. и др.* Управление многоспутниковыми орбитальными группировками на базе малоразмерных космических аппаратов // *Материалы 54-х Научных чтений памяти К. Э. Циолковского*. 2019, АКФ «Политоп», Калуга, С. 73–77.
12. *Галькевич А. И., Потюпкин А. Ю.* О постановке задачи научного обоснования методического аппарата формирования облика перспективной глобальной космической информационной системы // *Космонавтика и ракетостроение*, 2011, вып. 4 (65). С. 159–164.