

УДК 621.396
ББК 32.84
Б19

Рецензенты: зав. кафедрой Беспроводных телекоммуникаций Национального исследовательского университета Информационных технологий, механики и оптики, доктор техн. наук, профессор *В. А. Григорьев*; ведущий научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия Научно-исследовательский институт Радио, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник *Ю. К. Трофимов*

Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б.

Б19 Технология ММО: принципы и алгоритмы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244 с., ил.

ISBN 978-5-9912-0457-6.

Рассмотрены принципы построения и алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах связи с технологией ММО (многоантенных систем), положенные в основу систем: LTE, WiMax и Wi-Fi. Изложены фундаментальные основы многоантенных систем с пространственно-временным кодированием, давших толчок развитию этой технологии, а также приведены последние достижения в этой области. Большое внимание уделено алгоритмам обработки, используемым на практике. Приведены примеры использования технологии ММО в современных и перспективных системах беспроводной связи.

Для широкого круга научных работников, разработчиков и проектировщиков оборудования систем связи, специалистов в области телекоммуникаций, будет полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

ББК 32.84

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Научное издание

Бакулин Михаил Германович, Варукина Лидия Александровна,

Крейнделин Виталий Борисович

Технология ММО: принципы и алгоритмы

Монография

Редактор Ю. Н. Чернышов

Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышова

Обложка художника В. Г. Ситников

Подписано в печать 10.09.2014. Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 15,25. Тираж 1000 экз.

ISBN 978-5-9912-0457-6

© М. Г. Бакулин, Л. А. Варукина,
В. Б. Крейнделин, 2014

© Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком», 2014

Оглавление

Введение.....	3
1. Система связи с несколькими передающими и несколькими приёмными антеннами (MIMO).....	7
1.1. Системы связи с несколькими антеннами.....	7
1.2. Математическая модель системы MIMO.....	9
1.3. Пропускная способность системы MIMO.....	11
1.4. Пропускная способность систем SIMO и MISO	18
1.5. Пропускная способность системы MIMO в условиях замираний	22
1.6. Многопользовательские системы MIMO.....	34
2. Пространственно-временное кодирование.....	39
2.1. Разнесённая передача по задержкам.....	39
2.2. Схема Аламоути.....	40
2.3. Общие сведения о пространственно-временном блочном кодировании	46
2.4. Ортогональные пространственно-временные блочные коды для случая действительного сигнального созвездия	49
2.5. Ортогональные пространственно-временные блочные коды для случая комплексного сигнального созвездия	53
2.6. Критерии синтеза пространственно-временных блочных кодов.....	58
2.7. Квазиортогональные пространственно-временные блочные коды. Вращение созвездия.....	59
2.8. Неортогональные пространственно-временные блочные коды. Пространственное мультиплексирование .	69
2.9. Эквивалентная виртуальная матрица канала связи .	73

2.10. Алгоритмы демодуляции неортогональных пространственно-временных блочных кодов	76
2.10.1. Метод максимального правдоподобия	76
2.10.2. Метод Zero Forcing (декоррелятор)	78
2.10.3. Алгоритм МСКО	80
2.10.4. Линейный итерационный демодулятор	82
2.10.5. Квазиоптимальный V-BLAST-демодулятор	85
2.10.6. Квазиоптимальный демодулятор типа K-Best ..	88
3. Относительные пространственно-временные коды	93
3.1. Относительная цифровая модуляция	94
3.2. Относительный пространственно-временной код для системы ММО с двумя передающими антеннами ...	96
4. Системы ММО с обратной связью	103
4.1. Прекодирование	103
4.1.1. Методы получения передатчиком информации о состоянии канала связи	104
4.1.2. Динамическая модель информации о состоянии канала связи	108
4.1.3. Оценки выигрыша в пропускной способности от использования на передающей стороне информации о канале связи	110
4.1.4. Линейное прекодирование	112
4.1.5. Критерии синтеза алгоритмов прекодирования .	115
4.2. Синтез линейных алгоритмов прекодирования	117
4.2.1. Оптимальная прекодирующая матрица	117
4.2.2. Синтез алгоритма прекодирования для случая, когда на передающей стороне имеется точная информация о текущем состоянии канала	119
4.2.3. Синтез алгоритма прекодирования для случая, когда на передающей стороне имеется только информация о корреляции замираний в канале ..	123
4.2.4. Синтез алгоритма прекодирования для случая, когда на передающей стороне имеется только информация о среднем значении матрицы канала	126

4.2.5. Синтез алгоритма прекодирования для случая, когда на передающей стороне имеется информация о корреляции замираний в канале и о среднем значении матрицы канала	129
4.2.6. Общие свойства линейных алгоритмов прекодирования	130
4.3. Общие сведения о нелинейных алгоритмах прекодирования	131
4.3.1. Нелинейный алгоритм прекодирования Косты..	131
4.3.2. Принцип работы нелинейного алгоритма прекодирования Томлинсона–Харасимы	134
4.4. Алгоритмы прекодирования, предназначенные для работы в системе MU-MIMO	134
4.4.1. Линейный многопользовательский алгоритм прекодирования	135
4.4.2. Многопользовательская система с пространственным мультиплексированием.....	144
5. Реализация MIMO в современных и перспективных системах беспроводной связи	147
5.1. Система LTE	147
5.1.1. Схемы разнесённой передачи.....	148
5.1.2. Схемы SU-MIMO	151
5.1.3. Схемы MU-MIMO	157
5.1.4. Схемы адаптивного формирования луча диаграммы направленности.....	158
5.2. Система LTE-Advanced	161
5.2.1. Схемы разнесённой передачи.....	163
5.2.2. Схемы SU-MIMO	164
5.2.3. Схемы MU-MIMO	172
5.2.4. Схемы скоординированной многоточечной связи	173
5.3. Система UMTS	176
5.3.1. Схемы MIMO для базовых станций с двумя передающими антеннами	177
5.3.2. Схемы MIMO для базовых станций с четырьмя передающими антеннами	179

5.3.3. Схемы ММО для абонентских станций с двумя передающими антеннами	182
5.3.4. Схемы многоточечной связи	184
5.4. Система WiMax IEEE 802.16e	185
5.5. Система WiMax IEEE 802.16m	187
5.5.1. Схемы ММО на линии «вниз»	187
5.5.2. Схемы ММО на линии «вверх»	192
5.5.3. Схемы многоточечной связи	194
5.6. Система Wi-Fi IEEE 802.11n	196
5.7. Система Wi-Fi IEEE 802.11ac	199
Заключение	202
Приложение 1. Некоторые сведения о матрицах	204
Приложение 2. Комплексные случайные величины, векторы и матрицы	211
Приложение 3. Сведения об ортогональных функциях	215
Приложение 4. Анализ сложности алгоритмов обработки сигналов	217
Сокращения и обозначения	221
Литература	225