



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

Учёному секретарю
диссертационного совета
Д 212.125.12
к.т.н. Старкову А.В.

06.12.2016 № 98-6644

На № _____ от _____

Отзыв на диссертацию Войсковского А.П.

ОТЗЫВ

официального оппонента

д.т.н., профессора Белоконова Игоря Витальевича
на диссертацию Войсковского Андрея Павловича

«Автономное управление движением центра масс геостационарного космического аппарата на этапах довыведения, перевода в рабочую позицию и удержания», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертационного исследования

Стремление к автономности управления движением космического аппарата (КА), входящего в структуру той или иной космической системы, является устойчивой тенденцией на современном этапе развития систем связи, использующих геостационарные спутники. Переход к автономному управлению преследует цель снижения расходов на содержание наземной инфраструктуры и повышения надежности функционирования КА путем исключения человеческого фактора. Для реализации автономного высокоточного управления движением центра масс КА необходима разработка алгоритмов, способных вырабатывать управляющие воздействия непосредственно на борту КА, используя текущую информацию о векторе его состояния, формируемую бортовой (т.е. тоже автономной) навигационной системой. Все сказанное выше относится ко всему жизненному циклу геостационарного КА, включающему этапы довыведения на ГСО, перевода в рабочую позицию, удержания в рабочей позиции, перевода в другую орби-

тальную позицию, захоронение. Наибольшее внимание должно уделяться этапам довыведения и удержания как самым длительным в рамках жизненного цикла с учетом того, что стабилизация положения центра масс КА в рабочей позиции на ГСО должна обеспечиваться с точностью по долготе не хуже 0.05 градуса, а по наклонению не хуже 0.1 градуса. Анализ публикаций на эту тему показывает, что в период с 1970 г. по 1990 г. по данной тематике авторским коллективом МАИ был выполнен существенный объем работ, основные результаты которых опубликованы в монографиях с участием специалистов предприятия - Индустриального партнера АО ИСС имени академика М.Ф. Решетнева. Особенностью выполненных работ являлось параллельное исследование проблем управления движением центра масс и навигации. При этом требование автономности предъявлялось только к системе навигации. Алгоритмы управления решали задачу управления на этапе приведения КА в рабочую позицию в детерминированной, стохастической (вероятностной) и гарантирующей постановках. Замыкание системы обратной связью по навигации предусматривало использование средств наземного комплекса управления. Таким образом, отсутствовало обобщение, позволяющее разрабатывать новые и модифицировать ранее созданные алгоритмы автономного управления и навигации для интегрированных систем управления.

Диссертационная работа Войсковского А.П., посвященная разработке алгоритмов автономного оптимального управления движением центра масс в стохастической постановке и их интеграции с автономной системой навигации в едином программно-математическом обеспечении, в определенной степени заполняет этот пробел и поэтому является актуальной.

Структура и содержание работы

Изложение материала в диссертации построено методически грамотно. Работа содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы. Во введении сформулированы цели исследований, их актуальность, научная новизна и обоснована практическая значимость, а также достоверность полученных результатов.

В первой главе диссертации приведена постановка технической задачи, проведен анализ состояния обсуждаемой в работе проблемы с учетом российского и международного опыта. В результате такого анализа выявлены наиболее актуальные тенденции совершенствования методов и алгоритмов высокоточного автономного стохастического управления применительно к геостационарному КА, а также анализируются наиболее сложные технические задачи, решение которых обеспечивает необходимую точность управления движением центра масс геостационарного КА на рассматриваемых этапах его жизненного цикла. Заметим, что на всех рассматриваемых в работе этапах движения КА для управления движением его

центра масс используется электроракетная двигательная установка (ЭРДУ) малой тяги.

Во второй главе приведена математическая формализация задач автономного управления движением центра масс геостационарного КА. Обосновываются математические модели управляемого возмущенного движения центра масс КА на этапах довыведения на ГСО, перевода в рабочую позицию и удержания в точке стояния. Модель движения центра масс КА учитывает притяжение Земли по разложению гравитационного потенциала по сферическим функциям вплоть до 70-го порядка из актуальных бюллетеней IERS, а также притяжение Луны и Солнца, давление солнечного света на КА, приливные возмущения в теле Земли, прецессию и нутацию Земной оси. Модель управляемого движения центра масс КА учитывает случайные ошибки модуля тяги ЭРДУ, углового отклонения вектора тяги относительно оси двигательной установки и ориентации связанных осей КА относительно орбитальных. С учетом особенностей используемых моделей формализованы две исходные задачи автономного управления движением, решаемые в последующих главах работы. Первая задача заключается в формировании алгоритма автономного управления движением центра масс КА от окончания этапа довыведения до приведения в окрестность рабочей орбитальной позиции на ГСО с использованием данных навигационной системы и с учетом случайных ошибок вектора тяги ЭРДУ. Рабочая окрестность задана параллелепипедом допустимых отклонений координат КА вдоль орбиты, по радиусу и по бинормали размером $72 \times 72 \times 36$ км, что соответствует перспективным требованиям Всемирной административной конференции по радиосвязи (ВАКР). Вторая задача заключается в формировании алгоритма автономного управления коррекциями удержания КА в окрестности рабочей орбитальной позиции на длительном интервале времени по данным навигационной системы с учетом случайных ошибок тяги двигателей коррекции и систематических возмущений от гравитации Земли, Луны и Солнца. Все задачи автономного управления формализуются и стохастической постановке как задачи управления по полным данным в рамках известной теоремы разделения.

Третья глава содержит описание используемого в данной работе алгоритма автономного управления движением КА на этапе довыведения, а также разрабатываемых алгоритмов автономного управления на этапах приведения и удержания. На этапе довыведения используется квазиоптимальный алгоритм управления с обратной связью. Этот алгоритм устанавливает численную зависимость ориентации вектора тяги ЭРДУ от вектора состояния КА в детерминированной постановке. Важно отметить, что в данной работе для формирования текущего направления вектора тяги ЭРДУ упомянутый алгоритм использует не точные значения компонент век-

тора состояния КА, а результаты решения навигационной задачи, формируемые блоком навигации, включенным в замкнутый контур управления движением. Алгоритмы управления на этапах приведения в рабочую позицию и удержания создаются путем решения стохастической задачи синтеза оптимального управления квазилинейной дискретной стохастической системой по полным данным с использованием принципа оптимальности Беллмана – метода динамического программирования. Основная трудность применения этого метода в случае использования двигателей малой тяги заключается в неявной зависимости уравнений движения от величины управляющего приращения характеристической скорости коррекций (управляющего воздействия) от времени работы двигателя. Формально линейная относительно векторов состояния и управления модель движения оказывается существенно нелинейной по времени, в течение которого реализуется необходимое приращение характеристической скорости. Это приводит к необходимости использования метода последовательных приближений. В предыдущих опубликованных работах такой метод был назван методом статистической линеаризации, так как при уточнении времени коррекции использовалась линеаризованная модель управления. Существенным отличием данной работы является использование на этом этапе нелинейной модели, учитывающей основные неслучайных возмущений, что позволило исключить дальнейшее уточнение параметров закона управления. Кроме того, проведен детальный анализ возможных схем приведения КА в рабочую позицию, на результатах которого построен алгоритм поиска начального приближения для метода последовательных приближений.

В четвертой главе приведено описание разработанного автором программно-математического комплекса, его архитектуры, состава модулей и их назначения. На мой взгляд, автором профессионально реализованы графы классов, отвечающие принципам объектно-ориентированного программирования, что делает разработанное ПМО гибким, расширяемым и настраиваемым. Проведен статистический анализ точности работы замкнутой системы автономного управления движением геостационарного КА на рассматриваемых в работе этапах его функционирования. Приведенные в четвертой главе результаты моделирования наглядно подтверждают состоятельность используемых автором методов и средств решения поставленных задач, так как отвечают предъявляемым требованиям к терминальной точности управления.

Научная новизна и практическая значимость результатов

К новым научным результатам, полученным автором, следует отнести алгоритм автономного управления движением центра масс КА при переводе в рабочую позицию в стохастической постановке с учетом детер-

минированных возмущений от гравитационного поля Земли, гравитации Луны и Солнца и случайных ошибок управления и навигации. Кроме того, «сквозное» статистическое моделирование всех участков жизненного цикла с использованием алгоритмов автономного управления и автономной навигации, а также полученные в результате рекомендации являются новыми. Практическая значимость работы автора состоит в создании гибкого, открытого, настраиваемого и расширяемого специализированного инструмента исследования процесса функционирования интегрированных систем навигации и управления КА на ГСО - программно-математического обеспечения, разработанного с использованием объектно-ориентированного подхода.

Достоверность основных положений и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью и достаточной строгостью обоснований принятых допущений, теоретическим обоснованием применяемого методического и алгоритмического обеспечения, выбором проверенных математических моделей. К несомненным достоинствам работы относится использование результатов диссертации при выполнении составной части работы в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Это может оцениваться как существенный вклад автора в исследования, посвященные рассматриваемым задачам управления движением центра масс геостационарного КА. По теме диссертации опубликованы две статьи в журнале, индексируемом в международной системе цитирования SCOPUS. Результаты работы докладывались на 25-ом Симпозиуме Европейского космического агентства по проблеме «Динамика космического полета» (Мюнхен, Германия, 2015); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Космонавтика XXI века» (Королев, Московская обл. 2016) и 15-ой конференции Авиация и Космонавтика (Москва, МАИ, 2016 г). Публикации по теме диссертации достаточно полно отражают полученные научные результаты, выводы и рекомендации. Список публикаций свидетельствует о личном вкладе автора в решение задач исследований, необходимой апробации результатов диссертационных исследований и их освещении в научной печати.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях ракетно-космической отрасли, связанных с проектированием и разработкой геостационарных КА в интересах спутниковых систем мониторинга, связи, и навигации.

Замечания по диссертации

В качестве недостатков работы можно отметить следующие:

- при формировании алгоритмов управления движением центра масс КА на этапе приведения и удержания автором не рассматриваются особенности их бортовой реализации;
- в диссертации не приведены результаты исследования сходимости метода последовательных приближений;
- отсутствуют предложения по реализации бортового программного обеспечения;
- имеются стилистические погрешности.

Заключение

Диссертация А.П. Войсковского представляет собой законченное научное исследование, посвященное решению актуальной научно-технической задачи управления движением центра масс геостационарного КА на этапах довыведения, приведения в рабочую позицию и удержания в течение длительного времени активного существования.

Отмеченные выше недостатки не снижают ее научную ценность. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Войсковского Андрея Павловича соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 - «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент

Заведующий межвузовской кафедрой космических исследований федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Профессор, д.т.н.

 Белоконов И.В.

Заведующий межвузовской кафедрой космических исследований Белоконов Игорь Витальевич, (846) 267-4444, ibelokonov@mail.ru, адрес проживания – Самара, 443001, ул.Ленинская, д.301, кв.63.

Подпись Белоконова И.В. заверяю:

Ученый секретарь университета,
профессор



В.С. Кузьмичев