

国外电子与通信教材系列

现代无线通信系统 电波传播

Radio Propagation for Modern Wireless Systems

[美] Henry L. Bertoni 著

顾金星 南亲良 王尔为 等译

徐承和 审校

11
-1

PH
PTR



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
www.phei.com.cn

TN011
BC27-1
1

国外电子与通信教材系列

现代无线通信系统电波传播

Radio Propagation for Modern Wireless Systems

[美] Henry L. Bertoni 著

内 容 简 介

本书是由世界无线通信专家亨利 L·伯托尼编写的关于无线电波传播模型的权威性教科书。它为读者打开了理解无线信道中无线电波传播的大门。本书就建筑物、地形、树丛对路径损耗的影响进行了广泛而深入的研究,形成了窄带和宽带系统的空间变化、到达角度、延时扩散等关键影响的统一观点。通过大量例子给出了对建筑物拐角衍射的清晰描述,也给出了以前从未发表过的城市中移动体及移动体路径损耗的研究内容,并提出了新的针对特定位置预测和基于射线理论信道统计模拟的有效模型。书中对频谱再利用的透彻介绍和对现实世界中建筑物、地形、树丛的精确模型的介绍为每一个无线系统设计人员提供了非常有价值的信息。

本书适合无线通信专业的高年级学生和研究生学习参考,也可供致力于无线通信工程的广大工程技术人员学习参考。

Authorized translation from the English language edition published by Prentice Hall PTR Copyright © 2000. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher. Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry, Copyright © 2002.

本书中文简体专有翻译出版版权由 Pearson 教育集团所属的 Prentice Hall PTR 授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号:图字:01-2000-1145

图书在版编目(CIP)数据

现代无线通信系统电波传播 / (美)伯托尼(Bertoni, H. L.)著;顾金星等译.

-北京:电子工业出版社,2002.8

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Radio Propagation for Modern Wireless Systems

ISBN 7-5053-7953-4

I. 现… II. ①伯… ②顾… III. 无线电通信-电波传播-研究 IV. TN011

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第063420号

责任编辑:吴源 陶淑毅

印刷者:北京科技印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:339千字

版 次:2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

定 价:26.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师 移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	阮秋琦	北方交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	徐重阳	华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、教材建设委员会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社副社长

译 者 序

电波传播是无线通信工程设计和无线网络规划和优化的最基础的要素,许多无线通信技术的新领域也常常是在发现了新的电波传播特性的基础上提出的。深入细致地研究无线电波传输的特性对于成功地开发无线通信系统是非常必要的。

为此,我们组织翻译了这本由世界著名无线通信权威专家亨利 L·伯托尼编写的关于无线电波传播模型的权威性教科书。本书是作者给工程技术人员讲课的讲义和作者在布鲁克林理工大学里作为无线网络教育计划一部分所教授的无线传播课程的教材结合而成的,它为读者打开了理解无线信道中无线电波传播的大门。本书系统而全面地介绍了现代无线系统的电波传播理论和实验,整个内容分成 8 章。

在每章的最后给出了一定数量的习题以方便读者巩固所学的知识,同时也引述了大量的参考文献以帮助专业人员对某个感兴趣的课题内容进行更全面的了解。

本书适合于无线通信专业的高年级学生和研究生学习参考,也可供致力于无线通信工程的广大工程技术人员学习参考。参加本书翻译的有顾金星、南亲良、王尔为、谢玉钧等同志。在本书改版前牛勇等同志又对全书进行了修订,最后全书由徐承和教授审校。由于经验不足,时间仓促,加之译者水平有限,译文中不足之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

致 谢

我对所有对本书出版做出贡献的人表示感谢。首先要感谢我的妻子 Helene Ebenstein 在我写作期间给予我不断的鼓励,并对最终书稿进行了校阅。感谢布鲁克林理工大学的 Byung-Chul Kim 为我准备了大量的计算曲线和绘图。也感谢布鲁克林理工大学的 Jeho Lee、Hyun-Kyu Chung、Cheolhang Cheon 和现场进行技术支持的 George Liang,他们也为本书提供了计算曲线和绘图。本书 Web 站点上的程序是由 Byung-Chul Kim, Hyun-Kyu Chung, George Liang, Jeho Lee 和 Leonard Piazzi 提供的。我为能同许多学生一起工作深感荣幸,在本书中也包含了他们的思想和成果。最后,我要感谢 Mohsen Gharabaghloo, 感谢他在 20 世纪 80 年代早期就把我带进了蜂窝移动无线传播的研究领域。

前 言

自从 20 世纪 80 年代早期蜂窝移动无线电话开始使用以来,其商业上的成功已经使无线通信工程师对理解和预测无线电在城镇范围内,甚至在建筑群落内传播的特性产生了极大的兴趣。在本书中,我们带着两个要牢记的目标来讨论无线传播。第一个目标是为具备有限传播知识的实施工程师提供一个对无线信道观测特征的简要介绍,并帮助他们理解影响这些特征的过程及因素。第二个目标是为准备在无线通信企业内工作的人员提供一本研究生课程的教科书。现有的现代无线应用方面的图书只是综述了所涉及的问题,仅用一章或两章的篇幅来描述无线信道特征,或者着重于描述这些特性怎样影响系统的性能。由于无线通信领域在范围和规模方面不断壮大,因此应该有一本在更深层次上研究无线通信系统设计和控制等基础课题的书。而本书正是作者在布鲁克林理工大学作为无线网络计划一部分所教授的有关无线传播课程的基础上结合作者给工程技术人员的讲课内容编写而成的,并吸收了作者及其学生在理解和预测无线传播效应方面 15 年来的经验。

与过去被动收听者的角色不同,蜂窝电话在使用无线频谱方面给了公众一个主动的角色。这种使用无线频谱方面的社会进步最终改变了政府的观点。受多用户可在同一频带上运行这个要求的驱动,蜂窝电话也通过频谱再用的概念产生了技术上的进步。没有使用频谱再用的系统是通过工作在不同的频段来避免干扰,但这主要受到由噪声引起的性能限制。在这些系统中,可以通过增加发射功率的方法来弥补对传播条件认识的不足,而使系统进入可调制状态。相反,在成功的商业系统中,频谱再用概念使得来自其他用户的干扰成为限制系统性能的主要因素。在设计这些系统的时候,有必要在每个用户所期望的接收信号和来自其他用户可能的干扰信号之间取得某种平衡。寻找这种平衡需要了解无线信道的特征。第 1 章向读者介绍频谱再用概念,给出传播特性是如何影响期望信号和干扰之间的平衡并进而影响系统设计的例子。作为一章的总结,通过实例讨论来阐明概念,在这一章最后包括的习题中向读者介绍了应用这些概念的经验。

在现代系统中,无线链路大约为 20 km 或更短,产生这些链路的天线位于建筑物之间,甚至在建筑群里面,且波长比建筑物要小。因此,信道特征极大地受到建筑物以及植被和地形的影响。在这种环境中,信号从一个天线以多个路径传播到另一个天线,这多个路径包括墙和地面的反射及透射过程,以及建筑物边缘和地形障碍物的绕射过程。传播的多径特征使其本身给通信工程师的创造性提出了各种挑战。虽然开始时对信道容量有严重的影响,但工程师们已经开始寻找用于处理多径信号的方法以便实现接近理论极限的容量。然而,处理多径的每一个新思想都要求对无线信道的统计特性有一个很深的理解。在第 2 章描述了传播效应的许多方面,这些效应已在各种类型的测量中观测到,包括窄带信号的路径损耗及宽带信号的到达角和时延扩展等方面内容。和其他章一样,在这一章引述了大量的参考文献以帮助专业人员对每个特定课题内容有一个全面了解。对于读者来说,这一章可以作为测量类型、处理数据的方法以及用来表示结果的统计方法的一般性介绍。理解这些测量结果、处理过程和表示方法也可以为下面章节中描述的理论模型起一个引导性的作用。

本书假定读者已建立了大学电磁学课程中波动的概念。本书并不试图从麦克斯韦(Max-

well)方程严格地推导出传播特性,而是避免进行矢量运算。读者的知识背景依赖于某些波动特性的接受,通过启发式的讨论以及从能量守恒等基本概念来导出其他的特性。例如在第3章中从平面波的基本特性开始,并在进行地面和墙面上的反射及透射讨论时要求读者有传输线方面的背景知识。在第3章及下面各章中,只要有可能,均把理论结果同实验结果进行比较。因此用平面波来为观测到的干涉效应和多普勒扩频建立模型,干涉效应也叫做快衰落。在第4章中使用平面波特性和能量守恒来证实天线辐射的球面波特性和引出在介质表面反射的射线描述。通过对这些反射的考虑,建立了在城市峡谷中视距路径上的传播模型。利用电路概念获得了在天线间传播的互反性,并导出了路径增益或损耗的表达式。

在建筑物边缘的绕射是无线通信的一个重要过程。它允许无线信号到达那些即使是被建筑物遮挡的用户。由于不能确信读者已经熟悉这个过程,所以第5章详细地研究了绕射。为了简化起见,利用 Huygens-Kirchhoff 积分的标量形式作为出发点。我们首先使用它给出的关于一射线的 Fresnel 椭圆的物理意义,它被广泛应用在传播研究中,以大致估计物理尺度。并推导出了吸收半屏绕射场的几何光学和均匀一致性形式。在这些表达式中我们定义了一个可应用于任何直线建筑物边缘或拐角的通用分量,还定义了一个其特定形式依赖于该边缘特征的衍射系数。直接给出了几种边缘和拐角类型的绕射系数。通过启发性的射线讨论,把从平面波获得的结果推广到由天线辐射产生的球面波和多边缘的情况。这些结果可用路径增益或路径损耗来表示,这对无线通信应用来说是很方便的。

第6章通过成排建筑物的多重绕射来对在居民区环境中平均路径损耗的问题进行公式化推导。借助于 Huygens-Kirchhoff 方程,对不同类别的基站天线和用户天线高度的衍射问题进行求解。这些结果表明了频率、平均建筑物高度以及建筑物的行距是如何影响信号的距离函数和高度增益的。在第7章讨论了使用这种绕射方法来研究建筑物结构的随机性对阴影衰落的影响,并利用衍射来研究地形和植被对平均路径损耗的影响。

在第8章中讨论利用各类建筑物的几何描述来进行传播预测。基于射线的各种模型推导出综合了建筑物反射和衍射的过程以用于指定位置的预测。它们的精确程度已经通过把预测结果同小区域平均接收功率的测量结果比较而得到确认。然而通过 Monte Carlo 模拟,射线模型已开始被用来预测更高阶信道统计特性,如时延和角度扩散。这种方法能够产生用于先进通信系统中无线信道的统计特性数值,并能说明这些数值是如何依赖不同城市内建筑物大小和形状的分布的。

目 录

第 1 章 蜂窝小区概念及传播预测的必要性	1
1.1 空间再用概念	2
1.2 作为 FDMA 频道再用例子的线性小区	2
1.3 覆盖区域的六边形小区	4
1.3.1 对称再用图样	4
1.3.2 对称再用图样的干扰	6
1.4 扇形化小区	6
1.5 CDMA 的空间再用	7
1.6 小结	8
习题	9
参考文献	9
第 2 章 传播信道观测特性的测量	11
2.1 窄带信号测量	11
2.1.1 小区域信号变化:快衰落	13
2.1.2 小区域内的平均值变化:阴影衰落	15
2.1.3 从距离关系中分离出阴影衰落	16
2.2 宏小区距离关系的斜率-截距模型	18
2.3 微区的距离依赖关系:街道的几何影响	19
2.3.1 LOS(视线)路径	20
2.3.2 Sunset 和 Mission 区的之字形和阶梯形路径	21
2.3.3 在旧金山高层建筑中心的非视线路径	23
2.4 快衰落和其他窄带效应的多径模型	23
2.4.1 频率衰落	24
2.4.2 随时间变化的衰落	24
2.4.3 多普勒扩展	25
2.4.4 去极化	25
2.5 室内窄带信号传播	26
2.5.1 室内链路的快衰落	26
2.5.2 小区域平均的距离关系	28
2.6 脉冲激发的信道响应	29
2.6.1 功率的时延分布	30
2.6.2 单个脉冲的衰落特性	31
2.6.3 时延扩展的测量	32
2.6.4 相关性带宽	33

2.7	在架空基站天线上观测的多径效应	34
2.8	小结	35
	习题	36
	参考文献	37
第3章	平面波传播、反射和透射	42
3.1	无界区域中的平面波	43
3.1.1	相量标记	44
3.1.2	沿与坐标轴倾斜方向的传播	45
3.1.3	几个平面波引起的快衰落	45
3.1.4	相关函数和多普勒扩展	46
3.1.5	架空基站上的衰落	48
3.2	平面波在平面边界的反射	49
3.2.1	Snell 定理	50
3.2.2	TE 极化的反射和透射系数	50
3.2.3	TM 极化波的反射和透射系数	52
3.2.4	地面上方天线的高度增益	54
3.2.5	圆极化波的反射	54
3.3	分层电介质上的平面波入射	55
3.3.1	砖墙的反射	57
3.3.2	有损耗墙的反射	57
3.3.3	均匀结构墙中的透射	59
3.3.4	通过内壁墙和楼板的透射	62
3.4	小结	63
	习题	63
	参考文献	64
第4章	天线和辐射	67
4.1	球面波的辐射	67
4.2	接收天线、可逆性及路径增益或损耗	70
4.2.1	路径增益或损耗	71
4.2.2	接收天线的有效面积	72
4.2.3	有多径存在时的接收功率	75
4.3	在平地上传播的双射线模型	75
4.3.1	断点距离	78
4.3.2	双斜率回归拟合	78
4.4	在城市峡谷中的 LOS 传播	79
4.5	柱面波	81
4.6	小结	82
	习题	82

参考文献	83
第 5 章 边缘和拐角的衍射	84
5.1 传播的局部性质	85
5.1.1 场畸变估算	86
5.1.2 用 Fresnel 区解释局部区域	87
5.2 由吸收半平面产生的平面波衍射	88
5.2.1 在 $y > 0$ 照射区内的场	89
5.2.2 在 $y < 0$ 阴影区中的场	91
5.2.3 衍射的几何理论	92
5.2.4 对阴影区附近 y 的 Fresnel 积分计算	92
5.2.5 衍射一致理论	93
5.3 对其他边缘及倾斜入射的衍射	94
5.3.1 吸收屏	95
5.3.2 导电屏	96
5.3.3 直角尖劈	96
5.3.4 对边缘倾斜传播的平面波	97
5.4 球面波的衍射	99
5.4.1 射线以近似直角入射到边缘时的衍射	99
5.4.2 与边缘倾斜射线的衍射	100
5.4.3 无线应用下的路径增益	102
5.5 多边缘衍射	103
5.5.1 两个平行的边缘	103
5.5.2 两个垂直的边缘	104
5.6 小结	105
习题	106
参考文献	108
第 6 章 平地面上存在建筑物时的传播	109
6.1 低的成排建筑物上的传播模型	110
6.1.1 路径增益分量	110
6.1.2 用屋顶衍射场的模拟计算 PG_2	111
6.2 计算屋顶场衰减 PG_1 的方法	113
6.2.1 计算场衰减的物理光学方法	114
6.2.2 排间距和建筑物高度一致时的解	115
6.3 入射平面波对宏小区的预测	116
6.3.1 用 Borsma 函数表示的解	117
6.3.2 使用稳定场来求解路径损耗	119
6.4 用柱面波入射对微区预测	121
6.4.1 用 Borsma 函数求解	122

6.4.2	低基站天线的路径损耗	124
6.4.3	移动到移动传播的路径损耗	126
6.4.4	对成排建筑物的倾斜传播	128
6.5	建筑物高度和排距可变条件下场的数值计算	129
6.5.1	窗口化终止积分	130
6.5.2	积分的离散化	131
6.5.3	稳定场的高度关系	132
6.5.4	屋顶形状的影响	133
6.6	小结	135
	习题	136
	参考文献	137
第7章	阴影衰落和地形及树丛效应	139
7.1	阴影衰落统计特性	139
7.1.1	屋顶场变化	139
7.1.2	街面信号的综合变化	142
7.2	建立地形效应模型	144
7.2.1	用户附近屋顶的视线路径	144
7.2.2	在光秃的尖劈形小山上的衍射路径	145
7.2.3	在光的柱面形山上的衍射路径	147
7.2.4	有建筑物的山坡上的柱面波衍射	149
7.2.5	建筑物覆盖的山的路径损耗	153
7.3	建立树丛效应的模型	154
7.3.1	向森林区用户的传播	156
7.3.2	到森林中空地上用户的路径损耗	158
7.3.3	居民区中的成排树	159
7.4	小结	161
	习题	162
	参考文献	164
第8章	特定场合中的传播预测	167
8.1	使用二维建筑数据库的室外预测	169
8.1.1	镜像法和 Pincushion 法	169
8.1.2	射线对总功率的贡献	171
8.1.3	预测和测量结果比较	173
8.2	对曼哈顿商业区道路网的二维预测	174
8.2.1	绕过拐角的路径损耗	174
8.2.2	利用二维射线方法的预测	176
8.3	使用三维建筑物数据库的室外预测	177
8.3.1	三维 Pincushion 法	178

8.3.2	垂直面发射(VPL)方法	180
8.3.3	斜面-垂直面方法	182
8.3.4	高阶的信道统计特性的蒙特卡洛方法	184
8.4	室内特定场合的预测	186
8.4.1	通过地板的透射	187
8.4.2	家具和天花板结构对楼板上传播的影响	188
8.5	小结	191
	习题	191
	参考文献	192

第 1 章 蜂窝小区概念及传播预测的必要性

20 世纪 80 年代初蜂窝移动无线(CMR)电话系统的出现标志着无线电技术在通信领域内的一个重要转折点。20 世纪 80 年代以前,虽然像舰队间通信、袖珍无线电话机、民用波段(CB)收音机等正变得重要起来,但占主要地位的无线频谱的商业应用仍是无线广播和电视。广播系统是打算用单一的发射台来覆盖整个城市,发射的信号在一分配的频道内,因此系统设计的目标是实现最大可能的覆盖范围,在该范围内,接收到的功率与背景噪声相比足够强。为达到这一点,可通过把发射天线架设在一个高大建筑物上或塔顶并发射可能的最大功率来实现。在边缘地区,只要有可能也可以把接收天线架设在建筑物或柱顶上。为了支持广播系统的设计,对无线电波在 100 km 或更长距离的传播进行了实验和理论研究,考虑的因素包括地球曲率、大气折射以及大范围的地形特征等。

相反,CMR 电话系统被设计用来让移动用户通过使用其他有线网络终端经短链路无线访问通信系统,该短链路仅用来覆盖城市区域的一部分,所以随着距离衰减的无线信号允许其频谱在同一城市区域内的其他地方可以被重新使用。如果是这样,那么系统设计的目标就是使接收到的功率大到足够克服每个链路上的背景噪声,而同时对在更远距离上相同频率工作的干扰最小。实现这样一种平衡,即在覆盖所期望链路的同时避免对其他链路的过分干扰,使系统设计问题变得相当复杂。随着 CMR 电话在商业上的巨大成功,引进了许多其他无线系统和应用,提出了相同的或另外使用蜂窝小区概念的方法^[1,2],以通过对所分配的有限的无线频谱在空间上再使用来适应更多用户。本章的目的是使读者熟悉再使用的概念,并解释为什么无线传播特性是决定无线系统设计时的基本特性。

刚开始在城市区域内部署 CMR 时,使用了从用户到基站(到有有线系统的访问点)之间距离可达 20 km 的无线链路。然而,当更多的基站被增加进来以适应用户数的增长时,最大传输距离已经被大大减小。对更新的系统,特别是那些有望在室内应用的诸如无线局域网(W-LAN)和无线用户小交换机(W-PBX)这样的系统,最大距离很可能不会超过几百米。在这样短的链路上,建筑物对无线传播有很大的影响。本书主要讨论建筑物对无线信号的影响。我们也将考虑地形和植被的影响,这里大气的影响并不明显。

蜂窝系统工作在 450 到 900 MHz 的频段内。另外,接近 1.9 GHz 的频段目前正在全世界范围内被用做第二代蜂窝系统,而 3.9 GHz 则被用做无线本地环路。没有许可证的频段,如 900 MHz, 2.4 GHz 和 5.2 GHz 附近已被或将被用做无线 LAN、无线 PBX,或者用在其他方面。对这些频率,波长小于 1 m,这使得它同建筑物尺度相比小得多,但比建筑材料的粗糙度大。结果,无线电波的传播就可以按照在墙上的反射和透射及建筑物边缘的衍射过程从数学上来理解和描述。为了利用这种描述,本书的几个章节专门讨论了这些过程。理解这些系统对于已经提出的在高达 30 GHz 频段工作的系统也是很重要的。

简单说来,谈到 CMR 的历史,不能不说到集成电路技术的重要性,这使得智能化、控制功能及信号处理均可在一个固定系统及用户单元中实现。从移动电话由一个公文包大小的尺寸到今天袖珍式电话的变化,就可以看出 CMR 出现以来在微小型化方面所取得的稳定进步。更进一步的小型化允许使用更多的智能化和信号处理能力,这也就克服了由于无线信道的传

播特征所产生的局限(亦即使用灵巧天线系统)^[3]。然而,使用智能化的系统设计要求更深层的无线信道方面的知识。

1.1 空间再用概念

多址方式允许无线信号同时发送到同一区域内的各个基站、访问点或几个移动用户,或从它们发送出来。在蜂窝电话中实现的第一种多址方法是频分多址(FDMA),它的使用与发射信号的模拟调频(FM)相关。在双向传输的 FDMA 系统中,每一个用户被分配一个从用户到基站的上行频道和一个从基站到用户的下行频道。在北美,现行工作的 FDMA 系统叫做高级移动电话系统(AMPS),有总数为 $N_c = 395$ 的双向信道,每一个单向信道带宽为 30 kHz ^[1]。在 FDMA 系统中,空间再用等于在不同地理小区域重新使用相同 N_c 的频道。如果是这样的话,频率再用分配必须把本地与其他区域分隔得足够远,以限制其他相同信道信号的干扰。

用数字方法传输话音信号导致产生了多址技术的新方法。一种技术是时分多址(TDMA),在这里数字化的语音或其他信息的一小段被压缩成更短的时间间隔,并在一个循环序列中的一指定时隙中传送。另一种称之为 IS-54 的方法,IS-54 可从 AMPS 系统容易地迁移过来,每一个 AMPS 信道被用来在三个时隙内传送三个数字化的语音。还有一种广泛使用的称为 GSM 的系统在 200 kHz 宽的频带内传送 8 个 TDMA 信号。如果所有用户和基站的时隙是同步的,那么在一特定时隙内,其多址本质上同 FDMA 相同。因此,其空间再用也同 FDMA 的空间再用类似。

最新蜂窝电话系统使用码分多址(CDMA)的数字传输以区分来自或达到不同用户的信号^[4]。在这种方法中,每一个信息码元被作为更短持续时间称之为码片的编码序列来传送。这种编码对每一个呼叫要求要使用比其他方法传送信息所必需的更大频带。然而,同一系统中的所有用户使用相同的无线频段,且每一个用户有特殊的编码用以区分接收信号。对任何一个用户,所有来自其他用户的干扰表现为背景噪声,它的功率电平同每比特的码片数成反比(叫做处理增益)。对一个称做 IS-95 的普遍使用的 CDMA 系统,信息的每一个比特用 128 码片来发送,且话音信道被扩展在整个 1.23 MHz 频段内。下行发送和上行发送分别使用不同的频率。在这种情况下,空间再用方案必须把由所有其他用户产生的全部干扰限制在一个可接受的水平。

由于空间再用必须在为每个用户提供适当信号强度和在此同时进行的限制由其他用户造成的共信道干扰之间取得某种折中,因此无线传播特性在系统设计中很重要。在本章中,我们将通过几个例子来描述空间再用的概念,并且通过这些例子来说明在系统设计中传播特性为什么很重要。这里把描述在 FDMA 系统中的空间再用做为开始,然后简要讨论在 CDMA 系统中干扰的限制。

1.2 作为 FDMA 频道再用例子的线性小区

为了实现在某一城市或其他大区域内的 FDMA 系统具有更大的容量,大区域被分成若干个区域,计为 N ,这些小区域使用相同的一组 N_c 个无线频率信道。因此,在同一时间电话呼叫总数为 NN_c ,这个总数可以通过根据需把城市区域划分成更多的区域来增加。每一个区域可以被进一步划分成 N_R 个小区,每一个小区由一个基站服务,且被分配了 N_c / N_R 个可用