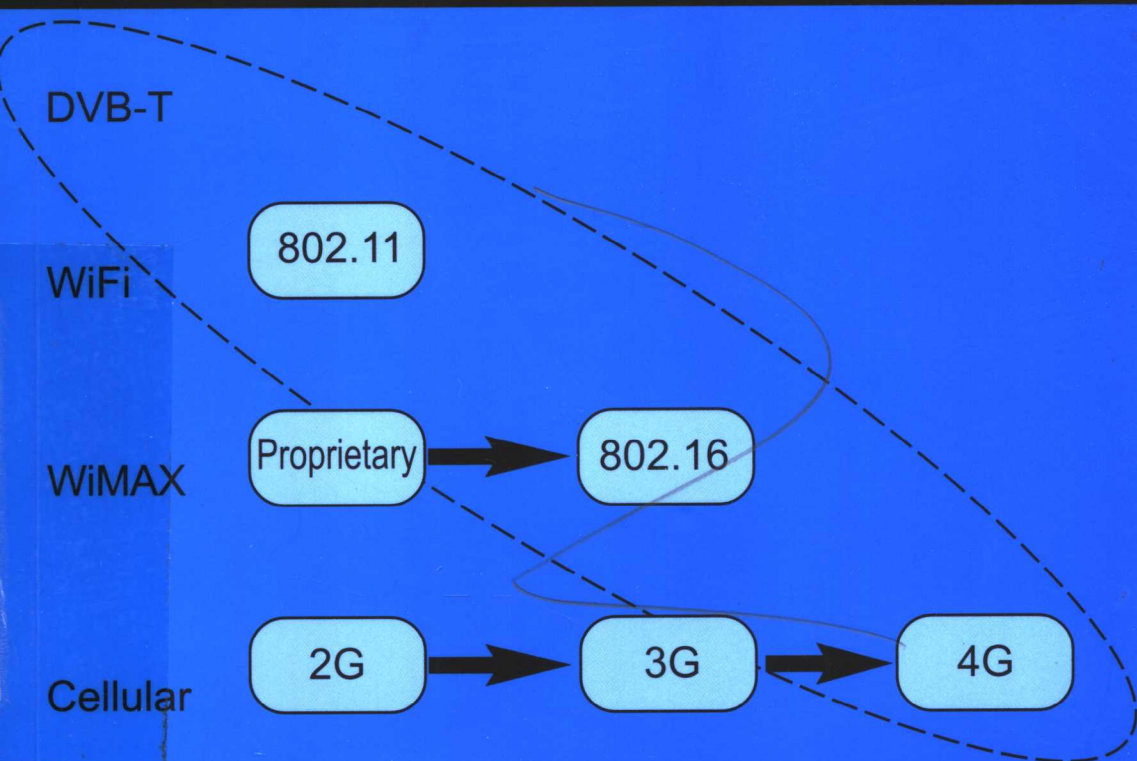


基于 OFDM 的无线宽带网络 设计与优化

OFDM-Based Broadband Wireless Networks
Design and Optimization

〔美〕 刘 辉 李国庆 著
任品毅 译

Hui Liu Guoqing Li



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

TN915.142/33

2008

**OFDM-Based Broadband Wireless Networks
Design and Optimization**

**基于 OFDM 的无线宽带网络
设计与优化**

刘 辉

Hui Liu

〔美〕

李国庆

Guoqing Li

著

任品毅 译

西安交通大学出版社

Xi'an Jiaotong University Press

Hui Liu and Guoqing Li
OFDM-Based Broadband Wireless Networks: Design and Optimization
ISBN: 978-0-471-72346-2
Copyright ©2005 by John Wiley & Sons, Inc.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning, or otherwise, except as permitted under Section 107 or 108 of the 1976 United States Copyright Act, without either the prior written permission of the Publisher, or authorization through payment of the appropriate per-copy fee to the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, (978) 750-8400, fax (978) 750-4470, or on the web at www.copyright.com. Requests to the Publisher for permission should be addressed to the Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, (201) 748-6011, fax (201) 748-6008, or online at <http://www.wiley.com/go/permission>.

All Right Reserved. This translation published under license.

陕西省版权局著作权合同登记号 图字 25-2006-024 号

图书在版编目(CIP)数据

基于 OFDM 的无线宽带网络:设计与优化/(美)刘辉(Hui Liu),(美)李国庆(Guoqing Li)著;任品毅译. —西安:西安交通大学出版社,2008.3

书名原文:OFDM-Based Broadband Wireless Networks: Design and Optimization

ISBN 978-7-5605-2675-1

I. 基… II. ①刘…②李…③任… III. 无线电通信-宽带通信系统-综合业务通信网 IV. TN915.142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 042184 号

书 名	基于 OFDM 的无线宽带网络:设计与优化
著 者	(美)刘辉,(美)李国庆
译 者	任品毅
策划编辑	赵丽平
责任编辑	鲍 媛

出版发行	西安交通大学出版社
	(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址	http://www.xjtupress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行中心)
	(029)82668315 82669096(总编办)
传 真	(029)82668280
印 刷	西安交通大学印刷厂

开 本	687mm×1012mm	1/16	印张	16.75
印 数	0001~3000		字数	234 千字
版次	2008 年 3 月第 1 版	2008 年 3 月第 1 次印刷		
书 号	ISBN 978-7-5605-2675-1/TN·107			
定 价	35.00 元			

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82665380
读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

清华大学出版社

诸如 WiFi 和 WiMAX 等新兴的技术深深地改变了宽带无线通信的蓝图。随着我们演进到未来一代的无线网络,摆在我们面前的一个主要挑战就是如何在统一的平台上支持高数据率、集成的多媒体类型的业务。鉴于其在高速通信中的固有优势,正交频分复用(OFDM)已经成为了很多高速无线通信系统的调制解调器的解决方案(例如,DVB-T、WiFi、WiMAX 和超宽带)。

本书旨在为无线通信专家和研究生提供该领域中一个最新的研究结果,更为重要的是宽带空中接口设计和实现的核心技术概念。我们的目标就是编撰一本能够提供足够的背景材料以及讨论能够显著提高网络性能而在目前无线架构中无法实现先进原理的教科书。

对那些对 WiFi 和 WiMAX 标准感兴趣的读者,附录中给出了与这些标准相关的最新技术和应用。另一方面,本书中技术性的讨论并不狭隘地局限于某一特定的标准。而是每一章都包含了对该主题的基本观点的一个博览。本书的一个主线就是强调对基于 OFDM 的宽带无线网络的设计概念和算法。我们对通过链路级和系统级的性能特性的联合优化以获取 OFDM 所有潜力的协议感兴趣。

我们将对从事技术研究的读者揭示当前无线系统设计范例背后的现代理论和方法。其覆盖面不仅包含了建立研究结果而且还有技术,以及涉及 OFDM 调制解调器和基于 OFDM 多址方案的作者文章的集合。这样一种结合不仅对需要深刻理解 OFDM 的入门级别的学生有益,而且还对寻求无线系统设计和优化方针的高年级研究生和实践工程师有益。

第 1 章和第 2 章对 OFDM 系统进行了全面的回顾,包括其历史、原理和应用。我们对来自于宽带衰落信道以及多媒体业务的设计挑战进行了讨论。这些章节对理解宽带无线技术的最新发展趋势的广大读者具有

吸引力。第3章和第4章是针对物理层技术的研究者和调制解调器的设计人员而编写的。第3章特别覆盖了 OFDM 调制解调器的各种不同的技术,而第4章给出了 MIMO 和智能天线以及它们与 OFDM 相结合的广泛研究。我们还描述了正在使用或者针对未来系统(例如, WiMAX 和 WiFi)提出的设计方法。

第5,6和7章涉及了 MAC 的功能并给出了一些对基于 OFDMA 蜂窝网络的系统级的考虑。这些章节通过多址控制、跨层优化和频率规划覆盖了无线资源管理的重要问题。与多用户分集相关的问题从信息论和系统协议的观点得以考虑。

涵盖了 IEEE802.11a/g 和 IEEE802.16e 的附录为那些对 WiFi 和 WiMAX 标准的最新研发状况感兴趣的读者提供了细节。

关于本书未来的修改,读者也请参见 ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/ofdm。

我们将感谢那些对本书的准备工作作出了贡献的人。许多以前和现在的同事和学生都贡献了他们的思想。特别值得一提的是邢关彬博士、沈曼媛博士和 Uf Tureli 教授的贡献。Adaptix 公司的 Wolf Mack 对 WiMAX 系统的性能分析和 Anatoliy Ioffe 对之的详细回顾对提高本书的用途有很大的作用。我们还非常感谢那些在华盛顿大学参加了“移动宽带网络”这门课程的同学,他们对本书有益的建议和校正工作表示感谢。最后,我感谢我的母校华盛顿大学,以及 NSF 和 ONR 在过去的岁月中对我们在无线 OFDM 网络研究工作中的支持。

目 录

第1章 引言	(1)
1.1 基于 OFDM 的无线网络概论	(1)
1.1.1 数字广播和 DVB-T	(2)
1.1.2 无线局域网和 IEEE 802.11	(4)
1.1.3 WiMAX 和 IEEE 802.16	(6)
1.2 “跨层”设计的需要	(7)
1.3 全文的结构	(10)
参考文献	(12)
第2章 OFDM 基础	(13)
2.1 宽带无线信道特征	(14)
2.1.1 包络的衰落	(14)
2.1.2 时间色散信道	(15)
2.1.3 频率色散信道	(16)
2.1.4 宽带信道的统计特征	(17)
2.2 宽带传输的标准形式	(20)
2.3 OFDM 的实现	(24)
2.4 小结	(29)
参考文献	(30)
第3章 物理层的问题——系统的非理想因素	(31)
3.1 频率同步	(31)
3.1.1 OFDM 载波偏移数据模型	(32)
3.1.2 基于导频的估计	(33)
3.1.3 不基于导频的信道估计方法	(34)
3.2 信道估计	(38)
3.2.1 二维 OFDM 信道估计的导频	(39)

3.2.2	二维 MMSE 信道估计	(40)
3.2.3	减小复杂度的信道估计	(40)
3.3	I/Q 的不平衡性补偿	(46)
3.3.1	I/Q 不平衡性模型	(47)
3.3.2	数字补偿接收机	(49)
3.3.3	具有 I/Q 不平衡的频率偏移估计	(51)
3.4	相位噪声补偿	(57)
3.4.1	相位噪声的数学模型	(58)
3.4.2	已知信道状态信息的 CPE 估计	(60)
3.4.3	存在有 CPE 时的时域信道估计	(62)
3.4.4	具有不精确 CSI 时的 CPE 估计	(62)
3.5	小结	(64)
	参考文献	(65)
第4章	物理层的问题——空域处理	(68)
4.1	天线阵基础	(68)
4.2	波束成形	(71)
4.2.1	相干合并	(72)
4.2.2	迫零	(73)
4.2.3	MMSE 接收(最优线性接收机)	(73)
4.2.4	SDMA	(75)
4.2.5	宽带波束成形	(75)
4.3	MIMO 信道和容量	(77)
4.4	空时编码	(82)
4.4.1	空间复用	(82)
4.4.2	正交空时分组码	(83)
4.4.3	级联的空时发射机	(84)
4.4.4	ST 编码与波束成形结合	(85)
4.4.5	OFDM 中的 ST 波束成形	(87)
4.5	宽阔地区 MIMO 波束成形	(87)
4.5.1	数据模型	(88)
4.5.2	未编码的 OFDM 设计准则	(89)
4.5.3	编码 OFDM 设计准则	(92)

4.6 小结	(97)
附录 I $\bar{P}_i$ 的推导	(97)
附录 II 命题 5 的证明	(98)
附录 III 命题 6 的证明	(99)
参考文献	(100)
第5章 多址控制协议	(103)
5.1 引言	(103)
5.2 基本 MAC 协议	(103)
5.2.1 基于争用的协议	(104)
5.2.2 基于非争用的 MAC 协议	(105)
5.3 OFDMA 的优势	(110)
5.4 多用户分集	(112)
5.5 OFDMA 最优性	(120)
5.5.1 多用户多载波 SISO 系统	(121)
5.5.2 多用户多载波 MIMO 系统	(128)
5.6 小结	(138)
附录 I $C_n(p)$ 是一个凸函数	(138)
附录 II $C(p)$ 是一个凸函数	(139)
参考文献	(139)
第6章 OFDMA 设计考虑事项	(143)
6.1 跨层设计引言	(143)
6.2 取决于移动性的业务信道	(145)
6.2.1 OFDMA 业务信道	(146)
6.2.2 系统模型	(147)
6.2.3 对固定应用的信道配置	(149)
6.2.4 对移动应用的信道配置	(161)
6.3 IEEE 802.16e 业务信道	(167)
6.4 小结	(170)
参考文献	(171)
第7章 多小区频率规划	(173)
7.1 引言	(173)
7.1.1 固定信道分配	(174)

7.1.2 动态信道分配	(176)
7.2 OFDMA DCA	(178)
7.2.1 协议设计	(179)
7.2.2 对 RNC 问题用公式描述	(182)
7.2.3 对基站问题用公式描述	(184)
7.2.4 对 RNC 的快速算法	(186)
7.2.5 BS 的快速算法	(187)
7.3 不同扇区配置下的频谱效率	(189)
7.3.1 系统配置和信令开销	(189)
7.3.2 信道负载增益	(194)
7.4 小结	(196)
附录 命题 13 的证明	(196)
参考文献	(198)
第8章 附录	(201)
8.1 IEEE 802.11 和 WiFi	(201)
8.1.1 802.11 回顾	(201)
8.1.2 802.11 网络结构	(204)
8.1.3 MAC 层技术	(206)
8.1.4 物理层技术	(216)
8.2 IEEE 802.16e 和移动 WiMAX	(224)
8.2.1 概论	(225)
8.2.2 物理层技术	(227)
8.2.3 MAC 层技术	(239)
8.3 WiMAX 系统的性能分析	(246)
8.3.1 WiMAX OFDMA-TDD	(247)
8.3.2 比较方法	(247)
参考文献	(253)
符号、缩略语和常用标记	(255)
关于作者	(259)

第 1 章

引 言

无线通信行业正经历着从窄带、电路交换系统到宽带、基于 IP 平台的重大变革。在这个向宽带的演化中,一个共同的主题就是 OFDM 调制解调器的使用和开放的网络架构。本章讨论了当代对基于分组的宽带无线通信的一般观点和其相关的挑战。我们将涵盖数字广播、无线局域网以及后三代移动网络的一些最新的技术。OFDM 调制解调器和媒体接入控制协议在空中接口中所扮演的角色也得以描述。这些模块必须协同地集成在一起以使得网络(1)在每单位的区域上获得高的频谱效率(bit/s/Hz/m^2),以及(2)满足所能预见的多媒体业务的峰值速率。

1.1 基于 OFDM 的无线网络概论

OFDM 已经成为当前宽带无线网络领域中最令人激动的技术之一。尽管人们对多载波传输或复用(例如,频分复用(FDM))的关注可以追溯到 20 世纪 50 年代,但是 FDM 的高频谱效率和低实现复杂度直至 20 世纪 70 年代和 80 年代离散傅里叶变换(DFT)^①开始发展才成为可能。直到 20 世纪 90 年代,我们才目睹了第一个商用的 OFDM 无线系统——数字音频广播

^① 原文 DFT 为 Digital Fourier Transform 有误,根据国内外的一般观点,应当为 Discrete Fourier Transform。——译者注

(DAB)标准。一些历史性的时刻列举如下:

- 1958年:动态滤波多路,一个军用多载波高频通信系统^[1];
- 1966年:贝尔实验室的 R. W. Chang 描述了并行数据传输和 FDM 的概念^[2];
- 1970年:第一个关于 OFDM 的专利发表^[3];
- 1971年:Weinstein 和 Ebert,以及后来的 Hirosaki,在 1981 年提出了用 DFT 实现 FDM 的方案^[4];
- 1995年:美国国家标准化组织(ANSI)标准 T1.413:ADSL 标准的离散多音调制部分^[6];
- 1995年:欧洲电信标准协会(ETSI) DAB 标准:对数字音频广播的第一个基于 OFDM 的无线标准^[7];
- 1997年:DVB-T:地面数字视频广播标准^[5];
- 1999年:对无线局域网的 IEEE 802.11a 和 HIPERLAN/2 标准;
- 2004年:对于固定宽带无线城域网的 IEEE 802.16a/d 标准^[6];
- 2005年:基于 OFDM 的移动蜂窝网络在 IEEE 802.16e 和 IEEE 802.20 下得以发展。

基于 OFDM 的系统最主要的特征就是高数据速率。下面,我们将给出三个系统的介绍,这三个系统要么是已被广泛使用的系统,要么是正开始改变着无线通信系统的前景的系统。

1.1.1 数字广播和 DVB-T

最初引入的时候,电视节目信号都是模拟信号,并且以广播的形式进行无线传播。DVB(数字视频广播)是一个由来自 35 个以上国家的约 300 家公司组成的一个协会,它们来自于广播、制造、网络运营和管理机构等领域,为了建立一个公共的国际标准化组织以完成从模拟到数字广播的过渡——参见 URL:Http://www.dvb.org。DVB-T 特别在 VHF(130~260 MHz)和 UHF(480~862 MHz)波段,提供地面数字广播业务。1998 年 5 月,一个

由 17 个广播商、网络运营商、专业和家用设备制造商组成的社团开展了一项名为 MOTIVATE 的项目。MOTIVATE 调查了 DVB-T 在移动接收时的实际和理论的性能极限。

DVB-T 有效地利用频率资源,并且可以像在 MPEG-2 传输流中的 TV 一样承载数据、语音以及因特网网页。表 1.1 中列举了不同的音频和视频流的数据速率。DVB-T 业务的基本要求包括:

- 大容量、高数据速率(SDTV,EDTV 和 HDTV);
- 单频地面网;
- 对用屋顶天线进行静止接收的最优覆盖;支持手持,但非移动接收;
- 低速率(鲁棒的)流和高速率(易碎的)流的同时广播。

表 1.1 多媒体业务的数据速率

质量	数据速率
电话	64 kbps
CD	1.4 Mbps
DVD	3.5~6 Mbps
MPEG-2 SDTV	5 Mbps
MPEG-2 EDTV	10 Mbps
MPEG-2 HDTV	20~30 Mbps

DVB-T 通过一个 OFDM 调制解调器以及大量的新技术满足了上述需求。特别地,DVB-T 采用长度为 2K 的 FFT 或长度为 8K 的 FFT 的两类编码 OFDM (COFDM)技术。尽管采用最常用的调制模式(QPSK+1/2 编码)时只能提供 5 Mbit/s 的吞吐量,但是当与 QPSK,16-QAM,或者 64-QAM 相结合时,DVB-T 可以达到 31.67 Mbit/s 的峰值速率。DVB-T 中的关键技术是:

- 编码 OFDM 调制解调器;
- 分级的调制;
- 连续和离散的导频。

这些技术的重要性将在我们对 COFDM 和导频设计进行深入研究的第 2 章和第 3 章中进行讨论。自从 2000 年以来, DVB-T 已经被修整为提供其他的无线广播应用, 诸如 DVB-H(用于手持终端)。我们可以预见 DVB-T 中技术和业务的持续演进。甚至于存在有 DVB-T 与诸如 3G 和 WiMAX 这样的电信网融合的可能性。

1.1.2 无线局域网和 IEEE 802.11

在当今世界, 无线局域网毫无疑问是世界上最为流行的宽带无线网络。LAN 的标准协议, 诸如以太网, 通过廉价的硬件连接以高速数据率工作, 可以将数据网带给几乎所有的计算机。IEEE 对无线局域网的标准 (IEEE 802.11), 通过允许计算机和其他设备以无线的方式相互通信, 为局域网环境引入了移动性和机动性 (URL: [Http://grouper.ieee.org/groups/802/11](http://grouper.ieee.org/groups/802/11))。该技术从通过一个网络的接入点而对固定的局域网以及内部网络的下部组织 (包括接入到其他的无线局域网) 的接入的改进而获益。同时还创造了高性能的无线自组织网。

两种利用 OFDM 的无线局域网解决方案为 802.11g 和 802.11a。IEEE 802.11g 标准被设计成相对于流行的 802.11b 或者 Wi-Fi 标准 (11 Mbps) 的更高的带宽 (54 Mbps) 的成功者。尽管 802.11g 在 2.4GHz ISM (工业、科学和医疗) 频带对 802.11b 向下兼容, 但是 802.11a 工作于一个新分配的 UNII (未授权的国家信息基础组织) 频带。图 1-1 给出了 UNII 频带中信道的分配以及相关的最大辐射。因为功率的限制, 大多数无线局域网的应用被限制于家庭和办公楼。

无线局域网的基本要求包括:

- 一个 MAC 支持多个 PHY;
- 多个网络的交叠;
- 对干扰的鲁棒性;
- 处理“隐藏节点”的机制;

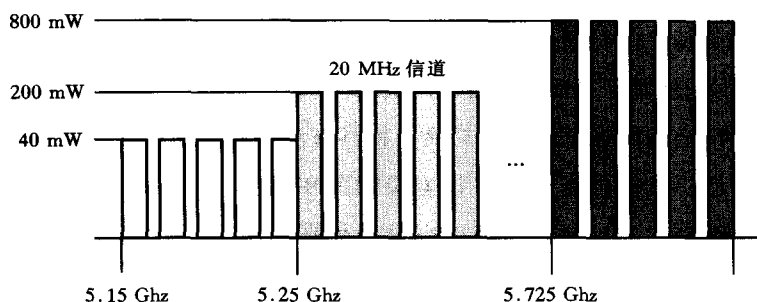


图 1-1 在 UNII 频带的最大辐射

- 备付时限的业务。

为了满足上述要求,必须解决很多挑战。802.11a/g 利用 OFDM 调制解调器来分发从 6 到 54 Mbps 的数据。甚至于更高速率的版本(802.11n)也正在批准以发送超过 100 Mbps 的数据速率。表 1.2 中总结了其 OFDM 调制解调器的参数。

表 1.2 802.11a/g 调制解调器参数

数据速率	6,9,12,18,24,36,48,54 Mbps
调制	BPSK,QPSK,16-QAM,64-QAM
码率	$1/2^{\text{①}}$, $2/3$, $3/4$
子载波数	52
导频数	4
OFDM 符号周期	4us
保护间隔	800ns
子载波间隔	312.5kHz
-3dB 带宽	16.56MHz
信道间隔	20MHz

① 原文为 1.2,有误。——译者注

在现阶段,无线局域网的主要限制就是它的覆盖范围(几百英尺)和业务质量的支持。尽管覆盖问题更主要的是管理问题而非技术问题,但是归于 802.11 系列基于 MAC 的争论,缺乏 QoS 却是其固有的问题。对目前 802.11 MAC 的增强正进行着扩展支持具有业务质量需求的局域网的应用。802.11e 是一个提供安全及协议容量和效率的工作组。这一增强,与最近 802.11a 和 802.11b 的对物理层容量的提高的结合,将提高整个系统的性能,并且扩展 802.11 的应用空间。示范性应用包括语音、视频和音频在 802.11 无线网络上的传输、视频会议、流媒体分发、增强的安全应用,以及移动和游牧接入应用。本书的附录一章有着对 802.11 更为详细的讨论。

1.1.3 WiMAX 和 IEEE 802.16

另外一种已经获得更广泛业界认可的基于 OFDM 的无线数据解决方案就是 IEEE802.16。形成的标准作为真正的城域网(MAN)对 802.11 进行补充。具有授权和免除授权两种选项的 802.16 的典型应用包括网状网络、空载传输、对住宅和小型家庭办公(SOHO)的无线 DSL,以及宽带移动网络。在固定环境中,视线传输有 35 km 的覆盖,802.16 的峰值速率可以达到 70 Mbps。

IEEE 802.16 标准定义了媒体接入控制(MAC)层协议以支持大量的物理层规范。最初的 802.16 标准就有几个工作组追随,其中一些放弃了他们对标准的贡献。最主要的改进是:802.16a,它将标准延伸到 2~11 GHz 之间的频谱;802.16d 定义了执行 802.16a 的系统轮廓;802.16e,正在发展以对工作于 2~6 GHz 主要支持固定无线网络的站增加其移动性。被称为移动 WiMAX 的 802.16e,在大规模的配置上可以对抗基于码分多址(CDMA)的 3G。

除了覆盖与移动性之外,802.11 和 802.16 之间的主要差别就是 MAC。与支持 10 个用户的 802.11 不同,802.16 采用授权需求机制以支持成千上万的用户。对语音和视频的 QoS 的支持是从底层往上设计的,并且引入了

不同的业务层。在安全性上,802.16 也先进得多。在技术上,802.16 包括了一些最先进的无线新技术:

- 可升级的 OFDMA ;
- 不同的信道配置用于多用户分集;
- 多输入多输出(MIMO)和先进的天线系统;
- 先进的信道编码和混合 ARQ;
- QoS 和业务等级。

本书的附录一章有着对 802.16 更为详细的讨论。

1.2 “跨层”设计的需要

广而言之,无线系统的设计包含链路层的问题和系统层的问题。无线链路层主要面临来自物理媒体的两个挑战——即,信道衰落(可能的时间和频率上的选择性)以及多址接入接口。对无线信道的链路设计的先进性实现了对多址干扰(MAI)和多径更强的鲁棒性,从而增加链路层或无线容量的调制方案和信道编码方案。特别地,OFDM 是在当前宽带演化过程中最为重要的一个,它在几乎所有的宽带系统中占领着统治地位。OFDM 通过多个并行的低速流传输高速数据的调制形式在频率选择的和有干扰的信道中表现出优越的性能。

尽管 OFDM 为宽带通信提供了强有力的物理层引擎,但是不进行全局考虑就对之应用可能会导致令人失望的结果,甚至于在整体性能上有负面的影响。例如,在典型的蜂窝环境中将 OFDM 与 TDMA(时分多址)相结合以提供宽带业务,由于链路预算的瓶颈,系统将陷入覆盖的问题^①。此外,OFDM/TDMA 粗糙的粒度将严重地阻碍为大量用户提供 QoS,这将不可

^① 在 TDMA 系统中,每一个用户在其特定的时隙中必须占有所有的信道,其结果就是非常高的峰值速率。

避免地减小无线资源的有效性。我们将在第 4 章中证明一种明智的多址方案设计不仅可以保证 OFDM 所有的优点,而且还具有传统的 CDMA 系统所没有的一些额外好处。其基本思想如图 1-2 中所示:通过跨层的交互作用,无线分配模块被设计成基于信道认知和基于应用认知。

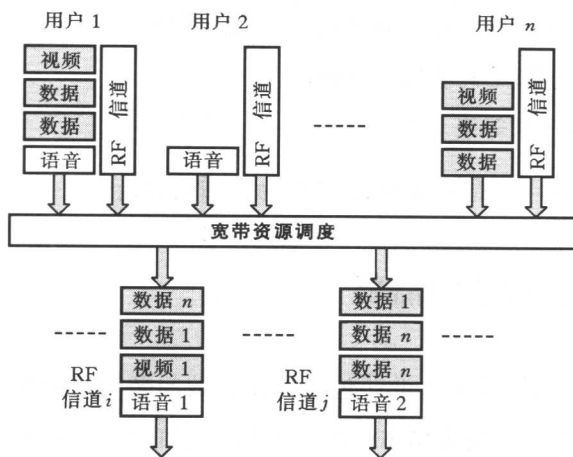


图 1-2 对动态无线资源分配的信道和应用感知的 MAC

在附录中,诸如 WiFi 和 WiMAX 的宽带无线网络应用场景将得以描述,这三类宽带无线系统的一个共同设计目标就是在统一的网络架构下支持具有不同 QoS 需求的不同业务。例如,语音相比较视频而言,具有非常低的速率并且具有较小的时延。为了分发很多类型的业务,在设计和评估空中接口时至少需要考虑如下几点:

- 每用户的数据速率/链路:系统所支持的每用户的峰值数据速率必须足够的大以支持高速应用(例如,HDTV 的数据速率在 10 Mb/s 至 100 Mb/s 这个数量级)
- 粒度:来自于用户的未来丰富的媒体业务将具有很大的速率需求范围(例如,从 10kbps 的语音到 1.5 Mbps 的 MPEG 视频)。为了防止不必要的开销,很重要的一点就是由空中接口处理最小的粒度。