

# Введение

---

В современных системах сотовой связи постоянно возрастают требования к их пропускной способности и емкости, что может быть достигнуто за счет увеличения числа базовых станций, ширины полосы частот радиоканалов или числа радиоканалов, а также повышения спектральной эффективности.

Наиболее экстенсивный и дорогостоящий способ увеличения емкости сотовой сети — увеличение числа базовых станций на обслуживаемой территории, а во многих больших городах в настоящее время просто нереализуемый: плотность расстановки макробазовых станций уже достигла своего предела. И следующим шагом в этом направлении станет переход к микро- и пикобазовым станциям с упрощенными требованиями к местам установки и эксплуатации.

В течение всей истории развития сотовой связи прослеживается тенденция увеличения ширины полосы частот радиоканала: 200 кГц в GSM (1990-е годы), 5 МГц в UMTS (2000-е годы), 20 МГц в LTE (2010-е годы). Однако в условиях ограниченности частотного ресурса этот путь наращивания емкости сети имеет свои пределы. Здесь становится востребованным новый подход — объединение в один канал нескольких беспроводных каналов, например агрегация несущих в LTE-Advanced, позволяющая уже сейчас передавать информацию пользователю в полосе 40 МГц при объединении двух каналов по 20 МГц. Напомним, что в LTE-Advanced поставлена цель объединения пяти несущих по 20 МГц, т. е. использование агрегированного канала шириной 100 МГц.

Наиболее экономически оправданным является путь повышения эффективности использования радиочастотного спектра, т. е. меры пропускной способности системы в одной соте сети, при-

ходящейся на единицу радиочастотного спектра. Спектральная эффективность измеряется в бит/с/Гц при передаче данных или Эрл/Гц в случае голосовых услуг. Спектральная эффективность может быть повышена, например, за счет: быстрой адаптации системы к характеристикам беспроводного канала связи, оптимального выбора схем модуляции и кодирования, ортогонального частотного мультиплексирования и технологии многоантенных систем — ММО.

Именно последней из перечисленных технологий увеличения спектральной эффективности и посвящена данная книга.

Технология ММО подразумевает использование нескольких антенн на передающей стороне и нескольких антенн на приёмной стороне и позволяет значительно повысить пропускную способность и/или помехоустойчивость системы связи по сравнению с традиционной системой с одной передающей и одной приёмной антеннами (SISO).

История ММО [154] начинается с публикации в 1984 г. статьи сотрудника Лабораторий Белла Джека Винтерса «Оптимальное сложение сигналов в цифровой мобильной связи при наличии соканальных помех» [155]. В 1996 г. абсолютно новый подход к увеличению пропускной способности в системах ММО был предложен Грегори Релеем и В.К. Джоунсом в статье «Многовариантные модуляция и кодирование в беспроводной связи» [156]. Они показали, что эффект многолучевости может многократно увеличить пропускную способность при использовании в системе определенной сигнально-кодовой конструкции. В том же году Джерард Фошини предложил новую многоуровневую архитектуру системы ММО — архитектуру BLAST [157].

В 1999 г. Эмр Телатар вывел аналитическое выражение для потенциальной пропускной способности — границу Шеннона — для флуктуирующего канала ММО [158]. Он показал, что пропускная способность системы ММО растёт пропорционально числу, минимальному из числа передающих и числа приёмных антенн. Этот факт привлек широкое внимание ученых и исследователей к технологии ММО.

В то же время немало внимания уделялось практической реализации систем ММО. В 1998 г. Лаборатории Белла провели

первую успешную демонстрацию этой технологии. Год спустя, в 1999 г. компания Gigabit Wireless Inc. и Стэнфордский университет создали первый прототип системы, работающий вне помещения, и продемонстрировали его работу. В 2002 г. компания Iospan Wireless Inc. (в прошлом Gigabit Wireless Inc., в настоящее время приобретена корпорацией Intel) выпустила первый коммерческий продукт. Первая установка для лабораторного тестирования системы ММО 4×4 (4 передающие и 4 приёмные антенны) начала свою работу в Университете Альберта в 2003 г.

Технологии ММО посвящено множество публикаций. В конце данной книги можно найти обширный библиографический список трудов на эту тему, к сожалению, в основном зарубежных. Среди отечественной научно-технической литературы есть книги с обзором той или иной технологии сотовой связи, включающие описание используемых режимов ММО, но нет ни одного издания на русском языке с систематическим описанием фундаментальных основ технологии ММО и различных аспектов ее реализации. Авторы данного труда поставили перед собой цель создать такую книгу на русском языке, полезную для инженеров, студентов и разработчиков, не владеющих иностранными языками, в объеме, достаточном для изучения теоретических нюансов технологии ММО.

Книга содержит следующие главы:

**1. Система связи с несколькими передающими и несколькими приёмными антеннами (ММО).** В главе приводится математическая модель системы ММО, освещаются вопросы потенциальной помехоустойчивости, вводятся понятия однопользовательской и многопользовательской систем ММО.

**2. Пространственно-временное кодирование.** Глава посвящена схемам ММО без обратной связи, включая пространственное мультиплексирование, разнесённую передачу и другие схемы пространственно-временного блочного кодирования, вводятся понятия ортогонального и неортогонального пространственно-временного кодирования, а также приводится описание различных методов обработки сигналов ММО на приёмной стороне.

### **3. Относительные пространственно-временные коды.**

Описываются пространственно-временные коды, позволяющие демодулировать сигнал на приёмной стороне без знания на приёмной стороне характеристик канала (следует отметить: в методах обработки сигналов на приёмной стороне, описанных в гл. 2, требуется знание на приёмной стороне характеристик канала).

**4. Системы ММО с обратной связью.** В главе описывается оптимальная система ММО, использующая на передающей стороне информацию о характеристиках канала и обладающая максимальной помехоустойчивостью. Рассматриваются основные способы получения передатчиком информации о текущем состоянии канала, описываются линейные и нелинейные методы прекодирования сигналов на передающей стороне, а также проводится оценка выигрыша в пропускной способности от использования на передающей стороне информации о канале связи.

**5. Реализация ММО в современных и перспективных системах беспроводной связи,** а именно: LTE, LTE-Advanced, UMTS, WiMax IEEE 802.16e и IEEE 802.16m, Wi-Fi IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac.

В качестве приложений включены справочные материалы по матрицам и линейной алгебре, комплексным случайным величинам, векторам и матрицам, анализу сложности алгоритмов обработки сигналов, а также ортогональным функциям, используемым в системах ММО.

Крейнделин В.Б. благодарит свою супругу Светлану за предоставленную возможность в течение ряда лет работать над этой книгой, а также за поддержку его решимости успешно завершить эту трудную работу.