



Специалисты радиозлектронного комплекса уже успели оценить серию книг «Мир радиозлектроники» за тщательный отбор научной и технической литературы по передовым направлениям развития науки и технологий радиозлектроники. Публикуемые в серии книги позволяют поддерживать современный уровень знаний, способствуя научно-техническому прогрессу в радиозлектронной промышленности, сокращению технологического отставания и подготовке необходимых кадров.

*Директор Департамента радиозлектронной промышленности
Минпромторга РФ
А.С. Якунин*



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Якунин Александр Сергеевич, директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ – председатель редсовета

Члены совета:

Авдонин Борис Николаевич, ген. директор ОАО ЦНИИ «Электроника», д.т.н., профессор, г. Москва

Акопян Иосиф Григорьевич, ОАО «МНИИ «Агат», д.т.н., профессор, г. Москва

Анцев Георгий Владимирович, ген. директор ОАО «НПП «Радар ММС», г. Санкт-Петербург

Белый Юрий Иванович, ген. директор НИИП им. В.В. Тихомирова МО, г. Жуковский

Беккиев Азрет Юсупович, ген. директор ОАО «Концерн «Созвездие», д.т.н., профессор, г. Воронеж

Боев Сергей Федотович, ген. директор ОАО «РТИ», д.э.н., профессор, г. Москва

Борисов Юрий Иванович, заместитель Министра обороны РФ, д.т.н., профессор, г. Москва

Букашкин Сергей Анатольевич, ген. директор ОАО «Концерн «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва

Бушуев Николай Александрович, ген. директор ОАО «НПП «Алмаз», д.э.н., профессор, к.ф.-м.н., г. Саратов

Васильев Андрей Георгиевич, д.ф.-м.н., профессор, г. Москва

Верба Владимир Степанович, ген. директор ОАО «Концерн радиостроения «Вега», д.т.н., профессор, г. Москва

Верник Петр Аркадьевич, ген. директор компании «Золотой Шар», г. Москва

Вилкова Надежда Николаевна, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Гуляев Юрий Васильевич, директор института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, академик РАН, г. Москва

Козлов Геннадий Викторович, ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», д.т.н., профессор, г. Москва

Комяков Алексей Владимирович, ген. директор ОАО «НПП «Полет» г. Нижний Новгород

Красников Геннадий Яковлевич, ген. директор ОАО «НИИМЭ», академик РАН, г. Зеленоград

Мальцев Петр Павлович, директор Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

Меньшиков Владислав Владимирович, ген. директор ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», г. Москва

Минаев Владимир Николаевич, ген. директор ОАО «Системы управления», д.т.н., профессор, г. Москва

Муравьев Сергей Алексеевич, советник директора Департамента Радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, к.т.н., с.н.с., г. Москва

Немудров Владимир Георгиевич, директор ФГУП «НИИ микроэлектронной аппаратуры «Прогресс», д.т.н., профессор, г. Москва

Попов Владимир Васильевич, ген. директор ОАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург

Сигов Александр Сергеевич, ректор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета), академик РАН, г. Москва

Турилов Валерий Александрович, ген. директор ОАО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга

Федоров Игорь Борисович, президент Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана, академик РАН, г. Москва

Чаплыгин Юрий Александрович, ректор Московского государственного института электронной техники (ТУ МИЭТ), чл.-корр. РАН, г. Зеленоград

Шахнович Илья Владимирович, шеф-редактор РИЦ «Техносфера», г. Москва

Шубарев Валерий Антонович, ген. директор ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург



МИР радиоэлектроники

Методы спутникового
и наземного
позиционирования.
Перспективы развития
технологий обработки
сигналов

Под редакцией
Д. Дардари, Э. Фаллетти,
М. Луизе

Перевод с английского
Е.Б. Махияновой
под редакцией
к.т.н. В.А. Турилова

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2012

УДК 629.78.072+621.396.93

ББК 32.95+32.88

M54

M54 Методы спутникового и наземного позиционирования.

Перспективы развития технологий обработки сигналов

Под ред. Д. Дардари, Э. Фаллетти, М. Луизе

Москва: Техносфера, 2012. — 528 с., ISBN 978-5-94836-338-7

Книга содержит обзор последних результатов научных исследований в области обработки сигналов для определения местоположения и навигации, в ней впервые объединены спутниковое и наземное позиционирование. В обзоре рассматриваются как «классические» технологии позиционирования с помощью спутниковых систем, так и новые темы: нахождение конечных пределов точности систем позиционирования, прямое позиционирование, методы оптимального сочетания измерений на основе радиосигналов и сигналов с различных датчиков, суперточная дальнометрия в закрытых помещениях с использованием сигналов с ультраширокой полосой пропускания и т.д. Книга написана на основе работ, проводимых в европейской сети передового научного опыта в области беспроводной связи NEWCOM++.

Книга послужит справочным пособием для всех, кого интересуют позиционирование и навигация, и вызовет значительный научный и технический интерес ученых и инженеров, работающих в данной области.

УДК 629.78.072+621.396.93

ББК 32.95+32.88

This edition of **SATELLITE AND TERRESTRIAL RADIO POSITIONING TECHNIQUES, A SIGNAL PROCESSING PERSPECTIVE** by Davide Dardari, Marco Luise & Emanuela Falletti published by arrangement with **ELSEVIER LIMITED** of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK

Это издание книги «Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов» Дэвида Дардари, Марко Луизе и Эмануэлы Фаллетти публикуется по договоренности с Элзевьер Лимитед по адресу: (Лэнгфорд Лейн, Кидлингтон, Оксфорд, OX5 1 ГБ, Великобритания).

Satellite and Terrestrial
Radio Positioning
Techniques
A Signal Processing Perspective

Edited by

Davide Dardari
Emanuela Falletti
Marco Luise



AMSTERDAM • BROOKLIN • HEBELBERG • LONDON
NEW YORK • OXFORD • PARIS • SAN DIEGO
SAN FRANCISCO • SYDNEY • TORONTO
Authorized Print is an imprint of Elsevier



© 2012, Elsevier Ltd. All rights reserved.

© 2012, ЗАО «РИЦ «Техносфера», перевод на русский язык,
оригинал-макет, оформление.

ISBN 978-5-94836-338-7

ISBN 978-0-12-382084-6 (англ.)

Содержание

Предисловие редактора перевода.	9
Предисловие.	11
Введение	12
Благодарности	17
Сокращения и аббревиатуры.	18
Глава 1. Введение	29
1.1. Основы позиционирования с помощью беспроводных устройств	29
1.1.1. Общие вопросы и приложения	29
1.1.2. Классификация беспроводных систем позиционирования	31
1.1.3. Показатели производительности.	38
1.2. Системы позиционирования и навигации	39
1.2.1. Спутниковые системы	42
1.2.2. Системы функционального дополнения GNSS	44
1.2.3. Наземные сетевые системы	45
1.3. Применение технологий обработки сигналов в позиционировании и навигации	50
1.3.1. Параметрические статистические методы	51
1.3.2. Непараметрические статистические методы	52
1.3.3. Негеометрические методы	52
1.3.4. Дополнительные инструменты обработки сигналов.	53
Литература	55
Глава 2. Спутниковые навигационные системы.	57
2.1. Глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS)	57
2.1.1. Система глобального позиционирования (GPS)	57
2.1.2. Galileo	65
2.1.3. ГЛОНАСС.	76
2.1.4. Compass/Beidou и региональные GNSS.	80
2.2. Приемники глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS-приемники)	83
2.2.1. Общая архитектура	83
2.2.2. Прием сигнала.	86
2.2.3. Отслеживание сигнала	89
2.2.4. Обработка навигационных данных	96
2.2.5. Источники ошибок в измерении псевдодалности.	100
2.3. Дополнительные и вспомогательные GNSS	102
2.3.1. Дифференциальная GPS	104
2.3.2. Спутниковые системы функционального дополнения	105

2.3.3. Псевдоспутники GNSS	106
2.3.4. Сетевая RTK	107
2.3.5. Вспомогательные GNSS (AGNSS)	108
Литература	115
Глава 3. Наземное сетевое позиционирование и навигация.	118
3.1. Основы методов позиционирования и навигации в наземных сетях	119
3.1.1. Оценка параметров сигнала, связанных с позицией.	119
3.1.2. Методы оценки местоположения	125
3.1.3. Источники ошибок позиционирования.	136
3.2. Позиционирование в сотовых сетях.	148
3.2.1. Методы позиционирования и навигации	149
3.3. Позиционирование в беспроводных локальных сетях.	154
3.3.1. Архитектура WLAN	155
3.3.2. Стандарты IEEE 802.11a/b/g.	157
3.3.3. Методы позиционирования и навигации	158
3.4. Позиционирование в беспроводных сенсорных сетях.	164
3.4.1. Физический уровень WSN	165
3.4.2. Определение параметров позиции с использованием сигнала UWB.	172
3.4.3. Позиционирование в WSN.	185
Литература	200
Глава 4. Основные ограничения точности позиционирования беспроводных устройств	210
4.1. Пределы точности оценки параметров позиционирования	210
4.1.1. Основные ограничения дальнометрии по TOA для UWB-сигналов	212
4.2. Дисперсия предела Крамера—Рао	217
4.2.1. Пределы Крамера—Рао для оценки TOA UWB многолучевого канала.	218
4.2.2. CRB для оценки многолучевого UWB-канала: влияние перекрытия импульсов.	221
4.3. Вариации предела Зив—Закаи	229
4.3.1. Модели UWB-сигналов и каналов	229
4.3.2. Вывод нижнего предела Зив—Закаи	231
4.3.3. Численные результаты при наличии многолучевости.	233
4.4. Новые алгоритмы позиционирования и соответствующие пределы.	235
4.4.1. Теоретические пределы прямой оценки позиции в GNSS	236
4.4.2. Теоретические пределы производительности при совместном позиционировании	253
4.4.3. Пределы оценки TOA при наличии помех	258
Литература	263

Глава 5. Инновационные методы обработки сигналов при беспроводном позиционировании	267
5.1. Передовые методы UWB-позиционирования	268
5.1.1. Оценка TOA в частотной области	268
5.1.2. Совместная оценка дальности и направления прихода сигнала	279
5.1.3. Оценка TOA при наличии помех	289
5.1.4. Надежные методы оценки TOA в условиях NLOS	292
5.2. MIMO-системы позиционирования	298
5.2.1. CRB совместной оценки TOA и AOA в системах MIMO	299
5.2.2. Практическая оценка дальности в системах SIMO	301
5.3. Расширенные геометрические методы позиционирования	305
5.3.1. Распределенная оценка граничной ошибки	306
5.3.2. Алгоритмы проекции на выпуклые множества (POCS)	313
5.4. Совместное позиционирование	327
5.4.1. Введение в совместное позиционирование	329
5.4.2. Совместная оценка методом LS	332
5.4.3. Совместная POCS	337
5.4.4. Позиционирование с помощью активных и пассивных якорей	345
5.4.5. Распределенное позиционирование на основе распространения доверия	351
5.5. Когнитивное позиционирование для когнитивных радиотерминалов	363
5.5.1. Когнитивная оценка TOA	364
5.5.2. Дальномерный сигнал с фильтр-банком и несколькими несущими	368
5.5.3. Когнитивные пределы и алгоритмы для сигналов с несколькими несущими	371
Литература	371
Глава 6. Обработка сигналов в гибридных системах	388
6.1. Введение в байесовскую фильтрацию для использования в позиционировании и мониторинге перемещения	389
6.1.1. Байесовское доверие	390
6.1.2. Динамические модели	393
6.1.3. Общая структура байесовского фильтра	393
6.1.4. Фильтр Калмана и его производные	397
6.1.5. Фракционные фильтры	407
6.2. Гибридное наземное позиционирование на основе измерений TOA, TDOA и AOA	417
6.3. Гибридное позиционирование с помощью GNSS и инерциальных систем	422
6.3.1. Блоки инерциальных датчиков и инерциальная навигация	423

6.3.2. Классическая интеграция GNSS-приемника с инерциальными датчиками	427
6.3.3. Байесовская прямая оценка позиции с использованием информации инерциального устройства	432
6.4. Гибридное позиционирование на основе GNSS и одноранговых наземных сигналов	452
6.4.1. Гибридное распределенное взвешенное многомерное масштабирование	452
Литература	462
Глава 7. Обработка сигналов для представления в виде данных для практического использования	467
7.1. Результаты теста, проведенного в NEWCOM++, Болонья	469
7.1.1. Установка оборудования	469
7.1.2. Основные сценарии экспериментов	472
7.2. Экспериментальные данные применения алгоритмов обработки сигналов	477
7.2.1. Гибридизация радиоизмерений ускорения с измерениями ускорения с помощью инерционных устройств	477
7.2.2. Фильтры EKF и SIR-PF для гибридной наземной навигации.	478
7.2.3. Измерения в условиях NLOS: сравнение результатов работы EKF, кубатурного PF и фракционной фильтрации по стоимости при отслеживании смещения	483
7.2.4. Сравнение экспериментальных результатов в условиях распространения LOS и NLOS	491
7.3. Радиосвязь с программируемыми параметрами: технология для разработки и тестирования улучшенных терминалов позиционирования	495
7.3.1. Концепции программируемой радиосвязи	496
7.3.2. Технология SDR в позиционировании	497
Литература	507
Предметный указатель	509

Предисловие редактора перевода

Последние годы характеризуются значительными успехами в области навигационных технологий и расширением сфер их применения. Развитие навигационных технологий и навигационной аппаратуры потребителя оказало огромное влияние на повседневную деятельность человека, обеспечило предоставление новых сервисов в традиционных областях деятельности, таких как транспорт, геодезия и картография, изыскательские работы, природоохранные мероприятия и многих других.

Сфера применения навигационной аппаратуры потребителя постоянно расширяется, охватывая даже такие нетрадиционные области, как раннее предупреждение о возможных авариях на гидротехнических сооружениях, прогнозирование оползней и осей береговой линии и горных массивов.

Таким образом, влияние навигационных технологий на человеческое сообщество в последние годы существенно выросло.

Несомненно, наибольшее влияние на навигационные технологии в последние десятилетия оказало активное развитие глобальных навигационных спутниковых систем — GPS, ГЛОНАСС и др. В то же время известные недостатки спутниковой навигации стимулировали развитие альтернативных методов определения местоположения. Успехи альтернативных методов навигации обуславливались, в первую очередь, достижениями в электронике, радиотехнике и технологиях МЭМС.

В то же время научные и технические публикации по навигации, за редким исключением, носят узконаправленный специализированный характер.

Практически отсутствуют системные публикации, рассматривающие различные методы навигации как совокупность взаимодополняющих технологий решения общей задачи.

Представляемая читателям книга известных специалистов Д. Дардари, Э. Фаллетти и М. Луизе в значительной степени заполняет данный пробел. Уже в первой главе, помимо общего обзора и систематизации, выполнен общий анализ подходов и обзор основных проблем. Изложение ведется на доступном, но при этом достаточно высоком, выверенном авторами научном уровне. Последующие главы представляемой монографии содержат достаточно подробное и корректное изложение как известных научных подходов, так и оригинальных результатов, полученных собственно авторами.

Уровень детализации описания методов, изложенных в монографии, позволяет применить их в конкретных инженерных разработках навигационной аппаратуры потребителей. При этом в книге достаточно хорошо изложены вопросы комплексного использования различных методов навигации за ис-

ключением методов определения местоположения удаленных объектов. Что, впрочем, является достаточно специфической задачей, редко используемой в широком спектре навигационной аппаратуры потребителей.

Ценным качеством монографии являются и приведенные в 7-й главе конкретные примеры реализации описываемых методов и результаты исследований этих реализаций, выполненных научными коллективами, которые представляют авторы монографии.

Предлагаемая вниманию читателя работа должна вызвать значительный научный и технический интерес ученых и инженеров, работающих в данной области, и будет способствовать дальнейшему развитию навигационных технологий.

Надеюсь, что данная монография будет полезна и найдет своего читателя в сообществе российских ученых и инженеров.

*Генеральный директор ОАО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент,
действительный член Российской инженерной академии
В.А. Турилов*

Предисловие

Надежность и точность позиционирования и навигации имеет решающее значение для постоянно разрабатываемых приложений, предназначенных для современных технологий обработки сигнала. В этой книге содержится обзор некоторых последних результатов научных исследований в области обработки сигналов для определения местоположения и навигации, направленных на решение многих сложных проблем.

Книга была написана на основе работ, проводимых в европейской сети передового научного опыта в области беспроводной связи NEWCOM++. В этом проекте я имел честь принимать участие и как внешний наблюдатель, и как соавтор. Сеть передового опыта является инициативой Европейской комиссии, которая дает отличную возможность исследователям по всему континенту построить новый уровень сотрудничества. В рамках этой инициативы исследовательская деятельность сосредоточена на развитии технологий обработки сигналов для обеспечения высокой точности определения местоположения пользователей.

Эта книга рассматривает различные аспекты и грани методов позиционирования и навигации. Она начинается с описания «классических» технологий позиционирования с помощью спутниковых систем (например, GPS и Galileo) и наземных сотовых сетей. Читатель также встретит новые темы, в том числе нахождение *конечных пределов* точности систем позиционирования, которые определяются присутствием шумов и помех; описание работы ряда новых методов, таких как *прямое позиционирование*, которые направлены на обеспечение работы GPS с очень слабыми принимаемыми радиосигналами (например, в помещении); а также методы оптимального *сочетания* измерений на основе радиосигналов и сигналов с различных датчиков, например инерциальных платформ (в частности гироскопы). Также обсуждаются новые области *совместного (кооперативного)* позиционирования, в котором многие узлы обмениваются сигналами и информацией, чтобы повысить точность своих позиций, и, наконец, тщательно анализируется совершенно новая область исследований — суперточная дальнометрия в закрытых помещениях с использованием сигналов с ультраширокой полосой пропускания.

Сочетание теории и экспериментов в проекте NEWCOM++ привело к практическим результатам, которые читатели могут найти в последней части книги. Как пример непосредственного применения в авангарде исследования реальных проблем представлены фьюжн-методы интеграции многократных измерений датчиков на основе экспериментальных данных. Я надеюсь, что эта книга послужит справочным пособием для всех, кто заинтересован в области позиционирования и навигации.

Мо З. Вин,
доцент

Массачусетский технологический институт

Введение

Многие читатели этой книги, возможно, знакомы с приключениями Гарри Поттера из бестселлеров Джоан Роулинг. В этом случае они знают, что юный Гарри получил так называемую Карту Мародеров: кусок пергамента, который показывает каждый дюйм магической школы Хогвартс, а также постоянно меняющиеся в реальном времени позиции друзей и врагов. *Конечно, если такой артефакт описан в книге о Гарри Поттере, то это должно быть что-то магическое, попросту чудо.* Но читатели этой книги знают лучше: это не магия, а *технология*. На сухом языке инженеров Карта Мародеров — это *географическая информационная система (GIS)* с выделенным плагином *позиционирования*, который отслеживает в реальном времени набор авторизованных пользователей и показывает их расположение на карте, выведенной на дисплей. Каждый может скачать GIS на свой смартфон за небольшую плату. Однако в большей степени эта технология основана на ряде различных методов, от радиопередачи до геометрических вычислений, от анализа данных до фильтра Калмана, и все они, вытекающие из общих и унифицированных методов *обработки сигналов*, представляют общую основу многих приборов позиционирования, таких как автомобильные навигаторы GPS, которые сейчас широко распространены в развитых странах. Такое повсеместное распространение устройств позиционирования в автомобилях или в смартфонах является основой для ряда инновационных контекстно-зависимых услуг, которые в настоящее время уже доступны: поиски аптеки в незнакомом большом городе больше не похожи на охоту за сокровищем. Однако мы только в начале пути: в ближайшие годы мы увидим появление *целого ряда программ высокого разрешения*, которые способны определять местоположение с точностью менее метра и доступны для эксплуатации даже в условиях, затрудняющих распространение сигнала, например внутри зданий. Число новых предлагаемых услуг ограничивается только фантазией и будет расти в геометрической прогрессии вместе с соответствующими доходами рынка.

Однако путь к этой цели по-прежнему сложный. Некоторые из современных технологий позиционирования в основном предназначены для различных приложений (например, управления сетями связи), и они не оптимизированы для предоставления точной и всегда доступной информации о местоположении. Кроме того, ни одна из используемых или находящихся в разработке технологий позиционирования не обеспечивает охват услугами в различных гетерогенных средах (например, на улице, в помещении, на море и на дороге) и высокую четкость и точность позиционирования. Помимо этого, интеграция различных технологий позиционирования является центральным аспектом для

будущего бесшовных систем позиционирования — ключом, который откроет новую эру повсеместного знания о местоположении.

До сих пор большинство книг, связанных с позиционированием, было посвящено конкретной системе, например спутниковой или наземной, или одной технологии (например, GPS или радиочастотные идентификаторы). Тем не менее механизмы, которые различные системы позиционирования используют для получения информации о местоположении пользователей, во многих случаях имеют один и тот же фундаментальный подход. Кроме того, при разработке будущих бесшовных систем позиционирования нельзя отбрасывать глобальные знания различных технологий, если их эффективная интеграция должна быть продолжена.

Помня об этом, мы постарались дать в этой книге широкий обзор технологий спутникового и наземного позиционирования и навигации под общим знаменателем *обработки сигналов*. Мы убеждены, что каждая проблема позиционирования может быть в конечном итоге разрешена с точки зрения проектирования сигнального процессора (для определенности — *оценщика параметров*), который позволит получить более точное положение пользователя, начиная с набора шумных позиционно-зависимых измерений, собранных посредством обмена сигналами между беспроводными устройствами системы. Нашей целью было не просто дать описание различных современных стандартов или технологий позиционирования. Скорее, мы намерены представить и проиллюстрировать теоретические основы, на которых они базируются, и описать несколько передовых практических решений задач позиционирования, подкрепленных тематическими исследованиями на основе экспериментальных данных.

В этой книге использованы результаты работы некоторых экспертов, сотрудничающих с европейской сетью передового опыта NEWCOM++, и она представляет собой один из главных итогов. Большая часть материала была выбрана из трудов молодых исследователей. Читатели могут заметить, что эта книга создана несколькими авторами под общей редакцией. Несмотря на трудности в координации и стандартизации деятельности такого количества исследователей (и мы надеемся, что преуспели в достижении этой цели), перед нами тот случай, когда «разнообразие» приветствуется. Различные подходы к общей проблеме позиционирования, поступающие из различных институтов и исследовательских школ, будут очевидны для читателей; мы надеемся, что такое разнообразие (что, на наш взгляд, только добавляет ценности книге) будет способствовать расширению точки зрения читателя по этому вопросу.

Эта книга предназначена для аспирантов и исследователей, которые нацелены на создание прочной научной основы в области позиционирования и навигации. Она также предназначена для инженеров, которым необходимо разработать систему позиционирования и понять основные принципы их работы.

Даже если не уделять большого внимания имеющимся литературным источникам, один взгляд на оглавление также предоставит начинающему пользователю полезную информацию.

Для краткого обзора основ теории позиционирования и навигации можно прочитать первые три главы, в то время как более сложные понятия и методы приведены в последующих главах. В частности, в главе 1 вводится понятие радиопозиционирования и постулируются математические задачи определения положения мобильного устройства в определенной системе отсчета с помощью измерений, извлеченных из радиоволн, распространяющихся между определенными точками отсчета и мобильным устройством. Она представляет собой классификацию беспроводных систем позиционирования на основе, с одной стороны, вида информации (или измерения), которую они извлекают из распространяющегося сигнала, а с другой стороны, типа сети инфраструктуры, созданной между устройствами, участвующими в процессе позиционирования. Затем дано вводное описание основных систем позиционирования, рассматриваемых в книге, а именно спутниковых систем, их наземных систем функционального дополнения, наземных сетевых систем (например, сотовых сетей, беспроводных локальных сетей, беспроводных сенсорных сетей, а также специальных компьютерных сетей).

Наконец, представлен обзор фундаментальных математических методик, подходящих для решения задач позиционирования в приведенных выше контекстах в тесном взаимодействии с методами обработки сигналов, благодаря которым их можно реализовать в технологических условиях. Глава 2 представляет обзор спутниковых систем позиционирования с особым акцентом на американской GPS, европейской Galileo и модернизированной ГЛОНАСС, Россия, которые обеспечивают почти полный охват Земли глобальной навигационной спутниковой системой (GNSS). Во-первых, описан «космический сегмент» таких систем с точки зрения форматов и занятых полос передаваемого сигнала. Затем подробно обсуждается архитектура типичного приемника спутниковой навигации, так как он имеет несколько своеобразные требования и особенности по отношению к коммуникационно-ориентированному трансиверу. Затем представлено обсуждение основных источников ошибок в оценке позиции. Последняя часть этой главы посвящена существующей в настоящее время так называемой системе поддержки — категории в основном наземных сетевых систем, направленных на оказание поддержки GNSS-приемнику для улучшения точности или доступности определения своего положения. Примерами таких систем являются: дифференциальная GPS, EGNOS, сети RTK и вспомогательная GNSS.

Фундаментальные технологии и методы обработки сигналов для определения положения мобильного устройства с помощью наземных сетей на основе систем радиосвязи рассматриваются в главе 3. Из распространяющегося сиг-

нала могут быть извлечены различные параметры, потенциально зависящие от позиции пользователя: мощность принимаемого сигнала (RSS), время прихода сигнала (TOA), разность времени прихода сигнала (TDOA) и угол прихода (AOA).

Затем объяснены основные методы получения информации о местоположении из таких измерений в соответствии с классификацией геометрических методов (или детерминированного, или статистического) и отображения (картирования, или фингерпринтинга). Проанализированы наиболее распространенные источники ошибок, влияющие на вышеупомянутые процессы.

Главу продолжают описания подходов к позиционированию, обычно принятых в различных сетевых технологиях (например, сотовые сети, беспроводные локальные сети и беспроводные сенсорные сети), адресация основного формата сигнала, наиболее подходящий вид измерений и связанные алгоритмы позиционирования и навигации. Особое внимание уделено ультраширокополосной технологии как наиболее перспективному формату сигнала для реализации высокой производительности наземного позиционирования.

На практике несколько факторов воздействуют на достижимую точность беспроводных систем позиционирования. Однако теоретические пределы могут быть установлены с целью определения наилучшей точности, которую только можно ожидать в определенных условиях, а также получения полезных результатов тестов при оценке производительности практических схем. Глава 4 посвящена презентации нескольких таких пределов, в основном производных от предела Крамера—Рао (CRB). Получены и рассмотрены теоретические границы производительности, связанные с дальнометрией через время прибытия сигналов сверхширокой полосы пропускания, а также приняты во внимание критические условия, такие как многолучевое распространение сигналов. Кроме того, улучшенное семейство пределов Зива—Закаи вводится как более жесткий стандарт в случае плотного рассеяния, где CRB попадает в сомнительный интервал.

Затем представлены новые результаты, связанные с выводом ограничений производительности для инновационных подходов позиционирования, таких как прямая оценка позиции (DPE) в GNSS, совместная (кооперативная) наземная локализация и последний анализ систем, склонных к радиопомехам, например системы несущих.

В главе 5 представлены новейшие результаты исследований в области беспроводного позиционирования, выполненных в рамках проекта NEWCOM++. Они представляют собой объективную, но неполную картину «горячих тем» в современном беспроводном позиционировании в рамках прикладной и технологической основы, представленной в предыдущих главах.

Основное внимание в первую очередь обращено на последние достижения в области сверхширокополосных алгоритмов позиционирования, учитывая

частотные диапазоны для оценки ТОА, совместные алгоритмы оценки ТОА/АОА, ухудшение приема из-за помех, а также уменьшение эффекта смещения вне зоны прямой видимости. Затем рассмотрено приложение систем ММО для позиционирования. Нетрадиционные геометрические решения для позиционирования представлены оценкой распределения с ограничением ошибок и методом проекции на выпуклые множества (POCS). POCS затем пересмотрено в контексте совместного позиционирования с кооперативным методом наименьших квадратов и распределенным алгоритмом, основанным на пространстве доверия. Наконец, введена концепция когнитивного позиционирования как функция когнитивных радиотерминалов. После вывода представлены ожидаемые показатели производительности, оптимальная структура сигнала для целей позиционирования и методы позиционирования.

Глава 6 посвящена объединению некоторых современных стратегий обработки сигнала в непрерывный процесс оценки, описанию различных измерений параметров, связанных с позицией пользователя, но полученных с помощью различных технологий и/или систем (например, измерений ТОА и TDOA в наземных сетях, измерений ТОА и RSS в спутниковых и наземных системах или спутниковых и инерциальных навигационных системах). Такой подход, как правило, называется гибридизацией и обещает обеспечить большую точность по отношению к своим автономным аналогам или лучшую доступность благодаря разнообразию используемых технологий. Например, гибридизация спутниковой и инерциальной систем, как ожидается, послужит компенсацией соответствующих недостатков двух систем, а именно относительно высокой дисперсии ошибки первой и дрейфа последней.

Математической основой для разработки гибридизации послужила байесовская фильтрация. Рассмотрена общая структура, в основу которой положены фильтр Калмана и его варианты с примерами приложений для позиционирования. Затем объясняется метод фракционной фильтрации и ее наиболее часто используемых вариантов.

Приведены примеры гибридных алгоритмов позиционирования, начиная с гибридной наземной архитектуры, архитектуры, представляющей собой комбинацию GNSS и инерциальных измерений, с использованием либо подхода фильтра Калмана, либо подхода прямой оценки позиции. Наконец, представлен пример гибридного позиционирования на основе GNSS и наземной передачи сигнала в одноранговых сетях.

Глава 7, финальная часть этой книги, посвящена некоторым тематическим исследованиям. Приведены практические примеры применения позиционирования и навигации, которые являются результатом экспериментальных работ, выполняемых исследователями, участвующими в сети NEWCOM++.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить Серхио Бенедетто, научного руководителя сети NEWCOM++, за его исключительные способности в области руководства и управления этой большой сетью. Они также хотели бы выразить признательность за поддержку и сотрудничество проекта сотрудникам Европейской комиссии Питеру Шакману и Энди Хьютону, тем, кто способствовал развитию научно-исследовательской деятельности NEWCOM++. Эта книга не была бы написана без участия всех партнеров, участвующих в проекте NEWCOM++ «Локализация и позиционирование» — работы, которой руководили авторы М. Луиз и Д. Дардари. Авторы особо благодарят Карлеса Фернандеса-Прадеса, Синан Гечици, Монику Николи и Эрика Г. Стрёма за их неоценимый вклад в формирование структуры этой книги.

Сокращения и аббревиатуры

ACGN	— аддитивный цветной гауссовский шум
ACK	— принять
ACRB	— средний CRB
ADC	— аналого-цифровой преобразователь
AEKF	— адаптивный расширенный фильтр Калмана
AFL	— якорь без локализации
AGNSS	— вспомогательная GNSS
AGPS	— вспомогательная GPS
AltBOC	— знакопеременная двоичная смещенная несущая
AN	— якорный узел
AOA	— угол прихода сигнала
AOD	— угол передачи сигнала
AP	— точка доступа
API	— интерфейс прикладного программирования
ARNS	— авиационные радионавигационные услуги
ARS	— ускоренный случайный поиск
AS	— антиспуфинг
AS	— азимут распространения сигнала
ASIC	— специализированная интегральная схема
AWGN	— аддитивный белый гауссовский шум
BCH	— коды Бозе—Чоудхури—Хоквингема
BCRB	— байесовский CRB
BIM	— байесовская информационная матрица
BLAS	— основные подпрограммы линейной алгебры
BLUE	— наилучшая линейная несмещенная оценка
BOC	— двоичная смещенная несущая
BP	— алгоритм распространения доверия
BPF	— полосовой фильтр
bps	— бит в секунду
BPSK	— двоичная фазовая манипуляция
BPZF	— полосовой зональный фильтр
BS	— базовая станция
BSC	— двоичный симметричный канал
BTB	— граница Беллини—Тартара
BTS	— базовая приемопередающая станция
C/A	— необработанный/поглощенный сигнал
C/NAV	— коммерческий/навигационный сигнал

C/N_0	— отношение плотности мощности несущей к шуму
CAP	— период утверждения на получение доступа
CBOC	— композитная двоичная смещенная несущая
CC	— центральный кластер
CCK	— дополнительная кодовая манипуляция
CDF	— интегральная функция плотности (плотность распределения)
CDM	— круглый дисковый монополь
CDMA	— множественный доступ с кодовым разделением сигналов
CE-POCS	— ортогональная проекция на круговые и эллиптические выпуклые множества
CFP	— бесконкурентный период
CH	— главный кластер
CIR	— импульсная характеристика канала
CKF	— кубатурный фильтр Калмана
CL	— гражданский длинный сигнал
CM	— гражданский умеренный сигнал
CNLS	— ограниченный метод NLS
CNSS	— навигационная спутниковая система «Компас»
Coop-OA	— совместные (кооперативные) OA
Coop-POCS	— совместная (кооперативная) POCS
COTS	— готовый коммерческий продукт
CP	— когнитивное позиционирование
CPICH	— общий пилотный канал
CPM	— непрерывное фазомодулирование
C-POCS	— ортогональная проекция на круглое выпуклое множество
CPR	— каналный импульсный отклик
CPS	— системы когнитивного позиционирования
cps	— элементов сигнала в секунду
CPU	— центральный процессор
CR	— когнитивное радио
CRB	— нижний предел Крамера—Рао
CRC	— циклический избыточный код
CRPF	— фракционный фильтр стоимости
CS	— контрольный сегмент/коммерческое обслуживание
CSI	— информация о состоянии канала
CSS	— импульсный сигнал с расширенным спектром
CTS	— разрешение на передачу
CW	— непрерывная волна
DAA	— обнаружить и избежать
DAB	— цифровое звуковое вещание
DCM	— матрица направляющего косинуса

DE	— алгоритм дифференциальной эволюции
DEPE	— оценка задержки посредством оценки фазы
DFE	— цифровой интерфейс
DFT	— дискретное преобразование Фурье
DGPS	— дифференциальная GPS
DIFS DCF	— межкадровый интервал
DL	— нисходящий канал
DLL	— задержка автоподстройки частоты
DMLL	— распределенное максимальное логарифмическое правдоподобие
DOA	— направление прихода сигнала
DoD	— министерство обороны
DP	— прямой путь
DPCH	— выделенный физический канал
DPE	— прямая оценка позиции
DS	— задержка распространения
DSP	— процессор цифровых сигналов
DSSS	— прямая последовательность с расширенным спектром
DVB	— цифровая передача видеосигнала
dwMDS	— распределенное взвешенное многомерное шкалирование
EB	— энергетический
ECEF	— геоцентрический
ED	— детектор энергии
EEPROM	— электрически стираемая программируемая постоянная память
EGNOS	— европейская геостационарная навигационная система
EIRP	— эффективная изотропная излучаемая мощность
EKF	— расширенный фильтр Калмана
EKFBT	— расширенный фильтр Калмана с отслеживанием смещения
E-L	— разница между ранним и поздним приходом сигнала
EPE	— централизованная система позиционирования в реальном времени Eka Hau
E-POCS	— ортогональная проекция на эллиптическое множество
ERQ	— расширенный алгоритм жесткости четырехугольников
EKA	— Европейское космическое агентство
EU	— Европейский Союз
F/NAV	— навигация со свободным доступом
FB-MCM	— фильтр-банк модуляции несущих
FCC	— Федеральная комиссия по связи
FDMA	— частотное разделение множественного доступа
FEC	— опережающая коррекция ошибок
FFD	— полнофункциональное устройство
FFT	— быстрое преобразование Фурье

FHSS	— скачкообразная перестройка частоты с расширенным спектром
FIM	— информационная матрица Фишера
FLL	— автоподстройка частоты
FMT	— многочастотный фильтр
FOC	— полная оперативная готовность
FPGA	— программируемая вентильная матрица
FPK	— параметры области коррекции
GAGAN	— наземная расширенная GPS-навигация
GANSS	— Galileo/дополнительная навигационная спутниковая система
GDOP	— геометрическое ухудшение точности
GEO	— геостационарный
GFSK	— гауссовская двоичная частотная манипуляция
GIOVE	— орбитальный элемент проверки системы Galileo
GIS	— географическая информационная система
ГЛОНАСС	— глобальная навигационная спутниковая система
GNSS	— глобальная навигационная спутниковая система
GPIB	— интерфейс шины общего назначения
GPRS	— служба пакетной передачи данных через интерфейс
GPS	— системы глобального позиционирования
GS	— геодезическая система
GSM	— глобальная система мобильной связи
GST	— системное время системы Galileo
GUI	— графический интерфейс пользователя
HDL	— язык описания аппаратных средств
HDLA	— информация о местоположении высокой точности
HDSA	— информация о ситуации высокой точности
hdwMDS	— гибридные dwMDS
HEO	— эллиптические орбиты с большим углом наклона
HMM	— скрытые модели Маркова
HOW	— передача слова
HPOCS	— гибридная POCS
HW	— аппаратный
I	— в фазе
Iid	— независимый и однородно распределенный
I/NAV	— целостность/навигация
IBERT	— интегрированный тестер отношения битовых ошибок
IC	— интегральная схема
ICD	— документ управления интерфейсом
ICT	— информационно-коммуникационные технологии
IE	— информативный элемент
IF	— промежуточная частота

IGSO	— наклонная геостационарная орбита
ILS	— система инструментальной посадки
IMU	— инерционное измерительное устройство
INR	— отношение мощности помех к шуму
INS	— инерциальная навигационная система
IODC	— запрос о данных часов
IODE	— запрос о данных эфемерид
IP	— интеллектуальная собственность
IR	— импульсное радио
IRNSS	— региональная навигационная спутниковая система
IR-UWB	— импульсное UWB-радио
ISM	— промышленно-научный медицинский
ISO/IEC	— Международная организация по стандартизации/Международная электротехническая комиссия
ISRO	— Индийская организация космических исследований
IST	— социальные информационные технологии
ITU	— Международный союз электросвязи
ITS	— интеллектуальная транспортная система
IVP	— инерциальная виртуальная платформа
JBSF	— скачок назад и опережающий поиск
KF	— фильтр Калмана
KNN	— k-й ближайший соседний терминал
LAAS	— локальная усилительная система
LAMBDA	— регулировка неопределенности декорреляции при вычислении методом наименьших квадратов
LAN	— локальная вычислительная сеть
LAPACK	— пакет программ линейной алгебры
LBS	— сервис определения местоположения
LCS	— сервисы определения местоположения
LDC	— низкая нагрузка
LDPC	— проверка четности с низкой плотностью
LEO	— отключение ошибки позиционирования
LIFO	— алгоритм «последний прибыл — обслужен первым», вычисление в обратном порядке
LLC	— логическое управление по ссылкам
LLR	— логарифмическое отношение правдоподобия
LNA	— малошумящий усилитель
LOB	— линия несущей
LOS	— условия прямой видимости
LRT	— тест правдоподобия
LS	— метод наименьших квадратов

LSB	— младший бит
LTE	— долгосрочная эволюция
LVDS	— низковольтная дифференциальная передача сигналов
MAC	— среда контроля доступа
MAP	— апостериорный максимум
MAI	— помехи множественного доступа
MBOC	— мультиплексированная двоичная смещенная несущая
MB-UWB	— многополосный UWB-канал
MC	— множественная несущая
MCAR	— разрешение неопределенности множественной несущей
MCRB	— измененный CRB
MEO	— средняя околоземная орбита
MEMS	— электромеханические системы
MF	— согласованный фильтр
MGF	— моментная производящая функция
MGF	— проверка нескольких гипотез
MIMO	— со многими входами и многими выходами
MISO	— со многими входами и одним выходом
ML	— максимальное правдоподобие
MLE	— оценка максимального правдоподобия
MMSE	— минимальная среднеквадратическая ошибка
MOM	— метод моментов
MP	— многолучевость
MPC	— многолучевой компонент сигнала
MP EE	— огибающая ошибки распространения многолучевого сигнала
MRC	— максимальное соотношение объединения
MS	— мобильная станция
MSAS	— многофункциональные дополнительные спутниковые системы
MSB	— самый старший бит
MSE	— среднеквадратическая ошибка
MSEE	— среднеквадратическая ошибка оценки
MSK	— минимальный сдвиг-манипуляция
MST	— минимальное остовное дерево
MTSAT	— многофункциональный транспортный спутник
MUI	— многопользовательские помехи
MV	— минимальная дисперсия
N/A	— недоступен
NAV	— навигация
NAVSTAR	— навигационная система для координатно-временного определения и ранжирования
NB	— узкополосный

NBI	— узкополосные помехи
NCO	— осциллятор с числовым программным управлением
NDIS	— спецификация интерфейса сетевого драйвера
NED	— нисходящий северо-восточный сигнал
NFR	— дальнометрия в ближнем поле
NLOS	— условия отсутствия прямой видимости
NLS	— нелинейный метод наименьших квадратов
NMEA	— Национальная ассоциация морской электроники
NMV	— нормализованная минимальная дисперсия
NN	— нейронные сети
NOLA	— неперекрывающиеся предположения
NPE	— централизованная система позиционирования Navizon
NQRT	— новый тест жесткости четырехугольников
NRE	— разовые расходы
NRZ	— обратный нулю
NSI5	— нестандартный I5
NSQ5	— нестандартный Q5
NTP	— Network Time Protocol (временный сетевой протокол)
OA	— внешняя аппроксимация
OCS	— сегмент оперативного контроля
OEM	— производитель оригинального оборудования
OFDM	— ортогональное мультиплексирование разделенной частоты
OMA	— Open Mobile Alliance (открытое сообщество производителей мобильной связи)
OMUX	— выход мультиплексора
OOB	— внешний по отношению к полосе сигнала
OQPSK	— компенсированная квадратурная фазовая манипуляция
OQRT	— первоначальный тест жесткости четырехугольников
ORQ	— оригинальный тест жесткости четырехугольников
OS	— открытый сервис
OTD	— наблюдаемая разница во времени
OTDOA	— наблюдаемое TDOA
P2P	— одноранговые сети
PAM	— импульсная амплитудная модуляция
PAN	— персональная сеть
ПК	— персональный компьютер
PDA	— персональный электронный органайзер (КПК)
PDF	— функция плотности вероятности
PDP	— профиль задержки мощности
PF	— фракционный фильтр
PHR	— физической заголовок

PHY	— физический уровень
PLL	— фазовая автоподстройка частоты
PN	— псевдошум
PND	— персональные навигационные устройства
POC	— оперативный центр полезной нагрузки
POCS	— проекция на выпуклые множества
POR	— проекция на кольца
PPM	— импульсная модуляция позиции
rpm	— частей на миллион
PPS	— сервис точного позиционирования
PR	— псевдослучайный
PRN	— псевдослучайный шум
PRS	— общественные службы
PRT	— тест частичной жесткости
PSD	— спектральная плотность мощности
PSDP	— профиль пространственной задержки мощности
PSDU	— сервисный блок физических данных
PSK	— фазовая манипуляция
PVT	— позиция, скорость и время
PW	— ширина импульса
pTOA	— псевдовремя прибытия сигнала
PV	— позиция-скорость
Q	— квадратурная фаза
QPSK	— квадратурная фазовая манипуляция
QZSS	— квазизенитная спутниковая система
RDMV	— дисперсия корня минимальной производной
RDSS	— спутниковая служба радиоопределения
RF	— радиочастотный
RFD	— снижение функции устройства
RFID	— радиочастотная идентификация
RIMS	— станции контроля дальности и целостности
RLE	— надежная оценка позиции
RMS	— среднеквадратичное
RMSE	— среднеквадратическая ошибка
RMV	— корень минимальной дисперсии
RN	— опорный узел
RNSS	— региональная навигационная спутниковая система
ROA	— скорость прибытия сигнала
ROC	— технологическая характеристика приемника
ROM	— постоянное запоминающее устройство
RQ	— жесткость четырехугольников

RRC	— алгоритм «корень приподнятого косинуса/радиоуправления ресурсами»
RRLP	— протокол радиуса расположения ресурса
RSS	— сила принимаемого сигнала
RT	— надежная трилатерация
RTCM	— радиотехническая комиссия по услугам морского позиционирования
RTK	— кинематика в реальном времени
RTLS	— система позиционирования в реальном времени
RTS	— готов к отправке
RTT	— время приема — передачи
RV	— случайная величина
RX	— приемник
CA	— селективный доступ
SAR	— поисково-спасательные службы
SAW	— поверхностная акустическая волна
SBAS	— спутниковая система функционального дополнения
SBS	— последовательный поиск назад
SBSMC	— последовательный поиск назад для нескольких кластеров
SCKF	— корневой кубатурный фильтр Калмана
SCPC	— один канал на несущую
SDR	— Software Defined Radio (программируемая радиосвязь)
SDS	— симметричные двухсторонние
SET	— SUPL-терминал
SFD	— разделитель начала кадра
SHR	— синхронизация заголовков
SIFS	— короткий интервал между кадрами
SIMO	— с одним входом и многими выходами
SIR	— последовательная интерполяция значения
SIS	— сигнал в пространстве
SISO	— с одним входом и одним выходом
SLP	— SUPL-платформа
SMA	— миниатюрный вариант А
SMC	— последовательный метод Монте-Карло
SMR	— соотношение сигнала и многолучевости
SNIR	— соотношение сигнал — шум плюс помеха
SNR	— соотношение сигнал — шум
SoL	— безопасность жизни
SPKF	— сигма-точка фильтра Калмана
SPS	— символов в секунду
SPS	— служба стандартного позиционирования

SQKF	— корневой квадратурный фильтр Калмана
SRN	— вторичный опорный узел
SRS	— служба того же уровня
SS	— расширенный спектр
SS-CPM	— непрерывный фазомодулированный сигнал с расширенным спектром
SS-GenMSK	— обобщенно-минимальная модуляция со сдвигом фазы и расширенным спектром
ST	— простой порог
SUPL	— безопасное позиционирование на плоскости пользователя
SV	— космический аппарат
SVD	— сингулярное разложение
SW	— программного обеспечения
SYNCH	— преамбула синхронизации
TCAR	— разрешение неопределенности тройной несущей
TDE	— время задержки оценки
TDOA	— разница во времени прибытия сигнала
TH	— время скачка
TH-PPM	— фазово-импульсная модуляция со скачковым изменением временных интервалов
TI	— трилатерационное пересечение
TLM	— телеметрия
TLS	— общий метод наименьших квадратов
TLS-ESPRIT	— общая оценка параметров сигнала методом наименьших квадратов с помощью вращательной инвариантности
TMBOC	— временное мультиплексирование двоичной смещенной несущей
TNR	— отношение порога к шуму
TOA	— время прибытия сигнала
TOF	— время полета
TOW	— время недели
TRS	— двухскоростное обслуживание
TTFF	— время до первого сигнала
TW-TOA	— двустороннее TOA
TX	— передатчик
UE	— пользовательское оборудование
UERE	— эквивалентная ошибка измерения дальности пользователем
UKF	— рекурсивный фильтр Калмана
UL	— восходящий сигнал
ULA	— равномерный линейный массив
ULP	— протокол определения местоположения пользователей

UMTS	— универсальная система мобильной связи
UN	— неизвестный узел
URE	— ошибка определения дальности пользователем
U.S.	— США
US	— пользовательский сегмент
UT	— пользовательский терминал
UTC	— всеобщее скоординированное время
UTM	— универсальная проекция Меркатора
UTRA	— UMTS наземный радиодоступ
UWB	— ультраширокая полоса пропускания
VANET	— автомобильная одноранговая сеть
VHDL	— VHSIC язык описания аппаратных средств
VHSIC	— интегральная схема с очень высокой скоростью
VNA	— векторный сетевой анализатор
VRS	— виртуальная базовая станция
WAAS	— широкая усиливающая система
WADGPS	— широкая дифференциальная GPS
WARN	— широкая опорная сеть
WB	— широкополосный сигнал
WBI	— широкополосные помехи
WCDMA	— широкополосный множественный доступ с кодовым разделением
WE	— беспроводные расширения
WED	— дополнительные задержки вследствие прохождения сигнала через стены
WGS84	— Всемирная геодезическая система
WiMAX	— технология предоставления беспроводного широкополосного доступа в Интернет
WLAN	— беспроводная локальная сеть
WLS	— метод взвешенных наименьших квадратов
WMAN	— беспроводная сеть столичной области
WPAN	— беспроводная персональная сеть
WRAPI	— беспроводной программируемый интерфейс для научных исследований
WRR	— отношение ширины импульса к средней скорости прибытия многолучевого компонента
Wrt	— по отношению
WSN	— беспроводная сенсорная сеть
WT	— беспроводные инструменты
WWB	— предел Вайс—Вайнштейна
ZZB	— нижний предел Зива—Закаи

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

*Дэвид Дардари, Эмануэла Фаллетти,
Франческо Соттиле*

1.1. Основы позиционирования с помощью беспроводных устройств

1.1.1. Общие вопросы и приложения

Позиционирование представляет собой процесс определения местоположения одной точки относительно других точек, местоположение которых уже известно. Оно было фундаментальной потребностью человека с момента его появления. Для решения этой задачи еще в эпохи, предшествующие развитию современных технологий, люди изобрели несколько инструментов, основанных на наблюдении за звездами.

В нашу технологическую эру можно определить местоположение людей и объектов в реальном времени, используя передачу радиосигналов (далее — беспроводную передачу). В этом контексте самый популярный пример — глобальная система позиционирования (GPS) — спутниковая система позиционирования, которая позволяет пользователям с наземными приемниками точно определить свое географическое положение [24]. В настоящее время позиционирование становится основой для развития услуг по определению местоположения (location-based services — LBS). В частности, беспроводные системы позиционирования вызвали значительный интерес в течение многих лет [1, 7, 12—14, 16, 22, 23, 26, 28, 29, 33, 35, 40].

Одной из главных областей использования методов позиционирования являются транспортные системы в целом и интеллектуальные транспортные системы (intelligent transportation systems — ITS) в частности, в том числе поиск и спасение при авариях, маршрутизация трафика, буксировка, помощь, а также слежение за грузами [17]. Во всей этой деятельности используется хорошо известная GPS. Безопасность является одной из главных мотиваций разработки гражданских приложений для мобильных устройств позиционирования, использование которых является обязательным для экстренных вызовов по телефонам 112 (в Европе) или 911 (в США) [18, 21]. Кроме того, LBS-услуги в настоящее время привлекают все больше интереса и инвестиций, поскольку они открывают новые возможности для совершенно новых рыночных стратегий,

основанных на мобильной местной рекламе, отслеживании перемещения персонала, навигационной помощи и позиционно-зависимого биллинга [23, 28]. Наглядное представление контекстно-зависимой архитектуры управления этими услугами показано на рис. 1.1.

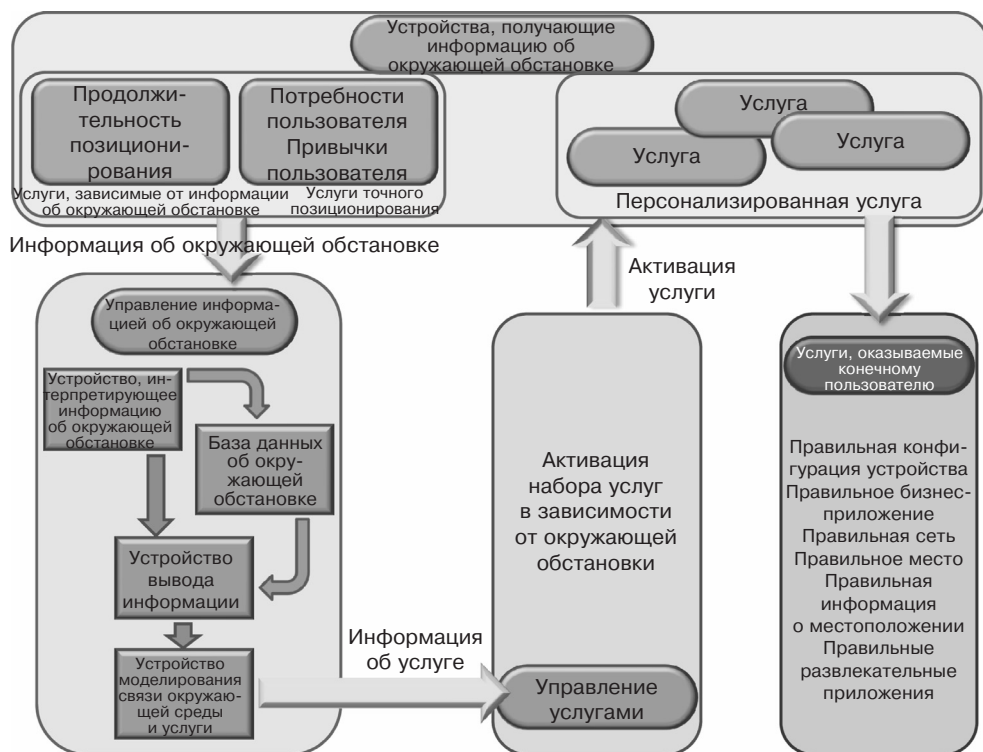


Рис. 1.1. Концепция архитектуры управления услугами в зависимости от окружающей обстановки

В ближайшие годы мы увидим использование высокоточных систем позиционирования (high-definition situation-aware — HDSA), способных работать в сложных условиях распространения сигналов в окружающей среде, что обычно невозможно при использовании GPS, например, внутри зданий и в подземных помещениях. Такое применение требует системы позиционирования с субметровой точностью [14]. Надежное позиционирование в подобных условиях является ключевым фактором для разнообразного использования, включая логистику, отслеживание в целях обеспечения безопасности (для авторизованных лиц — для обеспечения высшей степени безопасности), медицинские услуги (мониторинг пациентов), поисково-спасательные операции (связь с пожарными или жертвами природных катастроф), управление бытовой техникой, автомобильную безопасность и военные системы. Ожидается, что в 2017 году глобаль-

ные доходы от использования систем позиционирования в реальном времени (real-time locating systems — RTLS), составят более 6 млрд евро [6].

Как вы узнаете из этой книги, ни одна из существующих и разрабатываемых в настоящее время технологий позиционирования по отдельности не в состоянии обеспечить охват услугами всего разнообразного и разнородного окружения (например, одновременно открытых мест и закрытых помещений) с необходимой высокой точностью позиционирования. Интеграция различных технологий позиционирования, как представляется, является ключом к будущим интегрированным RTLS, которые откроют новую эру повсеместного знания своего местоположения.

1.1.2. Классификация беспроводных систем позиционирования

Основная характеристика беспроводного позиционирования предполагает наличие «активного» терминала, положение которого должно быть определено. Эта ситуация принципиально отличается от радиолокации, в процессе которой происходит нахождение «пассивного» удаленного объекта, который ни коим образом не участвует в процессе позиционирования, например использование радаров в процессе радиолокации. По этой причине радиолокацию часто связывают с военными технологиями и наблюдением. Напротив, «активный» терминал, определяющий свое местоположение, должен активно участвовать в процессе позиционирования, он принимает соответствующие измерения и получает/обменивается информацией посредством беспроводных устройств с некоторыми базовыми станциями. Информация о местоположении, как правило, используется самим терминалом, но также может быть направлена какой-то станции управления, ответственной за деятельность терминала. Определение местоположения относится поэтому к большому семейству систем, процедур и алгоритмов, разработанных для военного применения, но в последнее время все более широко используется в гражданском секторе. В этой книге термины «определение местоположения», «позиционирование» и «локализация» являются взаимозаменяемыми.

Между позиционированием и (радио-) навигацией существует фундаментальное различие. Действительно, навигация относится к «теории и практике планирования, учета и контроля хода и положения транспортного средства, особенно морского или воздушного судна»¹. Это означает, что навигационные системы могут не только определить точное положение терминала, но и отслеживать, а затем исправить его траекторию после первого определения. В навигации отслеживание траектории означает больше, чем просто установление последовательности независимых положений объекта, так как оно часто включает в себя оценку трехосевой скорости и, возможно, ускорения.

¹ Определение взято из словаря American Heritage®.

Беспроводные системы позиционирования имеют ряд опорных беспроводных узлов (узлы привязки — базовые узлы) с постоянной и точно известной позицией в принятой системе координат и обязательно один или несколько локализованных мобильных узлов (часто называются агентскими, целевыми или мобильными пользовательскими узлами) (см. рис. 1.2). Терминология не является универсальной, а зависит от используемой технологии: в сотовых системах позиционирования термин «базовая станция» (base station — BS) используется для обозначения радиоустройств (radio frequency — RF) с известными координатами, в то время как название «мобильная станция» (mobile station — MS) используется по отношению к радиоустройствам с неизвестными координатами, иногда также ее называют пользовательским терминалом (user terminal — UT) или пользовательским оборудованием (UE). В контексте беспроводных сенсорных сетей (wireless sensor networks — WSN) радиоустройства обычно указываются в виде узлов: базовых узлов с известными координатами и агентского узла с неизвестными координатами.

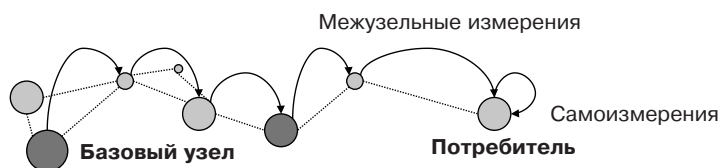


Рис. 1.2. Общая схема сети системы позиционирования

Позиционирование, как правило, происходит в два основных этапа: во-первых, проводятся непосредственные измерения между узлами, и, во-вторых, эти измерения обрабатываются для определения положения агентских узлов. Типичным примером данных измерений является определение расстояния между используемыми узлами. Это измерение называется дальнометрией. На основе типа измерений, проведенных между узлами, и конфигурации сети беспроводные системы позиционирования могут быть классифицированы по различным критериям, как описано в следующих разделах.

1.1.2.1. Классификация беспроводных систем позиционирования на основе имеющихся измерений

Каждый сигнал или физически измеряемая характеристика, которая передает позиционно-зависимую информацию, может, в принципе, использоваться для оценки местоположения потребителя. В зависимости от возможностей оборудования узла доступны различные виды измерений, основанные, например, на радиоизлучении, инерциальных приборах (например, ускорение), инфракрасном и ультразвуковом излучении. В частности, при использовании радиосигналов полезная позиционно-зависимая информация может быть получена пу-

тем анализа таких характеристик сигнала, как уровень принимаемого сигнала (received signal strength — RSS), время приема сигнала (time of arrival — TOA) и угол прихода сигнала (angle of arrival — AOA) или только из знания, что два или более узлов находятся в зоне радиовидимости. В табл. 1.1 приведена классификация используемых позиционно-зависимых измерений. Ниже дан краткий обзор, более подробная информация представлена в главе 3.

Таблица 1.1. Классификация систем позиционирования на основе доступных измерений

Измеряемая характеристика	Схема позиционирования	Определение характеристики
Угол прихода сигнала (AOA)	На основе углов прихода сигнала	Характеризует направление распространения сигнала Обычно требуется антенная решетка
Уровень принимаемого сигнала (RSS)	На основе дальности Фингерпринтинг Интерферометрическая	Измерение уровня принимаемого сигнала
Время прихода сигнала (TOA)	На основе дальности	Измерение задержки распространения сигнала
Разность во времени прихода сигнала (TDOA)	На основе разности в дальности	Измерение разности в задержках принимаемых сигналов
Дальнометрия в ближней зоне (NFR)	На основе дальности	Отношение между углом, образованным электрическими и магнитными полями принимаемого сигнала, и расстоянием между передатчиком и приемником
Радиовидимость	На основе близости к узлу	Подключение
Ускорение и угловая скорость	Инерциальные	Дает информацию о линейном и угловом смещении
Магнитное поле Земли	Магнитные	Дает информацию об ориентации в пространстве

Измерение угла прихода сигнала (AOA)

При использовании методов угловых измерений местоположение потребителя устанавливается путем измерения углов прихода сигналов AOA, поступающих на измерительную станцию. Источник сигнала находится на прямой линии, образованной станцией, и около AOA (также называется линией пеленга (line of bearing — LOB)). Когда одновременно доступны несколько независимых измерений AOA, точка пересечения двух LOB дает двумерное местоположение потребителя. При точных измерениях *проблемой позиционирования*, которую предстоит решить в этом случае, является пересечение нескольких прямых в 3D-пространстве. На практике шум, неточность измерения AOA и многолучевое распространение сигнала требуют использования более чем двух углов. Измеряющая станция, оснащенная антенной решеткой, которая позволяет оценивать AOA, может быть как локализуемым терминалом (в данном случае измеряется AOA сигналов от различных базовых узлов), так и самим базовым узлом (в этом случае он принимает сигнал, передаваемый потребителем, устанавливая его AOA).

Измерение уровня принимаемого сигнала (RSS)

Дальнометрия на основе уровня сигнала

Простейшим измерением, практически всегда доступным в каждом беспроводном устройстве, является определение уровня принимаемого сигнала (RSS). На основании принципа «чем дальше узел, тем слабее принимаемый сигнал» можно получить оценку расстояния между двумя узлами (дальнометрию) путем измерения RSS. Теоретические и эмпирические модели используются для того, чтобы перевести разницу (в дБ) в уровнях переданного (считается известным) и принятого сигнала в дальность. Дальнометрия RSS не требует синхронизации времени между узлами. К сожалению, проблемы распространения сигнала, такие как преломление, отражение, затенение и многолучевость, приводят к ослаблению сигнала, которое слабо коррелируется с расстоянием, что приводит к неточным оценкам последнего.

Моделирование радиополя (фингерпринтинг)

Моделирование радиополя, также известное как картирование, — метод отображения измеренных данных (например, RSS) на известной сетке в среде, представленной данными моделирования, которые генерируются в процессе картирования окружающей обстановки во время этапа калибровки системы. При проведении позиционирования измеренные данные сопоставляются с существующей моделью. Типичные недостатки этого метода включают изменение модели из-за изменений в геометрии пространства, например в результате закрытия дверей в помещении.

Интерферометрический метод

Технология основана на передаче радиосигнала на нескольких различных частотах между парными узлами. Несущая полученного композитного сигнала после полосовой фильтрации медленно меняется с течением времени. Смещение фазы этой несущей может быть оценено на основе измерений RSS и содержит информацию о разнице в расстоянии до узлов. Сделав несколько измерений в сети, состоящей по крайней мере из восьми узлов, можно восстановить взаимное расположение узлов в 3D-системе координат [27].

Измерение времени прихода (TOA) сигнала

Временная дальнометрия

Учитывая, что электромагнитные волны распространяются со скоростью света, то есть $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с, расстояние d между парой узлов может быть получено из измерения задержки распространения или времени прохождения сигнала (time of flight — TOF) $\tau = d/c$ при оценке сигнала (TOA). Как показано в главе 3, когда используются широкополосные сигналы и доступны точные измерения времени, временная дальнометрия может обеспечить высокую точность позиционирования. Однако синхронизация времени и погрешности измерений представляют собой основные проблемы при разработке методов временной дальнометрии.

Системы, работающие на основе *определения суммы времени прихода сигналов*, измеряют относительную сумму расстояний между потребителем и базовыми узлами и уточняют определение местоположения как пересечение трех и более эллипсоидов с фокусами в двух базовых узлах.

Системы, работающие на основе *определения разности времени прибытия* (TDOA), измеряют разность расстояний между приемо-передающей парой узлов. В результате измерений TDOA получается гиперboloид постоянной разности расстояния, когда базовые узлы находятся в фокусе.

Подключение

Простейший способ получить нужные измерения для позиционирования — это *определение близости к узлу*. В этом случае простая информация о подключении (да/нет) используется для оценки положения узла. Информация о местоположении представляется как соседство с ближайшим известным базовым узлом (ориентиром). Основным преимуществом этого метода является то, что он не требует никаких специальных аппаратных средств и времени синхронизации между узлами, так как сведения о подключении можно получить в любом беспроводном устройстве. Тем не менее такой позиционно-зависимой информации, полученной с использованием этого метода, может оказаться недостаточно.

Дальнометрия в ближней зоне (NFR)

При дальнометрии в ближней зоне принимаются радиосигналы низкой частоты (обычно около 1 МГц) и, следовательно, большой длины волны (около 300 м) [32]. Главная идея этого метода заключается в использовании детерминированных отношений, которые существуют между углом, образованным электрическими и магнитными полями принимаемого сигнала, и расстоянием между передатчиком и приемником. Этот низкочастотный подход к определению местоположения позволяет проникать через большие препятствия, обладает лучшей устойчивостью перед многолучевостью, а иногда дает и более точное определение местоположения благодаря дополнительной информации в ближнем поле, в отличие от классических методов использования высоких частот в дальнем поле. Основные недостатки этой технологии — потребность в больших антеннах и низкая энергоэффективность.

Автономное позиционирование

Помимо измерений характеристик радиосигналов при обмене между узлами (межузельные измерения), потребитель может определить свое местоположение с помощью локальных измерений (автономное позиционирование) с использованием бортовых датчиков, таких как инерционный измерительный блок (inertial measurement units — IMU). В последнее время разработка недорогих электромеханических систем (MEMS) сделала устройства IMU очень популярными. IMU может, как правило, содержать акселерометр и гироскоп. Акселерометр измеряет ускорение устройства, на котором он крепится (изме-

нение линейной скорости), в дополнение к тяжести Земли, в то время как гироскоп определяет угловую скорость устройства. Эти измерения не обеспечивают позиционирование устройства непосредственно, поскольку они позволяют только отслеживать его перемещения. Для определения собственно положения устройства могут использоваться некоторые стратегии, как правило, на основе интеграции различных измерений. При этом позиционирование может быть получено, например, при интеграции, во время которой определяются положение и ориентация дрейфа в результате погрешностей измерений. Это является основным ограничением использования инерциальных датчиков при позиционировании в течение длительных промежутков времени. Для уменьшения этих дрейфов инерционные устройства могут объединяться с магнитометром, чтобы использовать магнитное поле Земли в качестве эталона. Как объясняется в главе 6, самое большое преимущество IMU получается при их использовании в комбинации с некоторыми беспроводными методами позиционирования с помощью объединения данных алгоритмов обработки сигналов.

1.1.2.2. Классификация на основе конфигурации сети

Конфигурация сети и набор доступных измерений влияют на стратегию обработки сигнала (алгоритм позиционирования), которая будет использоваться для решения задач позиционирования. Рассмотрим, например, классическую задачу об определении позиции (x ; y) потребителя с помощью измеренного расстояния d_i между местоположением потребителя и набором N базовых узлов с известными координатами (x_i, y_i) при $i = 1, 2, \dots, N$. Расстояние можно получить, например, с помощью TOA, RSS или NFR-измерений. Полагая для простоты оценку расстояния идеальной, можно найти позицию потребителя с помощью простых геометрических построений. На самом деле i -й базовый узел (в 2D-сценарии) определяет окружность с центром в точке с координатами x_i, y_i и радиусом d_i (рис. 1.3). Точка пересечения нескольких окружностей соответствует положению потребителя. В двумерном пространстве требуются по крайней мере три базовых узла.

К сожалению, при наличии ошибок в определении расстояния окружности в общем случае не пересекаются в одном уникальном положении, что делает позиционирование более сложной проблемой; это подробно рассматривается в главах 2 и 3.

В зависимости от применения ограничений только небольшая часть узлов может иметь информацию о своей позиции (базовые узлы), к ним относятся узлы, оснащенные приемниками GPS или развернутые в известных позициях. Другие узлы с неизвестной позицией (агенты) должны оценить свое местоположение за счет взаимодействия с базовыми узлами. При непосредственном взаимодействии с достаточным количеством базовых узлов могут быть приня-

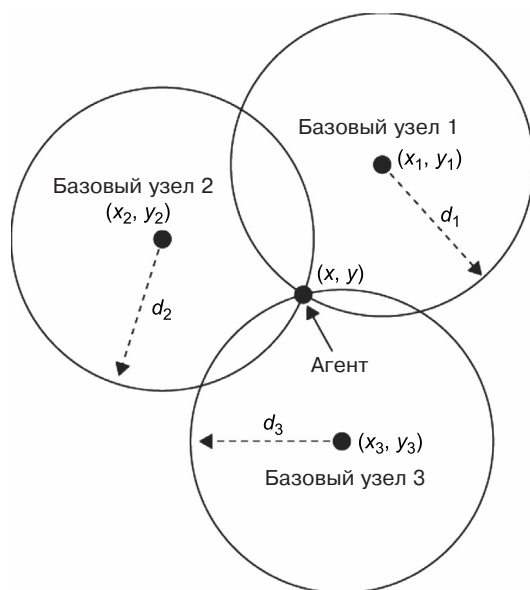


Рис. 1.3. Пример геометрического позиционирования

ты односкачковые алгоритмы позиционирования. Напротив, при использовании *многоскачкового распространения сигнала* требуется взаимодействие между узлами для передачи информации о положении базового узла тем узлам, которые не способны установить прямое взаимодействие с базовыми узлами.

В некоторых сценариях ни один из узлов не обладает информацией о своей абсолютной позиции (безъякорный сценарий). *Абсолютная позиция* — это точное место, где находится узел, описанное в общей системе отсчета для всех позиционированных узлов. Если системой отсчета является Земля, наиболее часто используемой геодезической системой (geodetic system — GS) является Всемирная геодезическая система (world geodetic system — WGS-84). Тем не менее во многих случаях нет необходимости в знании абсолютных координат (например, специальные боевые и спасательные системы). В этих случаях оцениваются только относительные координаты (иногда называемые *виртуальными координатами*) и должны быть разработаны дополнительные алгоритмы позиционирования.

Позиционирование может быть *центрированным относительно терминала*, когда потребитель выполняет измерения расстояния от базовых узлов на основе радиосигналов, передаваемых через них, а также проводит расчеты, необходимые для определения собственной позиции, или *центрированным относительно сети*, когда сигнал, передаваемый потребителем используется базовыми узлами (объединенными в сеть) для вычисления позиции потребителя, в этом случае информация о местоположении затем отправляется обратно потребителю, агенту.

Резюме этой классификации представлено в табл. 1.2. Другие возможные классификации основаны на применяемой беспроводной технологии, например сотовая и сенсорная сети, спутниковая и наземная системы, либо на основе зоны покрытия, например в помещении и на улице. Такая классификация рассматривается более подробно в специальном разделе 1.2.

Таблица 1.2. Классификация на основе конфигурации сети

Конфигурация сети	Описание
На основе базовых узлов	Часть узлов обладает информацией о своем местоположении
Многопрыжковая	Расстояние от базовых узлов может быть получено косвенно через промежуточные узлы
Однопрыжковая	Расстояние от базовых узлов может быть получено при прямом взаимодействии
Безъякорная	Ни один из узлов не обладает информацией о своем местоположении
Без определения дальности	Используется только информация о подключении
Терминал-центрированная	Использование специальной электроники в мобильном телефоне для определения собственного местоположения
Сеть-центрированная	Специальное оборудование для позиционирования в сети в целях определения местоположения мобильного терминала

1.1.3. Показатели производительности

Требования к сетям, имеющим информацию о своем местоположении, и технологиям зависят от их использования. Поскольку измерения, выполняемые при определении местоположения потребителя, зависят от некоторой неопределенности (например, шума), оценка местоположения также будет характеризоваться ошибками.

Ошибка оценки позиции задается евклидовым расстоянием между определенной позицией $\hat{\mathbf{x}}$ и истинной позицией $\mathbf{x}$ следующим образом:

$$e(\mathbf{x}) = \|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|_2. \quad (1.1)$$

Локальный показатель точности представляет собой среднеквадратичную ошибку (root mean square error — RMSE) оценки позиции

$$\text{RMSE} = \sqrt{\mathbb{E}\{e^2(\mathbf{x})\}}, \quad (1.2)$$

где $\mathbb{E}\{\cdot\}$ — статистическое ожидание по всем (случайным) источникам ошибок. RMSE часто называют точностью, так как это мера статистических отклонений оценки позиции от реального положения. Высокой точности соответствует низкая RMSE.

Прецизионность (сходимость результатов) описывает статистические отклонения от среднего положения, в частности дисперсию или стандартное отклонение (возможно, субъективное) от оцененной позиции. Высокая преци-

зионность представляется в виде низкой дисперсии или стандартного отклонения. При объективной оценке точность и прецизионность совпадают.

Другие представления точности и прецизионности включают в себя (временную/пространственную) достоверность измерений, при которой ошибки измерений будут ниже некоторого порога на определенный процент времени или измерений. Это представление можно рассматривать как вероятность отказа (сбоя), возникающую, если ошибка превышает допустимый порог e_{th} :

$$p_{out} = \mathcal{P}\{e(\mathbf{x}) > e_{th}\}, \quad (1.3)$$

где $\mathcal{P}\{X\}$ указывает вероятность события X , а e_{th} является пороговой (то есть максимально допустимой) ошибкой оценки позиции. Вероятность вычисляется с учетом всех возможных пространственных положений и моментов времени [39]. Если рассматривать всю область позиционирования, то ошибку позиционирования в результате отказа (localization error outage — LEO) можно рассматривать как глобальный показатель точности. Эквивалентный показатель, часто упоминаемый в литературе, — интегральная функция плотности (cumulative density function — CDF) $F_e(e)$ погрешности оценки позиции, которая задается уравнением

$$F_e(e_{th}) = \mathcal{P}\{e(\mathbf{x}) \leq e_{th}\} = 1 - p_{out}. \quad (1.4)$$

Другими показателями точности являются надежность работы алгоритма при некоторых нарушениях, таких как отсутствие радиовидимости, а также *покрытия* области, в которой узлы могут быть локализованы. В частности, аспекты, связанные со *скоростью обновления локализации* (то есть количество оценок позиции (перерегистрации) в секунду), имеют большое значение для навигационных систем (навигация пешеходов и транспортных средств, как правило, требует разной скорости обновления локализации), перекрывающихся сложными алгоритмов и высокой стоимости узлов.

1.2. Системы позиционирования и навигации

В этой книге рассматриваются существующие и перспективные системы позиционирования и навигации, создаваемые на базе научных и технологических исследований последних лет. Учитывая приведенные ранее классификации, теперь мы перейдем к технологическим различиям между спутниковыми и наземными системами позиционирования. Наглядное представление об основных технологиях позиционирования в настоящее время и степени их распространения и точности дано на рис. 1.4.

Системы *спутникового позиционирования* основаны на положении искусственных спутников, которые вращаются по известным орбитам и непрерывно передают сигналы, используемые мобильными терминалами для выполнения дальнометрии. По своей сути это навигационные системы, в то время как

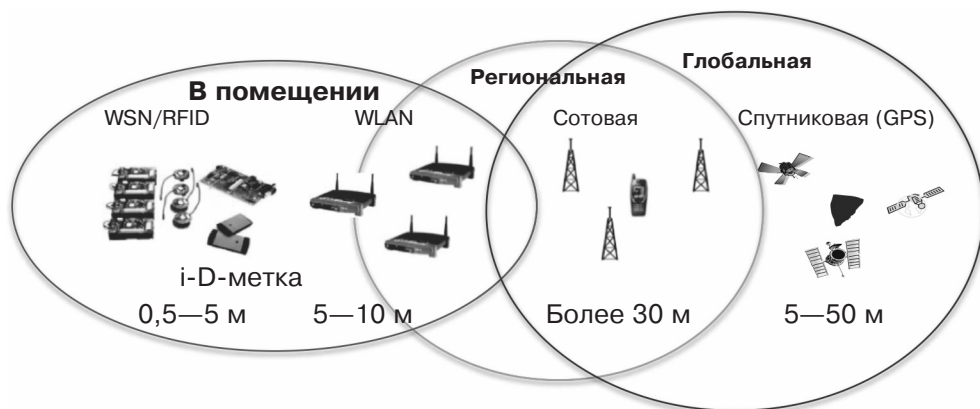


Рис. 1.4. Иллюстрация основных технологий позиционирования, а также их качественный уровень охвата и точности

последние наземные системы предназначены в основном для позиционирования. Система глобального позиционирования (GPS) в настоящее время в большей степени является глобальной навигационной спутниковой системой (GNSS).

Наземные системы позиционирования используют сеть наземных станций. В прошлом использовались несколько наземных систем для морской и авиационной навигации: Деcca, LORAN-C, TACAN и VOR/DME и множество других [2, 25]. Они характеризуются очень специализированными областями применения и высокой стоимостью установки и обслуживания. В долгосрочной перспективе некоторые из них будут заменены GNSS. Описание данного поколения наземных навигационных систем выходит за рамки этой книги.

С другой стороны, современные наземные системы определения местоположения родились как своего рода побочный продукт существующих беспроводных систем связи. Одним из основных различий между современными спутниковыми и наземными системами позиционирования является основная цель, для которой предназначен сигнал, идущий от передатчика к приемнику: в спутниковой системе целью является действительно позиционирование, тогда как в наземных системах позиционирование часто является вспомогательной опцией по отношению к передаче данных. По этой причине существует такое различие в технологических проблемах и областях применения. Это также главная причина, почему технология спутниковой навигации рассматривается зачастую как область, отличная от телекоммуникаций, возможно, находящаяся ближе к географическим наукам и наблюдениям.

Из-за разнообразия наземных беспроводных систем и методов модуляции к настоящему времени были предложены различные подходы к возможности позиционирования в личных телефонах и портативных устройствах. К ним от-

носятся терминал-центрированные и сеть-центрированные процедуры для сотовых сетей, для которых первые предложения изучались более пятнадцати лет назад — процедуры, направленные на модуляцию и протоколы для беспроводных локальных сетей (WLAN), беспроводные сети больших городов (WMAN) и WSN. Например, новая выделенная RTLS на основе радиочастотной идентификации (radio frequency identification — RFID) или на перспективных технологиях передачи, таких как ультраширокая полоса пропускания (ultra-wide bandwidth — UWB), была недавно представлена на рынке, как это показано в разделе 1.2.3. В табл. 1.3 сведены основные характеристики нескольких существующих систем. Список систем позиционирования с использованием других технологий можно найти в работе [16].

Таблица 1.3. Сравнение существующих систем позиционирования

Технология	Метод измерения	Точность	Достоинства	Недостатки
GPS	TDOA	10—20 м	Глобальное покрытие	Дорогостоящая инфраструктура, работает только на открытом воздухе
Galileo	TDOA	1—5 м	Глобальное покрытие	Дорогостоящая инфраструктура, работает только на открытом воздухе
A-GNSS	TDOA	Более 5 м	Покрывание территории одной страны	Низкая точность внутри помещений
Сотовая	E-OTD/OTDOA	50—500 м	Покрывание территории одной страны	Требуются синхронизированные базовые станции
Сотовая	CellID	Размер сотовой ячейки	Покрывание территории одной страны	Низкая точность
WLAN	RSS-модель	1—5 м	Покрывание внутри помещений, низкая стоимость	Требуется база данных цифровой модели, низкая точность
WSN (ZigBee)	RSS	1—10 м	Покрывание внутри помещений, низкая потребляемая мощность, низкая стоимость	Низкая точность
WSN (UWB)	TOA/TDOA/AOA	0,1—1 м	Покрывание внутри помещений, высокая точность	Малая дальность (менее 20 м), проблемы в NLOS

Таблица 1.3. (Окончание)

Технология	Метод измерения	Точность	Достоинства	Недостатки
RFID	Близость к узлу	Подключение	Покрытие внутри помещений, низкая потребляемая мощность, низкая стоимость	Низкая точность, одна метка на позицию
NFR	Электромагнитные характеристики в ближнем поле	1—5 м	Покрытие внутри помещений, низкая стоимость	Низкие частоты, большие антенны
INS	Ускорение/угловая скорость/магнитное поле Земли	1—5% от пройденного пути/угла перемещения	Работает везде	Дрейф позиции/ориентации

Тем не менее необходимо признать, что в настоящее время наблюдается сильное сближение технологий за счет интеграции навигационных и коммуникационных устройств, приложений и услуг (NAV/COM-систем и услуг). Передним краем беспроводного позиционирования является гибридизация спутниковых и наземных систем на базе концепции бесшовного позиционирования, основной пример — вспомогательная услуга GPS, которая использует наземные сотовые сети для повышения точности GPS-приемника.

1.2.1. Спутниковые системы

Мир навигации только что стал свидетелем важного этапа развития: появились и достигли полной работоспособности различные спутниковые навигационные системы, конкурирующие и дополняющие GPS. Европа призывает к развертыванию своей глобальной спутниковой системы Galileo, Россия радикально модернизировала глобальную навигационную спутниковую систему (ГЛОНАСС), Япония и Индия разрабатывают собственные региональные системы, а Китай занят преобразованием своей изначально региональной системы Beidou в глобальную. Соединенные Штаты вкладывают значительные ресурсы в модернизацию GPS. Появление этого нового спутникового созвездия способствовало ускорению мировых исследований в области спутниковой навигации, глубоко изменило рынок навигационных приемников и благодаря новым возможностям, новым услугам и повышению доступности расширило перспективы потребителей. Тем не менее бесспорным лидером среди спутниковых систем сегодня является GPS.

GPS является спутниковой радионавигационной системой, используемой для вычисления точного времени и трехмерной позиции в любом месте на Земле. Схема этой процедуры приведена на рис. 1.5. Определение местоположения с помощью GPS достигается путем получения сигнала с помощью

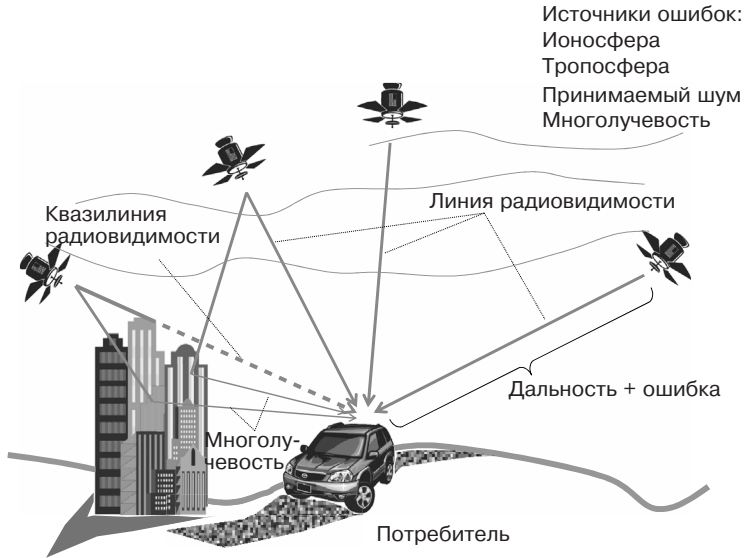


Рис. 1.5. Базовая архитектура GPS

ТОА-измерения, или псевдодальности, от минимум четырех спутников GPS. Эти предварительные значения псевдодальности представляют собой измеренные расстояния при прямой видимости (line of sight — LOS) сигналов, передаваемых каждым из спутников N_{sat} . Псевдодальность ρ_k для каждого спутника k будет равна

$$\rho_k = \sqrt{(x_k - x_u)^2 + (y_k - y_u)^2 + (z_k - z_u)^2} + c \cdot \Delta b_u, \quad k = 1, 2, \dots, N_{\text{sat}},$$

где x_k , y_k и z_k — геоцентрические, геофиксированные (ECEF) координаты для спутника k , а c — скорость света. Индекс u относится к потребителю, а x_u , y_u и z_u — ECEF-координаты потребителя. Временной сдвиг пользователя Δb_u является сдвигом между временем опорного приемника и (неизвестным) GPS-временем.

Как описано в главе 2, система (по крайней мере) четырех таких уравнений линеаризуется и итеративно решается для определения местоположения потребителя и его временного сдвига с использованием метода наименьших квадратов (LS) [24]. Временной сдвиг пользователя представляет собой изменяющуюся во времени величину, которая влияет на все псевдодальности и обусловлена следующими факторами:

- дрейф и сдвиг шкалы времени в приемнике потребителя;
- задержка при прохождении сигнала через спутниковую аппаратуру (аналоговый и цифровой);
- задержка сигнала при прохождении/обработке в антенне и приемнике.

В принципе, высокоточное позиционирование может быть получено в результате решения системы уравнений, упомянутых ранее. Однако в целом есть несколько основных источников ошибки GPS. Два из них включают неизвестные атмосферные ошибки или задержки в ионосфере и тропосфере. Из-за этих эффектов LOS-сигнал прибывает позже, чем предсказывают уравнения псевдодальности. Многолучевое распространение — еще один основной источник ошибки псевдодальности. Многолучевые сигналы (как правило, нежелательные) — это отраженные сигналы от земли или других близлежащих препятствий. В отличие от атмосферных воздействий, которые непосредственно влияют на LOS-сигнал TOA, многолучевость является причиной ошибочных измерений TOA-сигнала приемником GPS.

Принципы, обобщенные ранее для GPS, являются основой для понимания архитектуры всех спутниковых навигационных систем, в настоящее время находящихся в разработке, как глобальных, так и региональных. Более подробное обсуждение представлено в главе 2.

1.2.2. Системы функционального дополнения GNSS

Системы функционального дополнения GNSS появились, чтобы непрерывно обеспечивать надежную и безопасную навигацию, особенно когда требуются высокая точность, или усовершенствованное покрытие, или доступность. *Точность, доступность, целостность и непрерывность* — ключевые функции любой GNSS, поэтому для их улучшения были разработаны необходимые процедуры и внешние средства в виде **систем функционального дополнения GNSS** [30].

Системы функционального дополнения создают в целях уменьшения погрешностей от основных источников ошибок в GNSS. В основном это осуществляется путем размещения базовых станций на точно известном месте в непосредственной близости от потребителя или там, где требуется высокая точность навигации. Базовая станция измеряет расстояние до каждого из видимых спутников, демодулирует навигационное сообщение и в зависимости от типа параметра вычисляет несколько типов поправок, которые должны применяться в приемнике потребителя с целью повышения точности местопределения. Затем станция передает корректирующие сигналы потребителям через канал передачи данных, при этом точность позиционирования может составлять несколько сантиметров. **Системы функционального дополнения** работают только в общем режиме, учитывая пространственно коррелированные ошибки, такие как задержка сигнала в ионосфере и тропосфере. Ошибки, обусловленные многолучевостью, равно как и ошибки вследствие интерференции, не являются общими для базовых станций и потребителей, поэтому они не могут быть исправлены с помощью любых систем дополнения.

Основными системами функционального дополнения в настоящее время являются дифференциальные GPS (differential GPS — DGPS), спутниковые

системы функционального дополнения (satellite-based augmentation systems — SBAS), системы, работающие в режиме реального времени (real-time kinematic — RTK), и вспомогательные GNSS (AGNSS) [37]. Интересно отметить, что в то время как DGPS, SBAS, RTK требуют развертывания специальной наземной сети опорных станций и конкретных протоколов связи, AGNSS в основном использует архитектуру сети существующих систем сотовой связи, в частности с дополнительными функциями. По этой причине AGNSS — очень перспективная технология, поскольку она по своей сути реализует концепцию интеграции NAV/COM.

1.2.3. Наземные сетевые системы

Тенденция персонального использования навигационных систем, связанных с LBS, требует, чтобы устройства позиционирования могли беспрепятственно работать в различных изменяющихся и критических условиях, например внутри складов, многоэтажных зданий, подземных магазинов, на парковках, внутренних торговых и офисных помещениях. Примерами использования являются определение местоположения продукции, хранящейся на складе, обнаружение медицинского персонала или оборудования в больнице, поиск пожарных в горящем здании, определение местоположения полицейских собак, обученных поиску взрывчатых веществ в здании, и нахождение помеченных инструментов и оборудования, разбросанных по всему заводу [14]. К сожалению, прием сигнала GNSS в закрытых помещениях затрудняется из-за сильного затухания при прохождении стен и перекрытий, а также в результате многолучевого эффекта. Поэтому внутри помещений возникают большие проблемы с приемом и обработкой сигнала GNSS, решить которые призваны новые модуляции (такие, которые предусмотрены для Galileo) и новые подходы к навигации (в основном услуг GNSS).

Когда приемник находится в закрытом помещении, прием сигнала характеризуется сильным ослаблением радиосигнала и несколькими отраженными или рассеянными компонентами многолучевого распространения. Затухания, влияющие на прямое распространение сигнала, могут варьироваться от 10 до 25 дБ в зависимости от свойств бетона, тем самым снижая мощность радиосигнала примерно от -160 до -190 дБВт, однако номинальная чувствительность современных коммерческих приемников примерно равна 178 дБВт. Кроме того, внутри помещения эффект многолучевости и рассеяния становится еще более выраженным. В таких условиях использование основных приемников GPS действительно сомнительно, поэтому применяются другие подходы.

В настоящее время много исследований ориентировано на использование наземных беспроводных технологий как средств развития систем позиционирования и навигации, которые работают там, где использование спутниковых систем невозможно (внутри помещений, в городе). Новые LBS требуют опре-

деленного уровня точности установления местоположения, которому должны удовлетворять системы позиционирования, несмотря на все проблемы, типичные для распространения беспроводной связи, такие как затухание канала, низкое отношение сигнал — шум (signal-to-noise ratio — SNR), многопользовательские помехи и многолучевость.

Первые работы по позиционированию в помещениях появились более 10 лет назад, но многие работы еще продолжаются для уточнения и дальнейшей разработки этих новаторских идей, как в академических, так и в промышленных кругах [3, 15, 16]. Некоторые беспроводные технологии были изучены для внутреннего позиционирования. Их отличительными элементами являются:

- алгоритм позиционирования, который может использовать различные типы измерения сигнала, например TOA, AOA и RSS;
- физический уровень сетевой инфраструктуры, используемый для связи с терминалом пользователя. Одной из наиболее перспективных технологий для внутреннего позиционирования и связи, как представляется, является UWB [31, 33].

В этой книге термин «*наземные сетевые системы позиционирования и навигации*» относится к тем системам, которые используют беспроводные технологии и полностью развернуты на земле. Наиболее часто используемыми беспроводными технологиями такого рода являются сети сотовой связи, беспроводные локальные сети (WLAN), беспроводные системы на базе UWB, системы с радиочастотной идентификацией (RFID) и беспроводные сенсорные сети (WSN).

Наземные сетевые системы позиционирования можно также отнести к локальным системам, или системам малой дальности, потому что их зона покрытия ограничивается тем регионом, где они развернуты. Таким образом, они отличаются от GNSS, охват которых носит глобальный характер.

1.2.3.1. Позиционирование в сотовых сетях

Сотовые сети опираются на набор базовых станций (BS) с радиусом покрытия примерно до десятков километров каждая. В настоящее время они широко распространены во всех развитых странах.

Наиболее популярная технология позиционирования в сотовых сетях основана на TDOA [22]. Например, позиционирование в GSM основывается на существующей *разности во времени* (OTD). OTD оценивает разность во времени между сигналами, приходящими в локальные станции (MS) от двух разных BS. По крайней мере, необходимы три видимые BS для оценки положения MS, которое получается в результате пересечения гиперболических линий, имеющих фокусы в положениях BS. Окончательная точность позиционирования в GSM-системе с использованием OTD колеблется от 50 до 500 м.

Метод оценки параметра сигнала, используемый в UMTS сетях, — TDOA (OTDOA), он основан на подходе TDOA. Во всяком случае, точность сотового позиционирования довольно скромная, по этой причине последние алгоритмы определения местоположения пытаются использовать любую имеющуюся информацию о состоянии окружающей среды (например, затухание, доплеровскую частоту и топологию сети) для достижения более высокой точности с помощью методов объединения данных. Позиционирование в сотовых системах рассматривается в разделе 3.2.1.

1.2.3.2. Позиционирование в беспроводных локальных сетях (WLAN)

Область размещения WLAN намного меньше площади сотовых сетей. Они широко используются как в частных, так и государственных учреждениях, таких как кампусы компаний, университетов, корпораций, аэропорты, музеи и торговые центры. Развертывание сетей WLAN под открытым небом можно увидеть только в небольших зонах крупных городов в оживленных местах. Решение проблем позиционирования на основе WLAN-систем полагается главным образом на оценку мощности сигнала. Поскольку измерение мощности принимаемого сигнала (RSS) является частью нормального режима работы беспроводного трансивера, никакой другой специальной аппаратной инфраструктуры не требуется. Как описано в разделе 3.3, наиболее часто в WLAN-системах используются методы моделирования пространства фингерпринтинга [3].

1.2.3.3. Позиционирование при радиочастотной идентификации (RFID)

RFID-технология привлекла огромный интерес во всем мире, начиная с самых ранних новаторских идей, выдвинутых в 1948 г. Множество примеров использования этой технологии можно найти в нескольких областях, таких как логистика, автомобили, наблюдение, системы автоматизации, и в целом для идентификации объектов в режиме реального времени [9]. RFID-система состоит из меток, которые присваиваются объектам и считывателю. Считыватель запрашивает метки для получения данных, хранящихся на них посредством беспроводной связи. Когда требования к стоимости, размерам и энергопотреблению меток становятся особенно жесткими, рассматриваются пассивные или полупассивные варианты меток. Связь с пассивными метками обычно осуществляется передачей обратного сигнала, логические и запоминающие схемы контроля меток получают необходимую энергию для обработки ВЧ-сигнала, присланного считывателем.

Последние разработки демонстрируют тенденцию к гибридизации активных RFID- и RTLS-технологий [19]. Некоторые поставщики RFID внедряют или адаптируют RTLS-концепции, чтобы обеспечить дополнительные функциональные возможности своих устройств. Некоторые системы опираются на алго-

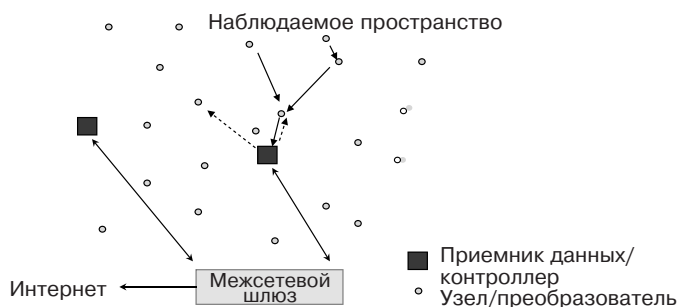


Рис. 1.6. Пример WSN

ритмы позиционирования, основанные на близости, которые, в общем, не очень точны для многих приложений. Стандарт ИСО/МЭК 24730-2 [20] был введен в 2006 году, чтобы заполнить разрыв между RFID- и RTLS-технологиями. Также были проведены некоторые научно-исследовательские разработки для интеграции RFID- и UWB-технологий и получения RTLS крайне низкой стоимости [5]. Алгоритмы позиционирования, принятые в RTLS на основе RFID, как правило, те же, что и в беспроводных локальных сетях и WSN.

1.2.3.4. Позиционирование в WSN

WSN в своей простейшей форме можно определить как сеть устройств (простых, малогабаритных), называемых узлами, которые принимают информацию об окружающей среде и посредством беспроводной связи обмениваются информацией. Данные передаются через несколько ретрансляторов в локальный приемник данных (контроллер или монитор) или в другие сети через шлюз (как показано на рис. 1.6) [38]. Число приложений, где используются WSN сегодня или планируется их применение в будущем, достаточно велико. Помимо «основных» приложений, относящихся к общему мониторингу окружающей среды и процессов, WSN используются или будут использоваться также в системе безопасности дорожного движения, медицине, сельском хозяйстве, логистике и при ликвидации последствий стихийных бедствий.

Во многих (если не сказать всех) приложениях WSN сенсор используется мало, если он не оказывается в положении, в котором были собраны данные. Проблемы позиционирования в WSN могут сильно варьироваться по своему характеру от сети к сети и от приложения к приложению. Целесообразность подхода к позиционированию сенсорных узлов зависит от доступных аппаратных средств, измеренных данных, инфраструктуры и от требований приложения. В некоторых случаях фиксированная инфраструктура может быть установлена по всей области развертывания сети, для того чтобы помочь позиционированию подвижных сенсорных узлов. Эта инфраструктура может включать в себя опорные узлы в известном месте (якоря) или цент-

ральную станцию обработки с расширенными ресурсами с точки зрения вычислительной мощности и/или энергоснабжения. Ожидаемый размер сети, то есть плотность узлов и зона покрытия сети, также играет важную роль в процессе проектирования. Некоторые WSN, которые были рассмотрены в литературе, включают тысячи сенсорных узлов, плотно расположенных на очень больших площадях. В таких крупных сетях очень важно, чтобы сложность алгоритма позиционирования не стала резко возрастать в зависимости от количества узлов и/или уровня подключения сети, то есть важным фактором часто является алгоритм масштабирования. В табл. 1.4 приведены некоторые основные аспекты WSN с точки зрения структуры алгоритма позиционирования и основных свойств. Позиционирование в WSN рассматривается в разделе 3.4.

Таблица 1.4. Факторы, влияющие на выбор алгоритма позиционирования WSN

Характеристики WSN	Важные свойства алгоритма
Доступное оборудование для узлов	Сложность алгоритма
Наличие фиксированной инфраструктуры	Распределенный или централизованный алгоритм
Ожидаемый размер сети (количество узлов, соединений)	Алгоритм масштабирования
Наличие исходных данных	Метод позиционирования, например трилатерации
Область применения сети	Точность алгоритма позиционирования

1.2.3.5. Сверхширокополосная (UWB) технология позиционирования

UWB является перспективной технологией для высокоточного позиционирования в закрытых помещениях, позволяющей очень точно и быстро измерить расстояния. UWB также является жизнеспособной технологией для беспроводной связи малой дальности в закрытых помещениях с потенциально привлекательными особенностями: высокой скоростью передачи, простотой и низкой стоимостью, малым потреблением энергии [4, 13]. Эта технология вызвала значительный и постоянно растущий интерес у многих производителей в США с февраля 2002 года, когда Федеральная комиссия по связи (FCC) открыла диапазон шириной 7,5 ГГц (от 3,1 до 10,6 ГГц) для использования устройств UWB [8].

Традиционный подход к конструкции системы связи UWB использует узкополосные кратковременные импульсы очень короткой продолжительностью, как правило, порядка наносекунды, тем самым распространяя энергию радиосигнала достаточно равномерно по широкой полосе частот в диапазоне от крайне низких значений до нескольких гигагерц. Этот метод обычно называют UWB-импульс-радио (IR-UWB). Большое преимущество короткоимпульсной модуляции — возможность оценить TOA, определяющее местоположение с точностью менее 1 м.

В марте 2004 года в рамках стандартизации IEEE 802.15 была создана техническая группа под названием «Целевая группа TG4a». Ее задача заключалась в определении альтернативного физического уровня (IEEE 802.15.4a) на основе UWB-характеристик для стандарта IEEE 802.15.4, большей частью используемого для создания WSN. Перед конструкторами стояли две цели: низкая стоимость и низкое энергопотребление, которые были достигнуты за счет нового слоя PHY на основе UWB с помощью простых схем демодуляции, низкой скорости передачи данных и малого тепловыделения. Низкое энергопотребление достигается за счет низкого коэффициента использования (заполнения импульсами). Было заявлено, что первый коммерческий чипсет, совместимый с IEEE 802.15.4a, будет выпущен в конце 2011 года. Параллельно с этим ряд компаний, предлагающих собственные продукты UWB для RTLS, серьезно занялись разработкой нового стандарта IEEE 802.15.4f, который должен регламентировать решения для точного позиционирования в закрытых помещениях при чрезвычайно низкой стоимости и низком энергопотреблении.

1.3. Применение технологий обработки сигналов в позиционировании и навигации

Как показано на примерах в разделе 1.1.2, при отсутствии ошибок измерений большинство задач позиционирования связаны с геометрическим подходом, при котором расположение MS непосредственно определяется из параметров, зависящих от позиции, которые извлекают из полученного сигнала путем геометрических построений (например, пересечения окружностей и гипербол). На практике измерения подвержены ошибкам, и, следовательно, такие подходы могут оказаться бесполезными. Следовательно, задача позиционирования должна решаться в рамках более общей теории оценивания.

В общем случае проблема позиционирования может быть сформулирована следующим образом (рис. 1.7). Рассмотрим общий сценарий с большим количеством беспроводных узлов, где некое подмножество узлов находится в неизвестных позициях (MS). Пусть $\mathbf{x}$ — набор координат для позиций MS. Мы хотим оценить $\hat{\mathbf{x}}$ для позиций MS по ряду доступных измерений $\mathbf{r}$ (наблюдений). Этот набор может включать в себя измерения от нескольких BS, а также измерения между MS или самостоятельные измерения. Измерения могут быть либо TOA, AOA, RSS, либо даже гетерогенные комбинации из них. Главный вопрос заключается в разработке оценочной функции, которая сводит к минимуму определенные показатели точности, такие как RMSE. Как правило, предпочтительнее получить оценочную функцию, которая обеспечивает объективную и минимальную дисперсию оценки.

Статистическая геометрия дает теоретическую основу, которая помогает решать задачи позиционирования даже при наличии ошибок измерений. Ста-

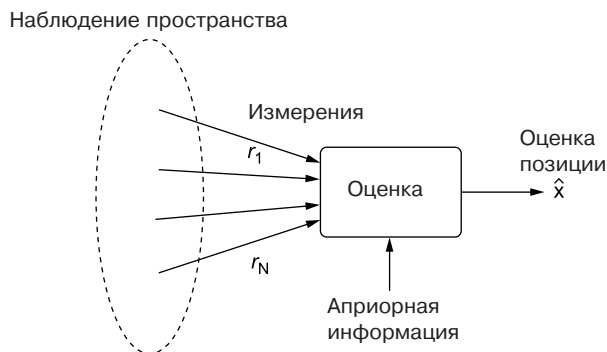


Рис. 1.7. Проблема оценки позиции

статистические методы основаны на вероятностном описании наблюдения r . Предполагается, что элементы r (измерения) — случайные переменные (random variables — RV), суммарная функция плотности вероятности (PDF) которых зависит от положения MS. Как правило, используется модель аддитивного шума, а это означает, что предполагаемые параметры позиции задаются суммой слагаемых, зависящих от местоположения MS, и случайных помех. Статистические методы делятся на параметрические или непараметрические в зависимости от того, доступно или нет вероятностное описание набора наблюдений r соответственно. Теперь мы представляем краткий обзор основных подходов, которые используются в теории оценивания для решения проблемы позиционирования. Более подробную информацию читатель может найти в классических учебниках по теории оценивания [36].

1.3.1. Параметрические статистические методы

Параметрические методы предполагают полное или частичное статистическое определение параметров позиции.

1.3.1.1. Байесовская оценочная функция

Когда можно получить априорные статистические характеристики измерений $\mathbf{r}$, а также параметр для оценки (координаты $\mathbf{x}$ позиций станций MS), можно использовать байесовские методы. Объективная оценочная функция минимальной среднеквадратической ошибки (MMSE) задается выражением

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{MMSE}} = \int \mathbf{x} p(\mathbf{x}|\mathbf{r}) d\mathbf{x}, \quad (1.5)$$

где $p(\mathbf{x}|\mathbf{r})$ — апостериорная плотность вероятности PDF от $\mathbf{x}$.

Следующий критерий — оценочная функция максимальной апостериорной вероятности (MAP), определяется как

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{MAP}} = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{x}|\mathbf{r}), \quad (1.6)$$

что эквивалентно оценочной функции MMSE, когда случайные величины $\mathbf{x}$ и $\mathbf{r}$ являются совместно гауссовскими.

1.3.1.2. Оценка методом максимального правдоподобия

При отсутствии априорных статистических характеристик позиций станций MS не всегда существует несмещенная оценка с минимальной дисперсией, а если она все-таки есть, отсутствует простая процедура для ее нахождения. Популярным и в целом оптимальным методом является оценка по методу максимального правдоподобия (maximum likelihood — ML):

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ML}} = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{r}|\mathbf{x}), \quad (1.7)$$

где $p(\mathbf{r}|\mathbf{x})$ является условной PDF измерений, определяемой позициями MS. Популярность оценки ML исходит из того, что она асимптотически эффективна, то есть при малых ошибках измерений она становится несмещенной оценкой с минимальной дисперсией. Действительно, когда существует эффективная оценка, ее можно произвести с помощью ML-оценки.

Дисперсия любой несмещенной оценки снизу ограничена нижним пределом Крамера—Рао (CRB), который, как правило, принимается в качестве эталона для новой конструкции оценок. Основные пределы рассматриваются в главе 4.

1.3.2. Непараметрические статистические методы

1.3.2.1. Оценка методом наименьших квадратов (LS)

Когда (априори) статистическая характеристика измерения отсутствует, в качестве стандартного подхода используют метод наименьших квадратов. Предположим, что измерение может быть выражено следующим образом:

$$\mathbf{r} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{n}, \quad (1.8)$$

где $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ обозначает связь между измерениями и положением MS, $\mathbf{n}$ — ошибки измерения, LS-оценка — позиция $\hat{\mathbf{x}}_{\text{LS}}$, которая минимизирует сумму квадратов ошибок измерения следующим образом:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{LS}} = \arg \min_{\mathbf{x}} (\mathbf{x} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))^T (\mathbf{x} - \mathbf{h}(\mathbf{x})). \quad (1.9)$$

Поскольку никаких вероятностных предположений об измерениях не сделано, сведение к минимуму ошибки LS не минимизирует ошибки оценивания, следовательно, в целом LS не является оптимальным методом. Заметим, что если погрешность измерения $\mathbf{n}$ имеет гауссовское распределение, оценки LS и ML становятся эквивалентными.

1.3.3. Негеометрические методы

Совершенно иной подход применяется в негеометрических методах, где измерения используются не для построения геометрических соотношений, а для получения своего рода «подписи» каждого интересующего места. Примером негеометрического метода являются методы моделирования пространства (или картирования). Метод описан более подробно в подразделе 3.1.2.3.

1.3.4. Дополнительные инструменты обработки сигналов

Хотя теория оценки была хорошо отработана в течение нескольких десятилетий, алгоритм хорошей оценки до сих пор является областью активных научных исследований из-за возможности негауссовских нарушений (например, многолучевого распространения, условия существования канала без прямой видимости (non-line-of-sight — NLOS), отсутствия синхронизации времени), различных конфигураций сети (централизованных, распределенных, совместных, когнитивных) и ограничений, таких как сложность вычислений и энергоэффективность. Поэтому были разработаны несколько дополнительных инструментов обработки сигнала. Например, если набор r включает в себя в межстанционные измерения (совместная локализация), прямое определение оценок MMSE, ML, LS или максимальных апостериорных оценок (maximum a posteriori — MAP) становится недоступным вследствие их сложности. Кроме того, измерения r могут содержать наблюдения, выполненные в разные моменты времени в среде, где MS находятся в непрерывном движении. В этом случае для более точной оценки позиции могут быть использованы алгоритмы отслеживания с применением байесовского подхода с временными корреляциями между последовательными наблюдениями. Как показано в главе 6, байесовская система также позволяет эффективно интегрировать различные технологии позиционирования (например, спутниковые и наземные или радио- и инерционные), а также мобильные модели MS в единой системе навигации посредством объединения данных.

1.3.4.1. Байесовская фильтрация

В байесовской фильтрации [11] проблема локализации моделируется как динамическая система, в которой вектор состояния x_n в дискретный момент времени n имеет координаты MS. В частности, в момент n апостериорная PDF $\text{Bel}(x_n)$ состояния x_n называется правдоподобием и оценивается в два этапа (рис. 1.8). На первом этапе функция правдоподобия обновляется в соответствии с мобильной моделью $p(x_n|x_{n-1})$, которая представляет собой динамическую модель для системы $\text{Bel}(x_n)$. Мобильная модель дает описание изменения $x_{n-1} \rightarrow x_n$, то есть статистическое описание движения MS. На втором этапе функция доверия претерпевает дальнейшее обновление до $\text{Bel}(x_n)$ с учетом статистической информации $p(r_n|x_n)$ о положении в момент времени n , начиная с измерения вектора r_n , собранного на момент n . Это воспринимающая модель восприятия, которая работает в качестве обновления состояния системы. Посредством функции правдоподобия можно определить наиболее вероятное состояние (позицию MS) в момент времени n среди всех возможных состояний. Поскольку реализация байесовского фильтра может быть сложной, в литературе были разработаны несколько оптимальных подходов, которые будут представлены в главе 6.

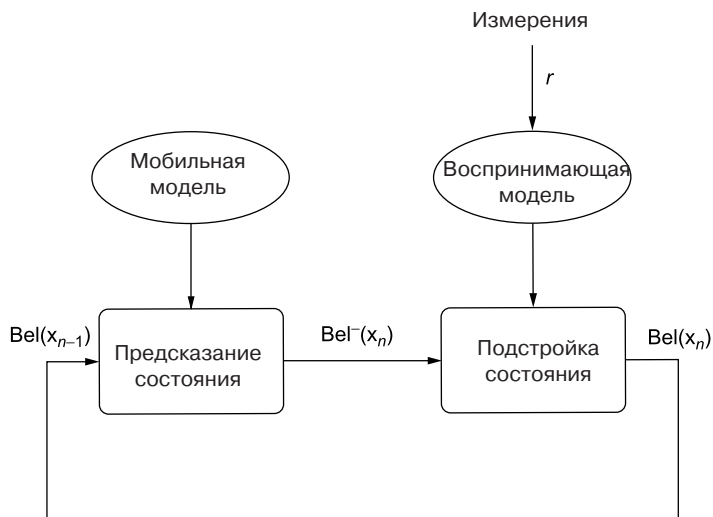


Рис. 1.8. Схематическое представление байесовской фильтрации для отслеживания позиции

1.3.4.2. Метод максимального правдоподобия

Методы максимального правдоподобия и их относительная простота реализации, например методы, основанные на фактор-графах, представляют собой мощные средства обработки сигналов для решения проблемы позиционирования при совместной работе [10, 34, 40]. Как показано на рис. 1.9, сеть позиционирования может быть представлена в виде неориентированного графа, где вершины — это узлы с привязанными локациями x_k и предварительные PDF, а ребра (ветви) соединяют узлы и позволяют обмениваться измерениями с вероятностью $p(r_{n,k}|x_k, x_n)$. На каждой итерации узел k получает приближенную апостериорную PDF (правдоподобие) $\hat{p}(x_k|r)$ его собственной позиции.

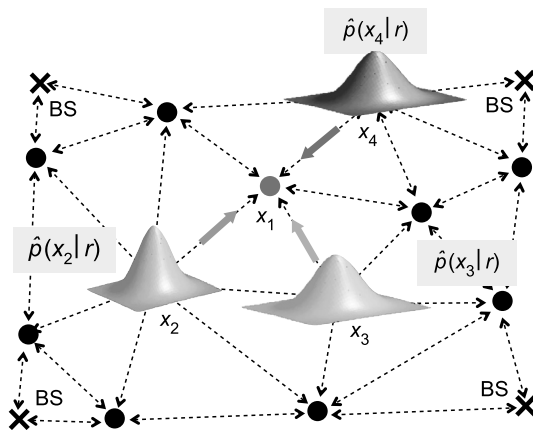


Рис. 1.9. Позиционирование с помощью методов распространения доверия

Соседи используют свои измерения для вычисления показателей правдоподобия к позиции k -го узла и отправляют его к узлу k (в виде сообщения). Обмен сообщениями между узлами продолжается до получения сходимости алгоритма. Более подробную информацию о позиционировании, основанном на распространении доверия, можно найти в главе 5, где также дан пример этого подхода (см. подраздел 5.4.5.2).

Литература

1. A. Sayed, A. Tarighat, N. Khajehnouri, Network-based wireless location, *IEEE Signal Process. Mag.* 22 (4) (2005) 24–40.
2. S. Appleby, R. Linford, P. Yarwood, *Marine Electronic Navigation*, second ed., Routledge & Kegan Paul, 1988.
3. P. Bahl, V.N. Padmanabhan, RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, in: *Proceedings of the IEEE Infocom 2000*, Tel Aviv, Israel, 2000.
4. D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, M.Z. Win, Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments, *Proc. IEEE, Special Issue on UWB Technology & Emerging Applications*, 97 (2) (2009) 404–426.
5. D. Dardari, R. D’Errico, C. Roblin, A. Sibille, M.Z. Win, Ultrawide bandwidth RFID: The next generation? *Proc. IEEE, Special Issue on RFID — A Unique Radio Innovation for the 21st Century*, 98 (9) (2010) 1570–1582.
6. R. Das, P. Harrop, RFID forecast, players and opportunities 2007–2017. <http://www.id-techex.com>, 2007.
7. F. Gustafsson, F. Gunnarsson, Mobile positioning using wireless networks, *IEEE Signal Process. Mag.* 22 (4) (2005) 41–53.
8. Federal Communications Commission, Revision of part 15 of the commission’s rules regarding ultrawideband transmission systems, first report and order (ET Docket 98–153), Adopted Feb. 14, 2002, Released Apr. 22, 2002.
9. K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, second ed., John Wiley & Sons, 2004.
10. D. Fontanella, M. Nicoli, L. Vandendorpe, Bayesian localization in sensor networks: Distributed algorithm and fundamental limits, in: *2010 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2010, pp. 1–5.
11. D. Fox, J. Hightower, L. Liao, D. Schulz, G. Borriello, Bayesian filtering for local estimation, *IEEE Pervasive Comput.* 2 (3) (2003).
12. G. Sun, J. Chen, W. Guo, K.J. Ray Liu, Signal processing techniques in network-aided positioning, *IEEE Signal Process. Mag.* 22 (4) (2005) 12–23.
13. S. Gezici, Z. Tian, G.B. Giannakis, H. Kobayashi, A. Molisch, H.V. Poor, et al., Localization via ultrawideband radio, *IEEE Signal Process. Mag.* 22 (4) (2005) 70–84.
14. H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, J. Liu, Survey of wireless indoor positioning techniques and systems, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. C Appl. Rev.* 37 (6) (2007) 1067–1080.
15. A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward, P. Webster, The anatomy of a context-aware application, *Wireless Networks* 8 (2002) 187–197.
16. J. Hightower, G. Borriello, Location systems for ubiquitous computing *Computer* 34 (8) (2001) 57–66.
17. http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/icar/index_en.htm, 2008.
18. http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/technologies/tech_07/index_en.htm, 2008.
19. ISO/IEC 19762-5:2008. Information technology — automatic identification and data capture (AIDC) techniques — part 5: Locating systems.

20. ISO/IEC 24730-2. Information technology — real-time locating systems (RTLS) — part 2: 2.4 GHz air interface protocol.
21. J.H. Reed, K.J. Krizman, B.D. Woerner, T.S. Rappaport, An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location services, *IEEE Commun. Mag.* 36 (4) (1998) 30–37.
22. J.J. Caffery Jr., G.L. Stuber, Overview of radiolocation in CDMA cellular systems, *IEEE Commun. Mag.* (1998) 38–45.
23. K. Gratsias, E. Frentzos, V. Delis, Y. Theodoridis, Towards a taxonomy of location based services, in: *Web and Wireless Geographical Information Systems, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin/Heidelberg, 2005.
24. E.D. Kaplan, *Understanding GPS: Principles and Applications*, second ed., Artech House, Norwood, MA, 2006.
25. M. Kayton, W. Fried, *Avionics Navigation Systems*. A Wiley-Interscience publication. J. Wiley, 1997.
26. M. Vossiek, L. Wiebking, P. Gulden, J. Wiegardt, C. Hoffmann, P. Heide, Wireless local positioning, *IEEE Microwave Mag.* 4 (4) (2003) 77–86.
27. M. Maroti, P. Völgyesi, S. Dora, B. Kusy, A. Nadas, A. Ledeczki, et al., Radio interferometric geolocation. in: *Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, San Diego, 2005.
28. P. Bellavista, A. Kupper, S. Helal, Location-based services: Back to the future. *IEEE Pervasive Comput.* 7 (2) (2008) 85–89.
29. N. Patwari, J.N. Ash, S. Kyperountas, A.O. Hero, R.L. Moses, N.S. Correal, Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Process. Mag.* 22 (4) (2005) 54–69.
30. R.E. Phelts, *Multicorrelator Techniques for Robust Mitigation of Threats to GPS Signal Quality*, PhD thesis, Stanford University, 2001.
31. Z. Sahinoglu, S. Gezici, I. Guvenc, *Ultra-Wideband Positioning Systems: Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols*, Cambridge University Press, 2008.
32. H.G. Schantz, A real-time location system using near-field electromagnetic ranging, in: *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Honolulu, HI, 2007.
33. Y. Shen, M. Win, Fundamental limits of wideband localization — part I: A general framework, *IEEE Trans. Inf. Theory* 56 (10) (2010) 4956–4980.
34. Y. Shen, H. Wymeersch, M. Win, Fundamental limits of wideband localization — part II: Cooperative networks. *Inf. Theory IEEE Trans.* 56 (10) (2010) 4981–5000.
35. T.S. Rappaport, J.H. Reed, B.D. Woerner, Position location using wireless communications on highways of the future, *IEEE Commun. Mag.* 34 (10) (1996) 33–41.
36. H.L.V. Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory: Part I*, second ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
37. F. Van Diggelen, *A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS*, *GNSS Technology and Applications Series*, Artech House, 2009.
38. R. Verdone, D. Dardari, G. Mazzini, A. Conti, *Wireless Sensor and Actuator Networks: Technologies, Analysis and Design*, Elsevier, 2008.
39. M.Z. Win, A. Conti, S. Mazuelas, Y. Shen, W.M. Gifford, D. Dardari, Network localization and navigation via cooperation, *IEEE Commun. Mag.* (2011).
40. H. Wymeersch, J. Lien, M. Win, Cooperative localization in wireless networks, *Proc. IEEE* 97 (2) (2009) 427–450.