**Методы системного анализа в вопросах создания и модификации орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.**

**Слепцов Э.С., Тутуров А.А.**

E-mail: *ernest89@mail.ru, tuturov@mail.ru*

**АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г.Москва, Хоромный тупик д.4 с.1**

**System analysis methods in the creation and modification of orbital constellations of Earth remote sensing spacecraft.**

**Sleptsov S. Ernest, Tuturov A. Alexey**

*В статье анализируется возможность постановки методами системного анализа задачи построения и удержания орбитальной группировки космических аппаратов ДЗЗ. Вводятся критерии, составляющие обобщенный целевой функционал орбитальной группировки, что дает основания разделить целевую задачу, задачу баллистического построения и задачу стабилизации.*

**Ключевые слова:** системный анализ, дистанционное зондирование Земли, орбитальная группировка, космический аппарат, баллистическое проектирование, система ориентации и стабилизации, корректирующая двигательная установка.

*The article analyzes the possibility of stating by methods of system analysis the task of constructing and holding the orbital constellation of remote sensing spacecraft. Criteria are introduced that make up the generalized target functional of the orbital grouping, which makes it possible to separate the target task, the ballistic construction problem, and the stabilization problem.*

**Keywords:** system analysis, Earth remote sensing, orbital constellation, spacecraft, ballistic design, orientation and stabilization system, corrective propulsion system.

**Введение**

На сегодняшний день необходимость получения больших объёмов оперативной высококачественной информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) привела к созданию, эксплуатации и развитию орбитальных группировок (ОГ) – совокупностей космических аппаратов (КА), расположенных на орбитах в соответствии с баллистической структурой и объединённых общностью решаемых задач в составе космического комплекса или системы. Многочисленные исследования в области проектирования и эксплуатации ОГ [1,2,3,4,5,6,7,8,9], состоящих из низкоорбитальных малых КА ДЗЗ выявляют следующие основные целевые характеристики, требующие нахождения оптимальных путей развития ОГ как системы:

1. Повышение эффективности выполнения целевых задач.
2. Повышение оперативности выполнения целевых задач и передачи целевой информации (ЦИ).
3. Уменьшение рисков связанных с операционной деятельностью в процессе выполнения целевых задач.
4. Уменьшение затрат на эксплуатацию, модернизации и запуски новых КА для поддержания ОГ.

Данные требования традиционно удовлетворялись путём создания и введения в состав ОГ модификаций КА, оптимизированных под решение конкретной задачи в уточнённых условиях на основе опыта эксплуатации прототипа серии. Однако в последние десятилетия данный подход перестал считаться оптимальным по ряду представленных ниже причин:

Во-первых, изменилось восприятие уменьшения затрат: сегодня данное требование является одним из главных критериев конкурентоспособности с точки зрения рынка предоставления услуг ДЗЗ.

Во-вторых, запуск модификаций КА для адаптации ОГ к фактическим изменениям условий эксплуатации не в состоянии решить проблемы адаптации к новым условиям уже находящихся в эксплуатации КА, что уменьшает эффективность данного подхода.

В-третьих, за последние десятилетия высокая интенсивность запусков на орбиты высотой порядка 250-500 км привела к тенденции их перенасыщения, что и является главной причиной поиска альтернативных подходов развития низкоорбитальных ОГ ДЗЗ.

Первый подход заключается в поиске средств увеличения срока активного существования (САС) КА в составе ОГ ДЗЗ. Являясь развитием традиционного решения, данный подход обладает фундаментальным следствием: уменьшается общее число запусков новых КА, необходимых для поддержания штатной работоспособности ОГ на протяжении всего срока её существования. Данный подход актуален ввиду особенностей формирования ОГ. Производство и запуск новых КА являются крайне затратными, в том числе по времени, а потому для описываемого семейства КА массой то 100 до 600 кг в большинстве случаев срок от запуска первых КА до моментаполного формирования штатной ОГ исчисляется в годах. Таким образом, необходимо чтобы САС КА ДЗЗ с определённым запасом превышал сумму сроков на его разработку, производство, запуск и ввод в состав ОГ.

Второй подход является развитием упомянутого следствия первого – снижение количества КА в составе ОГ до оптимального минимума, при котором параметры эффективности и оперативности выполнения целевых задач остаются максимализированными. Данный подход призван в основном обеспечить требования снижения затрат и рисков, поскольку критическим этапом функционирования КА, на котором риски и затраты максимальны, является его запуск. Осуществление данного подхода требует решения целого ряда задач оптимизации баллистического построения КА в составе ОГ. В данной статье решения данных задач представлены не будут, однако их упоминание необходимо для полного описания особенностей системы.

**Постановка задачи, гипотезы и принятые допущения**

Увеличение САС КА и уменьшение численности КА в составе ОГ неизбежно приводят к проблеме взаимодействия КА разных поколений и/или модификаций, поскольку срок эффективного существования ОГ должен в значительной степени превышать САС единовременно входящих в состав ОГ КА. Для решения проблемы взаимодействия КА в составе ОГ необходимо сформировать оптимальные законы управления ОГ, однако, ввиду использования КА разных поколений и/или модификаций, это не представляется возможным без детальной проработки на всех уровнях ОГ как системы.

Под уровнем системы в данном случае подразумевается комплекс взаимодействий самой системы как объекта или её компонентов, исходя из привязки к физическим границам данного объекта, анализа протекающих с его участием процессов, а также определения граничных условий решения рассматриваемых задач.

**Уровень надсистемы** – рассмотрение в масштабе Космической системы информационных и баллистических взаимодействий в составе Космического комплекса ОГ с Наземным комплексом управления (НКУ), а также всего Космического комплекса с Наземным комплексом приема, обработки и распространения (НКПОР) ЦИ.

Под информационными взаимодействиями на данном уровне понимается совокупность процессов передачи ЦИ между ОГ, НКУ и НКПОР, а под баллистическими взаимодействиями – совокупность процессов управления структурой орбитального позиционирования ОГ относительно объектов инфраструктуры НКУ и НКПОР с целью обеспечения оптимальной периодичности информационных взаимодействий.

**Уровень системы** – рассмотрение взаимодействий КА ДЗЗ в составе ОГ друг с другом: информационные, баллистические и технические.

Под техническими взаимодействиями подразумевается обеспечение штатного совместного функционирования целевой аппаратуры (ЦА) модулей полезной нагрузки (МПН) и служебных систем (МСС) [7], однако конкретно на данном уровне имеется в виду именно оптимизация взаимодействия КА разных поколений и/или модификаций.

**Уровень подсистемы** – технические взаимодействия систем КА. На данном уровне рассматривается именно взаимодействие МПН и МСС в рамках обеспечения штатной работоспособности конкретного КА без учёта его внешних связей с ОГ.

Схема взаимосвязей целевых характеристик в процессе поиска оптимальных законов управления на уровнях подсистемы и системы ОГ представлена на рисунке 1.

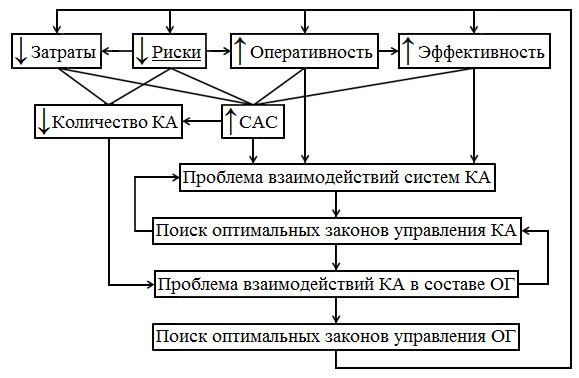


Рис. 1 Схема алгоритма анализа задачи оптимизации ОГ

**Методология**

Для описания оптимальных законов управления ОГ введем [3] целевой функционал ОГ, равный сумме сумм функционалов составляющих её КА, и функционалов взаимодействия этих КА:

(1)

Под функционалом взаимодействия КА подразумевается сумма попарных произведений [4.] всех функционалов КА, входящих в состав ОГ:

(2)

Функционал конкретного КА является взвешенной суммой входящих в него комплексных критериев [10] отражающих решение задач космическим аппаратом:

(3)

где:

– соответствующий вес критерия;

– комплексный критерий оперативности выполнения целевых задач – характеристика объёмов и периодичности работы ЦА при выполнении сеансов передачи ЦИ с КА на НКПОР ЦИ. Полное определение параметра невозможно без учёта факторов определяющих необходимые условия успешного выполнения целевой задачи: величин зон радиовидимости при взаимодействии КА с НКУ и НКПОР ЦИ, зависящих от баллистического построения ОГ, а также качества связи, зависящего от параметров бортового радиокомплекса каждого КА, что приводит к необходимости введения дополнительных параметров и . По своей сути, критерий является приведенным временем необходимым для единичного КА входящего в состав ОГ ДЗЗ для выполнения полного цикла целевой задачи с учетом других КА. Конкретные рассмотрения подобных задач для простых случаев съемок представлены в статьях [5,8].

– комплексный критерий взаимодействия целевых задач с баллистическими задачами КА. В свою очередь не может быть определён полностью, без полного анализа взаимодействия систем МСС участвующих в выполнении орбитальных манёвров. Решением такого рода задач в рамках построения и поддержания орбитальных группировок посвящены следующие статьи [6,11,12,13,14,15].

– комплексный критерий качества целевой задачи, в него входят обобщённые критерии системы ориентации и стабилизации (СОС), в частности инерционные и динамические характеристики исполнительных органов СОС, быстродействие, эксплуатационные характеристики чувствительных элементов СОС, способность корректировать ошибки, точность координатно-временных привязок, инерционные и динамические характеристики КА в целом. А также динамические и геометрические характеристики корректирующей двигательной установки (КДУ), а именно: точность установки относительно центра масс КА и величина вектора тяги [16].

В отличие от и , которые могут рассматриваться в качестве комплексных параметров взаимодействия ОГ в целом, параметр является исключительно индивидуальным варьируемым комплексным параметром для каждого КА. Области определения комплексных параметров , и на иерархической структуре ОГ представлены на рисунке 2:

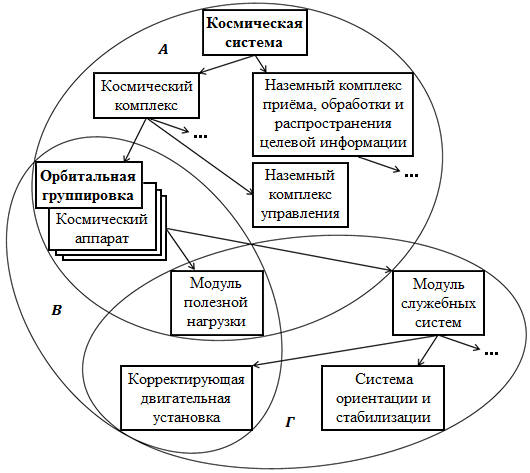


Рис. 2 Иерархическая схема анализа функциональных взаимодействий ОГ

Таким образом, на уровне поиска решения проблемы оптимального взаимодействия систем КА полностью определим лишь параметр тогда как и требуют уточнения на более высоких уровнях системы.

**Выводы**

Авторы предлагают для определения критерия (являющийся сам по себе объектом исследования при проектировании космических аппаратов [1,9]) при решении задачи системного анализа орбитальной группировки можно отметить, что формулы 1-3 дают корректную постановку оптимизации, и при назначении весов λ, можно получить важные свойства. В целом, можно сказать, что улучшать качества системы ориентации и стабилизации относительно парирования случайных возмущений, так и ослаблять их, при сохранении других качеств орбитальной группировки, в частности можно повысить устойчивость баллистического построения орбитальной группировки, или назначить качественный технологический цикл управления.

Также важно отметить, что метод предложенный в статье, позволяет оценить вопросы использования энергии для изменения параметров КА как твердого тела. Данный метод становится важным, если рассматривать проектирование орбитальной группировки как единого проекта в компьютерных системах автоматизированного проектирования.

**Список литературы**

1. Овчинников М.Ю.. Динамика и управление перспективными многоэлементными орбитальными системами. Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, №4, часть 2, с.255-257.
2. Матюшин М. М. и др. Проектирование рациональных схем распределения средств управления при эксплуатации крупномасштабных орбитальных группировок космических аппаратов //Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2016. – Т. 2. – С. 10-16.
3. Котяшов Е.В., Куваев О.Л., Кудинов М.Г., Чернявский В.А. Информационно-расчетная модель планирования применения орбитальных группировок космических аппаратов //Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2017. – №. 657. – С. 15-22.
4. Широбоков В. В., Шинкаренко А. Ф. Подход к организации межспутникого взаимодействия в распределенной вычислительной структуре орбитальной группировки микроспутников//Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2015. – №. 646. – С. 77-82.
5. Гончаров А. К., Чернов А. А. Планирование сеансов приёма информации с космических аппаратов орбитальной группировки при ограниченном количестве приёмных комплексов //Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – №. 1. – С. 180-189.
6. Шестихин В.И. Методический подход к задаче обеспечения устойчивости орбитальной группировки КА в составе системы дистанционного зондирования земли// Стратегическая стабильность 2011,№4 стр.45-47
7. Разработка систем космических аппаратов / Под ред. П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка; Пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2015.
8. Соллогуб А.В. , Скобелев П.О., Симонова Е.В., Царев А.В., Степанов М.Е, Жиляев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2013. №1 (62) с.16-26.
9. Y. Mashtakov, M. Ovchinnikov, S. Tkachev. Study of the disturbances effect on small satellite route tracking accuracy // Acta Astronautica – 2016. – V.129.  – P. 22-31.
10. Подиновский В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М. : Физматлит, 2007.
11. Журавлев К. В. и др. Поддержание динамической устойчивости орбитальной группировки из КА “Канопус-В”№ 1 и Белорусского КА //Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – №. 2. – С. 101-107.
12. Аверкиев Н. Ф. и др. Модификация баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов на основе принципа оптимального управления //Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – №. 7.
13. Малышев В. В., Старков А. В., Фёдоров А. В. Синтез оптимального управления при решении задачи удержания космического аппарата в орбитальной группировке //Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – №. 4. – С. 150-158.
14. Поливанов В. А., Тарасевич К. О. Комплексный подход к обеспечению устойчивости баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования земли //Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2016. – №. 655. – С. 128-133.
15. Селиванов А. А., Сасункевич А. А., Макаров М. М. Автономное распределенное управление орбитальной группировкой КА дистанционного зондирования земли на основе технологии многоагентных систем //Труды Военно-космической академии им. АФ Можайского. – 2013. – №. 641. – С. 69-74.
16. А.В.Хромов «Взаимодействие корректирующей двигательной установки с системой ориентации космического аппарата» // Вопросы электромеханики с.27-32, №2, Т.127, 2012.