

УДК 519.8

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-446

*Калинин Владимир Николаевич*¹,
профессор, д-р техн. наук, профессор;
*Соколов Борис Владимирович*²,
гл. науч. сотр., д-р техн. наук, профессор

КОСМИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА: СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

¹ Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени
А.Ф.Можайского, kvn.112@mail.ru;

² Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН, sokolov_boris@inbox.ru

Аннотация. В работе в качестве основного объекта исследования рассматриваются процессы проактивного управления многоспутниковыми орбитальными группировками (МОГ) космических аппаратов. Проведен анализ основных проблем управления в рассматриваемой предметной области. Показано, что целесообразно решение данных проблем осуществлять в рамках новой прикладной теории, а именно космической кибернетики. Проанализированы состав, структура и содержание современной космической кибернетики, а также определены перспективы ее развития.

Ключевые слова: космический аппарат, многоспутниковые орбитальные группировки, некибернетика, космическая кибернетика, системное моделирование, проактивное управление.

*Vladimir N. Kalinin*¹,
Professor, Doctor of Technical Sciences;
*Boris V. Sokolov*²,
Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences

SPACE CYBERNETICS: STATE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT PROSPECTS

¹ Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia,
kvn.112@mail.ru;

² St. Petersburg Federal Research Center of RAS, St. Petersburg, Russia,
sokolov_boris@inbox.ru

Abstract. The work considers the processes of proactive control of multi-satellite orbital constellations (MOG) of spacecraft as the main object of research. An analysis of the main management problems in the subject area under consideration is carried out. It is shown that it is advisable to solve these problems within the framework of a new applied theory, namely space cybernetics. The composition, structure and content of modern space cybernetics are analyzed, and the prospects for its development are determined.

Keywords: spacecraft, multi-satellite orbital constellations, non-cybernetics, space cybernetics, system modeling, proactive control.

Введение

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция усиления роли факторов сложности в существующих и проектируемых организационно-технических системах, используемых в различных предметных областях таких, как экономика, военное дело, экология, космические исследования. К настоящему времени появилось значительное количество сложных технических объектов (СТО), к числу которых относятся рассматриваемые в докладе перспективные многоспутниковые орбитальные группировки (МОГ) КА различного целевого назначения (например, навигационные КА (НКА), КА спутниковой связи (КА СС) и КА дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ)). При этом устойчивой тенденцией развития рассматриваемых МОГ является значительное увеличение числа КА, входящих в их состав. Так, например, в РФ в качестве одного из наиболее перспективных направлений применения МКА рассматривается реализация проекта многофункциональной МОГ «Сфера» [1]. Отечественную МОГ «Сфера» планируется создавать в виде космической инфраструктуры, в которой совместно должны функционировать несколько специализированных космических группировок, совместно реализующих функции связи, навигации, ДЗЗ. В рамках проекта планируется разработать и запустить до 200 КА различного функционального назначения, включая КА наблюдения [2–6].

В этих условиях из-за ограниченных возможностей (прежде всего, пропускной способности) отечественного наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) принципиальными особенностями организации процессов управления целевым применением (ЦП) рассматриваемыми МОГ КА являются повышенные требования к уровням автономного управления указанными МОГ КА, а также повышенные требования к значениям показателей надежности, живучести и, в целом, устойчивости их функционирования в условиях возмущающих воздействий.

Для выполнения указанных требований весьма актуален переход от технологий традиционного централизованного программно-командного управления к технологиям децентрализованного координатно-временного самоорганизующегося управления [4–10]. При этом за счет этих изменений, а также использования режимов ретрансляционного межспутникового обмена данными и информацией в ближайшие годы может быть существенно повышен уровень автономности как отдельных КА, так и в целом МОГ КА.

В этом случае возможен переход к методологии и технологиям сетевого управления КА и МОГ КА. Данный переход требует разработки принципиально новых подходов к решению всего перечня задач управления рассматриваемыми видами космических средств (КСр), к числу которых традиционно относят задачи целеполагания, планирования (стратегического, долгосрочного, оперативного), контроля, учета и прогнозирования, оценивания, анализа и диагностики состояния КСр (в ряде случаев их объединяют и называют функцией мониторинга состояния), задачи коррекции планов, перепланирования и управления в реальном масштабе времени, задачи координации [1–5, 7–11].

При этом исследователям и разработчикам перспективных систем управления (СУ) МОГ КА приходится решать, как и при управлении одиночными КА, известные фундаментальные научные проблемы, к числу которых принято относить: проблемы большой размерности, нестационарности, нелинейности, многокритериальности и учета «НЕ-факторов», но уже применительно к многоспутниковым космическим системам, что потребовало перехода уже к технологиям сетевого управления многоспутниковыми системами. Следует отметить, что при организации сетевого управления МОГ КА основное внимание должно уделяться формированию и поддержанию на длительных интервалах времени целевых и системных эффектов, создаваемых соответствующими орбитальными группировками. Данные эффекты, характеризуются, например, для МОГ НКА такими общесистемными показателями как доступность, целостность, точность определения координат. В случае рассмотрения МОГ КА ДЗЗ это – периодичность наблюдения, информативность, обзорность, вероятность получения информации с требуемым качеством. Эффективность

спутниковых систем связи (ССС) характеризуют множеством предоставляемых сервисов, вероятностью вхождения в связь за заданное время, задержками при передаче речи по спутниковым каналам [1–3]. В докладе рассмотрены современные подходы к решению перечисленных фундаментальных и прикладных проблем и задач.

Научные основы космической кибернетики и перспективы ее развития

В современных условиях в нашей стране и за рубежом разрабатываются десятки научных подходов к решению перечисленных ранее проблем и задач, среди которых можно отнести, подходы, базирующиеся на классических методах исследования операций [6–8], моделях, методах, алгоритмах, разрабатываемых в теории искусственного интеллекта (инженерии знаний) [18–21], классической и современной теории управления [12–17], на гомеостатическом подходе [5, 20]. Однако, как показывает практика, для решения рассматриваемых проблем обойтись каким-то одним подходом достаточно трудно. В связи со сказанным в докладе предлагается органично объединить имеющиеся и разрабатываемые теории в рамках нового научного направления, названного в работах [12–17, 22–24] *космической кибернетикой*. При этом под *космической кибернетикой* (КК) понимается прикладная наука об оптимальном управлении орбитальными группировками космических аппаратов и наземными средствами обеспечения космических полетов. Изначально методологические и методические основы КК базировались на ряде работ профессора Калинина В. Н., составивших научное ядро теории оптимального управления процессами информационного взаимодействия КА с окружающей физической средой на основе концепции активного подвижного объекта при воздействии различных возмущающих факторов [12–17].

В качестве базовых направлений исследований в КК были выбраны следующие направления:

- разработка методологических основ КК, включающих в себя концепции, принципы, способы и общие методы управления орбитальными и наземными космическими средствами;

- разработка методических основ КК в виде прикладной теории управления КА и МОС КА на основе концепции активного подвижного объекта (АПО) и прикладной теории управления наземными средствами и комплексами на основе концепции системы обслуживания [15–17]. При этом разработка перечисленных методологических и методических основ в настоящее время синхронизирована с разработкой более общих проблем кибернетики, которая получила название неокибернетики [22–27].

Первой из указанных концепций и технологий можно назвать концепцию и технологию комплексного (системного) моделирования МОГ КА, которая предполагает разработку и реализацию новых принципов,

способов, методов, методик проведения полимодельного агентно-ориентированного логико-динамического описания различных вариантов построения и использования рассматриваемых группировок космических средств (КСр), а также разработку и комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных проактивных управленческих решений (в том числе и ориентированных на их конфигурирование и реконфигурацию), связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых средств в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок.

В качестве второй концепцией и технологии рассматривается концепция и технология проактивного управления структурной динамикой МОГ КА в изменяющихся условиях, вызванных воздействием различных факторов (внешних, внутренних, объективных, субъективных и их комбинаций). Реализация данной концепции предполагает, в отличие от традиционно используемого на практике реактивного управления рассматриваемыми КСр, ориентированного на оперативное реагирование на уже произошедшие негативные события и недопущение их последующего развития, упреждающее предотвращение причин возникновения инцидентов за счёт создания (либо целенаправленного поиска) в соответствующей системе проактивного мониторинга и управления новых системно-функциональных резервов, обеспечивающих динамическое формирование принципиально новых возможностей по парированию возможных расчетных и нерасчетных нештатных и аварийных ситуаций, с использованием методологии и технологий системного (комплексного) моделирования, а также многовариантного ситуационно-адаптивного прогнозирования.

Еще одной концепцией и технологией является концепция и технология интеллектуализации управления, предусматривающая в качестве условий эффективного управления МОГ КА необходимость применения интеллектуальных инструментов управления (новых интеллектуальных информационных технологий), носящих ярко выраженный инновационный характер и направленных на достижение комплексной интеграции естественного и искусственного интеллектов. В качестве примера конструктивной реализации данной концепции можно привести использование нечетко-возможностной свертки векторного показателя качества функционирования МОГ КА ДЗЗ в агентно-ориентированной логико-динамической модели проактивного управления информационными процессами в рамках рассматриваемой группировки [22, 27].

На рис. 1 приведен пример конкретизации разработанных к настоящему времени прикладных теорий управления КА и МОС КА и наземными средствами и комплексами применительно к классам малоразмерных КА, на которые ориентируется как отечественная, так и зарубежная

космонавтика. Объединение перечисленных двух прикладных теорий осуществляется в рамках нового объекта исследований, а именно автоматизированных систем управления (АСУ), в состав которых включаются как бортовые, так и наземные комплексы управления (БКУ МКА и НКУ МКА).

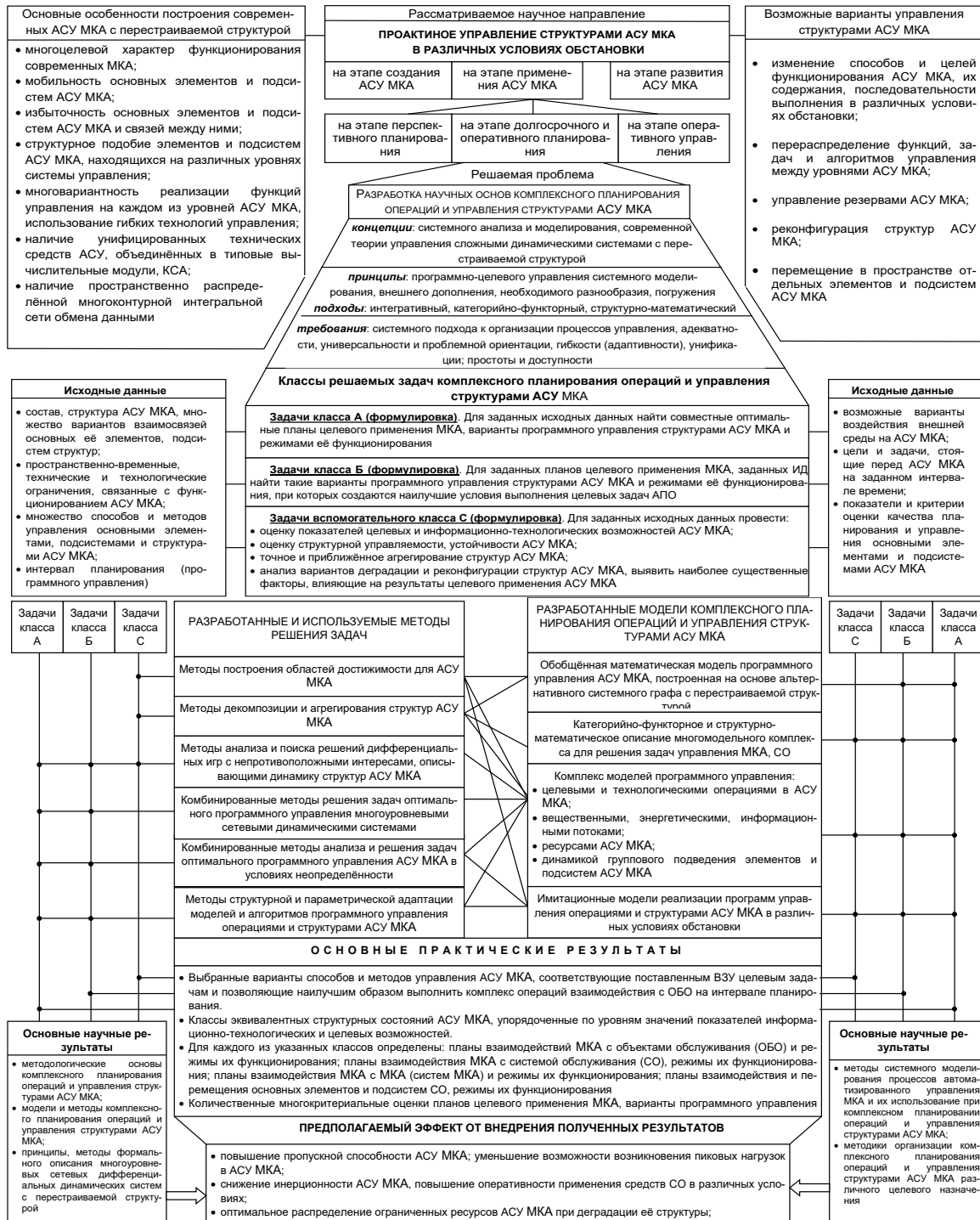


Рис. 1. Основные положения теории проактивного управления структурной динамикой АСУ МОГ малоразмерных КА (МКА)

Заключение

Анализ современных направлений исследований в области возможных вариантов функционирования перспективных МОГ КА показывает, что происходят качественные изменения в методологии и технологиях управления как отдельными КА, так и в целом МОГ КА. Эти изменения базируются на существенной трансформации и обновлении состава, структур и потенциальных возможностей аппаратно-программных комплексов, составляющих основу бортовых систем (БС) рассматриваемых КА, входящих в состав МОГ, и требуют перехода от традиционных подходов к организации процессов управления одиночными КА к методам и технологиям сетевого управления в целом МОГ КА. Для этого, в первую очередь, должны разрабатываться соответствующие новые научные основы, представленные в виде соответствующих прикладных теорий.

В статье показано, что одним из перспективных направлений исследований в рассматриваемой предметной области является космическая кибернетика, входящая в состав современной кибернетики, получившей название неокибернетики. При этом сама космическая кибернетика включает в себя три направления исследований: разработку методологических основ КК (концепций, принципов, подходов, общих методов), а также разработку методических основ КК в виде прикладной теории управления КА и МОС КА на основе концепции активного подвижного объекта (АПО) и прикладной теории управления наземными средствами и комплексами на основе концепции системы обслуживания. Дальнейшие перспективы развития КК связаны с переходом от классических моделей и методов управления КА и МОС КА к моделям и методам проактивного управления и управляемой самоорганизации.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767, <https://rscf.ru/project/22-19-00767>.

Список литературы

1. Роскосмос хочет сделать космические услуги платными с 2025 года [Электронный ресурс] // Вестник ГЛОНАСС: сайт. – URL: <http://vestnik-glonass.ru/news/corp/roskosmos-khochet-sdelat-kosmicheskie-uslugi-platnymi-s-2025-goda/> (дата обращения: 24.05.2024).
2. Черкасова Н. С конвейера на орбиту [Электронный ресурс] // RSpectr: сайт. – URL: <https://rspectr.com/articles/s-konvejera-na-orbitu> (дата обращения: 24.05.2024).
3. Ахметов Р. Н. Методы и модели автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва, Самара, СГАУ. – 2008. – № 2(15). – С. 194–210.
4. Проблемные вопросы создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малоразмерных космических аппаратов / В. В. Бетанов, С. А. Волков, Н. С. Данилин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6. – № 3. – С. 57–65.

5. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками / А. Ю. Потюпкин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Том 7. – Вып. 3. – С. 61–70.
6. Галузин В. А., Кутоманов А. Ю., Матюшин М. М., Скобелев П. О. Обзор современных методов планирования работы перспективных космических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21. – № 11. – С. 639–650.
7. Chen H., Peng S., Du C., Li J. Earth observation satellites. Task planning and scheduling. – Singapore: Springer, 2023. – 189 p.
8. Космическая система оперативного мониторинга земной поверхности на базе малых космических аппаратов / А. П. Данилкин, В. Н. Воронков, О. Ю. Казанцев [и др.] // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 1(32). – С. 42–55.
9. Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты в дистанционном зондировании Земли // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 5. – С. 82–88.
10. Liu L., Dong, Z., Su H., Yu D. A study of distributed Earth observation satellites mission scheduling method based on game-negotiation mechanism // Sensors. – 2021. No. 21. – P. 6660.
11. Wang X., Wu G., Xing L., Pedrycz W. Agile Earth observation satellite scheduling over 20 years: Formulations methods and future directions // IEEE Syst. J. – 2021. – Vol. 15. – No. 3. – Pp. 3881–3892.
12. Калинин В. Н. Теоретические основы управления активными подвижными объектами. – М.: МО СССР, 1974. – 130 с.
13. Калинин В. Н. Теоретические основы управления подвижными объектами и операциями их обслуживания: монография. – Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1989. – 224 с.
14. Калинин В. Н. Космический аппарат как объект системных исследований // Труды ВКА им. А. Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 640. – С. 80–89.
15. Калинин В. Н. Теория управления космическим аппаратом (на основе концепции активного подвижного объекта): монография. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – 188 с.
16. Калинин В. Н. Морфологический анализ проблематики математического моделирования процессов информационного взаимодействия космического аппарата с окружающей физической средой // Информация и космос – 2014. – № 1. – С. 94–104.
17. Калинин В. Н. Математическая модель информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью Земли // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 3 (34). – С. 33–56.
18. Карсаев О. В. Автономное планирование задач наблюдения в группировках спутников // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1(203). – С. 129–143.
19. Низкоорбитальные группировки малоразмерных космических аппаратов [Электронный ресурс] / А. А. Спиридонов, В. А. Велиган, И. А. Шалатонин, В. С. Баранова [и др.]. – Минск: БГУ, 2021. – URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/271683> (дата обращения: 24.05.2024).
20. Потюпкин А. Ю. Управление многоспутниковыми космическими системами. – М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 292 с.
21. Дарнопов В. В. Применение единого методического подхода к оперативному планированию целевого функционирования спутниковых систем мониторинга и связи // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 118–137.

22. Калинин В. Н., Кулаков А. Ю., Павлов А. Н., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконфигурацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // Информатика и автоматизация. – 2021. – Том 20. – № 2. – С. 236–269.
23. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
24. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
25. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами // Труды СПИИРАН. – 2010. – Вып. 4(15). – С. 7–52.
26. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1(162). – С.162–174.
27. ЛИТСАМ: сайт. – URL: <http://litsam.ru> (дата обращения: 24.05.2024).