

Управление в технических системах





Е.А. Микрин, М.В. Михайлов

**Ориентация, выведение, сближение
и спуск космических аппаратов
по измерениям от глобальных спутниковых
навигационных систем**

2-е издание

УДК 629.7.05
ББК 39.62
М59

Рецензенты:

д-р техн. наук, зав. кафедрой системного анализа
и управления МАИ *В.В. Малышев*;
академик РАН *В.Г. Пешехонов*

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Микрин, Е. А.

М59 Ориентация, выведение, сближение и спуск космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем : учебное пособие / Е. А. Микрин, М. В. Михайлов. — 2-е изд. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 357, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4895-1

Рассмотрены задачи координатно-временного обеспечения космического аппарата, решаемые аппаратурой спутниковой навигации, а именно: формирование бортовой шкалы времени; определение ориентации; навигация при сближении и спуске космического аппарата в атмосфере, а также навигация средств выведения.

Для студентов и аспирантов авиа- и ракетостроительных специальностей высших технических учебных заведений, научных работников и инженеров, занимающихся разработкой, проектированием и испытаниями навигационных систем космических аппаратов.

УДК 629.7.05
ББК 39.62



Все права защищены. Никакая часть данного издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку Издательства обеспечивает Адвокатское бюро «Сергей Москаленко и партнеры».

ISBN 978-5-7038-4895-1

© Микрин Е.А., Михайлов М.В., 2017
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Предисловие

Учебное пособие посвящено вопросам проектирования, разработки, наземных и лётных испытаний аппаратуры спутниковой навигации космического назначения при решении комплекса навигационных задач управления космическими аппаратами. Создание аппаратуры спутниковой навигации позволяет по-новому рассматривать задачи управления орбитальными космическими аппаратами, начиная от этапа выведения на орбитальном участке до участка спуска его в атмосфере.

Аппаратура спутниковой навигации может заменить всю традиционную измерительную аппаратуру космических аппаратов. Это наземный измерительный баллистический комплекс, системы высокоточного временного обеспечения КА, гироскопы и акселерометры, гироскопические платформы, инфракрасные датчики вертикали, солнечные и звездные датчики ориентации, навигационные системы сближения, измерительный комплекс системы управления спуском и многое другое.

Например, АСН-К, установленная на пилотируемых космических аппаратах «Союз», решает задачи временного обеспечения бортового комплекса управления корабля, определения орбиты, ориентации, параметров относительного движения корабля с МКС на участках дальнего и ближнего сближения.

В учебном пособии рассмотрены задачи координатно-временного обеспечения космического аппарата, решаемые аппаратурой спутниковой навигации:

- формирование бортовой шкалы времени;
- определение ориентации;
- относительной навигации при сближении;
- навигация при спуске КА в атмосфере;
- навигация средств выведения;
- управление движением и ориентацией КА средствами аппаратуры спутниковой навигации.

Указанные задачи подробно рассматриваются в главах 1–5. Глава 6 посвящена вопросам проектирования, разработки наземных и лётных испытаний аппаратуры спутниковой навигации космического назначения, глава 7 — перспективам применения аппаратуры спутниковой навигации в области управления космическими аппаратами.

На примере реально существующей аппаратуры корабля «Прогресс-МС» показана возможность использования ее не только как навигационной системы корабля, но и как системы управления на основе только собственной информации. При этом процессор может выполнять роль бортовой центральной вычислительной системы. Через внешний интерфейс *MIL-1553* аппаратура

спутниковой навигации имеет связь с исполнительными органами системы управления движением (двигателями ориентации и двигателями коррекции) и может с их помощью осуществлять управление как движением центра масс космического аппарата, так и его ориентацией. В главе рассмотрены различные алгоритмы управления, приведены результаты моделирования, получены точностные, динамические и расходные характеристики системы в различных режимах управления.

В главе 8 приведено описание программных функций, позволяющих существенно сократить сроки разработки как самих систем навигации, так и создания инфраструктуры наземной отработки и испытаний этих систем.

Большая часть этих программных функций разработана авторами совместно с коллегами и учениками.

Список основных сокращений

АМ	— антенный модуль
АСН	— аппаратура спутниковой навигации
БВС	— бортовая вычислительная система
БДУС	— блок датчиков угловой скорости
БИЛУ	— блок интегрирования линейных ускорений
БИНС	— бесплатформенная инерциальная навигационная система
БИТС	— бортовая измерительная телеметрическая система
БКУ	— бортовой комплекс управления
БНМ	— бортовой навигационный модуль
БО	— бытовой отсек
БП	— блок питания
БЦВК	— бортовой цифровой вычислительный комплекс
БЦВС	— бортовая центральная вычислительная система
ВЭО	— высокоэллиптическая орбита
ГГСК	— Гринвичская географическая система координат
ГЛОНАСС	— Глобальная навигационная спутниковая система
ГСК	— гринвичская (прямоугольная) система координат
ГСНС	— Глобальная спутниковая навигационная система
ГСО	— геостационарная орбита
ГЧ	— генератор частоты
ДО	— двигатель ориентации
ДПО	— двигатель причаливания и ориентации
ДС	— делитель сигнала
ДУС	— датчик угловой скорости
ИКВ	— инфракрасная вертикаль
ИКД	— Интерфейсный контрольный документ
ИП	— интерфейсная плата
ИСК	— инерциальная система координат
КА	— космический аппарат
КД	— корректирующий двигатель
КДУ	— комбинированная двигательная установка
КК	— космический корабль
КРЛ	— командная радиолиния
КСВ	— координаты, скорость, время
ЛИ	— лётные испытания
МБМВ	— Международное бюро мер и весов
МБРЛ	— межбортовая радиолиния

МКС	— Международная космическая станция
МПВ	— модуль приемовычислительный
МСВЗ	— Международная служба вращения Земли
МШУ	— малошумящий усилитель
НВ	— навигационный вычислитель
НВМ	— навигационный вычислительный модуль
НИП	— наземный измерительный пункт
НКО	— наземный комплекс отладки
НМ	— навигационный модуль
НП	— навигационный приемник
НПМ	— навигационный приемный модуль
НС	— навигационный спутник
ОС	— орбитальная станция
ОСК	— орбитальная система координат
ПАО	— приборно-агрегатный отсек
ПЗУ	— постоянно запоминающее устройство
ПМ	— приемный модуль
ПО	— программное обеспечение
ПП	— процессорная плата
ПС	— переизлучатели сигналов
РБ	— разгонный блок
РКО	— радиоконтроль орбиты
РН	— ракета-носитель
СА	— спускаемый аппарат
СБ	— солнечная батарея
СВЧ	— сверхвысокая частота
СВЭО	— супервысокоэллиптические орбиты
СКД	— сближающий корректирующий двигатель
ССК	— связанная (с КА) система координат
СУ	— система управления
СУДН	— система управления движением и навигацией
СУС	— система управления спуском
ТМ	— телеметрический модуль
ТОРУ	— телеоператорный режим управления
УА	— устройство антенное
УСМ	— усилитель секундной метки
УУ	— устройство усилительное
ЦВМ	— центральная вычислительная машина
ЦУП	— Центр управления полетами
ШВ	— шкала времени
АТВ	— Европейский автоматический корабль

<i>CP</i>	— careers phase (интегральная фаза)
<i>GDOP</i>	— Geometric Dilution of Precision (геометрический фактор)
<i>GPS</i>	— Global Positioning System
<i>NIST</i>	— Национальный институт стандартов и технологий
<i>NRL</i>	— Военно-морская исследовательская лаборатория
<i>PR</i>	— pseudoranges (псевдодальность)
<i>PVt</i>	— position, velocity, time (координаты, скорость, время)
<i>USNO</i>	— Военно-морская обсерватория
<i>UT</i>	— универсальное время
<i>UTC</i>	— универсальное международное время

Основные термины и определения

Акселерометр — устройство, формирующее выходные сигналы, пропорциональные проекциям линейных ускорений КА, обусловленных всеми негравитационными силами, на оси чувствительности акселерометра. Акселерометр может быть построен на разных физических принципах и отличаться диапазоном измеряемых линейных ускорений, точностью измерения этих ускорений.

Альманах — набор параметров, по которым могут быть рассчитаны координаты и скорости навигационных спутников на требуемый момент времени с низкой точностью. По альманаху в АСН определяется список видимых навигационных спутников.

БИНС — бесплатформенная инерциальная навигационная система, включающая в себя датчик угловой скорости, акселерометры и цифровой вычислитель (как правило, это ЦВМ КА). Интегрируя уравнения движения КА с учетом измерений от датчиков, БИНС определяет ориентацию КА относительно начальной ориентации и текущую орбиту КА. В состав БИНС могут не входить акселерометры, тогда БИНС определяет только ориентацию КА.

ВЭО — высокоэллиптическая орбита КА с периодом 12 или 24 ч, наклоном $\sim 63^\circ$, низким перигеем (1000...2000 км) и высоким апогеем.

Гироскоп — двухстепенной силовой гироскоп, впервые был установлен на станции «Мир» как исполнительный орган системы ориентации.

ГЛОНАСС — российская Глобальная навигационная спутниковая система.

ГСНС — Глобальная спутниковая навигационная система, обеспечивающая возможность с помощью специальных электронных приемных устройств определять параметры движения потребителя.

ГСО — геостационарная орбита КА, близкая к круговой, совпадает с плоскостью экватора и имеет период 24 ч.

ДУС — датчик угловой скорости — устройство, формирующее выходные сигналы, пропорциональные проекциям угловой скорости КА на оси чувствительности. ДУС бывают гироскопическими, оптическими, твердотельными и др. Отличаются ресурсом, диапазоном измеряемых угловых скоростей и точностью измерения угловой скорости.

Звездный датчик — датчик определения ориентации КА по звездам. Современные датчики имеют оптическую трубу с полем зрения $\sim 8^\circ$ и работают по звездам до седьмой звездной величины. При наведении оптической трубы на любой участок звездного неба в ее поле зрения всегда попадает несколько звезд. Датчик имеет вычислительную систему, содержащую в памяти звездный каталог. По измеренным угловым расстояниям между звездами в трубе путем сравнения с каталогом определяются координаты видимых

звезд в ИСК *J*2000 и в ССК, в результате определяется кватернион перехода от ИСК *J*2000 к ССК.

ИИО — инерциальные исполнительные органы, осуществляют управление ориентацией КА путем изменения собственного суммарного кинетического момента. ИИО подразделяют на *маховики* и *силовые гироскопы*. Маховики меняют собственный кинетический момент благодаря изменению скорости вращения тяжелого ротора без изменения направления осей вращения в ССК. Силовые гироскопы имеют постоянную высокую угловую скорость, а изменение кинетического момента осуществляется за счет поворота оси ротора. Маховики используются на КА с малыми моментами инерции, силовые гироскопы — на КА с большими моментами инерции, например, на орбитальной станции «Мир» и на МКС.

ИКВ — инфракрасная вертикаль — одноосный датчик измерения углового положения КА относительно направления на центр Земли. Датчик осуществляет обработку сигналов от поверхности Земли в ИК-диапазоне. Бывают датчики, сканирующие чувствительным элементом по горизонту Земли или по двум взаимно перпендикулярным хордам. В результате обработки принимаемых сигналов на выходе прибора формируются два угла — угол тангажа и угол рыскания. Обычная точность ИКВ лежит в диапазоне $0,5 \dots 1^\circ$.

КСВ — информационное сообщение от АСН, содержащее векторы координат и скорости потребителя с их привязкой к точному времени.

«Курс» — радионавигационная система, обеспечивающая сближение кораблей «Союз» и «Прогресс» с орбитальными станциями (начиная с 1980-х годов). Система имеет активную часть, которая устанавливается на корабль, и пассивную, устанавливаемую на станцию. Система является многоантенной и определяет дальность и скорость изменения дальности между антеннами КА и станции для различных комбинаций антенн. По измеряемым параметрам определяется относительный вектор состояния и относительная ориентация, по которым система управления осуществляет сближение с дальности ~50 км до касания. Недостатком данной системы является ее большая масса, высокое энергопотребление и стоимость.

МКС — Международная космическая станция, первый модуль которой был запущен в 20 ноября 1998 г. — функционально-грузовой блок «Заря», был выведен ракетой «Протон-К». 26 июля 2000 г. к функционально-грузовому блоку «Заря» был пристыкован служебный модуль «Звезда», а 2 ноября 2000 г. транспортный пилотируемый корабль «Союз ТМ-31» доставил на борт МКС экипаж первой основной экспедиции. Сейчас МКС включает десятки модулей, изготовленных разными странами в рамках международного сотрудничества по МКС. Станция является пилотируемой, на ней непрерывно работают международные экипажи.

РБ — разгонный блок, обеспечивающий выведение КА с низкой орбиты, высотой ~200 км, на высокую, включая ГСО, ВЭО, межпланетные орбиты и т. п. РБ, как правило, имеет химический двигатель с высокой тягой.

СА — спускаемый аппарат — отсек корабля «Союз», в котором экипаж спускается на Землю. СА отделяется от корабля после выдачи тормозного импульса перед входом в атмосферу. Благодаря специальной форме в виде «фары» и центровке при полете СА «скользит» по атмосфере, а не падает. Тем самым существенно снижаются перегрузки и реализуется управляемый спуск.

«Сырые» измерения — первичные параметры, измеряемые в АСН: псевдодальности и интегральные фазы (или псевдоскорости). По «сырым» измерениям в АСН вычисляются остальные выходные параметры.

ЭРД — электрореактивный двигатель, в котором рабочее тело в виде плазмы разгоняется электромагнитным полем до высоких скоростей. ЭРД работают благодаря электроэнергии, вырабатываемой, как правило, солнечными батареями. Удельная тяга ЭРД в 5–10 раз выше удельной тяги химических двигателей, и, как следствие, масса потребного для выполнения задачи рабочего тела уменьшается в десятки раз. Но ЭРД имеет низкую тягу (граммы) и используются для довыведения КА на высокие орбиты в течение длительного времени (месяцы).

Эфемериды — набор параметров, по которым могут быть рассчитаны координаты и скорости НС на требуемый момент времени с высокой точностью. По эфемеридам в АСН вычисляют координаты и скорость потребителя.

Broadcast-эфемериды — эфемериды, передаваемые от НС с определенной частотой.

J2000 — инерциальная система координат, совпадающая с ГСК на момент времени UTC 11:58:55,816 01.01.2000 г. Принята в качестве универсальной ИСК.

Leap_sec — рассогласование шкалы системного времени GPS со шкалой UTC на целое число секунд вследствие регулярной коррекции шкалы UTC на целую секунду.

GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) — геометрический фактор, характеризующий взаимное геометрическое расположение НС и потребителя и определяющий точность формируемых КСВ по измерениям данного набора навигационных спутников.

GPS — Глобальная спутниковая навигационная система США.

Введение

Аппаратура спутниковой навигации (АСН) может обеспечивать на качественно новом уровне решение всего комплекса задач навигации и управления движением космического аппарата (КА), позволяя многократно снизить массу, энергопотребление и стоимость системы управления. Излагаемый материал основан на результатах реальных разработок, испытаний и лётной эксплуатации АСН кораблей «Союз» и «Прогресс», МКС, Европейского автоматического корабля ATV и ряда других изделий. На смену традиционным, классическим системам управления приходит принципиально новая система, построенная на базе рукотворного Глобального навигационного поля систем ГЛОНАСС, GPS, Галилео (*Galileo*), Bei Dou, позволяющая осуществлять управление КА, опираясь на новые принципы навигации. Подготовка специалистов для создания системы управления, опираясь на новые методы измерений параметров движения КА, является целью настоящего пособия, направленного на формирование у студентов знаний, умений и навыков, позволяющих самостоятельно решать вопросы проектирования и разработки сложных многофункциональных систем космической навигации на базе ГСНС для широкого класса низкоорбитальных высокоорбитальных и высокоэллиптических КА.

В учебном пособии изложены методы и алгоритмы, приведены результаты наземных и лётных испытаний решения задач временного обеспечения КА, ориентации КА, относительной навигации при сближении двух КА, навигации при спуске КА в атмосфере, навигации средств выведения. Для каждой из перечисленных задач рассмотрены особенности работы АСН, предложены методы и алгоритмы решения задачи, определены динамические и точностные характеристики исполняемых режимов, приведены результаты моделирования и лётных испытаний, подтверждающих полученные характеристики.

Большое внимание уделено вопросам проектирования, разработки, наземных и лётных испытаний АСН космического назначения. Опыт показывает, что неправильно спроектированная система не даст и десятой доли возможной ее отдачи, а неправильно испытанная система просто не будет работать в космосе. Опыт авторов в создании систем АСН, разработке моделирующих стендов, проведении натурных наземных и лётных испытаний является необходимым звеном подготовки специалистов не только в части разработки АСН, но и значительно более широкого спектра систем управления КА.

Перспектива АСН в области управления КА показана на примере реально существующей АСН корабля «Прогресс-МС». АСН можно использовать не только как навигационную систему корабля, но и как систему управления, использующую для управления только собственную информацию. При этом

процессор АСН может выполнять роль бортовой центральной вычислительной системы (БЦВС). Через внешний интерфейс *MIL-1553* АСН имеет связь с исполнительными органами системы управления движением (двигателями ориентации и двигателями коррекции) и может с их помощью осуществлять управление как движением центра масс КА, так и его ориентацией. В лекциях рассмотрены различные алгоритмы управления, приведены результаты моделирования, получены точностные, динамические и расходные характеристики системы в различных режимах управления.

В процессе разработки АСН различных КА авторами совместно с коллегами и учениками создано большое количество программ и программных модулей, входящих в состав различных моделирующих комплексов и в состав бортового программного обеспечения (ПО) АСН. Эти программные модули включают как элементарные функции, так и различные сложные программные модели, например, модель движения низкоорбитального КА с учетом гравитационного поля Земли 72-го порядка, модели атмосферы, гравитационного влияния Луны и Солнца, с учетом реального смещения полюса Земли, а также прецессии и нутации оси вращения Земли. Именно такая модель позволяет обеспечить формирование оценки орбиты низкоорбитального КА по измерениям одночастотного приемника с точностью выше 1 м. Для решения многих громоздких вычислительных задач разработаны вычислительные методы, позволяющие повысить быстродействие в десятки и сотни раз. Например, модель гравитационного поля Земли 72-го порядка, реализованная в АСН-М МКС, требует для своего решения в 300 раз меньше вычислительных операций по сравнению с классическим решением через разложение геопотенциала Земли по сферическим функциям. Из этих разрозненных программных модулей была скомпонована библиотека навигационных программных функций, позволяющая как из кубиков создавать сложное бортовое и модельное ПО.

Глава 2

Определение ориентации космического аппарата по измерениям аппаратуры спутниковой навигации

Одной из основных задач навигационного обеспечения КА является определение его ориентации. Для большинства КА эта задача должна решаться непрерывно в течение всего полета без каких-либо сбоев. Существуют традиционные системы определения ориентации КА, имеющих в своем составе достаточно сложную и дорогостоящую аппаратуру, например, датчики инфракрасной вертикали (определяют одноосную ориентацию КА относительно направления на центр Земли), солнечные датчики (определяют одноосную ориентацию КА относительно направления на центр Солнца), звездные датчики (определяют трехосную ориентацию КА в инерциальном пространстве) и т. п. Ориентация КА может вычисляться также и по измерениям АСН. При наличии на борту КА АСН нахождение орбиты и сближение может выполняться параллельно без использования других систем. Такой подход позволит существенно упростить систему управления КА, снизить ее массу, энергопотребление и стоимость.

Для определения ориентации на борту КА должно быть установлено несколько антенн, сигналы от которых поступают в навигационные приемники АСН. Относительно моментов времени обработки сигнала, существуют два типа навигационных приемников: *синхронные* и *асинхронные*. Синхронные приемники работают от одного генератора частоты и в одной ШВ. Поэтому все измерения в этих приемниках выполняются в один момент времени. Примером синхронной системы может служить аппаратура АСН-К кораблей «Союз» и «Прогресс». Навигационный приемник АСН-К имеет четыре СВЧ-входа от четырех антенн. СВЧ-сигналы, поступающие в приемник обрабатываются одновременно в приемнике, работающем от одного генератора частоты.

В асинхронной АСН каждый навигационный приемник имеет свой генератор частоты и работает в собственной ШВ. Поэтому измерения эти приемники выполняют в разные моменты времени, которые могут отличаться на миллисекунды. Примером асинхронной системы может служить аппаратура АСН-М.

При скорости полета КА 7 км/с за 1 мкс антенна меняет свое положение относительно ГСК на 7 м. Эти изменения должны быть учтены при определении ориентации, т. е. все измерения асинхронных приемников должны быть сведены к одному времени, например, к целой секунде системного времени. Рассмотрим алгоритмы синхронизации асинхронных АСН, и далее будем предполагать, что измерения всех навигационных приемников, входящих в состав АСН, выполняются в один момент времени.

Глава 3

Относительная навигация по измерениям аппаратуры спутниковой навигации при сближении космических аппаратов

Сближение КА является одной из наиболее сложных и ответственных технологических операций в космосе. Как правило, срыв сближения означает срыв всей миссии КА. Поэтому система управления сближением — одна из наиболее важных, сложных и дорогостоящих систем КА, основной частью которой является ее навигационная часть, определяющая векторы положения и скорости активного КА (реализующего маневры сближения) в системе координат пассивного КА (находящегося в пассивном орбитальном полете). Чем точнее и быстрее определяются эти векторы, тем более экономично и надежно может быть выполнено само сближение.

Решение задачи сближения во многом зависит от типов сближающихся КА и их орбит. Принципиально можно говорить о сближении любых КА на любых орбитах. Построение системы сближения существенно зависит от орбит сближающихся КА. Одной из наиболее часто решаемых задач сближения является сближение пилотируемых или грузовых КА с орбитальной станцией (ОС), в частности, кораблей «Союз» и «Прогресс» с Международной космической станцией (МКС).

Задачу сближения КА будем рассматривать на примере реализации миссии кораблей «Союз» и «Прогресс» по доставке экипажей и грузов на МКС. При этом корабли будем называть активными КА, а ОС — пассивным КА.

3.1. Реализация сближения кораблей «Союз» и «Прогресс» с орбитальной станцией

Задача сближения пилотируемых и транспортных кораблей с ОС решается в четыре этапа:

- предстартовая подготовка;
- дальнее сближение;
- ближнее сближение;
- причаливание.

3.1.1. Предстартовая подготовка сближения

Этап предстартовой подготовки сближения заключается в выборе даты и времени старта активного КА, а также в проведении формирования орбиты пассивного КА. Решение этих задач обеспечивает создание оптимальных по расходу топлива условий сближения: обеспечение компланарности орбит

Глава 4

Навигация при спуске космических аппаратов в атмосфере

Спуск КА, особенно если они пилотируемые, является одним из основных и наиболее сложным и ответственным этапом полета. Он связан с безопасным возвращением экипажа на Землю в заданный район посадки. Приведение КА в заданный район посадки осуществляет система управления спуском (СУС). Существуют различные идеологии построения систем управления спуском. Например, система управления спуском корабля «Буран» или Shuttle реализует посадку самолетного типа с горизонтальным приземлением на посадочную полосу. Такие системы относятся к системам управления спуском с большим аэродинамическим качеством, когда подъемная сила, действующая на КА, значительно превышает лобовое сопротивление.

Здесь будем рассматривать системы управления спуском с малым аэродинамическим качеством, когда подъемная аэродинамическая сила в 3–4 раза меньше лобового сопротивления. К таким системам относится система управления спуском корабля «Союз». Возможность модернизации этой системы за счет интегрирования с АСН показана в настоящей главе.

4.1. Принцип управления спуском КА с малым аэродинамическим качеством

Первые пилотируемые КА при посадке совершали неуправляемый баллистический спуск. Для реализации такого спуска на спусковом витке, когда трасса КА проходит через полигон посадки, в расчетной точке траектории выдавался расчетный тормозной импульс, спускаемый аппарат (СА) при этом переходил на траекторию, высота перигея которой была ниже границы атмосферы ($H \approx 100$ км). При попадании в атмосферу начиналось резкое торможение СА и потеря высоты. Точка приземления определялась плоскостью орбиты КА, местом выдачи тормозного импульса и его значением. Существенными недостатками баллистического спуска являлись высокие перегрузки (они превышали 10g и были опасны для здоровья экипажа) и невозможность управления траекторией в процессе спуска в атмосфере для повышения точности приземления. Нестабильность атмосферы, геометрии СА обуславливали достаточно большой промах (до 30 км) относительно заданного места посадки, что затрудняло поиск и эвакуацию экипажа.

На кораблях «Союз» был реализован управляемый спуск с малым аэродинамическим качеством, который обеспечивался благодаря геометрической форме СА и его центровке. Типичная форма СА с малым аэродинамическим качеством показана на рис. 4.1. СА имеет форму усеченного конуса, основа-

Глава 5

Навигация средств выведения

К средствам выведения КА относятся ракеты-носители (РН) и разгонные блоки (РБ). Сегодня эти средства хорошо отработаны и выполняют свою целевую задачу — выведение одного или нескольких КА на заданные орбиты. При этом РН обеспечивает выведение полезного груза на предварительную околокруговую орбиту. Как правило, это низкая орбита высотой ~200 км. После отделения от РН полезный груз доводит себя на заданную орбиту. В состав полезного груза может быть включен РБ для выведения целевой нагрузки на заданную (или заданные) орбиты. Целевая нагрузка может представлять собой один или несколько спутников, заданные орбиты которых могут быть низкие околокруговые высотой ≈400...1000 км, среднекруговые, высотой ~20 000 км, геостационарные (ГСО), высотой ~36 000 км, высокоэллиптические (ВЭО) с апогеем ~40 000...50 000 км и супервысокоэллиптические (СВЭО) с апогеем ~350 000 км.

Основой систем управления РН и РБ являются гиросtabilизированные платформы высокой точности с установленными на них акселерометрами. Точность выведения РН и РБ определяется в основном точностью начального наведения платформы, ее угловым дрейфом и точностью акселерометров. Зная эти характеристики, можно оценить точность выведения целевой нагрузки на ту или иную орбиту. Целевая нагрузка разрабатывается под характеристики средств выведения и должна обеспечивать с помощью собственной системы управления компенсацию ошибок выведения, присущих соответствующим средствам выведения. Часто это приводит к усложнению систем управления целевой нагрузки и, соответственно, к повышению ее массы и стоимости всего проекта.

Установка АСН на средства выведения может существенно повысить точность выведения и упростить выводимую целевую аппаратуру, а в перспективе упростить и системы управления самих средств выведения заменой сложных и дорогостоящих гиросtabilизированных платформ высокой точности на относительно простую и дешевую БИНС средней точности.

В настоящее время системы навигации большинства средств выведения включают в свой состав АСН, однако эта аппаратура работает в телеметрическом режиме, передавая на Землю в реальном времени информацию о текущем векторе состояния объекта. Сегодня только система управления РН «Фрегат» использует информацию АСН в контуре управления, благодаря чему значительно повышается точность выведения.

Исходя из вышесказанного АСН средств выведения можно разделить на две группы: по объекту применения — РН или РБ, а также по решаемой зада-

Глава 6

Проектирование, разработка и наземные испытания аппаратуры спутниковой навигации космического назначения

6.1. Проектирование АСН космического назначения

Функциональное назначение и условия эксплуатации обуславливают принципиальное отличие АСН космического назначения от аппаратуры потребителя систем GPS и ГЛОНАСС, предназначенной для наземных объектов. Рассмотрим особенности АСН космического назначения и этапы ее создания.

6.1.1. Требования, предъявляемые к системе АСН космического назначения в целом и к ее аппаратуре

Проектирование системы заключается в формировании структурной схемы системы и ее аппаратуры, включая электрические схемы, выбор элементной базы, реализующей разработанные электрические схемы, обеспечивающие решение поставленных функциональных задач в соответствующих условиях эксплуатации. Таким образом, выбор структуры системы определяется в основном выполняемыми задачами и условиями эксплуатации. Можно отметить, что структура первой российской АСН космического назначения аналогична структуре аппаратуры наземных потребителей. Целевое назначение этой АСН — формирование векторов координат и скорости с их привязкой к точному времени. Она не была резервирована, имела только одну антенну и в ней не была реализована вторичная обработка измерений. К сожалению, сегодня на многих КА реализован аналогичный подход к построению системы со всеми рассмотренными выше характеристиками для этой схемы недостатками.

Аппаратура АСН-М МКС имеет более сложную структуру. Она включает в себя четыре антенны, определенным образом установленные на станции, четыре навигационных приемных модуля (НПМ), решающих первичную навигационную задачу, и два навигационных вычислительных модуля (НВМ), обеспечивающих вторичную обработку навигационных измерений. Эта схема имеет высокую степень резервирования, формирует высокоточные оценки орбиты независимо от числа видимых НС, может решать задачи ориентации и относительной навигации при сближении КА с МКС. При этом АСН-М выполнена в виде шести блоков (не считая антенн), соединенных межблочными кабелями. Их суммарная масса с учетом веса кабелей составляет ~8 кг (если бы вся электроника этих блоков была установлена в одном

Глава 7

Управление движением космического аппарата средствами аппаратуры спутниковой навигации

Во всех предыдущих главах АСН рассматривалась как навигационная аппаратура, измеряющая вектор состояния КА. В зависимости от задач КА таким вектором являлся расширенный вектор текущих координат и скорости, к которому при необходимости добавлялось аэродинамическое торможение. Во время коррекции траектории КА для повышения точности формируемого вектора состояния удобно использовать измерения БИНС КА, обеспечивающей интегрирование приращений кажущегося вектора скорости. Если АСН обеспечивала определение ориентации КА, измеряемый вектор состояния КА включал в себя также текущий кватернион ориентации. Для повышения точности формируемого кватерниона удобно использовать измерения БИНС КА, обеспечивающие динамическую фильтрацию угловых измерений АСН.

При сближении двух КА АСН активного КА формирует относительный вектор состояния, включающий векторы относительного положения и относительной скорости, а также кватернион относительной ориентации обоих КА.

Вся формируемая АСН навигационная информация передается в ЦВМ КА, обеспечивающую управление исполнительными органами СУДН. ЦВМ со всей аппаратурой КА обменивается информацией по интерфейсу *MIL-1553*, являясь контроллером, а вся аппаратура, которой управляет ЦВМ, включая АСН, — конечными устройствами. При этом, разработав соответствующее ПО, по команде с Земли можно, например, назначить АСН контроллером системы, исключив ЦВМ из контура управления. В этом случае АСН могла бы осуществлять управление всей аппаратурой СУДН. В результате реализуется так называемый резервный контур управления, который в случае отказа ЦВМ может обеспечить выполнение (хотя бы частичное) задач КА. ЦВМ, являясь основным элементом системы управления КА, имеет высоконадежную аппаратную часть. Как правило, в ЦВМ выполняют три, а иногда четыре резервных контура. Тем не менее отказы ЦВМ на практике случались и приводили к фатальным последствиям. Так, по причине отказа ЦВМ, в 2015 г. был потерян российско-египетский спутник *EgyptSat*. Из-за отказа ЦВМ была потеряна его ориентация, прекратился приток энергии от солнечных батарей, и из-за нехватки времени на анализ отказа и выполнение мероприятий по восстановлению ЦВМ, спутник был потерян. Если бы на *EgyptSat* была предусмотрена возможность перевода управления на резервный контур, то, вероятнее всего, ЦВМ можно было бы восстановить. Поэтому реализация на базе АСН резервного контура управления КА является актуальной задачей.

Глава 8

Описание программных функций библиотеки бортовых навигационных программ

Идея создания библиотеки бортовых навигационных программ появилась в процессе разработки первых систем АСН для МКС, когда при преодолении проблем по быстродействию навигационного процессора приходилось искать нестандартные алгоритмические решения. Одним из первых таких решений была разработка ускоренной модели гравитационного поля Земли 72 порядка, позволившая в ~ 300 раз сократить объем вычислений по сравнению с классическим решением — методом разложения геопотенциала Земли в ряд по сферическим функциям. Потом последовали другие оригинальные решения, которые использовались не только в АСН-М МКС, но и в АСН других изделий. При этом созданная библиотека позволяла формировать новое сложное программное обеспечение, существенно сокращая сроки разработки этого ПО. Она состоит из нескольких разделов, начиная от библиотеки элементарных функций и заканчивая сложными математическими моделями, используемыми для отработки системы. При этом даже представленные элементарные функции в ряде случаев реализуют оригинальные решения, нацеленные на повышение быстродействия.

Для функций, входящих в библиотеку, разработана соответствующая документация, включающая описание интерфейсов, а также неформальное и формальное описание алгоритмов. В настоящее время библиотека находится на стадии формирования. Допуск к ней обеспечен специалистам РКК «Энергия», студентам и аспирантам МГТУ им. Н.Э. Баумана и МФТИ, проходящим обучение и стажировку в РКК «Энергия». В дальнейшем предполагается открыть свободный доступ к ней любым пользователям.

8.1. Библиотека элементарных функций

Библиотека элементарных функций включает ряд функций, реализующих элементарные действия над векторами, матрицами, кватернионами, а также выполняющих взаимные преобразования различных ШВ.

1. *Функция скалярного произведения двух входных векторов \vec{r}_1 и \vec{r}_2 размерностью 3* формирует на выходе скалярное произведение $d = \vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2$.

2. *Функция векторного произведения двух входных векторов \vec{r}_1 и \vec{r}_2 размерностью 3* формирует на выходе трехмерный вектор $\vec{r}_3 = [\vec{r}_1 \times \vec{r}_2]$.

3. *Функция умножения входной матрицы M размером $n \times t$ на входной вектор \vec{r}_1 размерностью t* формирует на выходе выходной вектор \vec{r}_2 размерностью n : $\vec{r}_2 = M\vec{r}_1$.

Заключение

Решение практически всех задач орбитальной космической навигации одними и теми же техническими средствами открывают новые возможности в развитии космической навигации и всей космической техники в целом. С помощью АСН можно проводить коррекцию бортовой шкалы времени КА, определять ориентацию КА, проводить синхронизацию измерений асинхронных АСН, назначать НС на каналы АСН, оценивать ориентацию и угловую скорость КА по заполнению каналов; реализовывать сближение кораблей «Союз» и «Прогресс» с орбитальной станцией, проводить предстартовую подготовку сближения, а также управлять спуском КА с малым аэродинамическим качеством и т. д.

Перечисленные вопросы навигации изучались и ранее, написаны сотни монографий, посвященных различным методам их решения. В вузах студентам читают многочисленные курсы лекций по классическим методам космической навигации. Использование АСН открывает новое направление космической навигации, существенно упрощающее аппаратную реализацию системы и значительно улучшающее ее функциональные и точностные характеристики. Тем не менее подготовка студентов по данному направлению практически отсутствует.

Настоящий курс лекций направлен на подготовку специалистов новой отрасли космической навигации по измерениям от ГСНС, обеспечивающей принципиально новые возможности для решения широкого круга задач управления и навигации КА, направленных на расширение функциональных возможностей, повышение точностных характеристик, уменьшение массы, энергопотребления и стоимости системы, реализующей решение этих задач.

Литература

Основная

Автономная система навигации модернизированных кораблей «Союз» и «Прогресс» / Е.А. Микрин, М.В. Михайлов, И.В. Орловский [и др.] // Сб. тр. XXI Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор». 2013.

Бранец В.Н., Михайлов М.В. Аппаратура спутниковой навигации на существующих и перспективных изделиях РКК «Энергия». Функциональные возможности, технические характеристики // Мат. докл. Международного форума по спутниковой навигации. М., 2007.

Бранец В.Н., Михайлов М.В. Навигационное обеспечение МКС // Сб. тр. X Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2003.

Высокоточный прогноз орбит космических аппаратов, анализ влияния различных возмущающих факторов на движение низкоорбитальных и высокоорбитальных КА / Е.А. Микрин, М.В. Михайлов, С.Н. Рожков [и др.] // Сб. тр. XXI Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2014.

Дишель В.Д., Межеричкий Е.Л., Немкевич В.А. Методология формирования объединенного контура терминального наведения и инерциально-спутниковой корректируемой навигации в системах управления космических средств выведения. Анализ натурных испытаний // Сб. тр. XV Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2008.

Дишель В.Д., Паластин В.Л. Методы навигации и ориентации геостационарных и высокоэллиптических космических аппаратов при использовании БИНС. Корректируемой по кодовым и фазовым измерениям ГЛОНАСС/GPS // Сб. тр. X Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2003.

Марков Ю.Г., Михайлов М.В., Почукаев В.Н. Высокоточный прогноз орбит космического аппарата как результат рационального выбора возмущающих факторов // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 2.

Метод повышения точности и «времени жизни» эфемерид GPS и ГЛОНАСС / Е.А. Микрин, М.В. Михайлов, С.Н. Рожков [и др.] // Сб. тр. XIX Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2012.

Микрин Е.А., Михайлов М.В. Использование спутниковой навигации для обеспечения полета автоматического транспортного корабля ATV к Международной космической станции // Сб. тр. XIII Санкт-Петербургской Между-

народной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2006.

Микрин Е.А., Михайлов М.В. Ориентация перспективных кораблей «Союз» и «Прогресс» по измерениям асинхронных приемников GPS // Сб. тр. XV Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2008.

Микрин Е.А., Михайлов М.В. Прецизионная навигация спутника дистанционного зондирования Земли // V научные чтения памяти М.К. Тихонравова. Королёв, 2004.

Микрин Е.А., Михайлов М.В. Эксплуатация АСН-М МКС, ее характеристики и возможности. Перспективы использования АСН на КА «Союз» и «Прогресс» // Сб. трудов XVI Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2009.

Микрин Е.А., Михайлов М.В., Рожков С.Н. Автономная навигация и сближение КА на лунной орбите // Сб. трудов XVII Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2010.

Михайлов М.В., Федулов Р.В. Определение относительного положения двух КА по сигналам навигационных систем GPS и ГЛОНАСС // Сб. тр. V Международной конференции «Авиация и космонавтика». М., 2006.

Михайлов Н.В. Автономная навигация космических аппаратов при помощи спутниковых радионавигационных систем. СПб.: Политехника, 2014.

Обеспечение надежности работы аппаратуры спутниковой навигации МКС, кораблей «Союз» и «Прогресс» в условиях локальных и глобальных сбоев систем ГЛОНАСС и GPS, значительного сокращения спутниковых группировок / Е.А. Микрин, М.В. Михайлов, С.Н. Рожков, И.А. Краснопольский // Мат. конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014). СПб., 2014.

Результаты лётного эксперимента на МКС по исследованию влияния переотражений на решение задач навигации, ориентации и сближения по измерениям аппаратуры спутниковой навигации / Е.А. Микрин, М.В. Михайлов, С.Н. Рожков, А.С. Семенов // Сб. тр. XVIII Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2011.

Совершенствование бортового математического обеспечения первой инерциально-спутниковой системы навигации и ориентации космических средств выведения. Обобщение результатов серии лётных испытаний системы / В.Д. Дишель, А.К. Быков, В.Г. Сулимов, Н.В. Соколова // Сб. тр. XIII Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2006.

Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000.

Дополнительная

Bamford W., Winternitz L., Hay C. Autonomous GPS Positioning at High Earth Orbits. GPS World, 2006.

International Earth Rotation and Reference Systems Service. URL: <http://www.iers.org>

Murtazin R., Budylov S. Short Rendezvous Missions for Advanced Russian HumanSpacecraft. Acta Astronautica. 2010. no. 67.

Murtazin R., Petrov N. Short Profile for the Human Spacecraft SOYUZ-TMA Rendezvous Mission to the ISS. Acta Astronautica. 2012, no. 77.

Аппазов Р.Ф., Сытин О.Г. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. Москва: Наука, 1987.

Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическими летательными аппаратами. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974.

Бортовое навигационное обеспечение космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Ресурс-ДК» / Г.П. Аншаков, А.И. Мантуров, Я.А. Мостовой [и др.] // Сб. тр. XIII Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2006.

Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1992.

Интегрированная навигационная аппаратура для низкоорбитальных космических аппаратов зондирования Земли / Б.В. Шебшаевич, А.Е. Тюляков, В.Е. Дружинин [и др.] // Сб. тр. X Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2003.

Интерфейсный Контрольный Документ ГЛОНАСС: версия 5.0. 2002. URL: http://www.glonass-center.ru/ICD02_e.pdf

Козлов А.Г. Проектирование космических навигационных систем. Красноярск: НИИ ИПУ, 2000.

Мальшев В.В., Красильщиков М.Н., Карлов В.И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1989.

Мальшев В.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез, управление. М.: Издательство МАИ, 2000.

Мальшев В.В., Федоров А.В. Управление движением спутников космической системы // Сб. трудов II Международной конференции «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». М.: ЦНИИМАШ, 2000.

Марков Ю.Г., Почукаев В.Н. Фундаментальные составляющие параметров вращения Земли в формировании высокоточных систем навигации космических аппаратов // Доклады Академии наук. 2013. № 3.

Мельников Е.К., Смирнов А.И. Метод решения многоцелевой задачи управления движением околоземной космической станции // Космонавтика и ракетостроение. 2009, вып. 2 (55).

Некоторые результаты анализа эксплуатации системы спутниковой навигации на КА «Ресурс-ДК» / Р.Н. Ахметов, А.И. Мантуров, Я.А. Мостовой [и др.] // Сб. тр. XV Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., ЦНИИ «Электроприбор», 2006.

Освоение космического пространства в СССР. 1967–1970 гг. М.: Наука, 1970.

Прецизионная система навигации и управления движением искусственных спутников Земли / Э.В. Гаушус, М.В. Михайлов, Ю.Н. Зыбин, А.В. Антонов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. выпуск «Системы управления», 1/97 (25).

Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990.

Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974.

Скакун И.О. Всемирное координированное время и методы сличения шкал времени // Космонавтика и ракетостроение. 2012. 4(69).

Соловьев Ю.А. Состояние и развитие спутниковых навигационных систем // Научно-технический журнал по проблемам навигации. Новости навигации. 2008. № 2.

Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее применение. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2003.

Соловьев Ю.А. Точность определения относительных координат и синхронных шкал времени объектов при использовании спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника. ИПРЖР. 1998. № 9.

Точные эфемериды IGS Product Availability. URL: http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html

Управление спуском космического аппарата в атмосфере / Э.В. Гаушус, М.В. Михайлов, Ю.Н. Зыбин, А.В. Антонов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. выпуск «Системы управления», 1/97 (25).

Чмых М.К. Спутниковые системы связи и навигации: сб. статей. Красноярск: КГТУ, 1997.

Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993.

Оглавление

Предисловие	5
Список основных сокращений	7
Основные термины и определения	10
Введение	13
Глава 1. Формирование бортовой шкалы времени космического аппарата ...	15
1.1. Системные шкалы времени, связь между ними и форматы представления времени	15
1.2. Методы коррекции бортовой шкалы времени КА от АСН	21
1.3. Точность формирования бортовой шкалы времени при ее коррекции от АСН	22
1.4. Формирование оценки смещения часов АСН относительно системной шкалы времени на высокоорбитальных КА	28
1.5. Управление дрейфом часов АСН	31
Контрольные вопросы	32
Глава 2. Определение ориентации космического аппарата по измерениям аппаратуры спутниковой навигации	33
2.1. Принципы определения ориентации КА по измерениям АСН	34
2.2. Синхронизация измерений асинхронных АСН	42
2.3. Назначение НС на каналы АСН, оценка ориентации и угловой скорости КА по заполнению каналов	46
2.4. Метод раскрытия фазовой неопределенности по одномоментному измерению	49
2.5. Интегральный метод определения ориентации по приращениям интегральной фазы с использованием измерений БИНС	57
2.6. Интегральный метод определения ориентации КА по приращениям первых разностей интегральных фаз с формированием трехмерного вектора ориентации	73
2.7. Определение ориентации КА по одномоментным измерениям АСН при известной начальной оценке ориентации	77
2.8. Комплексование АСН и БИНС. Динамическая фильтрация одномоментных определений ориентации	81
2.9. Раскрытие фазовой неопределенности при различной точности начальной оценки матрицы ориентации	89
2.10. Интегральный метод раскрытия фазовой неопределенности	95
2.11. Определение ориентации по измерениям АСН и БИНС с учетом дрейфа БИНС	101
2.12. Последовательность реализации алгоритмов ориентации при построении ориентации КА	110

2.13. Полетная юстировка АСН	113
2.14. Особенности ориентации по измерениям АСН высокоорбитальных КА.....	122
Контрольные вопросы.....	133
Глава 3. Относительная навигация по измерениям аппаратуры спутниковой навигации при сближении космических аппаратов	134
3.1. Реализация сближения кораблей «Союз» и «Прогресс» с орбитальной станцией	134
3.2. Решение навигационной задачи дальнего сближения по измерениям АСН	143
3.3. Методы решения задачи ближнего сближения по «сырым» измерениям АСН	166
3.4. Динамическая фильтрация полного вектора «сырых» измерений АСН на участке ближнего сближения	173
3.5. Фазовые методы решения задачи относительной навигации на участке причаливания	186
Контрольные вопросы.....	197
Глава 4. Навигация при спуске космических аппаратов в атмосфере	198
4.1. Принцип управления спуском КА с малым аэродинамическим качеством.	198
4.2. Описание стенда математического моделирования работы АСН на участке спуска.....	201
4.3. Исследование видимости НС и уровней GDOP в различных режимах работы АСН. Определение компоновки АСН на СА.....	209
4.4. Обеспечение АСН «горячего» старта.....	222
4.5. Уточнение ориентации СА по измерениям АСН	232
4.6. Подготовка лётного эксперимента на спускаемом аппарате корабля «Союз» с использованием навигационного модуля АСН-К.....	247
Контрольные вопросы.....	250
Глава 5. Навигация средств выведения	251
5.1. АСН РН и РБ для обеспечения телеметрического режима.....	252
5.2. Достоверность измерений АСН	253
5.3. Использование АСН в контуре управления РН.....	255
5.4. Использование АСН на РБ	271
Контрольные вопросы.....	285
Глава 6. Проектирование, разработка и наземные испытания аппаратуры спутниковой навигации космического назначения	286
6.1. Проектирование АСН космического назначения	286
6.2. Этапы и методы отработки программного обеспечения АСН космического назначения.....	297
6.3. Комплексные наземные функциональные испытания АСН.....	308
6.4. Комплексные наземные испытания АСН в составе изделия.....	311
6.5. Лётные испытания АСН.....	313
Контрольные вопросы.....	314

Глава 7. Управление движением космического аппарата средствами аппаратуры спутниковой навигации	315
7.1. Задачи и состав АСН при управлении движением КА	316
7.2. Исследование алгоритма формирования управляющего момента по измерению угловых отклонений КА от заданной системы координат ..	321
Контрольные вопросы.....	336
Глава 8. Описание программных функций библиотеки бортовых навигационных программ	337
8.1. Библиотека элементарных функций	337
8.2. Библиотека функций формирования и преобразования систем координат .	342
8.3. Библиотека функций возмущающих ускорений, действующих на КА	342
8.4. Библиотека функций интегрирования уравнений движения КА	344
8.5. Основные функции функционального программного обеспечения навигационных приемников ГЛОНАСС, GPS	345
8.6. Функции динамической фильтрации измерений АСН	346
8.7. Библиотека функций решения задач ориентации.....	347
8.8. Библиотека функций решения задач сближения	348
8.9. Библиотека функций решения задачи управления РН или РБ	348
Контрольные вопросы.....	349
Заключение	350
Литература	351

Учебное издание

Микрин Евгений Анатольевич
Михайлов Михаил Васильевич

**Ориентация, выведение, сближение
и спуск космических аппаратов
по измерениям от глобальных спутниковых
навигационных систем**

Редактор *К.А. Осипова*
Художник *Э.Ш. Мурадова*
Корректор *Р.В. Царева*
Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*
Компьютерная верстка *Н.Ф. Бердавцевой*

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 26.03.2018. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 29,25. Тираж 100 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
Е.А. Микрина, М.В. Михайлова
«Навигация космических аппаратов по измерениям
от глобальных спутниковых навигационных систем»**



Рассмотрены вопросы проектирования и разработки сложных многофункциональных систем космической навигации на базе глобальных спутниковых навигационных систем для широкого класса низкоорбитальных, высокоорбитальных и высокоэллиптических космических аппаратов, а также круг вопросов, связанных с созданием бортовых средств навигации для автономного определения орбиты космического аппарата.

Для студентов и аспирантов авиа- и ракетостроительных специальностей высших технических учебных заведений, научных работников и инженеров, занимающихся разработкой, проектированием и испытаниями навигационных систем космических аппаратов.

Год издания: 2017

Тип издания: Учебное пособие

Объем: 344 стр. / 28,11 п.л.

Формат: 70x100/16

ISBN: 978-5-7038-4777-0

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

e-mail: press@baumanpress.ru

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
Н.П. Деменкова, Е.А. Микрина
«Управление в технических системах»**



Изложена теория автоматического управления в применении к техническим системам. Рассмотрены характерные особенности систем управления, их математическое описание, синтез корректирующих устройств, а также проектирование оптимальных и адаптивных систем управления.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Управление в технических системах» и изучающих дисциплины «Основы теории управления», «Теория автоматического управления», «Управление в технических системах», «Основы автоматики и системы автоматического управления» и др.

Учебник может быть полезен для инженерно-технических работников предприятий, проектных организаций и институтов, занимающихся вопросами автоматизации и управления производственными процессами и техническими объектами.

Год издания: 2017

Тип издания: Учебник

Объем: 456 стр. / 37,05 п.л.

Формат: 70x100/16

ISBN: 978-5-7038-4661-2

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

e-mail: press@baumanpress.ru