

На правах рукописи

Подчуфаров Андрей Андреевич

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ
УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, доцент
Фомичев Алексей Викторович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, доцент,
профессор
Феофилов Сергей Владимирович
Институт высокоточных систем
им. В.П. Грязева ФГБОУ ВО «Тульский
государственный университет»

Кандидат технических наук
Давыдов Игорь Александрович
Главный конструктор по
диверсификации и освоению новых
видов продукции
АО «Научно-производственное
объединение измерительной техники»

Ведущая организация:

Акционерное общество
«Конструкторское бюро «Арсенал»
имени М.В. Фрунзе»

Защита состоится «18» мая 2021 г. в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 на базе Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д.10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Значительное место в космических технологиях занимает дистанционное зондирование Земли из космоса. Данные дистанционного зондирования Земли стали важным источником для решения практических задач государственного, регионального и местного управления, мониторинга природных и техногенных объектов и явлений.

Значимым направлением совершенствования систем дистанционного зондирования Земли в мире является применение для этих целей групп космических аппаратов (КА). Такой подход обеспечивает значительное повышение качества получаемых данных, определяя при этом возможность дополнительного роста эффективности орбитальной группировки за счет их структуры и алгоритмов управления. Высокой оперативностью и эффективностью дистанционного зондирования Земли обладают КА с целевой аппаратурой радиолокационного типа.

Различия задач, решаемых на основе дистанционного зондирования Земли, определяют широкий спектр требований, предъявляемых к используемой информации со стороны ее потребителей с учетом ресурсных ограничений и эффективности загрузки оборудования. На текущий момент, для удовлетворения описанных требований, отсутствуют алгоритмы управления группой КА на основе существующих и перспективных спутников-прототипов, обеспечивающих необходимые показатели качества достижения групповой цели. В рамках управления группой КА отдельным вопросом является обеспечение координации между КА, которая включает в себя согласованное движение по траектории и ориентацию, исходя из цели, поставленной перед группой.

Вопросам построения систем управления летательными аппаратами и системам сопровождения целей посвящены работы В.В. Солодовникова, Л.Д. Певзнера, Р. Дорфа, Д.П. Кима, Е.И. Юревича, К.А. Пупкова, И.А. Каляева, Е.М. Воронова, Н.Н. Моисеева, N.S. Nise и др. В разработку методов дистанционного зондирования Земли внесли большой вклад такие ученые как Г.С. Кондратенков, М.И. Ботов, В.А. Вяхирев, Р. Шовенгердт, У. Рис, А.И. Захаров и др. Вопросам навигации и ориентации КА посвящены работы Е.А. Микрина, А.В. Фомичева, К.А. Неусыпина, Е.С. Лобусова, А.П. Коваленко, М.И. Орехова и др.

Формализация задачи построения системы управления группы КА дистанционного зондирования Земли может быть сведена к структурно-параметрическому синтезу функциональных модулей и системы управления группы КА как многообъектной многокритериальной системой, где каждый КА характеризуется многоканальностью разнородных систем стабилизации, наблюдения, связи, выполняет обработку многомерного потока целевых заданий и действует в условиях неопределенности возмущающих воздействий.

Решение такого класса задач применительно к системам дистанционного зондирования Земли дает возможность значительно улучшить показатели выполнения целевых заданий, а также повысить обоснованность требований, предъявляемых к характеристикам элементов систем. Реализация названного

подхода определяет необходимость разработки комплексных моделей, описывающих состояния каждого из элементов рассматриваемой системы с учетом алгоритмов их взаимодействия, направленных на достижение заданных показателей и определяющих при принятии решений последовательность отработки потока целевых заданий.

Разработки российской космической отрасли обладают потенциалом для создания на их основе групп КА дистанционного зондирования Земли. В связи с этим **актуальным направлением исследований** является разработка алгоритмов управления перспективными группами КА, на базе отечественных спутников-прототипов дистанционного зондирования Земли, обеспечивающих достижение ими характеристик, не уступающих лучшим зарубежным аналогам.

Объект исследования диссертации: группа КА дистанционного зондирования Земли на базе перспективного отечественного спутника-прототипа.

Предмет исследования – алгоритмы классификации целей программы зондирования и комплексного управления КА дистанционного зондирования Земли в группе, а также методика их разработки.

Цель диссертационной работы состоит в повышении эффективности применения КА дистанционного зондирования Земли в группе путем структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления при выполнении целевых заданий программы зондирования. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие **задачи исследования**:

- анализ тенденций развития орбитального зондирования земной поверхности и обоснование требований к отечественным КА дистанционного зондирования Земли, действующим в составе группы;
- разработка модели для исследования координации КА в группе, выполняющих дистанционное зондирование Земли в радио-диапазоне, и для отработки алгоритмов по повышению эффективности управления КА в группе;
- разработка методики синтеза алгоритмов управления КА по совокупности обоснованных требований к отечественным КА, действующих в составе группы радиолокационного дистанционного зондирования Земли;
- разработка алгоритмов управления КА, действующих в составе группы и обеспечивающих повышение эффективности радиолокационного дистанционного зондирования Земли;
- проверка работоспособности и эффективности предложенных технических и алгоритмических решений по управлению КА в группе при радиолокационном дистанционном зондировании Земли.

В работе принят комплексный метод исследования, который характеризуется совместным использованием методов системного анализа, векторной оптимизации, теории сетевого управления и массового обслуживания, методов математического и имитационного моделирования.

При выполнении исследований в работе получены следующие результаты, определяющие **научную новизну** диссертации:

1. На основе анализа тенденций повышения качества радиолокационных изображений земной поверхности сформированы требования к перспективным отечественным КА дистанционного зондирования Земли, действующим в составе группы и включающие обеспечение высокой разрешающей способности обнаружения и распознавания подвижных и неподвижных точечных и поверхностных целей, минимизацию энергетических и эксплуатационных затрат на корректировку ориентации целевой аппаратуры в направлении участка целевой области зондирования, минимизацию времени выполнения целевых задач и минимизацию конструктивных доработок аппаратного состава КА при реализации алгоритмов управления КА в группе.

2. Построена комплексная модель, с приемлемой точностью отражающая координацию КА группы и включающая модели движения КА по орбите, вращения КА вокруг центра масс, функционирования измерительного и исполнительного контуров КА и функционирования двух КА дистанционного зондирования Земли на орбите по централизованному иерархическому принципу «с ведущим». Комплексная модель реализована в составе комплексного стенда моделирования взаимной координации двух КА в группе.

3. Разработана методика синтеза алгоритмов координации КА в группе радиолокационного зондирования земной поверхности, отличающейся векторной интерпретацией процесса проектирования средств управления КА по критериям быстродействия, точности зондирования земной поверхности, энергетических и эксплуатационных затрат на выполнение полетного задания КА группы.

4. Разработан алгоритм классификации целей, отличающийся совместным использованием критериев быстродействия, точностных, энергетических и эксплуатационных ресурсных возможностей КА группы и предназначенный для формирования программы зондирования группой КА.

5. Разработан алгоритм комплексного управления каждым КА группы при отработке сформированной программы зондирования с распределенными и классифицированными целями, отличающийся широким диапазоном режимов функционирования КА в группе и оригинальными схемотехническими решениями.

6. Проведена отработка технических решений по программной реализации разработанных алгоритмов управления КА и предложена модернизация комплексного моделирующего стенда кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что для теории управления группой КА выполнена формализация задачи структурно-параметрического синтеза управления группой и отдельными КА группы в виде векторной интерпретации процесса проектирования, на основе которой предложена методика, позволяющая разрабатывать алгоритмы обработки многомерного потока целевых заданий и управления КА на траектории в составе группы.

В рамках проведенного исследования предложенные теоретические положения позволили сформировать алгоритмы обработки целевых заданий, которые отличаются последовательностью актуализации списков целей зондирования, обоснованной комплексной моделью группы КА, и алгоритмы управления КА в составе группы, которые отличаются использованием критериев точности зондирования земной поверхности, энергетических и эксплуатационных затрат и реализацией минимальных конструктивных доработок аппаратного состава спутника-прототипа при управлении КА в составе группы.

Практическая значимость:

1. Разработанные алгоритмы реализации программы дистанционного зондирования Земли сокращают время выполнения тестовой задачи на 40%, снижают значения суммарных углов переориентации при отработке массива целевых заданий на 24%, сокращают результирующий показатель отклонений допустимых и фактических углов зондирования при отработке массива целевых заданий на 32%.

2. Разработанные технические решения по созданию программно-алгоритмического комплекса рекомендованы к использованию в АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе» (Санкт-Петербург).

Достоверность получаемых в диссертации результатов обусловлена использованием в качестве исходных данных тактико-технических характеристик отечественного КА «Обзор-Р», согласованностью результатов теоретических исследований с результатами, полученными при отработке на комплексном моделирующем стенде.

Автор защищает:

- методику формирования алгоритмов координации КА в группе зондирования земной поверхности, разработанную на основе векторной интерпретации процесса проектирования средств управления КА с использованием критериев быстродействия, точности зондирования земной поверхности, энергетических и эксплуатационных затрат на выполнение полетного задания КА группы;

- алгоритм классификации целей и формирования последовательности их зондирования, предназначенный для центра обработки радиолокационных изображений и управления группой КА и реализующий оценку точности зондирования, быстродействия системы наведения КА и выполняющий обновление последовательности зондирования с заданной дискретностью;

- алгоритм комплексного управления каждым КА группы при отработке программы зондирования с учетом особенностей режимов зондирования целевой аппаратуры и переориентации в положение ожидания с компенсацией ошибок, вызванных действиями возмущающих факторов;

- программную реализацию алгоритмов координации КА в группе, отработанную на моделирующем стенде с использованием комплексной модели функционирования КА группы и при воспроизведении полетного задания.

Результаты выполненной работы соответствуют п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.», п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» и п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации».

Реализация результатов работы. Практические и теоретические результаты работы внедрены:

- в учебном процессе на кафедре систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

- на предприятии АО «ЦКБ аппаратостроения» (Тула);
- на предприятии АО «РКЦ «Прогресс» (Самара);
- на предприятии АО «Научно-исследовательский институт точных приборов» (Москва);
- на предприятии АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе» (Санкт-Петербург).

Апробация

Основные положения диссертации и отдельные ее результаты докладывались и получили положительные отзывы на следующих конференциях:

- Академические чтения по космонавтике, посвящённых памяти академика С.П. Королёва, (Москва, 2015 г.), (Москва, 2017 г.), (Москва, 2018 г.), (Москва, 2019 г.);
- Всероссийская конференция «Минцевские чтения -2017», (Москва, 2017 г.);
- XIX Всемирный фестиваль молодёжи и студентов, (Сочи, 2017 г.);
- VI Международный симпозиум ИАА «Безопасность космических полетов», (Санкт-Петербург, 2019 г.)

-

Публикации. По материалам диссертации опубликованы в 7 научных работах, в том числе 2 из перечня ВАК РФ и получен патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 161 странице, не включая приложений на 10 страницах, содержит список используемой литературы из 77 наименований, включает 26 таблиц и 68 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены современные подходы к постановке и решению задач дистанционного зондирования Земли. Приведен анализ существующих и перспективных групп (связок) КА дистанционного зондирования Земли. Приведено обоснование актуальности применения группы КА как перспективное направление дистанционного зондирования Земли за счет возможности использования принципа интерферометрии.

По итогам рассмотрения установлено, что для создания группы на базе выбранного отечественного спутника-прототипа необходимо уделить особое внимание формированию набора алгоритмов управления, как в части построения программы зондирования, так и в части эффективного наведения каждого из КА группы на требуемую область зондирования.

В результате проведенного анализа сформированы требования к алгоритмам управления КА для применения в составе связки и группы КА дистанционного зондирования Земли: обеспечение высокой разрешающей способности обнаружения и распознавания подвижных и неподвижных точечных и поверхностных целей; минимизация энергетических и эксплуатационных затрат на корректировку ориентации целевой аппаратуры в направлении участка целевой области зондирования; минимизация времени выполнения целевых задач; минимизация конструктивных доработок аппаратного состава КА при реализации алгоритмов управления КА в группе.

Во второй главе приводится описание разработанной комплексной математической модели для исследования характеристик КА группы. Составными частями комплексной модели группы КА являются: модель расчета орбитального положения группы, модель углового движения КА, динамическая модель контура управления КА из состава группы, включающая модель исполнительной подсистемы, модель формирования погрешностей измерительной и исполнительной подсистем КА из состава группы.

Разработанная модель позволяет решить задачу определения положения центров масс КА из состава группы на траектории с учетом смежных (пересекающиеся на витке) орбит КА и набора наиболее значимых внешних возмущающих воздействий. Дополнительным фактором, учтенным в модели, по сравнению с описанием движения единичных КА является необходимость определения текущего положения ведомого КА относительно ведущего КА в группе, что было реализовано с помощью предложенного автором принципа дифференциального режима спутниковой навигации, изложенного в патенте на изобретение [3] (Рис.1). В этом же патенте предложено введение зоны нечувствительности для исполнительного контура с целью стабилизации целевой аппаратуры при отработке целевых и служебных задач. Описанные предложения позволяют обеспечить повышение точности как наведения группы КА на область зондирования, так и позиционирования в процессе зондирования.

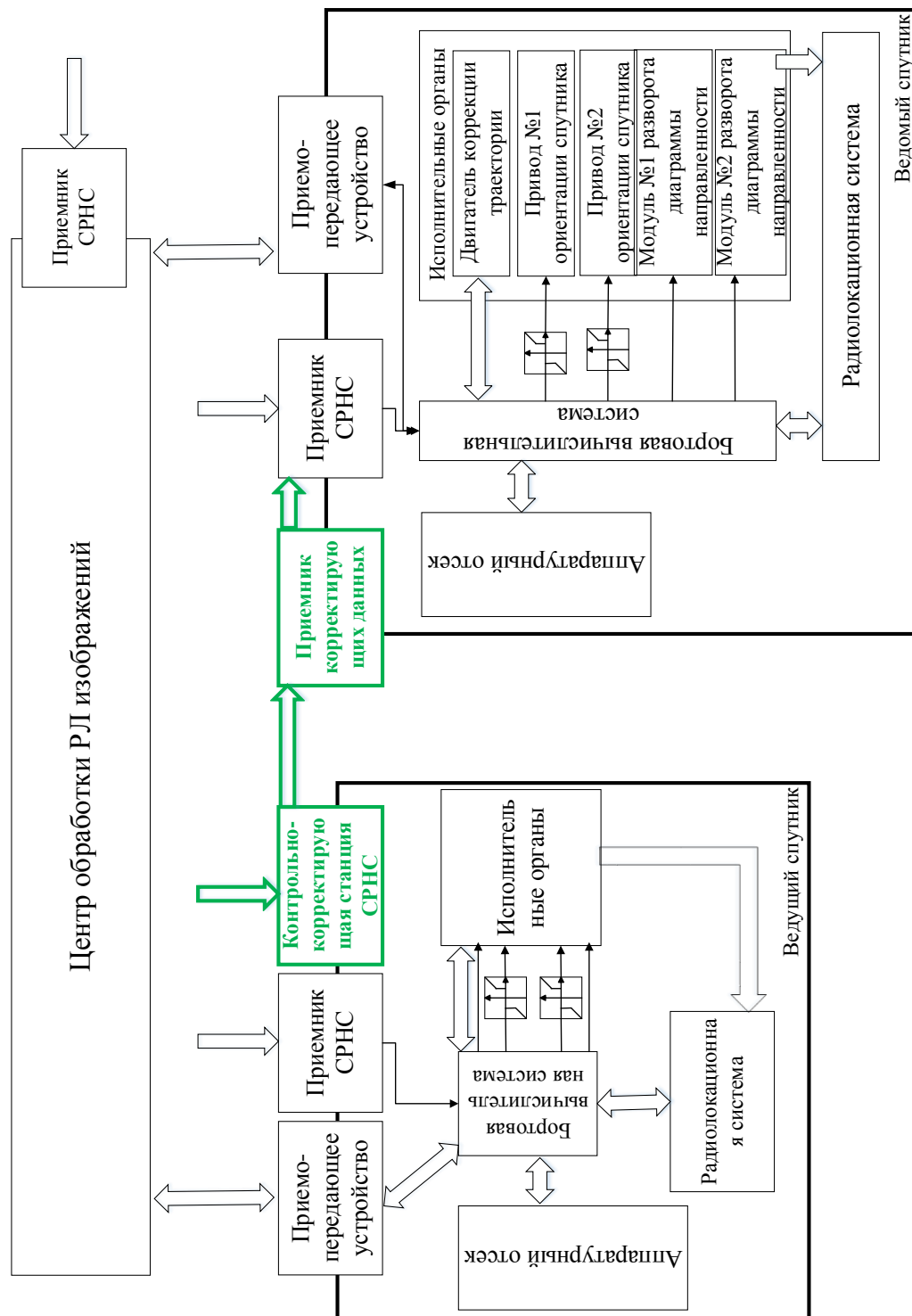


Рис. 1. Структурная схема модифицированного комплекса группы КА дистанционного зондирования Земли

Для группы КА обобщенная система уравнений комплексной модели имеет следующий вид:

$$\begin{cases} (x_j, y_j, z_j, Vx_j, Vy_j, Vz_j) = FK_1(C1_j(t_0), r_j, \Omega_j, u_j, i_j, t) \\ (\omega_{x_j}, \omega_{y_j}, \omega_{z_j}) = FK_2(C2_j(t_0), M_j^{\text{ynp}}, M_j^{\text{внеш}}, t) \\ (\alpha_{lj}, \beta_{lj}, \varepsilon_{lj}, M_{xj}^{\text{ynp}}, M_{yj}^{\text{ynp}}, M_{zj}^{\text{ynp}}) = FK_3(C3_j(t_0), \alpha_{cj}, \beta_{cj}, \varepsilon_{cj}, \alpha_j, \beta_j, \varepsilon_j, W_{\text{БВС}}, W_{\text{исп}}, W_{\text{РЛС}}, t) \end{cases} \quad (1)$$

где $x_j, y_j, z_j, Vx_j, Vy_j, Vz_j$ – координаты [м] и проекции скоростей [м/с] j-го КА в геоцентрической системе координат;

$j = 1 \dots l$ – номер КА в составе группы (в настоящей работе исследуется связка из двух КА);

r_j, Ω_j, u_j, i_j – параметры орбиты;

$\omega_{xj}, \omega_{yj}, \omega_{zj}$ – проекции вектора угловых скоростей j-го КА в связанной системе координат [1/с];

$M_j^{\text{упр}}, M_j^{\text{внеш}}$ – управляющие и внешние возмущающие моменты [Нм];

$\alpha_j, \beta_j, \varepsilon_j$ – углы наведения КА;

$\alpha_{\text{Л}j}, \beta_{\text{Л}j}, \varepsilon_{\text{Л}j}$ – углы наведения радиолокационной системы в скоростной системе координат, связанной с j-ым КА;

$\alpha_{\text{ц}}, \beta_{\text{ц}}, \varepsilon_{\text{ц}}$ – угловые координаты внешнего целеуказания;

$W_{\text{БВС}}, W_{\text{исп}}, W_{\text{РЛС}}$ – передаточные функции бортовой вычислительной системы, исполнительной подсистемы и радиолокационной системы;

$C1_j(t_0), C2_j(t_0), C3_j(t_0)$ – состояние орбитального и углового положений и комплекса управления j-го КА в момент времени t_0 .

Комплексная модель позволяет вести исследования взаимной координации КА в группе и дает возможность перейти к формированию на ее основе алгоритмов управления группой КА, как с точки зрения формирования программы зондирования, так и ее отработки при наведении на целевые области зондирования.

В третьей главе разработана методика структурно-параметрического синтеза алгоритмов управления КА дистанционного зондирования Земли в группе, базирующаяся на положениях векторной интерпретации процесса проектирования, когда требуется найти такое значение вектора параметров $\bar{\alpha}$ группы КА $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N1})$, определенного в области D допустимых значений N1-мерного пространства параметров, что:

$$\bar{\alpha} = \arg \min_{\alpha \in D} V[K(\alpha)], \text{ где} \quad (2)$$

$K(\alpha) = [k_1(\alpha), k_2(\alpha), \dots, k_{N2}(\alpha)]$ – вектор критериев качества, причем уменьшение значения критерия K_q ($q = 1, 2 \dots N_2$) соответствует повышению качества изделия по -ому критерию.

V – результирующий показатель качества;

D – область допустимых значений параметров.

Метод решения задачи (2) определяется предложенной методикой синтеза алгоритмов управления, представляющей собой результирующий показатель качества V задачи (2). Реализация значений параметров $\bar{\alpha}$ задачи (2) осуществляется в виде предлагаемой структуры построения комплекса группового спутникового зондирования земной поверхности, алгоритма классификации целей и формирования программы зондирования, алгоритма комплексного управления КА, а также значений ряда конструктивных и

эксплуатационных параметров комплекса группового зондирования и его специального программного обеспечения.

Исходные данные методики. В рамках методики исходными данными являются:

- Выбор для группы КА дистанционного зондирования Земли базового спутника–прототипа.;
- Определение базовых критериев качества.

Допущения методики. В рамках методики должны быть определены допущения по следующим направлениям:

- Степень достоверности потока исходных данных о целях зондирования.;
- Редактируемость формата массива исходных данных в разрезе возможности отражения показателей критериев качества;
- Тип моделей, обеспечивающих требуемый уровень достоверности описания исследуемой группы КА дистанционного зондирования Земли.

Методика синтеза алгоритмов управления включает следующие этапы:

Этап 1. Определение признаков целей.

Этап 2. Разработка комплексной модели группы КА дистанционного зондирования Земли.

Этап 3. На основе комплексной модели и решения оптимизационной задачи разработка алгоритма формирования программы зондирования, описание приведено ниже по тексту.

Этап 4. На основе комплексной модели и решения оптимизационной задачи разработка алгоритма комплексного управления группой КА, включающий учет поправок КА, необходимых для работы группы в едином информационном пространстве, описание приведено ниже по тексту.

Этап 5. Отработка полученных алгоритмов и технических решений на стенде имитационного моделирования.

На этапе 3 по указанной выше методики выполнена разработка алгоритма классификации целей и формирования программы зондирования с использованием ряда допущений и графических интерпретаций.

При разработке алгоритма классификации целей и формирования программы зондирования использован метод классификаций (Рис. 2). При этом множество целей СПИСКА №1 преобразуется в СПИСОК №2, затем из него формируется СПИСОК №3 как подмножество СПИСКА №2, после чего формируется СПИСОК №4 как подмножество СПИСКА №3.

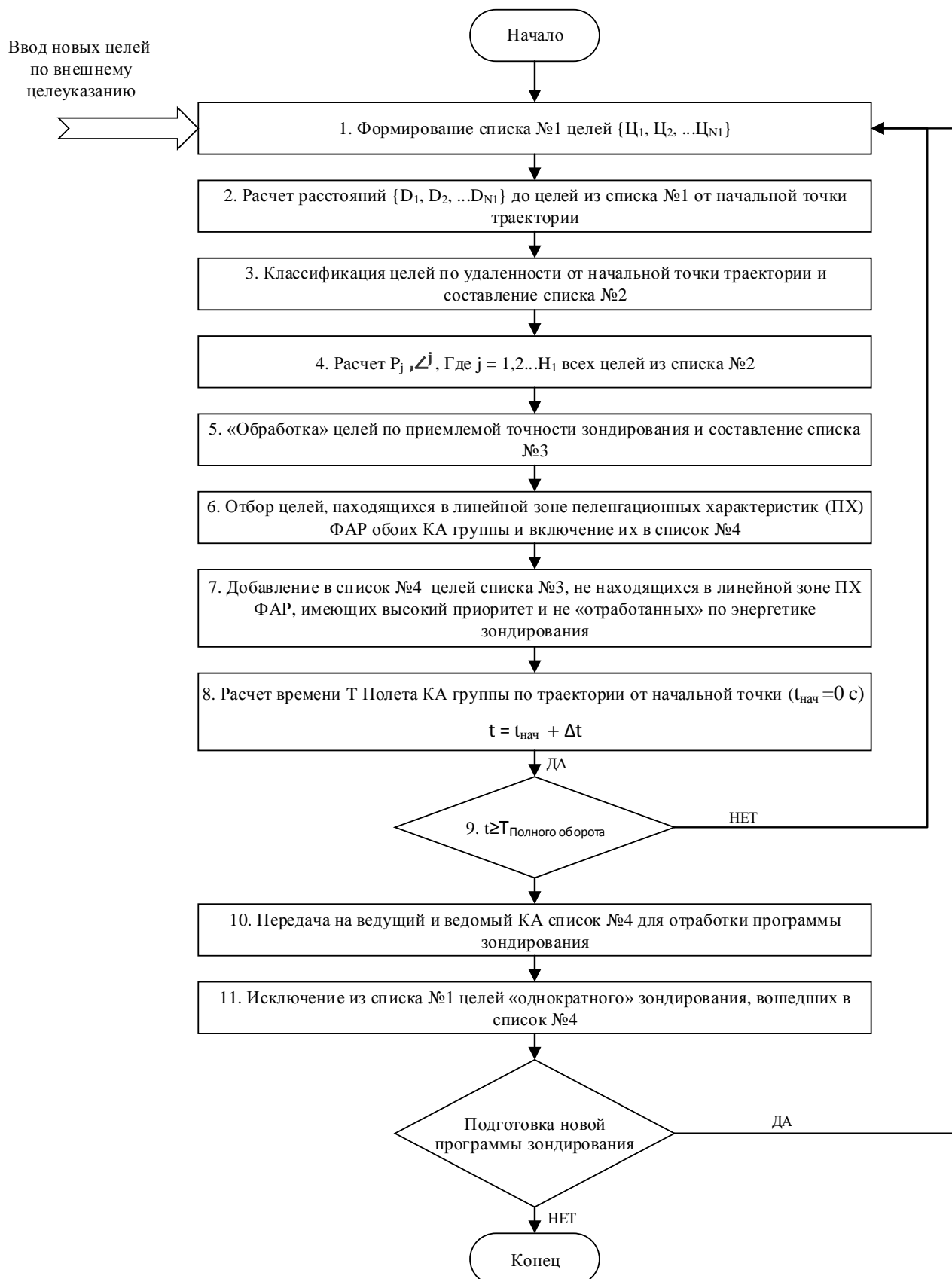


Рис. 2. Блок-схема алгоритма классификации целей и формирования программы зондирования

Далее, для итогового сформированного списка из классификации (для каждой цели) происходит расчет целевой функции на основе итерационного

метода выделения цели, соответствующей минимальному значению целевой функции, на каждом принятом временном шаге дискретности в соответствии со следующей процедурой:

$$F = \sum_{j=1}^n F_{i_{\text{выбр}}}(x_j)$$

$$F_{i_{\text{выбр}}} = \min F_i(x_j) \quad (3)$$

$$F_i(x_j) = k_{\text{пр}}(k_t(t_i - t_0) + k_q(\alpha_i - \alpha_{\text{min}}) + k_e E_i),$$

где

$i \in Z[1, n] - Z[i_{\text{выбр}}]$ - количество целей;

$j = 1, (m = 3)$ - количество критериев;

$k_{\text{пр}}$ - приоритет цели;

k_t - весовой коэффициент времени выхода в область начала зондирования;

k_q - весовой коэффициент пространственного разрешение радиолокационного изображения;

k_e - весовой коэффициент энергетических затрат и эксплуатационных ресурсных ограничений.

На этапе 4 указанной выше методики для выполнения программы зондирования разработан алгоритм комплексного управления КА, при минимизации конструктивных доработок аппаратуры и при эффективном использовании возможностей бортовой вычислительной системы по управлению КА в группе.

Разработка алгоритма комплексного управления КА из состава группы предусматривает решение следующих основных задач: прием и обработка программы зондирования Земной поверхности, полученной от наземного центра управления группой и обработки радиолокационного изображения, разворот оси целевой аппаратуры по углу крена КА, разворот оси целевой аппаратуры по углу тангажа КА, наведение целевой аппаратуры в условиях помех, автоматическое сопровождение зондируемой точечной цели, зондирование пространственной или линейной протяженной цели, подготовка к переориентации на следующую целевую область из программы зондирования.

Каждая из этих задач характеризует определенный режим функционирования радиолокационной системы.

Комплексное решение указанных задач направлено на разработку локальных алгоритмов каждого из режимов работы радиолокационной системы, алгоритмов перехода из одного режима в другой режим работы целевой аппаратуры и интегрированную реализацию всей совокупности режимов работы в рамках бортовой вычислительной системы КА. Модульная реализация системы управления радиолокационной системой КА отражена в диссертационной работе.

На этапе 5 выполнена отработка созданных алгоритмов на языке C в программной среде Matlab. Результаты отработки приведены в главе 4.

В четвертой главе описана модернизация комплексного моделирующего стенда для отработки технических решений по управлению группы КА дистанционного зондирования Земли, отличающийся дополнительным функционалом имитационного моделирования работы группы КА, а также проведена подготовка к проведению эксперимента на наземном комплексе отладки программного обеспечения «КОСМОС».

Разработаны тестовые задачи, позволяющие отработать возможности как комплексной модели, так и алгоритмов управления группы КА в основных режимах эксплуатации. Пример тестовой задачи показан ниже (Рис. 3).

С использованием комплексного моделирующего стенда отработаны алгоритмы классификации целей и формирования программы зондирования целевых областей, алгоритм комплексного управления КА в группе и частные алгоритмы оптимизации управления КА в группе. Отработано техническое решение по управлению КА группы при использовании дифференциального режима координации КА. Ниже представлены графики, отражающие процесс отработки сформированной по данным тестовой задачи программы зондирования космическими аппаратами из состава группы по угловым скоростям КА (Рис.4) и по углам КА (Рис.5).

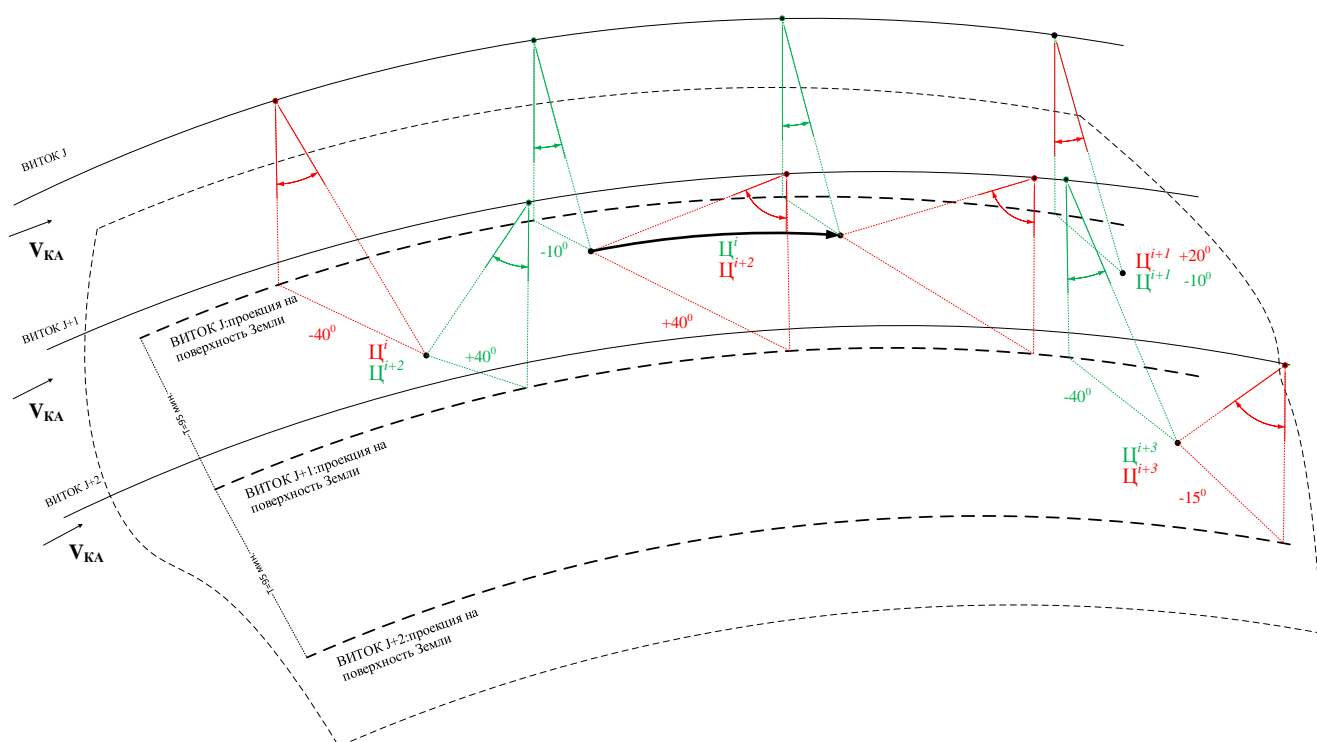


Рис. 3. Пример тестовой задачи

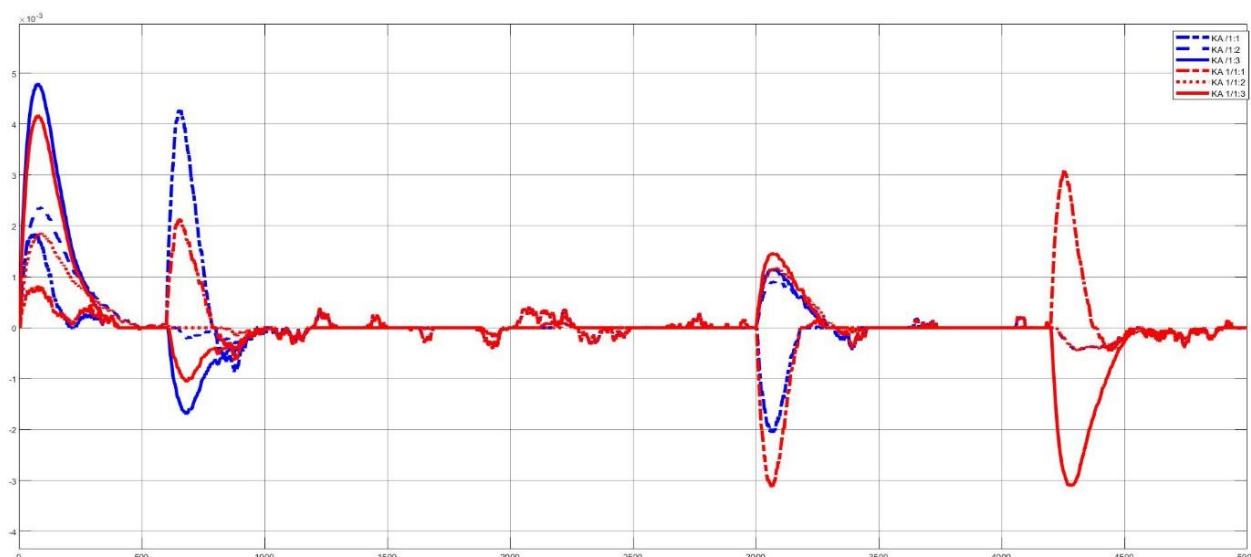


Рис. 4. Процесс отработки тестовой задачи группой КА по угловым скоростям КА

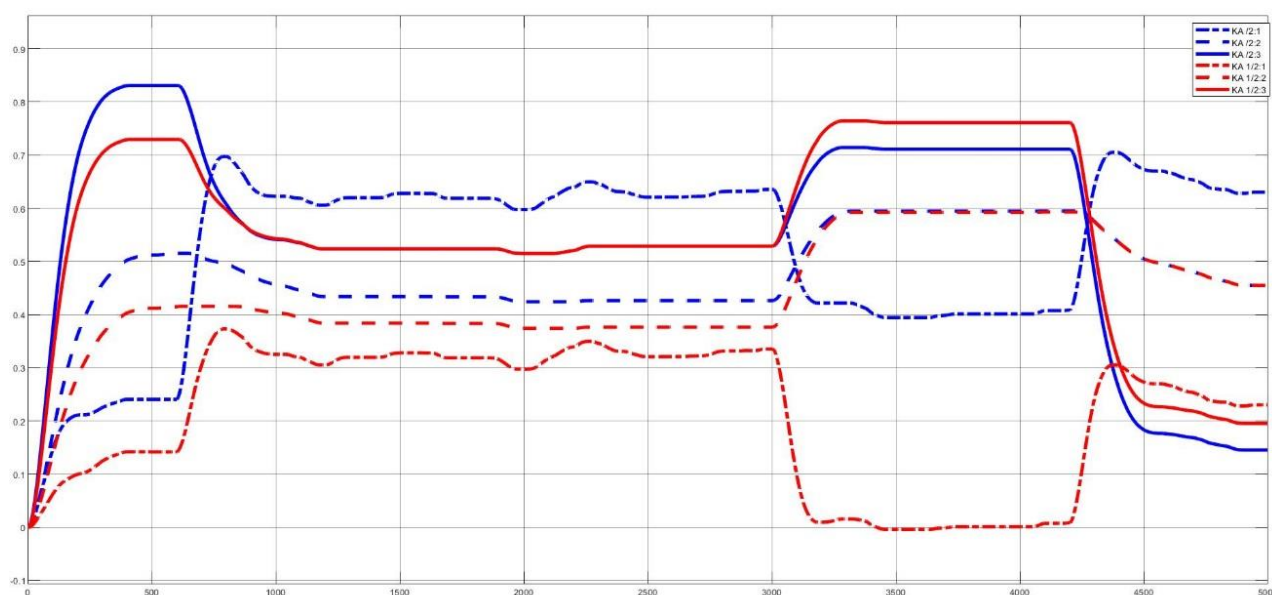


Рис. 5. Процесс отработки тестовой задачи группы КА по углам КА

Анализ результатов демонстрирует достижение целевых показателей таких как сокращение времени выполнения тестовой задачи на 40%, снижение значения суммарных углов переориентации при отработке массива целевых заданий на 24%, сокращение результирующего показателя отклонений допустимых и фактических углов зондирования при отработке массива целевых заданий на 32%

Реализация алгоритмов доведена до программно-алгоритмического решения, рекомендованного для формирования технических предложений при создании перспективной группировки КА.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. На основе анализа тенденций в области повышения качества радиолокационных изображений земной поверхности сформированы требования к системе взаимной координации перспективных отечественных КА, действующих в составе группы, которые включают:

- обеспечение высокой разрешающей способности зондирования подвижных и неподвижных целей с различными геометрическими характеристиками;

- минимизация времени выполнения целевых задач;

- минимизация энергетических и эксплуатационных затрат на корректировку ориентации целевой аппаратуры в направлении участка области зондирования.

- минимизация конструктивных доработок аппаратного состава прототипа КА, планируемого к применению в составе группы КА дистанционного зондирования Земли, путем разработки алгоритмов управления группой КА.

2. Построена комплексная модель, с приемлемой точностью отражающая координацию КА группы и включающая:

- модели КА движения по орбите и вращения вокруг центра масс с учетом внешних возмущающих факторов;

- динамические и точностные модели КА, отражающие функционирование измерительного и исполнительного контуров;

- комплексную модель двух КА дистанционного зондирования Земли, учитывающую дифференциальный режим спутниковой навигации;

- программную реализацию модели на комплексном стенде и подготовку к проведению эксперимента на наземном комплексе «КОСМОС» кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

3. Разработана методика структурно-параметрического синтеза алгоритмов координации КА в группе радиолокационного зондирования земной поверхности на основе векторной интерпретации процесса проектирования средств управления КА по критериям быстродействия, точности зондирования земной поверхности, энергетических и эксплуатационных затрат на выполнение полетного задания КА группы, включающая, в том числе модель координации группы, алгоритм классификации целей и алгоритм комплексного управления каждым КА группы.

4. Разработан алгоритм классификации целей по критериям быстродействия, точностных, энергетических и эксплуатационных ресурсных возможностей КА группы, предназначенных для формирования программы зондирования группой КА.

5. Разработан алгоритм комплексного управления каждым КА группы при отработке сформированной программы зондирования с распределенными и

классифицированными целями, учитывающий широкий диапазон режимов функционирования КА в группе.

6. Проведена модернизация комплексного моделирующего стенда с использованием комплексной модели двух КА дистанционного зондирования Земли, на котором отработаны технические решения по программной реализации разработанных алгоритмов управления КА, которая подтвердила эффективность методики и корректность использования структурно-параметрического синтеза применительно к алгоритмам управления группой КА дистанционного зондирования Земли. Проведена подготовка к проведению эксперимента на наземном комплексе отладки программного обеспечения «КОСМОС» кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана. Получены следующие результаты: обеспечено сокращение времени выполнения тестовой задачи на 40%, снижение значения суммарных углов переориентации при отработке массива целевых заданий на 24%, сокращение результирующего показателя отклонений допустимых и фактических углов зондирования при отработке массива целевых заданий на 32%.

7. Разработанные технические решения по созданию программно-алгоритмического комплекса рекомендованы к использованию при реализации в группе перспективных отечественных космических аппаратов для решения задач мониторинга земной поверхности, не уступающих существующим зарубежным аналогам.

По теме диссертационного исследования опубликованы следующие основные работы:

1. Подчуфаров А.А. Комплексный моделирующий стенд для отработки алгоритмов управления группой космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вопросы оборонной техники. Научно-технический журнал. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. Выпуск (133 - 134), 2019 С. 109-114 (0.4 п.л.)
2. Подчуфаров А.А. К получению высокодетализированных изображений земной поверхности // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Выпуск 108 (3,2019), 2019 С. 85-90 (0.4 п.л.)
3. Подчуфаров А.А., Фомичев А.В. Устройство получения радиолокационного изображения земной поверхности/ Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ, рег. №2019131479 от 25.04.2019. М.: Роспатент, 2019. (0.8 п.л./ 0.7 п.л.)
4. Подчуфаров А.А. Исследование проблем создания группы (связки) космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Труды XXXIX академических чтений по космонавтике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015 С. 414. (0.1 п.л.)
5. Подчуфаров А.А. Синтез высокоточных алгоритмов бортового комплекса управления группы (связки) космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Актуальные проблемы развития отечественной

- космонавтики: Труды XLI академических чтений по космонавтике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 401-402. (0.1 п.л.)
6. Подчуфаров А.А., Фомичев А.В. Логика формации связки спутников ДЗЗ для получения радиолокационного изображения поверхности с заданным разрешением // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Труды XLII академических чтений по космонавтике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. С. 313. (0.1 п.л. / 0.05 п.л.)
7. Подчуфаров А.А., Фомичев А.В. Разработка алгоритмов управления связкой спутников дистанционного зондирования Земли на основе специализированного программно-аппаратного комплекса // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Труды XLIII академических чтений по космонавтике. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. Т. 2. С. 100-101. (0.1 п.л. / 0.05 п.л.)