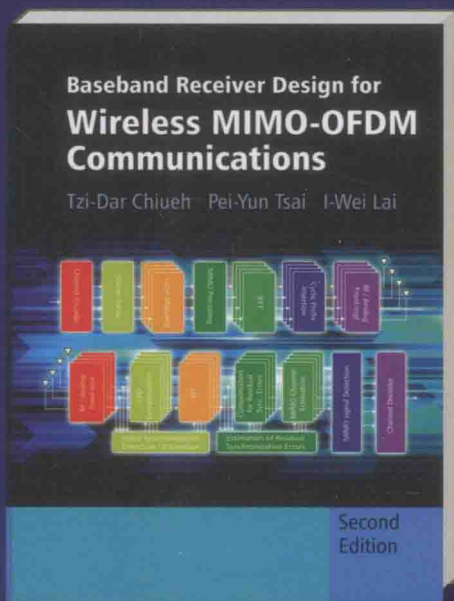




WILEY



Baseband Receiver Design
for Wireless MIMO-OFDM Communications
Second Edition

MIMO-OFDM

无线通信基带接收机设计

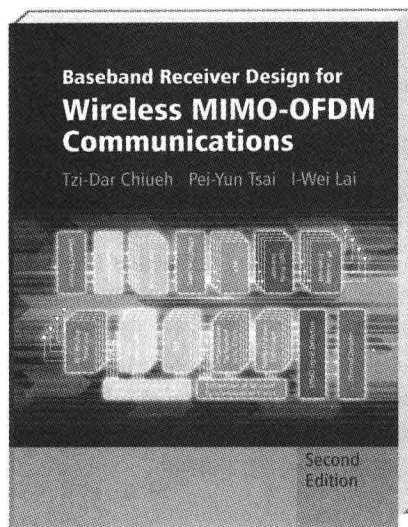
阙志达 蔡佩芸 赖以威 著 杨海芬 李鸣 吴胜龙 等译



机械工业出版社
China Machine Press



电子与嵌入式系统
设计译丛



Baseband Receiver Design
for Wireless MIMO-OFDM Communications
Second Edition

MIMO-OFDM 无线通信基带接收机设计

阙志达 蔡佩芸 赖以威 著 杨海芬 李鸣 吴胜龙 宁磊 郑植 译



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

MIMO-OFDM 无线通信基带接收机设计 / 阙志达, 蔡佩芸, 赖以威著; 杨海芬等译. —北京: 机械工业出版社, 2014.6

(电子与嵌入式系统设计译丛)

书名原文: Baseband Receiver Design for Wireless MIMO-OFDM Communications, Second Edition

ISBN 978-7-111-46948-3

I. M… II. ①阙… ②蔡… ③赖… ④杨… III. 无线电通信-接收机-设计 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 119693 号

本书版权登记号: 图字: 01-2013-0219

Copyright © 2012 John Wiley & Sons Singapore Pte, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Baseband Receiver Design for Wireless MIMO-OFDM Communications, ISBN 9781118188187, by Tzi-Dar Chiueh, Pei-Yun Tsai, I-Wei Lai, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由约翰·威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

MIMO-OFDM 无线通信基带接收机设计

阙志达 等著

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 秦 健

印 刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

开 本: 186mm×240mm 1/16

书 号: ISBN 978-7-111-46948-3

责任校对: 董纪丽

版 次: 2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

印 张: 19.25

定 价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

投稿热线: (010) 88379604

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东



译者序

无线通信技术一直都在不断发展中，而且处于一个前所未有的变革期。新兴的 4G 空中接口都有一个共同的特点，即基于 OFDM（正交频分复用），用以抗频率选择性衰落。4G 需要极高的频谱利用率，而 OFDM 提高频谱利用率的作用毕竟有限，因此需要引入 MIMO。

MIMO 利用多天线来抑制信道衰落，也就是说，可以利用 MIMO 信道成倍地提高无线信道容量，在不增加带宽和天线发送功率的情况下，可以成倍地提高频谱利用率。MIMO 系统可以在一定程度上利用传播中多径分量，也就是说 MIMO 可以抗多径衰落。

因此，在 OFDM 的基础上进一步开发空间资源，也就是 MIMO-OFDM，可以提供更高的数据传输速率。

了解并清晰 MIMO-OFDM 技术对于研究无线通信领域特别是 4G 技术方面具有重要的意义。

Tzi-Dar Chiueh 等作者在其著作《OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications》之后，开始 MIMO 技术的应用和发展，因而在本书中针对 MIMO 技术如何与 OFDM 系统相结合，很好地从理论—算法—系统架构—电路设计的叙述方式出发对 MIMO-OFDM 接收机基带设计进行了简洁完整而逻辑清晰的讲解，使得本书在内容和脉络上能够保持完备、清晰并具有一定深度。

根据提出问题—分析问题—解决问题的方式，作者对接收机基带设计中的重点问题和关键技术进行了描述。这对善于思考的读者去理解和消化本书的知识非常有帮助。

此外，本书着重分析了概念的背景和结构，而不局限于通过公式堆砌去推导概念。当然本书并非不重视公式的推导，而是突出重点，用公式为概念而服务。

本书最后描述了 MIMO-OFDM 接收机的硬件实现，对于实际电路和集成电路的设计人员很有帮助，同时对其他读者也有重要的参考价值，在阅读该部分的时候可以思考如何将前面的知识应用于实际中。

相信本书的读者在追寻作者的思维阅读完本书后，再仔细回想整个 MIMO-OFDM 接收机基带设计时，在脑海中将有清楚的框架，知道为什么这么设计，如何设计。

目前在中文专业书籍领域，很少有这种专注于 MIMO-OFDM 接收机基带设计的专业书籍。很多读者在了解基本的 MIMO、OFDM 技术的基础知识后，会有这样的疑问：MIMO、OFDM 技术如何真正落在具体的实现上。本书可以解答读者这些问题，给读者展现更开阔的视野。本书对于无线通信领域的技术人员或希望了解该领域的读者具有极大的帮助。

在整个翻译过程中，很多人对该书能够尽早出版付出了巨大的努力。感谢原书作者之一的赖以威博士在百忙中抽出时间对本书译稿进行审定。感谢机械工业出版社华章公司张国强编辑的指导和具体协调工作。

由于译者水平有限，翻译中难免有错误或不妥之处，此外也可能偏向于自己的工作经验，真诚希望各位读者在阅读本书时能将发现的错误及时告知，以便更正。

前 言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) 已经成为无线通信系统中最受欢迎的调制技术。为了说明 OFDM 接收机的设计需求, 我们于 2007 年写了本书的第 1 版。近年来, 无线通信技术取得了迅速发展, 尤其是在多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术领域, 这也将无线通信的发展带到了一个新纪元。MIMO 技术能够实现高吞吐量、更大的小区覆盖范围和更好的服务质量。然而, MIMO 技术使得基带收发机设计的复杂度变得更高。鉴于这些变化, 本书第 2 版的目标在于向读者展示 MIMO-OFDM 系统中的一些重要问题和技术。与第 1 版一样, 本书适合于具有超大规模集成电路设计和信号处理背景的优秀本科生和研究生使用。对于从事无线通信系统算法研究和硬件实现的工程师, 本书介绍了一些 MIMO-OFDM 设计技术的综合研究现状这将是很有价值的参考资料。

本书的主题包括 MIMO-OFDM 无线通信系统中的理论、算法、整体架构和电路设计。本书旨在强调公式背后的理念而非数学推导, 为了便于对概念的理解, 本书同时提供了一些例子。最后 3 章比较特殊, 针对无线 MIMO-OFDM 系统, 读者可以学习如何开发面向硬件实现的信号处理算法和如何为无线 MIMO-OFDM 系统设计集成电路。我们通过设计实例来说明这些技术, 包括两个 MIMO 模块, QR 分解和软输出球形解码, 这些都是至关重要的 MIMO 模块。最后, 本书提供了一个完整片上系统 (System on Chip, SoC) 的实例, 它描述了面向 IEEE 802. 16e WiMAX 标准的 MIMO-OFDM 基带调制解调器。

本书分为三个部分, 第一部分回顾背景知识, 包括基础的调制方案、MIMO 的概念和多址技术、纠错编码、信号传播和信道建模。第二部分首先深入探讨了 MIMO-OFDM 接收机、同步技术和信道估计中两个基本的信号处理任务, 然后简要介绍一些 MIMO 技术, 包括空间复用、预编码和空间分集。这一部分还为读者提供了 MIMO-OFDM 基带接收机设计中现代信号处理的算法。第三部分涉及硬件设计的相关问题, 为读者展示了面向 OFDM 和 MIMO 接收机的基本模块和重要组件。最后, 本书以一个 MIMO-OFDM 片上系统的实例结尾, 涵盖开发 MIMO-OFDM 基带接收机的许多问题。下面给出每章内容更为详细的介绍。

第 1 章介绍几种重要的无线通信标准及其演进过程, 包括数字广播系统、移动蜂窝系统、无线数据网络系统。这些系统都采用了 OFDM 和 MIMO-OFDM 技术, 突显了 MI-

MO-OFDM 技术在无线通信领域的重要性。

第 2 章讨论数字调制技术，包括单载波调制和多载波调制。传统单载波调制技术是作为多载波 OFDM 调制技术的前期基础。该章将阐述一些基本的 OFDM 处理方法，如离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 和逆离散傅里叶变换 (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT)、保护间隔插入、保护频带预留和频率滤波。OFDM 调制信号的高峰均功率比特特性也有所说明。最后，本章介绍了自适应 OFDM 技术，该技术正在渐渐成为一个具有良好前景的提高频谱效率和能效的解决办法。

第 3 章介绍高级无线技术。首先，该章介绍一些基本 MIMO 技术的概念及其优势。之后讨论了多址方案，即一种支持大量用户在同一个通信链路通信的机制。此外，该章还介绍了扩展频谱技术，码分多址技术就是从扩频技术中得来的。该章还给出了一些重要的常用码分多址和扩展频谱系统的扩频码。

第 4 章介绍了数字通信系统中必不可少的纠错编码技术，涵盖了几种主流的纠错编码和解码策略，包括分组码、卷积码和 RS 码。同时，对属于另一个类别的软输入软输出迭代解码策略也进行了讨论，其中软信息，如比特值的概率或对数似然比 (Log Likelihood Ratio, LLR) 在每次迭代中被交换和更新。属于此类的两个著名的编码方案：Turbo 码和低密度奇偶校验 (Low Density Parity Check, LDPC) 码在高级无线通信系统中发挥重要作用。

如果对信号传播过程中的损耗没有一个全面了解，就不可能进行无线接收机的设计。第 5 章讨论了传播机制、衰落现象和其他在信道和收发机前端的非理想。经过无线信道后，通信信号将产生路径损耗和阴影效应，这极大地削弱了接收信号的强度。此外，信号还可能存在延迟扩展、多普勒扩散和角度扩散，这使得信号产生具有不同时延、扭曲频谱和入射角度的副本，结果导致了频率选择性、时间选择性和空间选择性。前端电子器件的非理想化在设计无线接收机时也必须考虑在内。振荡器不匹配以及发射机和接收机之间的相对运动也会导致载波频率偏移和采样时钟偏移。上下行转换路径的不匹配分支可能导致 I/Q 不平衡和直流偏移。具有有限线性范围的功率放大器是另一个导致振幅和相位畸变的因素。在第 5 章中，会详细地讨论说明上述所有细节。

同步是所有通信系统的关键问题之一（有线和无线的问题类似）。相位同步和载频同步的算法以及单输入单输出 (Single-input Single-output, SISO) 系统中采样时钟信号和 MIMO-OFDM 接收机是第 6 章的主要话题。该章首先描述了载波频率偏移、载波相位误差、采样时钟偏移、符号定时偏移和 I/Q 不平衡对 SISO 和 MIMO-OFDM 接收信号的影响。然后，对于不同的同步误差，该章给出了几种估计算法并对性能进行了比较。最后介绍了时域和频域补偿方法，它们的优缺点同时可以帮助设计者丰富设计经验，并作出合理的设计决策。

第 7 章分析了 SISO 和 MIMO-OFDM 接收机的信道估计问题。当进行信道估计时，接收机通常依赖于参考信号，如前导序列信号和导频信号。因此，信道估计算法可以根据可

用的参考信号模型进行分类。同时，为了获得更好的估计结果信道统计和信道功率时延信息也常被使用。尽管 OFDM 的一个突出优势在于简单但有效的一抽头均衡，但可以进一步提高系统性能的越来越复杂的均衡技术也得到了研究和说明。我们也讨论了 OFDM 接收机中多抽头均衡器的设计，因为它们可以解决因移动信道或不完美同步引起的载波间干扰问题。

MIMO 配置方法有望继续提高传输效率和 QoS 的通信性能。因此，第 8 章侧重于 MIMO 内核技术，即信号检测。我们介绍了不少 MIMO 检测技术，它们已经用于过去的时分复用方案。具体包括线性检测、连续干扰消除、球形解码等。具有反馈到发射机的完全或者部分信道状态的信息后，MIMO 预编码技术可以将复杂的空间通道分解为平行和独立的子信道，从而减轻接收机中信号检测的设计压力。由于最大似然检测方法的正交属性，对于空时分组码这种检测方法是可行且可实现的。

第 9 章介绍了广泛用于 OFDM 系统体系结构和电路设计的方法，包括快速傅里叶变换处理器、延迟缓冲器和矩形坐标、极坐标相互转换电路。首先该章介绍了一些基于硬件实现的快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 方法，其次给出了一些 FFT 结构。其中，流水线结构可以以采样率执行 FFT，但它需要消耗更多的硬件资源。另外，基于内存的结构是区域有效的，但可能需要更高的时钟频率以及内存寻址方面的复杂控制。延迟缓冲器可以有效地实现移位寄存器或 SRAM，这取决于它的长度。最后，本章还介绍了几个直角坐标到极坐标的转换电路，用于相位或幅度是复数的情况。此外，该章末尾介绍了极坐标到直角坐标的转换电路，用于产生正弦波形。

第 10 章介绍了高吞吐量 MIMO 检测的两种基本的硬件设计方法。对可以进行信道预处理或线性 MIMO 检测功能的 QR 分解模块进行了说明。首先讨论了 QR 分解的算法复杂度，然后解释了流式坐标旋转算法 (Coordinated Rotation Digital Computer, CORDIC) 结构的设计理念，这种理念结合了复数 Givens 和实数 Givens 旋转。第二个例子是软输出 MIMO 检测器，它支持从 2×2 到 8×8 的天线配置。我们将努力给读者展示以下映射关系，即从新近提出的修改后的基于最佳优先的快速下降 (Modified best-first with Fast Descent, MBF-FD) MIMO 检测方法到电路设计理念，包括流水线四双堆 (quad-DEAP) 体系结构和列表枚举方案。通过这两个例子，我们相信读者可以深入理解 MIMO 检测器的关键设计策略。

本书的最后一章给出了一个完整的 MIMO-OFDM 基带调制解调器片上系统方案，它符合 IEEE 802.16e WiMAX 标准。基带调制解调器集成了同步、信道估计、MIMO 检测、信道解码模块，同时媒体访问控制层硬件/固件展示了贯穿整本书的算法和电路中的应用。

T. D. Chiueh

P. Y. Tsai

I. W. Lai

致 谢

首先本书的作者们要感谢 Gene C. H. Chuang 博士、Pan-An Ting 博士、Ying-Chuan Hsiao、Jen-Yuan Hsu、Jiun-You Lai、Cheng-Ming Chen 和 Chi-Tien Sun，感谢他们对本书重要的组成部分第 11 章作出的贡献。我们也要感谢 Chun-Hao Liao、To-Ping Wang 和 Zheng-Yu Huang 对第 10 章作出的贡献。我们也非常感激 Bhoomek Pandya 对本书有价值的评论，这些评论帮助我们改进了本书的内容。

Tzi-Dar Chiueh 同时希望感谢所有毕业和在读的学生们，他们来自台湾大学微系统研究实验室，感谢他们做的大量研究工作。

目 录

译者序

前言

致谢

第一部分 无线通信基础

第 1 章 引言 / 2

1.1 数字广播系统 / 3

1.1.1 数字音频广播 / 3

1.1.2 数字视频广播 / 4

1.2 移动蜂窝系统 / 4

1.2.1 载波聚合 / 6

1.2.2 多天线配置 / 7

1.2.3 中继传输 / 7

1.2.4 协作多点传输和接收 / 7

1.3 无线网络系统 / 7

1.3.1 个人区域网 / 8

1.3.2 本地局域网 / 10

1.3.3 城域网 / 11

1.3.4 广域网 / 11

总结 / 12

参考文献 / 13

第 2 章 数字调制 / 14

2.1 单载波调制 / 14

2.1.1 调制信号的功率谱密度 / 15

2.1.2 PSK、QAM 和 ASK16 / 15

2.1.3 CPFSK 连续相位频移键控和
MSK 最小频移键控 / 18

2.1.4 脉冲形成和加窗 / 18

2.2 多载波调制 / 21

2.2.1 正交频分复用 / 22

2.2.2 OFDM 相关问题 / 23

2.2.3 OFDM 收发机架构 / 26

2.3 自适应 OFDM / 27

总结 / 30

参考文献 / 31

第 3 章 高级无线技术 / 32

3.1 多输入多输出 / 32

3.1.1 引言 / 32

3.1.2 MIMO 基础 / 33

3.1.3 MIMO 技术 / 35

3.1.4 MIMO-OFDM 系统举例 / 41

3.2 多址接入 / 44

3.2.1 频分多址 / 44

3.2.2 时分多址 / 45

3.2.3 码分多址 / 46

3.2.4 载波监听多址接入 / 47

3.2.5 正交频分多址接入 / 48

3.2.6 空频分多址接入 / 49

3.3 扩频和 CDMA / 50

3.3.1 PN 码 / 50

3.3.2 直接扩频序列 / 53

3.3.3 跳频扩频 / 55

总结 / 56

参考文献 / 56

第 4 章 纠错码 / 58

4.1 引言 / 58

4.2 分组码 / 59

4.2.1 线性码 / 59

4.2.2 循环码 / 60

4.3 Reed-Solomon 码 / 61

4.3.1 有限域 / 62

4.3.2 编码 / 63

4.3.3 译码 / 64

4.3.4 缩短 RS 码 / 64

4.4 卷积码 / 65

4.4.1 编码 / 65

4.4.2 维特比译码器 / 66

4.4.3 打孔卷积码 / 68

4.5 软输入软输出译码算法 / 69

4.5.1 MAP 译码器 / 69

4.5.2 Log-MAP 译码器 / 72

4.5.3 Max-Log-MAP 译码器 / 73

4.6 Turbo 码 / 73

4.6.1 编码 / 74

4.6.2 译码 / 75

4.7 LDPC 码 / 76

4.7.1 编码 / 76

4.7.2 译码 / 77

总结 / 79

参考文献 / 80

第 5 章 信号传播与信道模型 / 81

5.1 引言 / 81

5.2 无线信道传播 / 81

5.2.1 路径损耗与阴影衰落 / 81

5.2.2 多径衰落 / 82

5.2.3 多径信道参数 / 83

5.2.4 MIMO 信道 / 88

5.3 前端的电子效应 / 89

5.3.1 载波频率偏移 / 89

5.3.2 采样时钟偏移 / 90

5.3.3 相位噪声 / 90

5.3.4 IQ 不平衡和直流偏移 / 91

5.3.5 功率放大器的非线性 / 94

5.4 信道模型 / 94

5.4.1 前端影响的模型 / 95

5.4.2 多径瑞利衰落模型 / 96

5.4.3 通信标准中所使用的信道模型 / 98

总结 / 104

参考文献 / 105

第二部分 MIMO-OFDM 接收机处理

第 6 章 同步 / 108

6.1 引言 / 108

6.2 同步 / 109

6.2.1 同步错误 / 109

6.2.2 同步错误的影响 / 110

6.2.3 同步估计与补偿 / 113

6.3 同步错误检测与估计 / 114

6.3.1 符号定时检测 / 114

6.3.2 载波频率偏移估计 / 121

6.3.3 残余 CFO 和 SCO 估计 / 125

6.3.4 载波相位估计 / 127

6.3.5 IQ 不平衡估计 / 127

6.4 MIMO 系统的同步错误检测与估计 / 130

6.4.1 MIMO-OFDM 系统的符号定时检测 / 130

6.4.2 MIMO-OFDM 系统的载波

- 频率偏差估计 / 131
- 6.4.3 MIMO-OFDM 系统残余 CFO 和 SCO 估计 / 132
- 6.4.4 MIMO-OFDM 系统的载波相位估计 / 133
- 6.4.5 MIMO-OFDM 系统的 IQ 不平衡估计 / 133
- 6.5 同步错误恢复 / 133
 - 6.5.1 载波频率偏差补偿 / 134
 - 6.5.2 采样时钟偏差补偿 / 135
 - 6.5.3 IQ 不平衡补偿 / 138
- 总结 / 138
- 参考文献 / 139

第 7 章 信道估计与均衡 / 141

- 7.1 引言 / 141
- 7.2 导频图案 / 142
 - 7.2.1 SISO-OFDM 系统中的导频图案 / 142
 - 7.2.2 MIMO-OFDM 系统中的导频图案 / 144
- 7.3 SISO-OFDM 信道估计 / 147
 - 7.3.1 基于块状导频符号的信道估计 / 149
 - 7.3.2 基于梳状导频符号的信道估计 / 152
 - 7.3.3 基于网格状导频符号的信道估计 / 157
- 7.4 MIMO-OFDM 信道估计 / 161
- 7.5 自适应信道估计 / 164
- 7.6 均衡 / 164
 - 7.6.1 单抽头均衡器 / 164
 - 7.6.2 多抽头均衡器 / 168
- 7.7 迭代接收机 / 172
 - 7.7.1 迭代同步和信道估计 / 173
 - 7.7.2 比特交织编码调制及迭代解码 (BICM-ID) / 173
- 总结 / 174
- 参考文献 / 175

第 8 章 MIMO 检测 / 178

- 8.1 简介 / 178
- 8.2 线性检测 / 179
 - 8.2.1 迫零检测 / 179
 - 8.2.2 最小均方误差检测 / 179
- 8.3 具有信道预处理功能的 MIMO 检测 / 180
 - 8.3.1 排序 / 181
 - 8.3.2 QR 分解 / 181
 - 8.3.3 最小均方误差排序 QR 分解 / 183
 - 8.3.4 排序连续干扰消除 / 184
 - 8.3.5 减格 / 186
- 8.4 球形解码器 / 187
 - 8.4.1 深度优先树形检索 / 189
 - 8.4.2 宽度优先树形检索 / 190
 - 8.4.3 最佳优先树形检索 / 191
 - 8.4.4 复杂度的度量 / 194
 - 8.4.5 球形解码器设计空间探索 / 194
- 8.5 软输出球形解码器 / 196
 - 8.5.1 重复树形检索 / 197
 - 8.5.2 单树形检索 / 197
 - 8.5.3 LLR 裁剪 / 198
- 8.6 迭代 MIMO 检测算法 / 199
 - 8.6.1 列表球形解码器 / 200
 - 8.6.2 软输入软输出球形解码器 / 200
 - 8.6.3 迭代 SIC-MMSE 检测算法 / 203
- 8.7 预编码 / 204

- 8.7.1 波束控制 / 204
- 8.7.2 空间解相关 / 206
- 8.7.3 有限反馈 / 208
- 8.8 空间块码 / 210
- 总结 / 211
- 参考文献 / 212

第三部分 MIMO-OFDM 接收机硬件设计

第9章 电路设计 / 216

- 9.1 导论 / 216
- 9.2 快速傅里叶变换模块 / 216
 - 9.2.1 FFT 算法 / 217
 - 9.2.2 结构 / 220
 - 9.2.3 对比 / 226
- 9.3 延迟缓冲器 / 227
 - 9.3.1 SRAM/寄存器文件延迟缓冲器 / 227
 - 9.3.2 基于点的延迟缓冲器 / 229
 - 9.3.3 门控时钟策略 / 229
 - 9.3.4 对比 / 232
- 9.4 直角坐标到极坐标转换电路 / 234
 - 9.4.1 反正切函数 / 234
 - 9.4.2 幅度方程 / 238
 - 9.4.3 对比 / 242
- 9.5 极坐标转直角坐标电路 / 243
 - 9.5.1 三角函数近似 / 244
 - 9.5.2 多项式近似 / 245
 - 9.5.3 对比 / 246
- 总结 / 247
- 参考文献 / 247

第10章 MIMO IC 设计实例 / 249

- 10.1 简介 / 249

- 10.2 QR 分解 / 249
 - 10.2.1 系统描述 / 249
 - 10.2.2 算法设计 / 250
 - 10.2.3 架构设计 / 254
 - 10.2.4 实验结果 / 256
- 10.3 8×8 软输出球形译码器 / 260
 - 10.3.1 模块描述 / 260
 - 10.3.2 算法设计 / 260
 - 10.3.3 架构设计 / 260
 - 10.3.4 实验结果 / 269
- 总结 / 271
- 参考文献 / 271

第11章 移动 MIMO WiMAX 片上 系统设计 / 273

- 11.1 WiMAX 标准简介 / 273
- 11.2 移动 WiMAX OFDM 和
帧结构 / 274
- 11.3 WiMAX 基带接收机设计 / 277
 - 11.3.1 自动增益控制 / 277
 - 11.3.2 包检测 / 278
 - 11.3.3 符号定时恢复 / 279
 - 11.3.4 载波频率偏移
补偿 / 280
 - 11.3.5 信道估计 / 281
 - 11.3.6 MIMO 检测器 / 281
 - 11.3.7 外接接收机 / 283
- 11.4 WiMAX 媒体接入控制
设计 / 284
- 11.5 WiMAX SoC 实现与场测 / 287
 - 11.5.1 实验测试和性能评估 / 290
 - 11.5.2 台湾高铁场测 / 291
- 总结 / 291
- 参考文献 / 292

术语表 / 293

第一部分

无线通信基础

- 第 1 章 引言
- 第 2 章 数字调制
- 第 3 章 高级无线技术
- 第 4 章 纠错码
- 第 5 章 信号传播与信道模型

第 1 章 引 言

无论是已经存在的还是正在发展的无线通信标准，均已经采用或考虑采用正交频分复用（Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM）与多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）技术结合作为无线传输方案。很明显，MIMO-OFDM 毫无疑问地成为现在和将来无线通信系统的传输方案。

追求更好的生活方式促进了人类文明的进步。提供适用于任何时间与地点的通信服务使得人们从固定设备的限制中解放出来。如今，我们应该感谢无线技术的飞速发展，是它让每个人都可以享用无线通信带来的便利。无论何时、何地，移动电话都与人们形影不离。数字音频和视频广播为消费者提供高分辨率、品质更好以及可以交互的节目。通信设备现在变得小、轻、薄而且价格便宜。正值本书出版之际，可以运行多媒体和宽带应用程序的智能手机已经在消费者中开始流行，占据了全球手机销售的大部分份额。正如图 1.1 所示，数字基带收发机是这些智能电话的基本组成。

一些研究未来无线网络的项目正在进行，它们涉及各个领域，这将使得无线通信接入到任何地方的因特网骨干网络，无论是室内或室外、乡村或城市。接下来本书将会介绍这些项目的演化和未来的发展，我们会发现 MIMO 和 OFDM 技术在无线通信系统中的本质角色将会变得非常清晰。

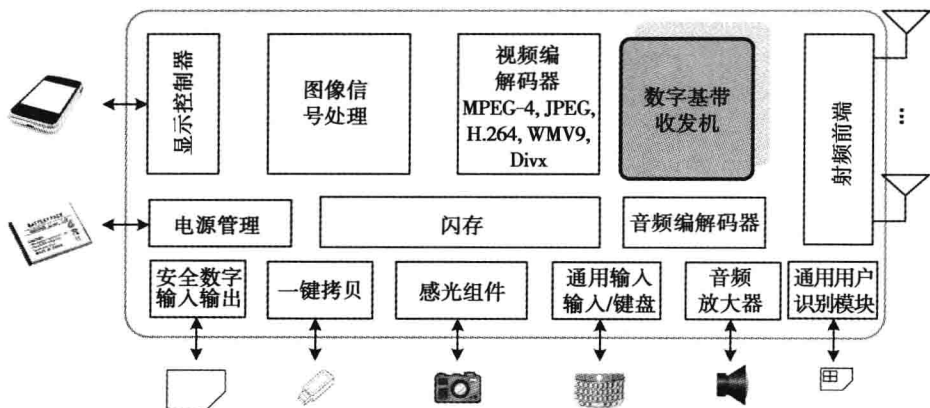


图 1.1 类似智能电话设备的系统框图

1.1 数字广播系统

在 20 世纪，通过音频和视频广播，大多数人满足了他们对信息和娱乐的需求。调幅广播的推广可以追溯到 20 世纪初期；第二次世界大战以前，模拟电视节目第一次被播送。20 世纪中期，调频广播节目开始广泛使用。这些基于模拟通信的技术为人们日常生活增添了很多色彩，包括新闻、音乐、戏剧、电影等。在过去几年里，为了提供更多更好的节目，数字广播技术开始取代模拟广播技术，例如数字音频广播（Digital Audio Broadcasting, DAB）和数字视频广播（Digital Video Broadcasting, DVB）。

1.1.1 数字音频广播

数字音频广播系统（DAB）是使用 OFDM 技术的第一个标准之一。DAB 项目始于 20 世纪 80 年代中期^[1]。基于 OFDM 技术，DAB 有一个明显的优势：它是一个单频网络（Single-Frequency Network, SFN）。在单频广播网络中，一个载波可以用于所有的发射机，为整个国家播送同一广播节目而不会遭受同频干扰。另外，在调频系统中，只有约 1/15 的可用频谱得到使用，这导致了非常低效的频谱重用因数。图 1.2 说明了单频网络与多频网络。

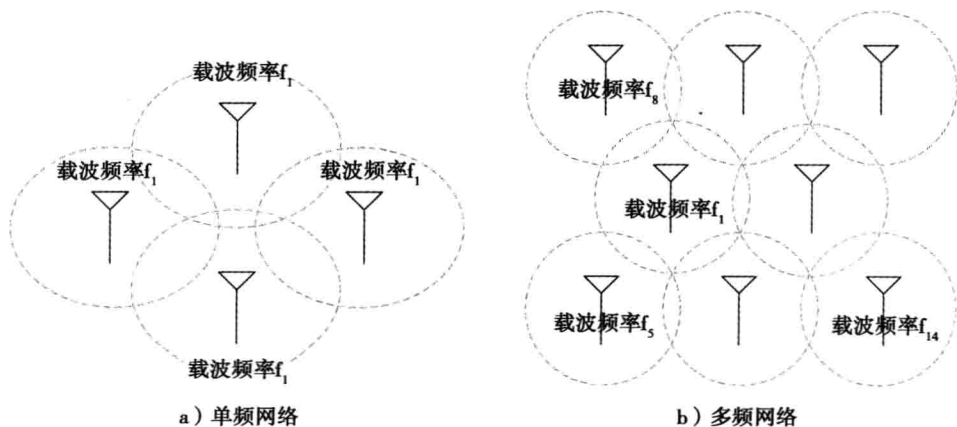


图 1.2 单频网络与多频网络

在数字音频广播系统中，不必像调幅/调频收音机那样搜索电台。所有电台节目都被集成在多路复用器中。多路复用器节约了多个独立电台的维护费用。此外，可以为每个节目分配不同的带宽，以满足他们对声音质量的不同要求。音乐电台多路复用器可以按最高质量 192Kbps 的速率发送数据，而单声道的演讲、新闻类节目可能仅需要 80Kbps。由于 OFDM 技术的使用，数字音频广播系统能提供更好的移动接收质量。2007 年，升级的

DAB+标准被公布，它采用一种有效的音频压缩方法和强大的码元纠错能力，使其具有更强的富音频内容的传输健壮性。

1.1.2 数字视频广播

数字视频广播是数字电视广播的欧洲标准^[2]。各种 DVB 标准包括：用于卫星的 DVB-S，用于电缆的 DVB-C，用于陆地传输的 DVB-T 以及用于低功耗手持终端的 DVB-H。上述标准中，DVB-T 和 DVB-H 利用 OFDM 作为调制方案。DVB-T 接收机在上个世纪 90 年代才开始投入使用，现在许多国家都使用 DVB-T 节目。与 DAB 系统一样，DVB-T/H 技术也支持全国范围内的单频网络。此外，DVB-T/H 标准提供几种运营模式，用于大范围覆盖的单频网络和高速移动的无线接收。DVB-T 的成功部署经验和在无线通信领域的持续发展激发了视频服务领域的升级需求。2008 年，第二代数字陆地电视标准——DVB-T2 被批准。DVB-T2 目标在于提高频谱效率，这样就可以增强系统容量和覆盖范围。第二代系统的主要特征包括：高阶调制技术（256QAM）、改进的前向纠错码技术、多输入单输出技术。DVB-T2 系统可以达到 30%~65% 的容量提升。

DVB-T 的基本数字流是 MPEG-2 传送流，它可以包括一个或多个节目流。每个子流将压缩的视频、音频和数据信号进行多路传输。DVB-T 标准可以支持满足 MPEG-2 的高清电视数据速率，即在一个 8MHz 信道中速率接近 31Mbps。作为移动通信网络的增强，DVB-H 提供高速移动 IP 服务。DVB-T2 系统中的传送流被分为一个或多个逻辑数据流，运载于物理层通道（Physical Layer Pipe, PLP）。它可以支持多个物理层通道，根据要求的服务健壮性，每个通道具有唯一的调制模式。此外，DVB 标准允许集成使用其他接入技术的双向数据连接，这就使得电视观众和电视台的交互应用成为可能。

1.2 移动蜂窝系统

移动电话如今已经变成全球几十亿人的必需品。它们的功能涵盖了各个方面：从语音服务到图片、视频和宽带数据服务。图 1.3 展示了移动蜂窝通信系统第二代、第三代、第四代的变迁过程。在第二代系统中，全球移动通信系统（Global System for Mobile Communications, GSM）作为欧洲标准使用，CDMAOne IS-95 则被北美地区采用。它们都可以提供大约 10Kbps 速率的数字话音服务。另外，通用分组无线业务（General Packet Radio Service, GPRS）和增强型全球数据发展速率（Enhanced Data rate for Global Evolution, EDGE）作为 GSM 标准的增强，它们可以提供接近几百 Kbps 的传输速率。同样地，北美地区的 CDMA2000 1X 升级后的数据传输速率在 150Kbps 左右。

在 3G 标准中，要求提供多媒体应用和数据传输服务。第三代合作伙伴计划 2（The Third Generation Partnership Project 2, 3GPP2）推出两种演化方向：即 CDMA2000 1X