

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
Список сокращений	10
Введение	13
<i>Глава 1.</i> Основы навигации в околоземном пространстве	16
1.1. Планета Земля	16
1.2. Системы координат	23
1.3. Преобразования координат	26
1.3.1. Преобразование из географической в геоцентрическую СК	26
1.3.2. Преобразование из геоцентрической в географическую СК	27
1.3.3. Преобразование из геоцентрической в локальную прямоугольную СК	29
1.3.4. Преобразование из локальной прямо- угольной в геоцентрическую СК	29
1.3.5. Преобразование из локальной прямо- угольной в локальную сферическую СК . .	30
1.3.6. Преобразование из локальной сфериче- ской в локальную прямоугольную СК . . .	30
1.4. Время	30
1.4.1. Небесная сфера, ее основные элементы и системы небесных координат	31
1.4.2. Звездное время и звездные сутки	36
1.4.3. Солнце и солнечное время	37
1.4.4. Системы счета времени	43
1.4.5. Эталоны времени, шкалы времени, Всемирное координированное время	45
1.4.6. Юлианские дни	48
1.5. Методы определения местоположения объектов	49
1.5.1. Метод счисления пути	50
1.5.2. Позиционный метод	50
1.5.3. Обзорно-сравнительный метод	51
1.6. Физические принципы радионавигации	51
Контрольные вопросы	54

<i>Глава 2.</i> Влияние околоземного пространства на работу РНС	56
2.1. Дальность действия РНС в свободном пространстве	56
2.2. Особенности распространения радиоволн в навигационном пространстве	57
2.2.1. Влияние поверхности Земли	58
2.2.2. Влияние атмосферы Земли	70
2.2.3. Затухание радиоволн в атмосфере	79
2.2.4. Влияние ионосферы Земли	84
2.2.5. Расчет длины оптического пути при прохождении сигнала через сферически-слоистую атмосферу	90
Контрольные вопросы	97
<i>Глава 3.</i> Основы статистической теории обработки сигналов в радионавигационных системах	100
3.1. Обнаружение сигналов	100
3.1.1. Обнаружение полностью известного сигнала на фоне белого шума	107
3.1.2. Согласованный фильтр	112
3.1.3. Обнаружение сигналов со случайными параметрами	115
3.1.4. Обнаружитель сигнала со случайной фазой	117
3.1.5. Обнаружитель сигнала со случайными фазой и амплитудой	122
3.1.6. Обнаружение последовательностей импульсов	125
3.1.7. Обнаружение когерентной, медленно флюкутирующей пачки	127
3.1.8. Обнаружение некогерентной, медленно флюкутирующей пачки	131
3.1.9. Обнаружение некогерентной, быстро флюкутирующей пачки	135
3.2. Оценивание неизвестных параметров сигналов	137
3.2.1. Оценки при квадратической функции потерь (МСКО-оценки)	140
3.2.2. Оценки при простой функции потерь (МАП-оценки)	141
3.2.3. Оценки максимального правдоподобия (МП-оценки)	141
3.2.4. Оценивание методом наименьших квадратов (МНК-оценки)	143
3.2.5. Показатели качества оценок	146
3.2.6. Примеры оценивания параметров сигналов	150

3.2.7. Обнаружение сигнала с неизвестными параметрами	160
3.3. Фильтрация случайных процессов	163
3.3.1. Основные уравнения рекурсивной фильтрации	164
3.3.2. Фильтр Калмана	166
3.3.3. Расширенный фильтр Калмана	169
3.3.4. Оценка случайной постоянной величины	171
3.3.5. Пример использования фильтров Калмана для сглаживания трека цели	174
3.3.6. Пример использования фильтра Калмана для комплексирования измерителей	180
Контрольные вопросы	185
<i>Глава 4.</i> Методы измерения дальности в радионавигации	188
4.1. Фазовый метод измерения дальности	189
4.2. Частотный метод измерения дальности	195
4.3. Временной (импульсный) метод измерения дальности	201
Контрольные вопросы	205
<i>Глава 5.</i> Методы измерения скорости в радионавигации	207
5.1. Метод измерения скорости на основе эффекта Доплера	207
5.2. Корреляционный метод измерения скорости	211
Контрольные вопросы	214
<i>Глава 6.</i> Методы углометрии в радионавигации	215
6.1. Одноканальные методы углометрии	216
6.1.1. Метод максимума	216
6.1.2. Метод минимума	219
6.2. Многоканальные методы углометрии	221
6.2.1. Фазовый метод	221
6.2.2. Амплитудный метод	225
6.2.3. Доплеровский метод	227
6.2.4. Дифференциально-фазовый метод	231
Контрольные вопросы	234
<i>Глава 7.</i> Применение радиотехнических методов для решения навигационных задач	235
7.1. Поверхность положения	235
7.2. Позиционные способы определения МП	237
7.3. Ошибки определения МП объектов	239
7.3.1. Ошибки смещения ПП	239
7.3.2. Ошибки смещения линии положения	241
7.3.3. Ошибки измерения МП	243

7.3.4. Зона обслуживания угломерно- дальномерной системы	246
Контрольные вопросы	247
Глава 8. Радионавигационные системы	248
8.1. Система спутниковой навигации <i>GPS</i>	248
8.1.1. Система координат и исчисление време- ни СНС <i>GPS</i>	249
8.1.2. Структура СНС <i>GPS</i>	250
8.1.3. Сигналы СНС <i>GPS</i>	252
8.1.4. Аппаратура пользователя СНС <i>GPS</i>	258
8.1.5. Оценка координат пользователя в СНС <i>GPS</i>	263
8.1.6. Оценка вектора скорости пользователя в СНС <i>GPS</i>	268
8.1.7. Факторы, влияющие на точность СНС <i>GPS</i>	270
8.1.8. Дифференциальный режим	274
8.1.9. Информационные технологии, использующие данные СНС	276
8.2. Системы мультилатерации	281
8.2.1. Структура системы МЛАТ	282
8.2.2. Сигналы систем МЛАТ	284
8.2.3. Потенциальная точность оценки коорди- нат пользователя в системах МЛАТ	292
8.2.4. Оценки координат пользователя в систе- мах МЛАТ	295
8.2.5. Компенсация ошибок тропосферного распространения при оценке координат в широкозонных системах МЛАТ	301
8.3. Дальномерная система <i>DME</i>	304
8.3.1. Сигналы системы <i>DME</i>	306
8.3.2. Радиомаяк <i>DME</i>	311
8.3.3. Запросчик <i>DME</i>	314
8.3.4. Точность системы <i>DME</i>	316
8.4. Радиомаяки <i>VOR</i> и <i>DVOR</i>	321
8.4.1. Сигналы и функциональная схема радиомаяка <i>VOR</i>	321
8.4.2. Особенности формирования сигналов радиомаяка <i>DVOR</i>	326
8.4.3. Бортовое оборудование радиомаяков <i>VOR</i> и <i>DVOR</i>	329
8.4.4. Точность оценки азимута по сигналам радиомаяков <i>VOR</i> и <i>DVOR</i>	330
8.5. Система посадки метрового диапазона <i>ILS</i>	331

8.5.1. Состав и излучаемые сигналы системы посадки <i>ILS</i>	333
8.5.2. Бортовое оборудование СП <i>ILS</i>	337
8.5.3. Факторы, влияющие на точность системы посадки <i>ILS</i>	340
8.6. Система посадки сантиметрового диапазона <i>MLS</i>	341
8.6.1. Задачи, состав и размещение системы посадки <i>MLS</i>	342
8.6.2. Технология <i>TRSB</i>	345
8.6.3. Форматы излучаемых сигналов системы посадки <i>MLS</i>	348
8.6.4. Точность системы посадки <i>MLS</i>	352
8.7. Радиовысотомеры	353
8.7.1. Прямоотсчетный радиовысотомер	356
8.7.2. Следящий радиовысотомер	359
8.7.3. Факторы, влияющие на точность радиовысотомеров	368
Контрольные вопросы	373
Задачи	376
Список литературы	385
Приложения к главам	387
<i>Глава А.</i> Вероятностный анализ обнаружителей сигналов	389
А.1. Совместная плотность распределения амплитуды и фазы сигнала	389
А.2. Вероятностный анализ обнаружителя сигнала со случайной фазой	391
А.3. Вероятностный анализ обнаружителя сигнала со случайными фазой и амплитудой	394
А.4. Вероятностный анализ обнаружителей последова- тельности импульсов	395
<i>Глава Б.</i> Потенциальная точность совместного оценивания времени задержки и доплеровской частоты сигнала	398
<i>Глава В.</i> Марковские случайные процессы	402
<i>Глава Г.</i> Основные уравнения фильтрации	414
Г.1. Вывод основных уравнений фильтра Калмана	414
Г.2. Вывод основных уравнений расширенного фильтра Калмана	417
<i>Глава Д.</i> Обнаружение и оценка положения переднего фронта импульса	419
<i>Глава Е.</i> Кеплеровы элементы орбиты	427

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технические средства радиолокации, радионавигации и радиосвязи совместно образуют группу радиотехнических систем извлечения информации. Их объединяет то, что носителем полезной информации является радиосигнал, прием которого всегда происходит на фоне помех и шумов — случайных процессов, которые делают невозможным безошибочное извлечение содержащейся в радиосигнале информации. Теоретической базой для разработки оптимальных методов обработки принимаемых сигналов, которые позволяют минимизировать информационные потери, является статистическая теория радиотехнических систем. Вместе с тем для каждой из трех перечисленных групп существуют особенности, которые вызваны их целевыми различиями. Эти различия необходимо учитывать при разработке и эксплуатации перечисленных технических средств.

Настоящий учебник посвящен рассмотрению теоретических положений, составляющих основу для функционирования радионавигационных систем. Главное внимание уделяется физическим принципам работы современного радионавигационного оборудования и статистическим методам измерения навигационных элементов движения объектов навигации радиотехническими средствами. Учебник написан на основе материалов лекций по курсам «Статистическая теория радиотехнических систем», «Основы радионавигации», «Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств», которые автор читает для студентов и аспирантов факультета радиотехники, электроники и связи в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения. Кроме того, в учебнике использованы те материалы, которые были необходимы автору в его практической работе.

те по синтезу и анализу алгоритмов обработки радиосигналов в радионавигационных системах.

Целевой аудиторией предлагаемого учебника являются студенты и аспиранты радиотехнических специальностей высших учебных заведений. Книга также может быть полезна широкому кругу специалистов, занимающихся вопросами разработки средств радионавигации и радиолокации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗН	автоматическое зависимое наблюдение
АСУВД	автоматизированная система управления воздушным движением
АРП	автоматический радиопеленгатор
АРУ	автоматическая регулировка усиления
АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
БИХ	бесконечная импульсная характеристика
ВАРУ	временная автоматическая регулировка усиления
ВПП	взлетно-посадочная полоса
ВРЛС	вторичный радиолокатор
ВС	воздушное судно
ГРМ	глиссадный радиомаяк
ГФ	геометрический фактор
ДН	диаграмма направленности антенны
ДИСС	доплеровский измеритель скорости и угла сноса
ИНС	инерциальная навигационная система
ИХ	импульсная характеристика
КИ	корреляционный интеграл
КИСС	корреляционный измеритель скорости и угла сноса
КИХ	конечная импульсная характеристика
КМ	корреляционная матрица
КП	коэффициент передачи
КРМ	курсовый радиомаяк
КУ	коэффициент усиления антенны
КФ	корреляционная функция
ЛП	линия положения
МАП	максимум апостериорной плотности
МПЧ	максимальная принимаемая частота
МП	местоположение
МПСН	многопозиционная система навигации

МРМ	маркерный радиомаяк
МСП	марковский случайный процесс
МСКО	минимум среднеквадратической ошибки
НИСЗ	навигационный искусственный спутник Земли
НСФД	наземная система функционального дополнения
ОС	опорный сигнал
ОСШ	отношение сигнал/шум
ПП	поверхность положения
ППФ	полосно-пропускающий фильтр
ПРВ	плотность распределения вероятностей
ПРД	передатчик
ПРМ	приемник
ПХ	пеленгационная характеристика
РВ	радиовысотомер
РГМ	разность глубины модуляции
РМ	радиомаяк
РНП	радионавигационный параметр
РНС	радионавигационная система
РНТ	радионавигационная точка
СБ	сигнал биений
СГП	система геодезических параметров
СЕВ	система единого времени
СК	система координат
СКО	среднеквадратическое отклонение
СМЛ	система мультилатерации
СНС	спутниковая навигационная система
ССФД	спутниковая система функционального дополнения
СП	система посадки
СПМ	спектральная плотность мощности
СПС	система предупреждения столкновений
СТО	стандартное отклонение
СФ	согласованный фильтр
УНЧ	усилитель низкой частоты
ФАПЧ	фазовая автоматическая подстройка частоты
ФВЧ	фильтр высоких частот
ФНЧ	фильтр низких частот
ФП	функция потерь
ФПП	функция правдоподобия

ФЧХ	фазо-частотная характеристика
ЧХ	частотная характеристика
ЭПР	эффективная площадь рассеяния
ADS	Automatic Dependent Surveillance
A-S	Anti Spoofing
GA	Ground Antenna
GBAS	Ground Based Augmentation System
IAT	International Atomic Time
ICAO	International Civil Aviation Organization
ITU	International Telecommunication Union
GPS	Global Positioning System
MCS	Master Control Station
MLAT	Multilateration
CMN	Control Motion Noise
MS	Monitoring Station
P	Precision
PFE	Path Following Error
PPS	Precise Positioning Service
SA	Selective Availability
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SPS	Standard Positioning Service
TCAS	Traffic Collision Avoidance System
WAM	Wide Area Multilateration

ВВЕДЕНИЕ

С древнейших времен человек задавал себе два вопроса: «Где я?» и «Какой путь мне выбрать?» В поисках ответа на эти вопросы возникла навигация — одна из древнейших наук, вобравшая в себя опыт многих поколений по ориентации человека на планете Земля. *Навигация* (от лат. *navis* — корабль и *agere* — управлять) — наука о способах выбора пути и методах вождения судов, летательных аппаратов, космических аппаратов и иных средств передвижения. *Основными задачами навигации* являются определение местоположения объекта навигации и нахождение оптимального маршрута (траектории) движения. При этом оптимальность маршрута понимается как требование обеспечения максимальной безопасности и экономичности вывода объекта в заданную точку пространства в определенный момент времени с установленной точностью.

Для достижения поставленной задачи в навигации используются различные методы. Поскольку первоначальной областью применения навигации было мореходство, наиболее древний метод этой науки — навигация по звездам, или *астронавигация*. Помимо астрономических существуют аэрометрические, магнитные, инерциальные и радиотехнические методы навигации. Последние являются наиболее современными и перспективными для решения навигационных задач в авиации. Именно эти методы и их использование в авиации рассматриваются в данной книге.

Радионавигация (от *радио...* и *навигация*) — определение местоположения в пространстве, скорости, направления и траектории движения судов, летательных аппаратов, управляемых снарядов и других движущихся объектов при помощи радиотехнических методов и средств¹. Основной задачей

¹ Новый энциклопедический словарь. — М.: Большая Российская энциклопедия: РИПОЛ классик, 2007.

радионавигации является определение местоположения объекта в околоземном пространстве и оптимальной траектории его движения от начального до конечного пунктов маршрута. Под *местоположением* (МП) объекта понимается точка пространства, в которой в данный момент времени находится его центр массы. Поскольку основное внимание в настоящем учебнике будет уделено авиационной радионавигации, то объектом в нашем случае будет *воздушное судно* (ВС). Скалярные величины, характеризующие пространственное местоположение и вектор скорости ВС, называются *навигационными элементами движения*. Измерение навигационных элементов (пространственных координат и их производных по времени) является главной задачей, стоящей перед радионавигационными системами и устройствами.

Для измерения навигационных элементов движения в радионавигации используются радионавигационные системы. *Радионавигационными системами* (РНС) называются комплексы радиотехнических средств извлечения информации, в которых местоположение объекта определяется на основе излучения, приема и обработки радиосигналов. Радионавигационные системы являются наиболее универсальными источниками информации о текущих координатах и скорости ВС. Они позволяют обеспечить высокую надежность и точность самолетовождения в различных метеоусловиях, в любое время года, в любое время суток и в любой точке земного шара.

Настоящий учебник посвящен рассмотрению теоретических положений, составляющих основу для функционирования радионавигационных систем. Главное внимание уделяется физическим принципам работы современного радионавигационного оборудования и статистическим методам измерения навигационных элементов движения объектов навигации радиотехническими средствами.

В главе 1 кратко изложены важные для радионавигации положения геодезии, астрономии и метрологии — трех наук, которые положены в основу навигации. Дан краткий анализ методов решения основной задачи радионавигации. В главе также вводятся основные понятия и раскрыты основные физические принципы радионавигации.

В главе 2 дан вывод основного уравнения радионавигации, позволяющего рассчитать мощность принятого радионавигационного сигнала в свободном пространстве. В главе также дан анализ физических явлений, возникающих в канале распространения сигналов, и их влияния на дальность действия радионавигационных систем.

Глава 3 посвящена вопросам оптимальной обработки сигналов в радионавигационных системах. Рассмотрены методы синтеза и анализа оптимальных правил обнаружения сигналов, оценки неизвестных параметров сигналов, а также основы теории фильтрации случайных процессов.

В главах 4, 5 и 6 рассматриваются методы измерения дальности, угловых координат и скорости, которые применяются в радионавигационных системах.

В главе 7 решается задача вычисления ошибки определения местоположения ВС при условии, что пространственные координаты ВС — дальность и угловые координаты — оценены с ошибками. В главе определено понятие рабочей зоны РНС и геометрического фактора — основных параметров, характеризующих точность многопозиционных РНС.

В главе 8 рассмотрены принципы построения и функционирования различных РНС, которые в настоящее время применяются в гражданской авиации.

Для контроля качества освоения материала в учебнике включены задачи, при решении которых необходимо использовать сведения из различных глав. В список литературы включены работы, которые необходимы для более широкого охвата теории радионавигации. Многие задачи и сведения из теории, которые важны для понимания методов обработки сигналов в радионавигационных системах, вынесены в Приложения.

Глава 1

ОСНОВЫ НАВИГАЦИИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Навигация в околоземном пространстве неразрывно связана с необходимостью учета реальной формы и размеров нашей планеты, измерением времени, оценкой длин и углов, отображением маршрутов движения на картах. Эти задачи решают астрономия, геодезия и метрология. *Астрономия* (от др.-греч. *ἀστρο* — звезда и *νόμος* — закон) — наука о строении и развитии космических тел, образуемых ими систем и Вселенной в целом¹. *Геодезия* (от греч. *γῆ* — земля и *διάζω* — разделяю) — система наук об определении формы и размеров Земли и об измерениях на земной поверхности для отображения ее на планах и картах². *Метрология* (от др.-греч. *μέτρον* — мера и *λόγος* — суждение) — наука об измерениях, методах достижения их единства и требуемой точности³. Методы астрономии, геодезии и метрологии нашли широкое применение в навигации. Поэтому настоящая глава посвящена краткому изложению важных для радионавигации положений перечисленных наук.

1.1. ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

Определить местоположение точки в околоземном пространстве, а также измерить расстояние между двумя пунктами или угол между двумя линиями возможно только в том

¹Новый энциклопедический словарь. — М.: Большая Российская энциклопедия: РИПОЛ классик, 2007.

²Там же.

³Там же.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru