

На правах рукописи

УДК 629.785

Рябогин Николай Владимирович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ
ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА
УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ НАУЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2017

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

Научный руководитель: **Задорожная Наталия Михайловна**,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Системы автоматического управления»
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Голован Андрей Андреевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией управления и
навигации, Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова.

Абезяев Илья Николаевич,
кандидат технических наук,
главный научный сотрудник
комплекса систем управления
АО «ВПК «НПО машиностроения»

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», г. Химки, Московской области

Защита состоится «12» сентября 2017 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613 м.

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

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02
кандидат технических наук, доцент



Муратов И.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В связи с расширением космической научной программы и постановкой новых задач для целевой аппаратуры (ЦА) космических аппаратов (КА) актуальна проблема создания космических аппаратов научного назначения, в которых требуется обеспечить прецизионное определение ориентации и наведения научного КА.

Задача наведения и ориентации КА связана с наведением визирной системы координат (ВСК), связанной с ЦА, и решается служебным бортом, включающим в себя бортовой комплекс управления (БКУ), который и обеспечивает требуемую точность ориентации.

Требования к точности ориентации КА научного назначения выше требований для КА других типов. Это связано с тем, что астрономические исследования требуют более высокого разрешения.

Отсутствие приборов для прецизионной ориентации КА, невозможность воспроизведения некоторых приборов, высокая стоимость ОКР по замещению приборов аналогами и время разработки нового прибора-аналога определяют необходимость поиска новых аппаратно-программных и конструктивных решений для обеспечения требований ТЗ к КА научного назначения, тем самым характеризуя задачу, поставленную в работе, как актуальную.

В настоящее время основным разработчиком КА научного назначения в России является НПО имени С. А. Лавочкина. Программа создания аппаратов, направленных на изучение космического пространства, реализована серией КА «Спектр», основанных на унифицированной платформе «Навигатор». Проект был начат еще в 80 годах, однако, по ряду обстоятельств, первый аппарат данной серии КА «Спектр-Р» был запущен только 18 июля 2011 года.

КА проекта «Спектр» отличают высокие требования к точности определения ориентации и стабилизации, которые согласно требованиям технического задания (ТЗ) для БКУ КА «Спектр-Р» составляют 18 угловых секунд для случайной ошибки ориентации и 5 угловых секунд на стабилизационные отклонения. Эти требования были успешно обеспечены в БКУ КА (разработки МОКБ «Марс») за счет комплексной обработки измерительной информации прибора ГИВУС КИНД34-020 (разработки НИИ прикладной механики имени Кузнецова) и звездного прибора (ЗП) АД-1 (разработки МОКБ «Марс»).

Требования к остальным КА серии «Спектр»: «Спектр-РГ», «Спектр-УФ», «Спектр-М», «Гамма-400» – в части точности определения и поддержания ориентации еще более высокие. Однако невозможность воспроизведения ЗП АД-1 определяет необходимость поиска новых решений для обеспечения требований ТЗ к КА серии «Спектр».

Решением задачи определения и расчета данных об ориентации ВСК КА в БКУ КА серии «Спектр» занимается система информационного обеспечения (СИО). СИО является функциональным объединением датчиков первичной информации и программного обеспечения (ПО), размещаемого в бортовой вычислительной системе (БВС) БКУ. СИО предназначена для формирования

необходимой измерительной и расчетной информации, обеспечивающей решение задач управления и контроля во всех режимах функционирования КА.

В связи с вышеизложенным, проблема разработки СИО БКУ КА научного назначения, отвечающей заданным требованиям по точности определения ориентации КА, является актуальной.

В настоящей работе представлено решение следующей задачи: разработка и исследование СИО БКУ КА серии «Спектр», обеспечивающей заданные требования по точности определения ориентации. Принимая во внимание имеющийся технический задел МОКБ по алгоритмам БКУ КА серии «Спектр», разработка должна основываться на ранее разработанных алгоритмах смежных СИО подсистем БКУ, протоколах взаимодействия программных подсистем БКУ и не затрагивать смежные системы.

Бортовой комплекс управления КА научного назначения должен обеспечивать определение ориентации ВСК КА относительно второй экваториальной системы координат (2ЭСК) (без учета погрешности взаимной привязки приборных систем координат (ПСК) командных приборов (КП) и ВСК) с предельной погрешностью (3σ) не более 10" по каждой из осей ВСК при неподвижных элементах конструкции КА, вне участков коррекции орбиты и разгрузки двигателей-маховиков. Выходная информация СИО должна обеспечивать разность между максимальным и минимальным значениями стабилизационного отклонения по угловой координате в инерциальном пространстве не должна превышать 5".

Целью диссертационной работы является разработка прецизионной системы информационного обеспечения, отвечающей заданным требованиям по точности определения ориентации бортового комплекса управления космическим аппаратом научного назначения.

Объектом исследования являются бортовые комплексы управления космическими аппаратами, в частности системы информационного обеспечения и системы измерений БКУ КА.

Предметом исследования являются алгоритмы и способы обеспечения точностных требований к системе информационного обеспечения бортовых комплексов управления космическими аппаратами.

Для достижения цели в данной **работе поставлены и решены следующие задачи:**

1. Исследованы существующие алгоритмы, обеспечивающие точное определение параметров ориентации. Определены недостатки исследованных алгоритмов, сформулированы требования к необходимым алгоритмам;
2. Проведен анализ существующих приборов и определена возможность создания системы, обеспечивающей прецизионное определение параметров ориентации, на основе этих приборов. Определены перспективы развития приборов для системы прецизионного определения параметров ориентации;
3. Разработана методика оценки точности определения ориентации БКУ КА различного назначения, которая обобщает частные задачи оценки точности параметров ориентации;

4. Разработана структурно-функциональная схема системы информационного обеспечения, включающая в себя имеющийся задел по алгоритмам СИО и вновь разработанные алгоритмы;
5. Разработан алгоритм комплексирования информации инерциального измерительного блока и звездных приборов, отличающийся низкими требованиями к вычислительным ресурсам БКУ;
6. Разработана модель виртуального звездного прибора. Модель использует природу распределения высокочастотной погрешности звездного прибора на оси приборной системы координат, обеспечивая формирование данных об ориентации виртуального прибора по информации от двух работающих звездных приборов;
7. Разработаны вспомогательные алгоритмы обеспечения точности определения ориентации: алгоритм калибровки дрейфов ИИБ и алгоритм фильтрации высокочастотной погрешности звездных приборов. Алгоритмы также отличаются низкими требованиями к вычислительным ресурсам БКУ;
8. Проведено моделирование функционирования разработанных алгоритмов в составе бортового комплекса управления космического аппарата на стенде математического моделирования. Подтверждена правильность принятых при разработке алгоритмов допущений. Подтверждено выполнение требований по точности определения параметров ориентации.

К числу новых **научных результатов относятся:**

1. Комплекс алгоритмов, обеспечивающих автономное (без связи с наземным комплексом управления) прецизионное определение ориентации, эффективную фильтрацию высокочастотной шумовой погрешности различных звездных приборов с применением информации от различных инерциальных измерительных блоков;
2. Алгоритм комплексирования информации звездных приборов и инерциальных измерительных блоков в системе информационного обеспечения, основанный на редуцированном фильтре Калмана. Алгоритм позволяет применять различный по характеристикам набор инерциальных измерительных блоков и звездных приборов. Отличительной чертой алгоритма является то, что оценивается только вектор малого поворота между истинной (по данным ЗП) и рассчитанной (по данным ИИБ) ориентацией в совокупности с расчетом ковариационных матриц и матрицы коэффициентов усиления с тактом меньшим такта формирования оценки;
3. Алгоритм фильтрации высокочастотной шумовой погрешности звездных приборов на базе совместной обработки информации с двух одновременно работающих звездных приборов. Особенностью алгоритма является фильтрация измерительной информации звездных приборов за счет использования модели виртуального звездного прибора без внесения дополнительного запаздывания;
4. Алгоритм двухточечной калибровки дрейфов гироскопов инерциальных измерительных блоков. Отличие алгоритма заключается в автономной оценке дрейфов гироскопов по двум точкам получения данных об ориентации КА от ЗП.

Теоретическая ценность работы заключается в разработанных новых алгоритмах прецизионного определения ориентации, фильтрации высокочастотной шумовой погрешности звездных приборов и комплексирования информации в системах информационного обеспечения широкого класса КА. Алгоритмы разработаны на основе обоснованной редукции и использовании природы распределения погрешностей измерителей.

Практическая ценность работы заключается в реализации в бортовом программном обеспечении разработанных алгоритмов, обеспечивающих выполнение требований по точности ориентации и эффективную надежную фильтрацию высокочастотной погрешности различных звездных приборов при использовании различных инерциальных измерительных блоков, а также в снижении требований к вычислительным ресурсам БКУ КА.

При решении задач диссертационной работы широко **применялись методы и методики** теории оценивания и фильтрации, обработки информации, математического моделирования и аналитических вычислений.

Достоверность результатов подтверждается результатами математического моделирования, результатами отработки и испытаний, проведенных на стендах моделирования, результатами летно-конструкторских испытаний.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы применены в разработанных ФГУП МОКБ «Марс» БКУ КА «Спектр-РГ», «Спектр-УФ», «Казсат-2», «Обзор-О», докладывались и обсуждались на ряде научных конференций:

1. II Всероссийская научно-техническая конференция МОКБ «Марс», (Москва, 2012 г.)
2. XXXVII Академические чтения по космонавтике, (Москва, 2013 г.)
3. Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации. XXII Международный научно-технический семинар, (Алушта, 2013 г.)
4. XXXVIII Академические чтения по космонавтике, (Москва, 2014 г.)
5. XVIII Международная научная конференция «Решетневские чтения», (Красноярск, 2014 г.)
6. XXXIX Академические чтения по космонавтике, (Москва, 2015 г.)
7. III Всероссийская научно-техническая конференция МОКБ «Марс», (Москва, 2015 г.)
8. XL Академические чтения по космонавтике, (Москва, 2016 г.)

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 10 научных работах, в том числе в 5 статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК РФ. По результатам исследований получены четыре патента Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 200 страницах, содержит 64 рисунка и 15 таблиц. Библиографический список содержит в себе 165 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность и важность темы диссертационной работы, для чего проведен краткий анализ типов космических аппаратов и решаемых ими прикладных задач. Продемонстрированы уникальность задач научных космических аппаратов и высокие требования к системе управления КА в части точности ориентации. Конкретизируется основная цель работы и задачи.

В первой главе приводятся результаты анализа методов и особенностей построения систем определения ориентации космических аппаратов.

Технический уровень систем управления КА определяется уровнем их информационно-измерительных подсистем, который в свою очередь зависит от совершенства используемых приборов, датчиковой аппаратуры, средств и способов обработки информации.

При анализе путей улучшения точностных характеристик БКУ КА основное внимание уделено системе определения ориентации КА. Рассмотрены факторы, определяющие достижимые точностные характеристики:

- типовые задачи, решаемые научными КА (их целевой нагрузкой);
- характеристики космических платформ;
- характеристики используемых измерительных приборов;
- методы обработки информации.

Для КА, решающих задачи астрономических исследований, как правило, наиболее высокими являются требования, предъявляемые к точностным характеристикам их систем ориентации и стабилизации, влияющим на качество съемки астрономических объектов.

На текущий момент времени накоплен огромный опыт в разработке и создании бортовых комплексов космических аппаратов различного назначения как отечественными, так и зарубежными фирмами. При решении разных задач существует определенная специфика в построении как БКУ, так и самого КА. Но, несмотря на эту особенность, приборный состав БКУ во многом стал унифицированным.

Тем не менее, состав подсистем БКУ, включая и программное обеспечение, привести к единообразию не представляется возможным. Единство задач БКУ привело к единому перечню задач существующих подсистем, но разделение функций между подсистемами у каждого производителя остается свое.

При проведении анализа БКУ КА рассматривались КА астрофизические, гидрометеорологические и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с высокими требованиями к определению ориентации и стабилизации, поскольку во многих случаях базовые служебные платформы идентичны или используют типовой приборный состав.

Для обеспечения точности ориентации КА также используются идентичные подходы: применение соответствующих приборов системы ориентации, разработка специфических конструкций КА.

Основным требованием к системе управления научного КА является обеспечение точного наведения ЦА на объекты исследования в течение

длительного времени. Одним из способов решения рассматриваемой задачи представляется построение прецизионного контура наведения с использованием звездных приборов, измерителей вектора угловой скорости. В качестве исполнительных органов наведения используются традиционные инерционные исполнительные органы, установленные на корпусе КА, в частности, управляющие двигатели-маховики.

На основании анализа материалов исследования сделаны следующие выводы.

1. Телекоммуникационные КА, КА ДЗЗ и навигационные КА в части точности определения и поддержания ориентации не требуют специфических мер по обработке измерительной информации в БКУ. Космические аппараты научного назначения отличаются высокими требованиями, как к определению параметров ориентации, так и к поддержанию ориентации по углу и угловой скорости. Решение задач определения параметров ориентации для КА научного назначения определяется требованиями к точности ориентации ЦА, как правило, уникальной для каждого КА научного назначения.

2. В настоящее время отсутствуют отечественные приборы ориентации, обеспечивающие выполнение требований к КА серии «Спектр», в тоже время требования по импортозамещению и ограничительные списки делают невозможным применение большого количества зарубежных приборов в составе БКУ. Таким образом, решение задачи прецизионного определения ориентации должно обеспечиваться на имеющихся приборах с обеспечением точности параметров ориентации БКУ КА серии «Спектр» через внедрение комплексной обработки информации.

3. Применяемые алгоритмы фильтрации и комплексирования измерительных данных приборов ориентации в каждом отдельном случае учитывают специфику КА и приборного состава. Применение многих существующих алгоритмов фильтрации и комплексирования затруднительно в вычислительных машинах БКУ КА из-за низкой вычислительной мощности этих машин.

По итогам анализа объекта и предмета исследования продемонстрирована уникальность каждого БКУ КА научного назначения, в том числе КА серии «Спектр». На основании проведенного исследования и отсутствия среди отечественных приборов, обеспечивающих прецизионную ориентацию КА научного назначения, ставятся задачи для обеспечения основной цели работы.

Глава 2 содержит в себе анализ и разработку основных принципов построения системы информационного обеспечения БКУ космического аппарата серии «Спектр».

Анализ циклограмм и режимов функционирования КА проводится на основании опыта разработки и эксплуатации КА «Спектр-Р», а также технических заданий и исходных данных на разработку БКУ КА серии «Спектр». СИО предназначена для формирования необходимой измерительной и расчетной информации, обеспечивающей решение задач управления и контроля КА в различных режимах. СИО строится по модульному принципу.

Принцип модульности позволяет использовать один программно-алгоритмический продукт для применения на различных типах КА.

Обеспечение точности ориентации космического аппарата является комплексной задачей. Требования к БКУ КА по точности определения и поддержания ориентации формируются, исходя из обеспечения необходимых условий функционирования ЦА. В зависимости от назначения КА требования к условиям функционирования ЦА могут значительно различаться. Проведен анализ существующей литературы и литературных источников с решениями задач оценки точности ориентации космических аппаратов. Осуществлено обобщение частных задач и на основе обобщения автором представлена методика, позволяющая провести оценку погрешности ориентации космических аппаратов различного назначения.

Погрешность ориентации КА можно разделить на две составляющие: погрешность определения ориентации (Δ_o) и погрешность поддержания ориентации (Δ_c). Ошибка поддержания ориентации определяется как законом управления, так и характеристиками органов управления, в работе она не рассматривается.

Погрешность определения ориентации космического аппарата является суммой независимых ошибок. Независимость погрешностей, обусловленных приведенными выше факторами, следует из различной, независимой природы их возникновения. В этом случае дисперсия общей погрешности может быть определена по известным значениям частных дисперсий. Принимая во внимание, что различные ошибки могут иметь различные веса в погрешности определения ориентации для различных КА, введены коэффициенты влияния погрешностей, которые предназначены для уточнения уровня влияния составляющих погрешности в зависимости от предназначения КА, особенностей его функционирования и конструктивных особенностей.

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^n K_i \cdot \sigma_{\Delta_i}^2.$$

Методика позволяет провести оценку погрешности ориентации космических аппаратов различного назначения.

БКУ КА представляет собой сложный многокомпонентный комплекс, содержащий в себе как аппаратные, так и программные средства. При проектировании архитектуры бортового программного обеспечения (БПО) основной целью является создание иерархической структуры БПО, включающей системы, подсистемы и отдельные модули. Существующие методы документирования ПО уделяют повышенное внимание вопросам программирования, при этом недостаточно описывая архитектуру ПО и общую логику работы системы. Альтернативой может быть широко используемый при разработке прикладного программного обеспечения язык Unified Modeling Language (UML). Подходящим для рассматриваемой задачи можно считать язык System Modeling Language (SysML), развиваемый как расширение UML в целях разработки, анализа и верификации сложных динамических систем. Представленный метод описания программного обеспечения бортовых

комплексов с помощью диаграмм UML и SysML позволяет наглядно и качественно представить строение, структуру и внутреннее взаимодействие программного обеспечения бортовых комплексов управления космическими аппаратами.

Диаграммы применяются при анализе телеметрической информации с космического аппарата при возникновении нештатных ситуаций. Однозначность переходов позволяет восстанавливать причину отказа или перехода в отказное состояние, избежать возможного заикливания алгоритмов. Пример диаграммы, отражающей состояния и переходы между состояниями системы при отказах, представлен на Рисунке 1.

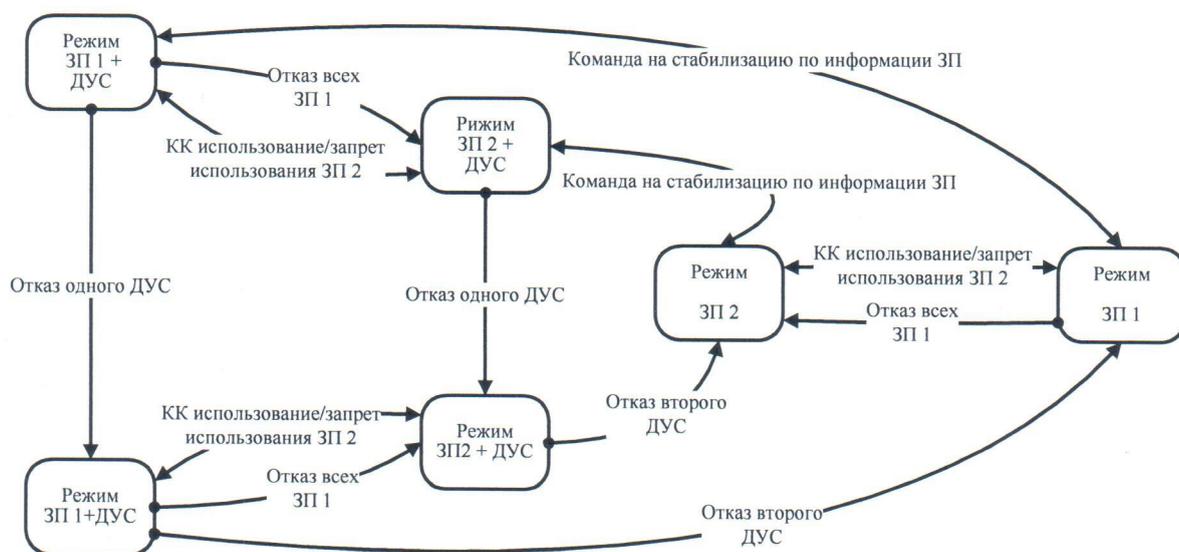


Рисунок 1. Диаграмма переходов между режимами использования звездных приборов в составе БКУ КА

На основании анализа БКУ КА серии «Спектр» предложены функции и сформулированы принципы построения СИО БКУ КА, направленные на обеспечение выполнения требований по точности определения ориентации КА научного назначения.

В третьей главе предложена функциональная схема и алгоритмы комплексирования информации от ИИБ и ЗП.

Построение алгоритмов комплексирования производится из предположения, что все постоянные составляющие ошибки между приборными системами координат скомпенсированы по итогам процедур союстировки, ошибки, вызванные ошибками отклонения измерительных осей ИИБ и масштабных коэффициентов, убраны по итогам механизма компенсации.

Измерительный тракт СИО при использовании в составе БКУ НКА ИИБ и ЗП имеет вид, представленный на Рисунке 2. На схеме предложен состав алгоритмов СИО, образующих измерительный тракт ИИБ и ЗП и направленных на выработку информации об ориентации КА. В структуру измерительного тракта входят алгоритмы, не находящиеся в сфере ответственности автора, но их описание необходимо для понимания работы системы в целом.

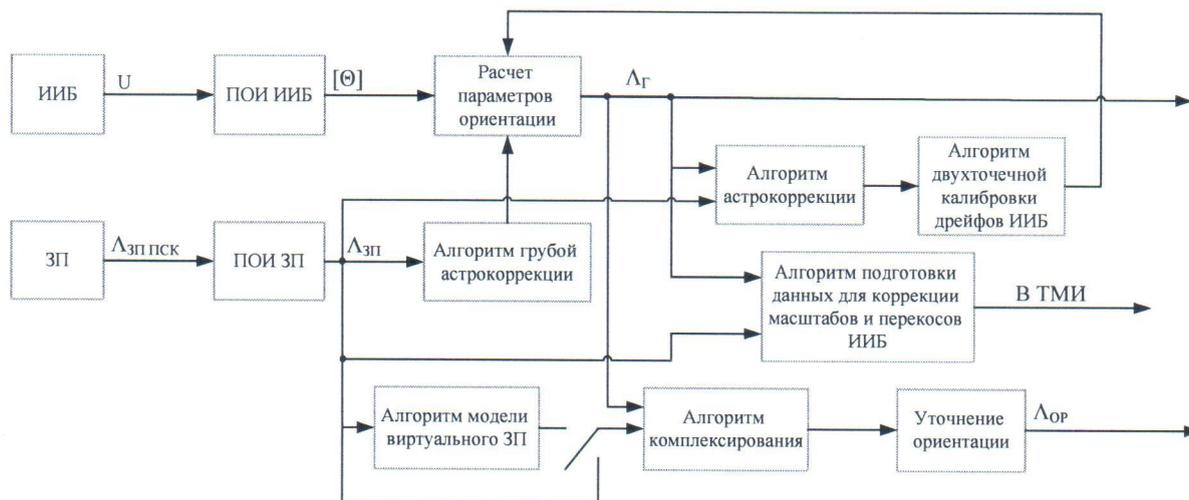


Рисунок 2. Структура измерительного тракта ИИБ и ЗП

Алгоритмы предварительной обработки информации (ПОИ) ИИБ предназначены для реализации преобразования первичной информации от ИИБ, выраженной некоторым сигналом U , в вектор приращений углов измерительных каналов ИИБ за время между опросами и контроля данной информации.

Алгоритмы ПОИ ЗП предназначены для проведения функционального контроля измерительной информации ЗП и преобразования кватерниона, измеренного ЗП, из ПСК ЗП в ВСК КА. Соответственно, выходом алгоритмов ПОИ ЗП является кватернион ориентации ВСК КА относительно ИСК, рассчитанный по кватерниону ориентации ПСК ЗП.

Назначение алгоритма грубой астрокоррекции в коррекции ухода базиса ориентации под действием некомпенсированных дрейфов ИИБ на начальном участке полета КА.

Алгоритм астрокоррекции предназначен для периодической коррекции ухода базиса ориентации, вызванных некалибруемыми дрейфами ИИБ, на участке штатного функционирования КА. Выходом алгоритмов астрокоррекции является рассчитанный с требуемой точностью кватернион ориентации ВСК КА относительно ИСК.

Алгоритм подготовки данных для коррекции масштабов и перекосов измерительных осей ИИБ обрабатывает измерительную информацию ИИБ и ЗП, упаковывает эту информацию и передает в составе ТМИ в НКУ. На основании данных бортового алгоритма наземная часть производит расчет поправок к матрице установки измерительных осей ИИБ в ВСК КА и поправок к масштабным коэффициентам измерительных каналов ИИБ.

Для выполнения требований по точности определения параметров ориентации автором в дополнение к описанным выше предлагаются следующие алгоритмы.

Алгоритм двухточечной калибровки дрейфов ИИБ осуществляет компенсацию остаточных дрейфов ИИБ, вызванных нестабильностью дрейфа измерительных каналов ИИБ. Алгоритм применяется на участке штатного

функционирования КА. Отличительной чертой алгоритма калибровки дрейфов является расчет дрейфов гироскопов по двум точкам получения данных об ориентации КА от ЗП.

Алгоритм модели виртуального звездного прибора осуществляет фильтрацию высокочастотной шумовой погрешности ЗП. Алгоритм отличает отсутствие запаздывания информации при фильтрации шумов ЗП за счет использования модели виртуального звездного прибора.

Модель виртуального звездного прибора строится на информации о положении визирных осей в ССК и ИСК двух работающих ЗП.

$$M_{уствзп} = \begin{bmatrix} Z_2^{ССК} \times Z_1^{ССК} \\ Z_1^{ССК} \times (Z_2^{ССК} \times Z_1^{ССК}) \\ Z_1^{ССК} \end{bmatrix},$$

где $M_{устзп1}$, $M_{устзп2}$, $M_{уствзп}$ - матрицы установки ЗП1, ЗП2 и виртуального ЗП относительно ССК КА, $[X_1 \ Y_1 \ Z_1]'_{ССК}$, $[X_2 \ Y_2 \ Z_2]'_{ССК}$ - орты направлений приборных осей ЗП в ССК.

$$M_{взп}^{OP} = \begin{bmatrix} Z_{зп2} \times Z_{зп1} \\ Z_{зп1} \times (Z_{зп2} \times Z_{зп1}) \\ Z_{зп1} \end{bmatrix},$$

где $M_{зп1}^{OP}$, $M_{зп2}^{OP}$ - матрицы ориентации ЗП1 и ЗП2 относительно инерциального пространства, $M_{взп}^{OP}$ - матрица ориентации виртуального ЗП относительно инерциального пространства.

Определена зависимость эффективности фильтрации от угла между визирными осями ЗП. При увеличении угла происходит увеличение эффективности фильтрации.

$$\sigma_{\Sigma} = K(\varphi) \cdot \sigma_X,$$

где σ_X - СКО ВШП относительно оси X ПСК ЗП, σ_{Σ} - суммарная ошибка определения ориентации ВЗП.

Алгоритм комплексирования предназначен для совместной обработки данных от ИИБ и ЗП. Алгоритм отличается оценкой вектора малого поворота между истинной и рассчитанной ориентациями в совокупности с расчетом ковариационных матриц и матриц коэффициентов усиления с тактом меньшим такта формирования оценки.

Алгоритм фильтрации при комплексирования измерений ЗП по информации от ИИБ имеет вид:

модель системы и модель измерений:

$$X_{k+1} = \Phi_k \cdot X_k + \zeta_k,$$

$$Z_k = H_k \cdot X_k + \xi_k,$$

где $X_k = [\theta_x^{t/t-1} \ \theta_y^{t/t-1} \ \theta_z^{t/t-1}]^T$ - вектор малого поворота между соответствующими одному моменту времени ориентацией по данным ЗП и ориентацией, рассчитанной по данным ИИБ.

Фильтр имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P_{k/k-1} &= \Phi^{k-1} \cdot P_{k-1/k-1} \cdot \Phi^{k-1T} \\
 K^k &= P_{k/k-1} \cdot (P_{k/k-1} + R_k)^{-1} \\
 \hat{\theta}_x^{k/k} &= \Phi_{(1,:)}^{k-1} \cdot \hat{\theta}_x^{k-1/k-1} + K_{(1,:)}^k \cdot (\theta_x^{k/k} - \Phi_{(1,:)}^{k-1} \cdot \hat{\theta}_x^{k-1/k-1}) \\
 \hat{\theta}_y^{k/k} &= \Phi_{(2,:)}^{k-1} \cdot \hat{\theta}_y^{k-1/k-1} + K_{(2,:)}^k \cdot (\theta_y^{k/k} - \Phi_{(2,:)}^{k-1} \cdot \hat{\theta}_y^{k-1/k-1}) \\
 \hat{\theta}_z^{k/k} &= \Phi_{(3,:)}^{k-1} \cdot \hat{\theta}_z^{k-1/k-1} + K_{(3,:)}^k \cdot (\theta_z^{k/k} - \Phi_{(3,:)}^{k-1} \cdot \hat{\theta}_z^{k-1/k-1}) \\
 P_{k/k} &= (I - K_k) \cdot P_{k/k-1}
 \end{aligned}$$

Такт работы алгоритма комплексирования совпадает с тактом получения данных от звездного прибора и не совпадает с тактом работы БКУ БКУ КА.

Выходная информация поступает на вход модуля уточнения информации, где происходит умножение кватерниона ориентации, рассчитанного по данным ИИБ, и вектора малого поворота. Выходная информация из модуля уточнения информации поступает на вход модуля расчета параметров ориентации в качестве новых начальных условий для интегрирования.

Разработанный алгоритм комплексирования в сочетании с предложенными алгоритмами работы СИО в измерительном тракте ИИБ и ЗП позволяет осуществлять эффективную фильтрацию высокочастотной ошибки измерений ЗП и формировать прецизионную ориентацию КА.

В четвертой главе работы проводится описание структуры применяемого моделирующего стенда, основных математических моделей и результатов отработки принятых решений и предложенных алгоритмов.

Для отработки и анализа алгоритмов, разработанных в ходе настоящей работы, задействован стенд математического моделирования БКУ КА. На примере работы БКУ КА серии «Спектр» на платформе «Навигатор» с вновь разработанными алгоритмами продемонстрировано выполнение требований к БКУ в части точности определения ориентации и стабилизационных отклонений.

На Рисунке 3 изображены ошибки определения ориентации КА до и после внедрения разработанных алгоритмов.

До внедрения разработанных автором в настоящей работе алгоритмов, для фильтрации высокочастотной погрешности ЗП применялся фильтр Калмана с постоянными коэффициентами. Уровень ошибки от шумов ЗП снизился в 3 раза. Рисунок 3 также включает участок действия возмущений. Предложенный алгоритм комплексирования позволяет реализовать эффективную фильтрацию шумов звездных приборов и выполнение требований к стабилизационным отклонениям.

Результаты работы алгоритма фильтрации высокочастотной погрешности ЗП при применении модели виртуального звездного прибора отражены на графике Рисунка 4. При моделировании использовались характеристики высокочастотной погрешности ЗП, представленные в Таблице 1, угол между визирными осями звездного прибора задавался равным 54 градусам.

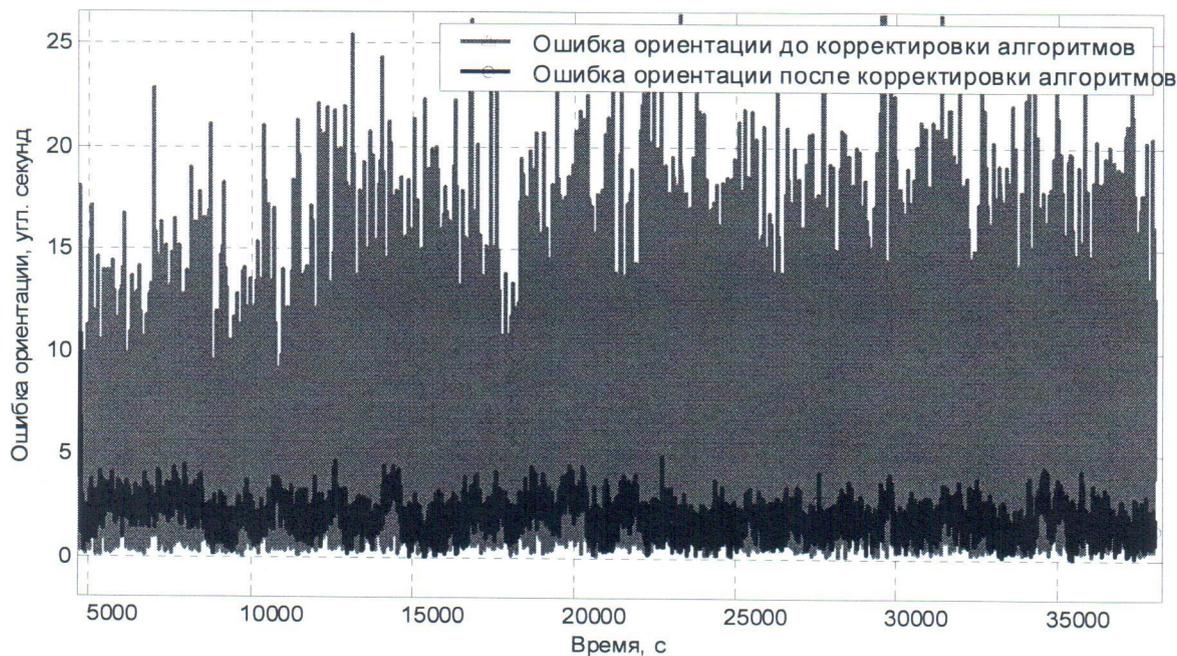


Рисунок 3. Графики ошибки определения ориентации КА до внедрения разработанных алгоритмов и после

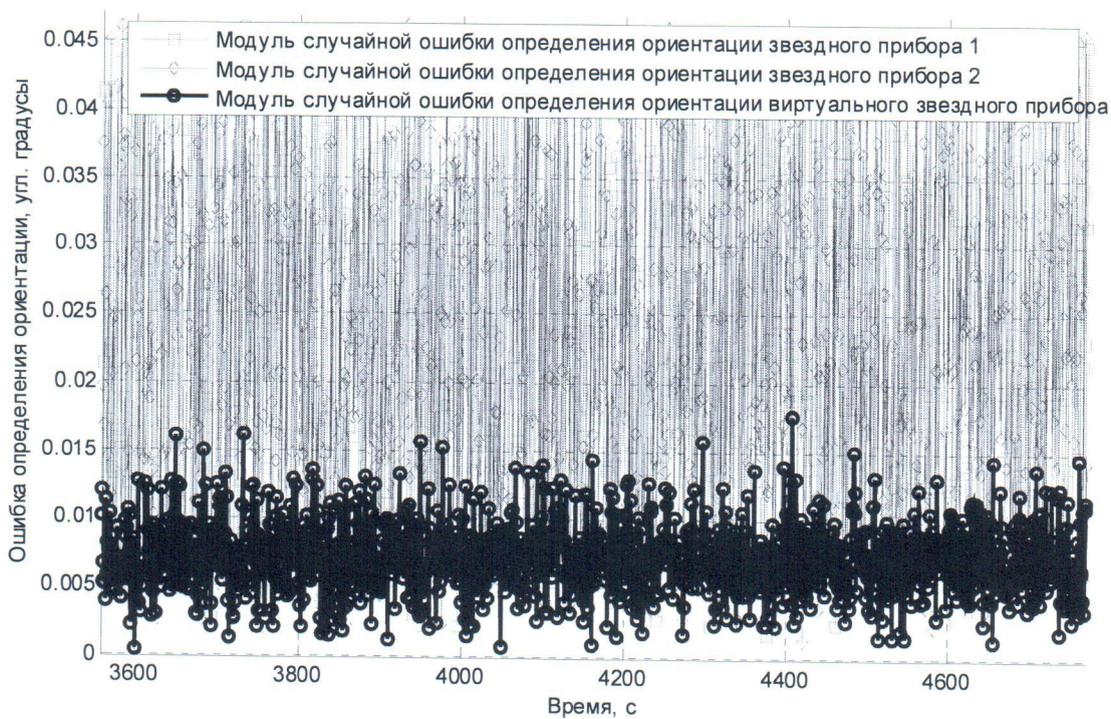


Рисунок 4. Модули случайной погрешности определения ориентации ЗП и ВЗП

Характеристики высокочастотной погрешности ЗП

Наименование	Значение
Высокочастотная шумовая составляющая ПСК X, Y (3σ), "	24
Высокочастотная шумовая составляющая ПСК Z (3σ), "	164

Результат совместной работы алгоритма фильтрации высокочастотной погрешности ЗП и алгоритма комплексирования информации ИИБ и ЗП в сравнении с одиночной работой алгоритма комплексирования представлен на Рисунке 5.

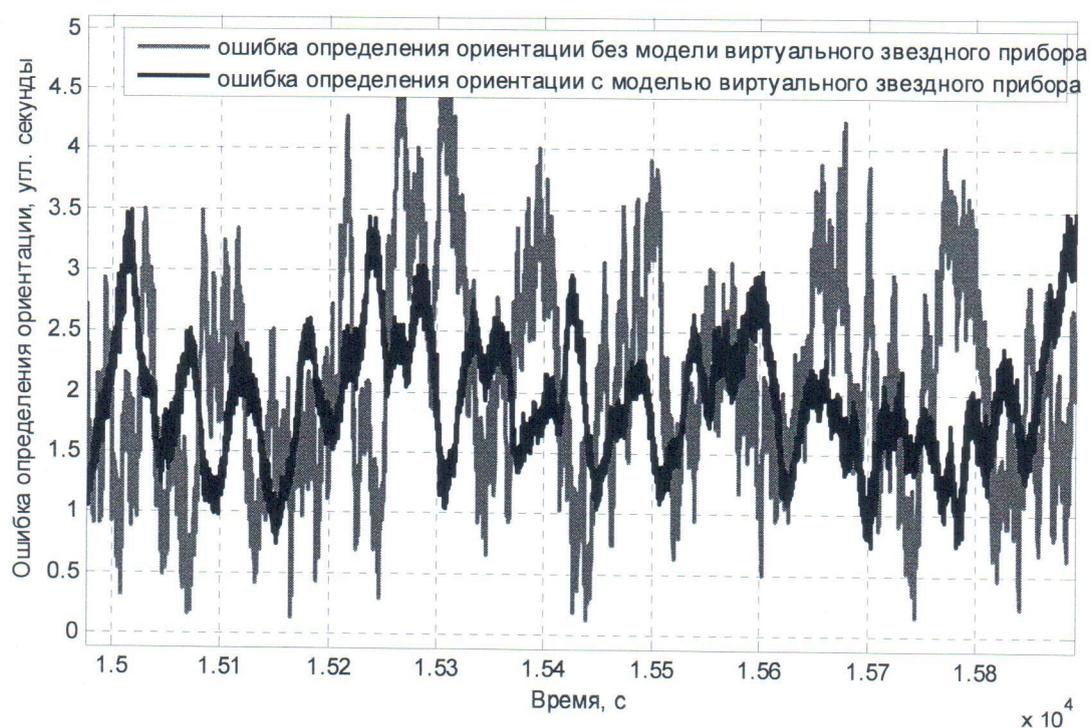


Рисунок 5. Ошибки определения ориентации без модели виртуального ЗП и с применением модели виртуального ЗП

Результаты моделирования функционирования БКУ КА научного назначения с предложенными в работе алгоритмами, показывают выполнение требований по точности, предъявленным в постановке задачи.

Основные результаты диссертации

1. Показано, что космические аппараты научного назначения отличаются высокими требованиями, как к определению параметров ориентации, так и к поддержанию ориентации по углу и угловой скорости. Отсутствуют отечественные приборы ориентации, обеспечивающие выполнение требований к КА серии «Спектр». Применение многих существующих алгоритмов фильтрации и комплексирования затруднительно в вычислительных машинах БКУ КА из-за низкой вычислительной мощности этих машин.

2. Проработаны основные принципы построения системы информационного обеспечения БКУ КА, обеспечивающей точное определение параметров ориентации КА. На основании анализа исходных данных к разработке БКУ КА серии «Спектр» сформулированы основные функции и принципы построения СИО БКУ КА, обеспечивающие выполнение требований по точности определения ориентации КА научного назначения.

3. Разработана методика оценки точности определения ориентации БКУ КА. Проведен анализ объекта исследования, литературы и литературных источников по решениям задач оценки точности ориентации КА, осуществлено обобщение частных задач. Предложены коэффициенты индивидуального учета составляющих погрешностей, позволяющих уточнять влияние составляющей при различных условиях применения приборов и КА в целом.

4. Представлена структурно-функциональная схема СИО и предложены алгоритмы, направленные на обеспечение заданных требований по точности определения параметров ориентации.

5. Рассмотрена полная модель задачи оценивания параметров ориентации КА и проведено обоснованное редуцирование модели. Для редуцированной модели оценивания автором разработан алгоритм фильтрации. Отличием алгоритма фильтрации является оценивание вектора малого поворота между соответствующими одному моменту измерения параметров ориентации ЗП и ИИБ. Проведен стохастический анализ точности редуцированной модели оценивания. Реализован расчет матрицы коэффициентов усиления фильтра, разложенный на пять тактов работы алгоритмов. Указанные свойства алгоритма являются его отличительной чертой. Алгоритм позволяет снизить ошибку определения ориентации КА в 3 раза по сравнению с алгоритмами фильтрации, основанными на фильтре Калмана с постоянными коэффициентами усиления. Разработанный алгоритм имеет сниженные в 2,7 раза требования к вычислительным ресурсам БКУ по отношению к алгоритмам, основанным на полном фильтре Калмана.

6. Разработана модель виртуального звездного прибора, реализующая интегральную обработку измерений двух звездных приборов. На основании модели разработан алгоритм фильтрации высокочастотной шумовой погрешности ЗП на базе совместной обработки измерительной информации звездных приборов. Алгоритм, за счет использования модели виртуального прибора, при фильтрации не вносит дополнительного запаздывания. Определена зависимость степени фильтрации высокочастотной погрешности ЗП от величины угла между визирными осями ЗП.

7. Разработан алгоритм двухточечной калибровки дрейфов гироскопов ИИБ. Алгоритм позволяет при задействовании малых вычислительных ресурсов БКУ проводить автономную оценку дрейфов гироскопов по двум точкам наблюдения измерительных данных ЗП.

8. Разработан метод описания программного обеспечения БКУ с помощью использования современных графических средств системного анализа, который позволяет наглядно и качественно представить строение, структуру и внутреннее взаимодействие программного обеспечения БКУ КА.

9. Разработан, обоснован и испытан программно-алгоритмический комплекс, обеспечивающий прецизионное определение ориентации БКУ КА и эффективную фильтрацию высокочастотной шумовой погрешности ЗП, при одновременной минимизации требований к вычислительным ресурсам БКУ.

10. Проведено внедрение разработанных автором алгоритмов в объект исследования и моделирование объекта исследований. С применением метода математического моделирования показана работоспособность разработанных автором алгоритмов системы информационного обеспечения. Проведенное моделирование доказывает правильность построения алгоритмов комплексирования информации ИИБ и ЗП, а также показывает выполнение требований как по точности определения ориентации, так и по реализуемым вследствие работы предложенного алгоритма комплексирования стабилизационным отклонениям.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Рябогин Н.В., Задорожная Н.М. Влияние упругих деформаций корпуса космического аппарата на точность ориентации целевой аппаратуры // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронное издание. 2013. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/523.html>
2. М.М. Лисаков, С.М. Войнаков, А.С. Сыров, В.Н. Соколов, Д.А. Добрынин, М.А. Шатский, Р.А. Комальдинова, В.В. Сосновцев, Т.Б. Выюницкая, Н.В. Рябогин, Е.Н. Филиппова. Работа системы ориентации космического аппарата Спектр-Р // Космические исследования. 2014. Т. 52. С. 399-407. (0.5 пл/ 0.2 пл)
3. Соловьев И.В., Рябогин Н.В. Метод полетной калибровки резервированного гироскопического измерителя вектора угловой скорости космического аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2016. №3. С. 11-21. (0.68 пл/ 0.1 пл)
4. Рябогин Н.В., Соколов В.Н., Задорожная Н.М. Методика оценки точности определения ориентации космического аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2016. №7. С. 10-23. (0.875 пл/ 0.8 пл)
5. Рябогин Н.В., Шатский М.А., Косинский М.Ю., Соколов В.Н., Задорожная Н.М. Применение SysML в задачах разработки и отработки программного обеспечения бортовых комплексов управления космическими аппаратами // Программная инженерия. 2016. Т. 7. №8. С. 373-382. (0.625 пл/ 0.3 пл)
6. Способ функционального контроля и резервирования плат измерительного канала угловой скорости космического аппарата и устройство для его реализации: патент №2490697 РФ / Рябогин Н.В., Шатский М.А., Колбецкий А.Н., Соколов В.Н., Сыров А.С.; опубл. 2012.
7. Способ измерения вектора угловой скорости космического аппарата и устройство для его реализации: патент №2519603 РФ / Рябогин Н.В., Шатский М.А., Колбецкий А.Н., Соколов В.Н., Сыров А.С., Самус П.А.; опубл. 2012.

8. Способ ориентации космического аппарата по углу крена и устройство для его реализации: патент №2567312 РФ / Рябогин Н.В., Шатский М.А., Соколов В.Н., Сыров А.С., Самус П.А., Лащев А.Я.; опублик. 2015.
9. Способ ориентации космического аппарата по углу крена и устройство для его реализации: патент №2564936 РФ / Рябогин Н.В., Шатский М.А., Соколов В.Н., Сыров А.С., Лащев А.Я.; опублик. 2015.
10. Рябогин Н.В. Калибровка дрейфов датчиков угловой скорости космических аппаратов по информации от звездных датчиков при вращении вокруг произвольной оси. Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции. М.: МОКБ «Марс», 2012. С. 42-43. (0.125 пл/ 0.125 пл)
11. Н.В. Рябогин, Н.М. Задорожная, А. С. Сыров. Анализ требований к точностным характеристикам космических аппаратов // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVIII Академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2014 г./ Под общей редакцией А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2014. С. 497-498. (0.06 пл/ 0.06 пл)
12. Н.В. Рябогин, Н.М. Задорожная, А. С. Сыров. О построении навигационной системы космического аппарата // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIX Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. Москва, 27-30 января 2015 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 419. (0.06 пл/ 0.06 пл)
13. Н.В. Рябогин, А.С. Сыров, В.Н. Соколов, Д.А. Добрынин, М.А. Шатский, Р.А. Комальдинова, В.В. Сосновцев, Т.Б. Вьюницкая. Функционирование системы управления космическим аппаратом «Спектр-Р» – проекта «Радиоастрон» // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIX Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. Москва, 27-30 января 2015 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 398. (0.06 пл/ 0.06 пл)
14. Н.В. Рябогин, Н.М. Задорожная, А. С. Сыров. Исследование и разработка путей улучшения характеристик БКУ для КА различного назначения // Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности «РОСКОСМОС», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана 2015. С. 351. (0.06 пл/ 0.06 пл)