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

УДК 621.314.5 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.11.19

**Групповое управление многоспутниковой
орбитальной группировкой на основе концепции
режимов совместного функционирования**

А. Ю. Потюпкин, *д. т. н., проф., potyupkin_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 на основе концепции режимов функционирования в условиях ограниченности ресурсов управления. Формулируется задача управления, предлагается ее решение. Рассмотрено содержание вновь вводимых режимов функционирования всей космической системы. Приведена формализация описания состояния группировки в виде альманаха системы, позволяющая автоматизировать процесс принятия решения на управление. Сделан вывод о необходимости разработки практических методов группового управления путем создания летного кластера малоразмерных космических аппаратов.

Ключевые слова: многоспутниковая орбитальная группировка, управление, многоагентная система, режимы функционирования, альманах системы

**Group Control of Multisatellite Orbital Grouping
Based on the Concept of Joint Operating Modes**

A. Yu. Potyupkin, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., potyupkin_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 control of multisatellite orbital groupings based on the concept of operating modes in conditions of limited control resources is considered. The control task is formulated, its solution is proposed. The content of the newly introduced operating modes of the entire space system is considered. The formalization of the grouping's state description in the form of an almanac of the system, which allows automating the decision-making process for control, is given. It is concluded that it is necessary to develop practical methods of group control by creating a flight cluster of small spacecraft.

Keywords: multisatellite orbital grouping, control, multi-agent system, modes of operation, almanac of the system

Введение

Вопросы управления многоспутниковыми орбитальными группировками (МОГ) вот уже долгое время находятся в поле зрения специалистов космической отрасли. Несмотря на успехи зарубежных партнеров по созданию и применению МОГ, например *спутниковой глобальной системы наблюдения Planet — на орбите 150+ КА Dove (Голубь) и SuperDove, спутниковых глобальных системы связи SpaceX — 1657 на орбите (всего их запущено 1738), OneWeb — 254 КА на орбите* [1–3], возникает закономерный вопрос: насколько опыт управления такими группировками применим при проектировании отечественной перспективной орбитальной группировки.

Следует учитывать, что все приведенные выше МОГ являются гомогенными, т. е. однородными, реализующими только ограниченный набор функций: персональная подвижная спутниковая служба глобального масштаба, глобальное наблюдение земной поверхности в квазиреальном масштабе времени с возможностью ежесуточного отслеживания динамики изменений, которые осуществляются без дополнительных динамических операций, например перенацеливания КА, только за счет избыточности КА на орбите. Существующий же на сегодня проект отечественной МОГ является многофункциональным, гетерогенным и рассматривается в виде космической инфраструктуры [4], в которой *совместно должны функционировать несколько специализированных космических систем, реализующих функции связи, навигации, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в том числе и видового наблюдения*, что предполагает обязательные динамические операции. Условие гетерогенности и необходимость реализации новых комплексных сервисов [5] предъявляют особые требования к управлению всей системой — практически полной глобальности и непрерывности управления, оперативности вплоть до реального масштаба времени.

Анализ опыта зарубежных партнеров свидетельствует о некоторых существенных преимуществах в области управления системами КА. В частности, они имеют возможность размещать средства управления практически по всему миру.

Например, компания Planet обеспечивает глобальность и непрерывность управления группировкой за счет глобальной наземной инфраструктуры, которая представляет собой 12 площадок со станциями на разных континентах. Средства управления расположены 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. К сожалению, отечественные возможности по созданию наземного комплекса управления (НКУ) ограничены территорией нашей страны. Поэтому даже предложения по интенсивному развитию НКУ, предлагаемые авторами [6], созданию Единого НКУ КА и, несомненно, заслуживающие внимания не являются достаточными для выполнения требований по управлению всей вновь создаваемой МОГ. Следующим важным преимуществом зарубежных партнеров является высокая степень автоматизации процессов управления, например в той же компании Planet управление группировкой более чем в 150 КА осуществляется без несения дежурства командой Центра управления полетами (ЦУП) в составе всего лишь 5 человек, работающих с понедельника по пятницу с 9 до 17 часов [7]. В связи с этим предложения по повышению автоматизации управления КА реализации функции «автоматического оператора» тех же авторов [6] должны получить дальнейшее развитие.

Отсутствует в нашей стране и развитая система глобальной ретрансляции, которая потенциально могла бы обеспечить глобальность управления МОГ, и, к сожалению, в обсуждаемых проектах создания космической инфраструктуры нет конкретного упоминания о реализации межспутниковой связи, которая могла бы послужить основой для создания перспективной системы ретрансляции и информационного обмена. В связи с этим в условиях сложившихся ресурсных ограничений и возникает актуальность разработки новых подходов к управлению космическими объектами, связанных с изменением объекта управления — от одиночных КА наблюдается переход к дистанционно управляемым многоагентным системам с численностью от десятков до нескольких сотен и тысяч КА, каждый из которых представляет собой роботизированное устройство с элементами искусственного интеллекта.

Как правило, процесс управления космическими объектами принято представлять в виде технологического цикла управления (ТЦУ). При этом структура ТЦУ как упорядоченная совокупность операций управления определяется типом управляемого объекта, его целевым предназначением, что является основополагающим при определении комплекса задач информационного обеспечения процесса управления. Для отдельных КА структуры ТЦУ достаточно хорошо известны и апробированы. Существует и положительный опыт управления системой КА — космической навигационной системой (КНС) ГЛОНАСС, насчитывающей порядка 30 КА и позволяющей выделить в структуре ТЦУ задачи управления системного уровня, например обеспечение глобальности и непрерывности координатно-временного обеспечения с выполнением требований по доступности и целостности системы, точности результата местоопределения потребителя.

При этом главным при определении структуры ТЦУ является модель функционирования объекта управления, определяемая реализуемой концепцией управления. Вследствие этого целью настоящей статьи является разработка такой модели и предложений по групповому управлению новым объектом — орбитальной *многофункциональной группировкой*, насчитывающей множество *разнородных КА*, функционирующих как совместно, так и раздельно и являющихся интеллектуальными агентами сложной многоагентной системы.

Анализ известного опыта применения МОГ позволил предложить общую концепцию управления [8], основанную на том, что целевым предназначением любой МОГ является реализация заданного системного эффекта (СЭ), например устойчивого обеспечения потребителей навигационно-временной информацией для КНС, услугами телекоммуникаций определенного уровня для систем связи и т. д., при этом СЭ, в свою очередь, достигается за счет реализации ряда целевых эффектов (ЦЭ) МОГ. К числу ЦЭ может быть отнесено обеспечение требуемого геометрического фактора для КНС, для систем связи — наличие в зоне видимости абонента хотя бы одного КА связи, для систем ДЗЗ — попадание объекта наблюдения в полосу захвата бортовой аппаратуры (БА) наблюдения, для более сложных случаев — реализация ЦЭ непрерывно-

сти, многопозиционности, стереосъемки, комплексности наблюдения и т. д.

В общем случае для гетерогенной МОГ 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 наземным комплексом, а при необходимости распределенной бортовой обработки информации и управление орбитальной вычислительной сетью. В силу этого общая задача управления МОГ предполагает переход от традиционных задач управления отдельным КА в полете к другому классу задач управления — управлению системой КА в целом как многоагентной динамической системой и будет включать следующие частные задачи: обеспечение реализуемости СЭ исходя из целевого предназначения системы; управление ЦЭ, орбитальной структурой, численностью МОГ, ресурсами системы, системой информационного обмена; управление орбитальной вычислительной сетью, а также устранение конфликтов между агентами.

Система информационного обмена в рамках системы управления строится на основе предложенного в работе [8] нового подхода 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 МОГ выделяются КА, выполняющие роль базовых станций космических «орбитальных сот» и оснащенные специальной аппаратурой для организации связи как с абонентами, так и с соседними базовыми станциями и наземной инфраструктурой. Остальные КА орбитальной группировки 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 много-спутниковой группировки.

Приведенные выше сведения — исходные данные для постановки задачи управления МОГ, которая является важным этапом ее формализации и решения, а в дальнейшем и обязательной автоматизации управления МОГ, в том числе и реализации функции «автоматического оператора», предусматривающей создание автоматических сценариев управления не только отдельными КА, но и системой в целом [6]. Формализация задачи управления должна предусматривать: цель управления, модель объекта управления, управляемые параметры, ограничения на управление, показатели и критерии качества управления.

Постановка задачи на управление многоспутниковой орбитальной группировкой

При постановке задачи на управление многофункциональной МОГ должно быть учтено следующее.

Дано. 1. Содержание системного эффекта (СЭ) МОГ и определены его показатели $\{П\}$: глобальность, непрерывность, оперативность, массовость предоставления услуг потребителю, так называемый кортеж «ГНОМ» и ряд дополнительных показателей — достоверность информации, целостность и доступность, точность. Определено и множество заданных значений показателей $\{П_{\text{треб.}}\}$.

2. Множество целевых эффектов (ЦЭ) МОГ, $ЦЭ_k$, $k = 1, K$, требующих для своей реализации определенной орбитальной структуры на множестве КА.

3. Исходя из требований СЭ проведено баллистическое проектирование системы и задана орбитальная структура МОГ, включающая множество КА различных типов, размещенных на выбранных орбитах. При этом определено количество орбитальных плоскостей, типы орбит и орбитальные параметры. Всего выведено на орбиту N КА.

4. Орбитальная структура МОГ представляется набором параметров орбит X_p , $p = 1, 6$ (либо кеплеровых параметров, либо параметров в ГСК) и формализуется в виде матрицы орбитальных параметров $X = \|X_{pi}\|$.

5. Множество типов КА, различающихся по типу бортовой специальной аппаратуры (БСА) — оптико-электронного и радиоэлектронного наблюдения (ОЭН и РЭН), радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), БСА связи (ретрансляции), БСА навигации, научная БСА. Всего задано M типов КА. Тогда каждый из КА обозначим как S_{ij} , где $i = 1, N$ — номер КА, $j = 1, M$ — тип КА.

6. В составе группировки определено множество КА-ретрансляторов $\{S_{ip}\}$ — центров «орбитальных сот» (здесь $j = \langle p \rangle$ — ретранслятор), через которые происходит информационный обмен «КА-Земля», «КА-КА». Каждый КА регистрируется в определенной соте, а также может осуществлять переход между сотами.

7. Определено множество типов локальных орбитальных структур C_v , $v = 1, V$, для реализации ЦЭ, при этом одновременно в МОГ может быть реализовано несколько ЦЭ для комплекса задач потребителя.

8. Множество алгоритмов функционирования КА, обеспечивающих как индивидуальное, так и групповое (системное) функционирование $\{G\} = \{G_{\text{и}}\} \cup \{G_{\text{с}}\}$.

9. Каждая структура C_v для реализации выбранного ЦЭ формируется при определенных условиях: наличие требуемой орбитальной позиции, технической готовности, связи между КА. Вводятся следующие показатели для каждого S_{ij} КА: коэффициент технической готовности $K_{\text{г}}$, наличие связи между КА — факта регистрации в некоторой соте $R = 1, 0$ (1 — «да», 0 — «нет»), начальной активации по типу ЦЭ $F_k = 1, 0$, наличие конфликта с другими КА $U = 1, 0$ и общего индикатора итоговой активности $A = 1, 0$.

Тогда формализованное представление показателя СЭ МОГ представим в следующем виде:

$$П = П\{ЦЭ_k, N_{\text{ка}}, S_{ij}, X_{pi}, C_v, G, K_{\text{гi}}, R_i, F_{ki}, U_i, A_i\}.$$

Требуется: найти такие $\{ЦЭ_k^*, C_v^*, S_{ij}^*, G^*/X_{pi}, K_{\text{гi}}, R_i, F_{ki}, U_i, A_i\}$, которые позволят обеспечить реализацию СЭ и соответствие текущего множества $\{П^*\}$ показателей качества функционирования МОГ заданному $\{П_{\text{треб.}}\}$.

Решение задачи. Задача управления МОГ может быть рассмотрена как задача *множественного* выбора локальных орбитальных структур

на избыточном множестве КА для реализации заданных потребителем ЦЭ исходя из ресурсных ограничений. Решение задачи предполагает либо разработку новых подходов, либо реализацию известных с учетом их нового содержания, определяемого новизной объекта управления. Учитывая множество ограничений, связанных с баллистическим построением МОГ, ресурсом отдельных КА, поставленная задача может быть решена одним из методов решения многокритериальных задач, например методом главного критерия или последовательных уступок.

Рассмотрим общую структуру процесса принятия решения на управление. Представляется, что она должна включать получение задачи от потребителя, выбор ЦЭ, выбор орбитальной структуры для его реализации, поиск КА, способных в требуемое время ее реализовать, оценку их технической готовности, запаса ресурсов — энергетических и рабочего тела (ЭЭ и РТ), наличие возможностей информационного обмена. Предварительным решением является начальная активация по типу ЦЭ (назначение КА, способных реализовать ЦЭ) и конечным — итоговая активация выбранных КА.

После начальной активации, т. е. потенциальной оценки возможности выполнения задачи некоторой группой КА, следует этап устранения конфликтов. Дело в том, что приведенные выше задачи могут решаться одновременно для множества потребителей и одни и те же КА могут оказаться в различных локальных орбитальных структурах как способные реализовать выбранные ЦЭ. В связи с этим следующим шагом является выявление и устранение конфликтов и в ряде случаев переназначение КА. После устранения конфликтов происходит итоговая активация выбранных КА. Указанные задачи могут быть решены как потребителем, например, для КНС выбор необходимого созвездия навигационных КА осуществляется потребителем автоматически, так и в более сложном случае операторами Центра управления полетом космической системы как для систем ДЗЗ.

Общее правило принятия решения будет выглядеть следующим образом: *ЕСЛИ КА находится в орбитальной позиции, соответствующей нужному целевому эффекту и его локальной орбитальной структуре, зарегистрирован в орби-*

тальной соте, обладает требуемой технической готовностью и не находится в состоянии конфликта с другими КА,

ТО он может быть активирован для реализации системного эффекта.

Пример выбора локальных орбитальных структур для реализации целевых эффектов приведен на рис. 1. Здесь штрихпунктирными и сплошными линиями показаны возможные (штрихпунктирные) и выбранные (сплошные) орбитальные структуры КА для реализации заданных ЦЭ.

Рис. 1. Пример выбора орбитальных структур

Таким образом, для реализации выбранного целевого эффекта необходимо:

- выбрать орбитальную структуру;
- обеспечить техническую готовность КА и наличие требуемых ресурсов;
- обеспечить информационный обмен между КА, НКУ и наземным комплексом приема и обработки информации;
- в случае реализации распределенной бортовой обработки информации обеспечить управление вычислительной сетью

Исходя из этого в общем случае в структуре ТЦУ (рассматривается ТЦУ ДЗЗ как самый

сложный), помимо традиционных задач индивидуального управления КА, должны присутствовать задачи системного уровня (выделены курсивом):

планирование или выбор ЦЭ под задачу потребителя;

выбор КА, способных реализовать заданный ЦЭ в выбранной области пространства в требуемое время;

определение требуемых орбитальных параметров для КА, параметров ориентации, технологии применения БСА;

оценка технической готовности выбранных КА, запаса ресурсов ЭЭ и РТ для выполнения программных разворотов;

формирование набора управляющих воздействий — командно-программной информации (КПИ) для БА КА, исходных данных для БСА;

контроль состояния системы информационного обмена, факта регистрации КА в «орбитальной соте», решение задач маршрутизации;

контроль взаимного орбитального положения КА;

контроль и синхронизация бортовых шкал времени (БШВ);

выдача КПИ на борт выбранных КА через КА-ретрансляторы, контроль прохождения;

реализация управлений на борту КА, включение БА, выполнение программных разворотов, подготовка БСА;

реализация ЦЭ, получение информации, обработка на БЦВК, передача информации по каналам связи КА-ретранслятору в соответствии с ранее решенной задачей маршрутизации.

Учитывая сложность объекта управления, резкое возрастание сложности алгоритмического обеспечения, потока управляющих воздействий, содержащих в том числе и исходные данные для алгоритмов нового системного уровня, для реализации указанных задач предлагается использовать известный подход, основанный на принципе композиции алгоритмов в *режимы функционирования* как основных режимов системы управления КА, представляющих собой обобщенные целевые алгоритмы функционирования, включающие совокупность частных алгоритмов и отдельных операций. Такой подход успешно реализуется при организа-

ции функционирования КА ДЗЗ различного назначения [9].

Тогда структура режима будет определяться как $Q = \Psi\{G_{\text{и}} \cup G_{\text{с}}\}$, а общий алгоритм функционирования МОГ будет представлять собой последовательную смену режимов функционирования, содержание которых определяется исходными данными, приведенными в постановке задачи

$$\Phi = \cup\{Q(t)\}.$$

При этом режимы подразделяются на индивидуальные $Q_{\text{и}}$ — для отдельных КА и системные $Q_{\text{с}}$, которые, в свою очередь, будут различаться:

- по предназначению — целевые $Q^{\text{ц}}$ для реализации целевых эффектов и функциональные $Q^{\text{ф}}$ для обеспечения функционирования системы;
- по масштабу — глобальные $Q_{\text{гл.}}$ (в рамках всей системы) и локальные $Q_{\text{лк.}}$ (для выбранных КА, ограниченное число) (рис. 2).

Рис. 2. Классификация режимов МОГ

В этом случае общий алгоритм функционирования МОГ будет заключаться в последовательной смене режимов функционирования, содержание которых определяется исходными данными, приведенными в постановке задачи.

Представляется, что общее функционирование МОГ может быть описано следующим множеством функциональных режимов.

1. **Q1.** Автономный режим — реализация стандартных ТЦУ для каждого КА, поддержание альманаха системы.

2. **Q2.** Режим первоначального развертывания — определение орбитальных позиций, регистрация в соответствующей соте, синхронизация БШВ, автономная навигация, контроль состояния, обновление альманаха. Включает известный режим первоначальной ориентации для каждого вновь выводимого КА.

3. **Q3.** Дежурный режим — поддержание состояния, контроль функционирования БА и БСА, решение задач валидации получаемой информации, обмен служебной информацией, поддержание альманаха системы. Включает известные режимы автономных навигационных измерений, совершения маневра для каждого КА.

4. **Q4.** Режим функционирования рабочей структуры для реализации ЦЭ — получение исходных данных, выполнение программных разворотов, проверка состояния каналов связи (систем информационного обмена), маршрутизация, контроль функционирования БЦВК, сверка БШВ, формирование индикатора готовности для реализации ЦЭ, активация КА, реализация ЦЭ, обработка информации, осуществление информационного обмена с КА-ретранслятором и Землей, переход в дежурный режим. Включает известные режим работы БСА для каждого КА, режим доставки информации зондирования на Землю. Отдельно выделим режим управления КА при обнаружении неисправностей.

Приведенная совокупность режимов функционирования позволит в первом приближении описать общее функционирование МОГ и тем самым реализовать процесс группового управления в виде стандартного ТЦУ, обеспечивающего требуемое качество решения целевых задач. Пример общего алгоритма функционирования МОГ приведен на рис. 3.

Групповое управление функционированием МОГ предполагает наличие общесистемной модели, которую целесообразно представить в виде альманаха системы, который на сегодняшний день используется в КНС ГЛОНАСС. В этом случае в содержание альманаха, помимо сведений об орбитальных параметрах каждого из КА, следует включить сведения о составе БСА (функциональном предназначении КА), его технической готовности, состоянии БЦВК, каналов связи, например факта реги-

Рис. 3. Пример общего алгоритма функционирования МОГ

страции в «орбитальной соте», наличия запаса ЭЭ и РТ, готовности к реализации заданного ЦЭ, отсутствия конфликтов с другими КА, факта итоговой активации КА для достижения системного эффекта МОГ.

Представляется, что альманах системы должен обновляться в реальном масштабе времени и храниться на всех КА в составе орбитальной группировки. Структура альманаха системы может быть представлена в виде таблицы $S = \|S_{ih}\|$, где i — номер КА, $h = 1, H$, общее число параметров альманаха.

Таблица. Альманах системы

Номер КА	Текущее время	Орбитальные параметры	Тип БСА	Техническая готовность	Наличие канала связи	Начальная активация по типу ЦЭ	Отсутствие конфликтов	Итоговая активность
1	t	$\ X_{p1}\ $	$j1$	$K\Gamma_1$	$R1$	F_{k1}	U_1	A_1
...	...	...	...	...	...	...	...	...
i	t	$\ X_{pi}\ $	ji	$K\Gamma_i$	R_i	F_{ki}	U_i	A_i

С использованием альманаха системы предложенный алгоритм принятия решения — ЕСЛИ ... ТО ... ИНАЧЕ ... может быть формализован и автоматизирован, например иметь двухуровневую структуру. На первом уровне принимается решение о начальной активации по правилу

ЕСЛИ $\|X_{pi}\| \in C_v/\text{ЦЭ}_k$ И $R_i = 1$ И $K\Gamma_i \geq K\Gamma_{\text{треб.}}$, ТО $F_{ki} = 1$,

ИНАЧЕ режим Q1 ИЛИ Q3 (возможны и другие варианты режимов, как локальных, так и глобальных).

На втором уровне происходит итоговая активация КА по правилу

ЕСЛИ $F_{ki} = 1$ И $U_i = 1$, ТО $A_i = 1$ И режим Q4, ИНАЧЕ режим Q1 ИЛИ Q3.

При этом определение соответствия КА нужной орбитальной структуре при заданном ЦЭ в заданной области пространства может быть осуществлено путем наложения множества орбитальных структур ЦЭ на матрицу орбитальных параметров.

Следует учитывать, что формирование правил принятия решения на управление с учетом режимов функционирования представляет собой отдельную и весьма сложную исследовательскую задачу, так как выбор варианта режима для каждого из КА группировки и системы в целом остается прерогативой специалистов Центра управления полетом космической системы.

Приведенные в настоящей статье предложения по групповому управлению КА на основе режимов функционирования являются предварительными и требуют дальнейших исследований. В качестве практического шага, направленного на отработку содержания групповых технологий управления, можно предложить разработку исследовательского летного кластера на базе КА, созданных по технологии CubeSat или ТНС-0 (минимальное число — 3 МКА) (рис. 4), с последующим испытанием двухуровневой системы управления

«Земля ↔ КА-лидер ↔ КА-ведомые» с целью отработки технологий группового управления МКА и структуры ТЦУ и содержания режимов функционирования. Содержание системных режимов для подобного кластера КА достаточно подробно разработано и приведено в работе [10].

Заключение

В настоящей статье рассмотрены вопросы группового управления сложной гетерогенной многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов функционирования, позволяющей осуществить автоматизацию процессов управления. Проведена формализация задачи управления системным эффектом МОГ, предложено ее решение с использованием альманаха системы и структура ТЦУ многоспутниковой группировкой с выделением задач управления системного уровня. Материалы данной статьи являются конкретизацией ранее высказанных идей по управлению МОГ и предполагают дальнейшее развитие в виде решения частных задач информационного обеспечения управления на основе принципов гомеостаза, моделирования поведенческой активности МОГ как избыточной системы, проведения экспериментов по групповому управлению КА, обобщению и анализу результатов с целью выработки практических рекомендаций по формированию ТЦУ и автоматических сценариев управления новым космическим объектом — многофункциональной многоспутниковой орбитальной группировкой.

Рис. 4. Пример исследовательского кластера на базе CubeSat

Список литературы

1. Starlink. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Starlink> (Дата обращения 17.07.2021).
2. Planet <https://www.planet.com/why-planet> (Дата обращения 17.07.2021).
3. OneWeb <https://ru.wikipedia.org/wiki/OneWeb> (Дата обращения 17.07.2021).
4. Афанасьев И. «Сфера» общих интересов. Космические информационные технологии как драйвер развития страны // Русский космос. 2020. № 10. С. 8–19. <https://www.roscosmos.ru/media/pdf/russianspace/rk2020-08-single.pdf> (Дата обращения 18.12.2020).

5. Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Тимофеев Ю.А. Перспективные сервисы многоспутниковых космических систем // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8, вып. 1. С. 59–68.
6. 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.
7. Ключников В.Ю. Мини-спутники собираются в стаи https://www.ng.ru/science/2020-01-21/9_7773_satellites.html (Дата обращения 17.07.2021.)
8. 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.
9. Конструирование автоматических космических аппаратов / Под ред. Д.И. Козлова. М.: Машиностроение, 1996.
10. 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.