

Введение

Цифровые системы связи широко используются для передачи различных видов информации, таких, как речь, данные, видео и т. п. Как правило, это системы с многостанционным доступом, которые могут поддерживать связь со многими пользователями путем распределения доступных ресурсов (например, полосы частот, мощности передачи и др.). В настоящее время известны следующие технологии многостанционного доступа [1–16]:

- системы многостанционного доступа с кодовым разделением каналов (Code Division Multiple Access, CDMA);
- системы многостанционного доступа с временным разделением каналов (Time Division Multiple Access, TDMA);
- системы многостанционного доступа с частотным разделением каналов (Frequency Division Multiple Access, FDMA);
- системы многостанционного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA);
- системы со многими передающими и приемными антеннами (Multiple-Input multiple-Output, MIMO), использующие пространственно-временное кодирование (Space-Time Coding, STC) и турбообработку информации.

Системы радиосвязи с многостанционным доступом могут одновременно поддерживать связь со многими абонентскими станциями. Каждая абонентская станция связывается с одной или более базовыми станциями по прямой и обратной линиям связи. Прямой линией связи (или линией «вниз»*) называется линия связи от базовой станции к абонентской станции, а обратной линией связи (или линией «вверх») называется линия связи от абонентской станции к базовой станции. Эта линия связи может использоваться в системах с различным числом

* Этот термин произошел от систем спутниковой связи, где абоненты находятся на Земле, а роль базовой станции выполняет ретранслятор, размещенный на спутнике.

как передающих, так и приемных антенн: в так называемых системах с одним входом и одним выходом, многими входами и одним выходом или многими входами и многими выходами (MIMO).

Несмотря на наличие ряда книг, изданных в Российской Федерации и посвященных различным аспектам формирования и обработки сигналов, в настоящее время отсутствует книга, которая бы позволила русскоязычному читателю ознакомиться с последними достижениями в данной области, особенно в применении к будущим системам 5G. Настоящая книга призвана уменьшить этот пробел.

Модели каналов связи описаны в главе 1. Технология MIMO и алгоритмы демодуляции для систем MIMO рассматриваются во 2-й и 3-й главах соответственно. Общие вопросы демодуляции радиосигналов рассмотрены в главе 3.

В качестве примера систем связи, использующих технологию CDMA, можно привести универсальную систему подвижной связи (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) третьего поколения (3G) [5, 13]. Наряду с UMTS, в рамках партнерского проекта по разработке стандарта систем третьего поколения (3GPP) также работает проект по долговременному усовершенствованию (Long Term Evolution, LTE) систем стандарта UMTS для перехода к системам четвертого (4G) и следующего поколений (5G). В последнее время появилась модификация LTE, получившая название LTE Advanced.

Стандарты LTE и LTE-Advanced основаны на технологии OFDM, которая описана в главе 5.

В последнее время наблюдается быстрое развитие цифровых систем связи, проявляющееся, главным образом, в увеличении объемов передаваемой информации. Поэтому перед разработчиками оборудования связи ставится задача увеличения пропускной способности систем связи. Пропускная способность определяется максимальной скоростью передачи информации или числом пользователей (абонентов) и является одной из важнейших характеристик, от которых зависит конкурентоспособность системы. Быстро развиваются системы сотовой подвижной связи (ССПС), к которым предъявляются требования обеспечения высокой пропускной способности и достоверного приема информации в сложных для распростра-

нения радиоволн условиях городской застройки при высоких скоростях перемещения абонентов.

Увеличение числа обслуживаемых абонентов, повышение спектральной эффективности и помехоустойчивости ССПС достигается за счет применения упомянутых выше технологий, таких как кодовое разделение каналов (CDMA), ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM), пространственно-временное кодирование (STC), турбокодирование, а также использования многих передающих и многих приемных антенн (MIMO). Применение этих технологий стало возможным благодаря успехам микроэлектронной промышленности: в цифровых системах связи появилась возможность реализации сложных алгоритмов цифровой обработки сигналов [11, 16]. Краткое описание принципов работы систем CDMA приведено в главе 6.

Увеличение пропускной способности затрудняет наличие помех от других пользователей в канале связи. Проблема подавления внутриканальных помех особенно актуальна для систем с кодовым разделением каналов [17–19]. Алгоритмы подавления внутриканальных помех, называемые также алгоритмами многопользовательской демодуляции, позволяют существенно увеличить пропускную способность систем CDMA. Уровень внутриканальной помехи в системе CDMA определяется числом абонентов, свойствами кодовых последовательностей, а также точностью синхронизации [4], многопользовательский демодулятор обрабатывают сигналы абонентов совместно с учетом их структуры и взаимного влияния друг на друга в канале связи, что позволяет компенсировать внутриканальную помеху. Глава 7 содержит подробное изложение алгоритмов многопользовательской демодуляции. Существуют следующие способы увеличения пропускной способности систем связи:

- расширение используемой системой полосы частот;
- увеличение мощности, излучаемой передатчиками абонентских станций и базовых станций;
- применение адаптивных антенных решеток на приемной и передающей сторонах;
- использование методов разнесенного приема и передачи;
- применение высокопроизводительных микропроцессоров

для реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов;

- применение высокоэффективных алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Первый способ весьма затруднителен по экономическим соображениям.

Радиочастотный спектр является ограниченным природным ресурсом и распределяется государством между различными радиослужбами. Из-за загруженности частотных диапазонов действующими системами распределение радиочастотного спектра является сложной задачей. Второй способ приводит к увеличению энергопотребления, а также помех другим системам. Остальные способы увеличения пропускной способности, кроме последнего, требуют применения дополнительного оборудования, что приводит к увеличению стоимости системы связи.

Последний способ является наиболее эффективным, так как подразумевает использование новых подходов к обработке сигналов, в том числе и алгоритмов многопользовательской демодуляции.

Новые подходы к обработке сигналов, позволяющие повысить пропускную способность системы связи и которые рассматриваются для применения в будущих системах 5G, кратко обсуждаются в главе 8.

Математическое моделирование, включая имитационное статистическое моделирование, является практически единственным на сегодняшний день методом исследования характеристик сложных алгоритмов обработки сигналов, работающих в условиях реального канала связи с помехами и искажениями. Основные подходы к моделированию алгоритмов обработки сигналов приведены в главе 9.

Следует отметить, что разработчику оборудования связи необходимо обеспечить оптимальное использование следующих ресурсов [16]:

- частотного;
- энергетического;
- вычислительного.

Технологии CDMA, OFDM и MIMO позволяет эффективно использовать первые два ресурса. Третий ресурс определяется цифровыми сигнальными процессорами. Чем сложнее

алгоритм обработки сигналов, тем более производительный и дорогой процессор требуется. Поэтому разработчику системы необходимо найти компромиссное решение между вычислительной сложностью реализации алгоритма и его качественными характеристиками. В заключительной, 10-й главе рассмотрены вопросы вычислительной сложности алгоритмов обработки сигналов и методам ее расчета и снижения.

В качестве приложений приведены справочные сведения по теории матриц и матричным операциям, теории вероятностей и математической статистике, моделированию случайных величин, а также вычислительной сложности основных операций обработки сигналов.

Книга будет полезна студентам, аспирантам, инженерам, преподавателям вузов и всем интересующимся современными и перспективными методами обработки сигналов для систем подвижной радиосвязи.

В.Б. Крейнделин выражает благодарность своей супруге Светлане, без поддержки которой многолетняя работа над книгой почти наверняка не была бы закончена. Д.Ю. Панкратов благодарит свою супругу Евгению и детей за поддержку в написании книги.

Авторы посвящают книгу своему учителю и научному руководителю Александру Михайловичу Шломе (1934–2017).