

Управление в технических системах





Е.А. Микрин, М.В. Михайлов

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



МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА
2017

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. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — 357, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4778-7

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 978-5-7038-4778-7

© 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 приемысчислительный
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
АТV	— 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

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