

国外电子信息科学教材系列

# 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

PH  
PTR



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL <http://www.phei.com.cn>

## 内 容 简 介

本书是由世界无线通信专家亨利·贝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。

Authorized translation from the English language edition published by Prentice Hall, Inc

本书中文简版专有翻译出版版权由美国 Prentice Hall, Inc. 授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

Copyright © 2000 Prentice Hall PTR. 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 Prentice Hall, Inc.

### 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, 2001.1

书名原文:Radio Propagation for Modern Wireless Systems

国外电子信息科学教材系列

ISBN 7-5053-6413-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 82239 号

丛 书 名:国外电子信息科学教材系列

书 名:现代无线通信系统电波传播

原 书 名:Radio Propagation for Modern Wireless Systems

著 者:Henry L. Bertoni

译 者:顾金星 南亲良 王尔为 等

审 校 者:徐承和

责任编辑:吴 源

特邀编辑:徐跃进

排版制作:电子出版社计算机排版室监制

印 刷 者:北京天竺颖华印刷厂

装 订 者:三河市金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社 URL: <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 字数:324 千字

版 次:2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5053-6413-8

TN·1431

印 数:5000 册 定价:26.00 元

版权贸易合同登记号:01-2000-1145

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

## 译 者 序

无线技术给人们带来的影响是无可争议的。无线技术的不断更新使无线技术的发展非常迅速,因此用户不可避免地要向未来的无线局域网技术靠拢,而且只有无线局域网技术才能使日益普及的移动计算设备成为真正意义上自由存取网络的移动工具。另外室内无线网解决方案能够解决有线网络布线的不便和功能不足问题,伴随着有线网络的广泛应用,以快捷高效、组网灵活为优势的无线网络技术也在飞速发展。因此系统而全面地了解和掌握无线电波的传输原理及特性,对于任何一个无线网络设计、研究和管理人员来说都是必不可少的。

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·贝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 Polytechnic 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输理论和实验,整个内容分成八章。

在每章的最后给出了相当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特定课题内容寻找更全面的理解。

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。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有贡献的人表示感谢。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,和对最终书稿的校阅。感谢 Polytechnic 大学的 Byung-Chul Kim 为我准备了大量的计算曲线,以及许多的绘图。也感谢 Polytechnic 大学的 Jeho Lee、Hyun-Kyu Chung 和 Cheolhang Cheon, 和现场技术支持的 George Liang, 他们为本书提供了另外的计算曲线和绘图。出现在本书 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。我对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 年代早期把我带进了蜂窝移动无线传播的研究领域。

## 序

自从 80 年代早期蜂窝移动无线电话开始实用以来,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,我们用两个要牢记的目标来讨论无线传播。第一个目标是为有限传播知识的实施工程师提供一个对观测无线信道特征的简要介绍和对影响这一特征的过程及因素的理解。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。因有关现代无线应用的书典型地综合评述所涉及的问题,故只用一章或两章的内容来描述无线信道特征,或者着重于描述这些特性是怎样影响系统性能。既然无线通信领域在范围和规模方面不断壮大,则有一本在更深层次上研究操纵无线通信系统设计和控制等各种各样基础课题的书是很合适的。本书资料是作者在给工程技术人员的讲课内容和作者在 Polytechnic 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编写而成的,本书也吸收了作者和他的学生在理解和预测无线传播效应方面 15 年之久的经验。

与过去被动收听者的角色相比,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。受允许多用户可在同一相同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。通过工作在不同的频段,没有使用频谱再用的系统避免了干扰和主要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补偿对传播条件认识的不足,而使系统到达可调节上限。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。作为全部章节的总结,通过例子讨论来阐明概念,在本章最后包括的习题中给读者提供了应用这些概念的经验。

在现代系统中,无线链路大约为 20km 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,且波长比建筑物尺度要小。因此,信道特征严重地受建筑物以及植物和地形的影响。在这种环境中,信号从一个天线以多个路径传播到达另一个天线,这种多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衍射过程。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以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层次的理解。在第 2 章中我们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,它们包括从窄带信号的路径损耗到宽带信号的到达角和延时扩散等方面内容。和其他章一样,本章引述了大量的参考文献以帮助专业人员寻找对每个特定课题内容的全面了解。对于读者来说,本章可以作为测量类型及处理数据的方法,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、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 Maxwell 方程严

格地推导出传播特性,更确切地说,目的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,通过启发式的讨论和从能量守恒等基本概念来导出其他的特性。例如在第3章中我们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2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展宽建立模型,干涉效应也叫作衰落。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可逆性,并导出了路径增益或损耗的表达式。

在建筑物边缘的衍射是无线通信的一个重要过程。它允许无线信号达到那些即使是被建筑物遮挡的用户。由于不能指望读者已经熟悉这个过程,所以第5章详细地研究了衍射。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约估计物理尺度。推导出了吸收半屏衍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一个通用分量和其特定形式依赖于该边缘特征的一个衍射系数。直接给出了几种边缘和拐角类型的衍射系数。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方便的。

第6章用通过成排建筑物的多重衍射来对在居民区环境中平均路径损耗的问题进行了公式化推导。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和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章中使用这种衍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物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描述先进通信系统中无线信道统计特性数值,并说明这些数值是如何依赖于不同城市内建筑物大小和形状分布的。

# 目 录

<b>第 1 章 蜂窝小区概念及传输预测的必要性</b> .....	( 1 )
1.1 空间再用概念 .....	( 2 )
1.2 作为 FDMA 频道再用例子的线性蜂窝 .....	( 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 .....	( 5 )
1.4 扇形化小区 .....	( 7 )
1.5 CDMA 的空间再用 .....	( 7 )
1.6 小结 .....	( 9 )
习题 .....	( 9 )
参考文献 .....	( 10 )
<b>第 2 章 传播信道观测特性的测量</b> .....	( 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:阴影区衰落 .....	( 15 )
2.1.3 把阴影区衰落从距离关系中分离出来 .....	( 16 )
2.2 大蜂窝距离关系的斜率-截距模型 .....	( 18 )
2.3 微蜂窝的距离依赖关系:街道几何形状的影响 .....	( 19 )
2.3.1 LOS 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 San Francisco 高层建筑中心城市中的非 LOS 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 时间有关的衰落 .....	( 25 )
2.4.3 多普勒扩展 .....	( 25 )
2.4.4 极化 .....	( 26 )
2.5 室内窄带信号传播 .....	( 26 )
2.5.1 室内链路的快衰落 .....	( 27 )
2.5.2 小区域平均的距离关系 .....	( 29 )
2.6 脉冲激发的信道响应 .....	( 30 )
2.6.1 功率延迟剖面 .....	( 30 )
2.6.2 单个脉冲的衰落特性 .....	( 32 )
2.6.3 时延扩展的测量 .....	( 33 )
2.6.4 相关性带宽 .....	( 34 )
2.7 在架空基站天线上观测的多径效应 .....	( 35 )
2.8 小结 .....	( 36 )
习题 .....	( 36 )

参考文献 .....	(37)
<b>第3章 平面波传播、反射和透射</b> .....	(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 .....	(47)
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 .....	(49)
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 .....	(58)
3.3.3 均匀结构墙中的透射 .....	(58)
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)
<b>第4章 天线和辐射</b> .....	(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 .....	(72)
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 .....	(74)
4.3 在平地上传播的双射线模型 .....	(75)
4.3.1 断点距离 .....	(77)
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 .....	(82)
4.6 小结 .....	(82)
习题 .....	(82)
参考文献 .....	(83)
<b>第5章 边缘和拐角的衍射</b> .....	(85)
5.1 传播的局部性质 .....	(86)
5.1.1 场畸变估算 .....	(87)
5.1.2 用 Fresnel 区的本地区域说明 .....	(88)



5.2	由吸收半平面产生的平面波衍射	(89)
5.2.1	在 $y > 0$ 照射区内的场	(90)
5.2.2	在 $y < 0$ 阴影区中的场	(92)
5.2.3	衍射的几何理论	(93)
5.2.4	对阴影区附近 $y$ 的 Fresnel 积分计算	(93)
5.2.5	衍射的均匀理论	(94)
5.3	对其他边缘及倾斜入射的衍射	(96)
5.3.1	吸收屏	(96)
5.3.2	导电屏	(97)
5.3.3	直角尖劈	(98)
5.3.4	对边缘倾斜传播的平面波	(99)
5.4	球面波的衍射	(100)
5.4.1	射线以近似直角入射到边缘时的衍射	(101)
5.4.2	与边缘倾斜射线的衍射	(101)
5.4.3	无线应用的路径增益	(103)
5.5	多边缘衍射	(104)
5.5.1	两个平行的边缘	(105)
5.5.2	两个垂直的边缘	(106)
5.6	小结	(107)
	习题	(107)
	参考文献	(109)
<b>第 6 章</b>	<b>平地面上存在建筑物时的传播</b>	<b>(111)</b>
6.1	低的成排建筑物上的传播模型	(112)
6.1.1	路径增益分量	(112)
6.1.2	屋顶场衍射 $PG_2$ 的计算	(113)
6.2	计算屋顶场衰减 $PG_1$ 的方法	(115)
6.2.1	计算场衰减的物理光学方法	(116)
6.2.2	排间距和建筑物高度一致时的解	(117)
6.3	大蜂窝入射平面波预测	(118)
6.3.1	用 Borsma 函数表示的解	(119)
6.3.2	使用稳定场来求解路径损耗	(121)
6.4	微蜂窝预测的柱面波入射	(123)
6.4.1	用 Borsma 函数表示的解	(123)
6.4.2	低基站天线的路径损耗	(126)
6.4.3	移动用户到移动用户传播的路径损耗	(129)
6.4.4	倾斜于成排建筑物的传播	(130)
6.5	可变建筑物高度和排距条件下场的数值计算	(131)
6.5.1	窗口化的终止积分	(132)
6.5.2	积分的离散化	(133)
6.5.3	稳定场的高度关系	(134)

6.5.4 屋顶形状的影响 .....	(135)
6.6 小结 .....	(137)
习题 .....	(138)
参考文献 .....	(139)
<b>第7章 阴影区衰落和地形及树丛效应</b> .....	<b>(141)</b>
7.1 阴影区衰落统计特性 .....	(141)
7.1.1 屋顶场变化 .....	(141)
7.1.2 街面信号的总变化 .....	(144)
7.2 建立地形效应模型 .....	(146)
7.2.1 到用户附近屋顶的 LOS 路径 .....	(146)
7.2.2 在裸露楔形山上方的衍射路径 .....	(147)
7.2.3 在光秃柱面形山上的衍射路径 .....	(149)
7.2.4 有建筑物山坡上的柱面波衍射 .....	(151)
7.2.5 被建筑物覆盖山上的路径损耗 .....	(155)
7.3 建立树丛效应的模型 .....	(156)
7.3.1 到森林中用户的传播 .....	(158)
7.3.2 到森林中开垦地用户的路径损耗 .....	(160)
7.3.3 在居民区中的一排排树 .....	(161)
7.4 小结 .....	(164)
习题 .....	(164)
参考文献 .....	(166)
<b>第8章 特定位置的传播预测</b> .....	<b>(169)</b>
8.1 使用二维建筑数据库的室外预测 .....	(171)
8.1.1 镜像法和枕形法 .....	(172)
8.1.2 对总功率的射线贡献 .....	(173)
8.1.3 预测和测量结果的比较 .....	(175)
8.2 对曼哈顿商业区街道网的二维预测 .....	(176)
8.2.1 绕过拐角的路径损耗 .....	(176)
8.2.2 利用二维射线方法的预测 .....	(178)
8.3 使用三维建筑物数据库的室外预测 .....	(180)
8.3.1 三维枕形方法 .....	(180)
8.3.2 垂直面发射方法 .....	(182)
8.3.3 斜面-垂直面方法 .....	(183)
8.3.4 高阶信道统计特性的 Monte Carlo 方法 .....	(186)
8.4 室内特定位置的预测 .....	(187)
8.4.1 通过地板的透射 .....	(189)
8.4.2 家具和天花板结构对楼板上传播的影响 .....	(191)
8.5 小结 .....	(193)
习题 .....	(194)
参考文献 .....	(195)

# 第 1 章 蜂窝小区概念及传输预测的必要性

在 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技术在通信领域内的一个重要转折点。在 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,则可通过把发射天线架设在一个高大建筑物或塔顶并发射最大可能的功率来实现。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 100km 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末端的一短链路上的无线电来访问通信系统,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。假若这样,那系统设计的目标就是使接收到的功率足够大以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,这使得系统设计问题变得大大复杂。随着 CMR 电话商业上的巨大成功,许多另外的无线系统和应用也已引进了或提出了相同的或另外使用小区概念的方法<sup>[1,2]</sup>,以通过对所分配的有限无线频谱的空间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,并给出为什么无线传播特性是决定无线系统设计中的基本原理。

刚开始在城市区域内部署 CMR 时使用了从用户到基站(访问有线系统的点)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,特别是那些可以看到的诸如无线局域网 (W-LAN) 和无线用户小交换机 (W-PBX),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。本书的主要内容主要讨论有关建筑物对无线信号的影响。我们也将考虑地形和植物的影响,但大气的影晌不会明显。

蜂窝系统工作在从 450 到 900MHz 的频段内。另外,靠近 1.9GHz 的频段现正在全世界范围内被用作第二代蜂窝系统,而 3.9 GHz 则被用作无线本地环路。没有许可证的频段,如 900MHz、2.4GHz、2.5GHz 附近已被或将被用作无线 LAN,无线 PBX,及其他的应用。对这些频率,波长小于 1m,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更高达 30GHz 频段工作的系统也是很重要的。

然而简单说来,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。移动电话单元从一个大公文包大小的尺寸变成今天袖珍式电话的变化就可以看到自 CMR 出现以来在微小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)<sup>[3]</sup>。然而,使用智能化能力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,叫作高级移动电话系统(AMPS),有总数为 $N_c = 395$ 的双向信道,每一个单向信道带宽为 $30\text{kHz}$ <sup>[1]</sup>。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。假若这样的话,频率再用分配必须把本地与其他区域分隔足够远,以限制其他同信道信号的干涉。

采用数字化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之为GSM的系统在 $200\text{kHz}$ 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,那么在一特定时间隙内,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<sup>[4]</sup>。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Chips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bit的Chip数成反比(叫作处理增益)。对一个称作IS-95的普遍使用的CDMA系统,信息的每一个bit用128Chip来发送,且话音信道被扩展在整个 $1.23\text{MHz}$ 频段。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强度信号的同时限制由于其他用户造成的同道干扰之间取得某种折衷,因此无线传播特性在系统设计中起着很重要的作用。在本章的剩余部分,我们将通过几个例子来描述空间再用的概念,并且通过这些例子说明在系统设计中传播特性是如何重要。我们通过描述在FDMA系统中的空间再用作为开始,之后简要讨论在CDMA系统中干扰的局限性。

## 1.2 作为FDMA频道再用例子的线性蜂窝

为了实现在某一城市或其他大区域内的FDMA系统中有更大容量用户,大区域被分成若干个区域 $N$ ,它们再使用一组相同的 $N_c$ 个无线频率信道。因此,同时电话呼叫总数为 $NN_c$ ,这个总数可以通过根据需把城市区域划分成更大的 $N$ 区域来增加。每一个区域被进一步划分成 $N_R$ 个小区,每一个小区由一个基站服务,且被分配了 $N_c/N_R$ 个可用无线频道。通过线缆把基站同交换中心连接起来,该交换中心控制网络并把呼叫连接到有线电话网络。这种

进一步划分的作用是使使用相同频道的那些小区被一足够大的距离分离开来以使干扰最小。例如,在北美 AMPS 系统中可接受的话音质量要求来自基站的所希望信号的接收功率  $P(W)$  必须比从所有其他共信道基站接收的总干扰  $I(W)$  大 50 倍以上<sup>[5]</sup>。因此信号干扰比  $P/I$  必须大于 50。用分贝表示为  $10\text{Log}50 = 17\text{dB}$ 。

图 1-1 给出了怎样把区域划分成小区以覆盖一高速路的一维视图。在这个例子中,每一个区域被划分成半径为  $R_C$  的  $N_R = 3$  个小区。在下行方向,区域 1 中小区 1 内的一个移动台,当它靠近如图示小区的右手边界时,它将经历最低的接收信号功率  $P$  和最高的来自区域 2 的干扰  $I$ 。既然是这样,那么移动台距离服务基站的距离为  $R_C$ ,而距离使用相同频率的最近干扰基站的距离为  $(2N_R - 1)R_C$ ,该基站位于图 1-1 中区域 2 中的小区 1 内。为了计算在小区半径处的  $P/I$  比,有必要理解在特定环境中,信号是如何传播的。

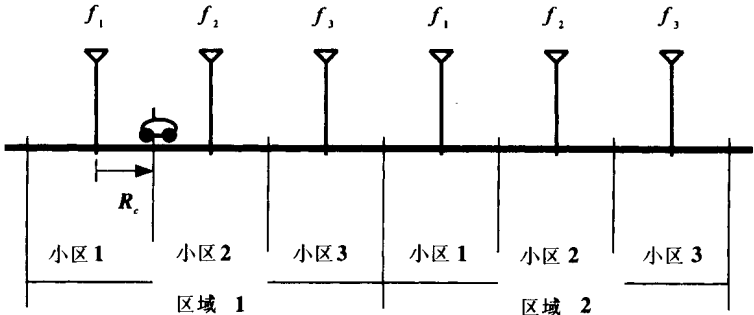


图 1-1 服务于一高速通路且在每频率空间再用中  
使用三个小区的一维蜂窝 FDMA 系统

正如在第 4 章中要讨论的,对自由空间中的传播,当辐射功率为  $P_T(W)$ ,离天线距离为  $R$  时,由天线接收的功率  $P = P_T A / R^n$ ,这里  $A$  是常数,  $n = 2$  是距离指数<sup>[6]</sup>。在第 4 章中我们也将看到对在平地面上方一低高度的基站天线,也有类似的表达式,但此时距离指数  $n = 4$ 。假定所有的基站辐射功率相等,且仅考虑来自距离为  $(2N_R - 1)R_C$  的最近共信道基站的干扰,则对用户接收功率的前述依赖关系给出了在小区边界处下行信号干扰比:

$$\frac{P}{I} = \frac{P_T A / R_C^n}{P_T A / [(2N_R - 1)R_C]^n} = (2N_R - 1)^n \tag{1-1}$$

如果  $N_R = 3$ ,如图 1-1 所示,则当对自由空间的距离指数  $n = 2$  时,(1-1)式给出  $P/I = 25$ ,它显得太小;而当对平地面上的距离指数  $n = 4$  时,  $P/I = 625$ ,它又比所需要的更大。为使信号干扰比接近 50,则要求在  $n = 2$  时,  $N_R = 4$ ,而在  $n = 4$  时,  $N_R = 2$ 。

(1-1)式的意义可以从一个简单的在有 6 个车道高速公路上的例子看出。如果汽车中心到汽车中心的距离为 10m,则每公里每车道上有 100 辆汽车,6 个车道上共有汽车 600 辆。如果每个车上有一个使用率为 2% 的蜂窝电话,则平均每公里同时有 12 个呼叫。如果一个 AMPS 系统的 200 信道专门用于覆盖这些小区,则从上面可以看出,对于  $n = 2$ ,  $N_R = 4$ ,每个小区将有 50 信道。如果这样的话,每个小区的直径为  $2R_C = 50/12 = 4.2\text{km}$ ,这也就是基站之间的距离。然而,如果  $n = 4$ ,则  $N_R = 2$ ,且每个小区有 100 个信道,基站之间的距离为  $8.4\text{km}$ 。从这个例子可以看出,如果忽略干扰效率因素的话,则为沿高速路上一定数目的用户提供服务所需

要的基站数量同  $N_R$  成正比。因此简单线性小区例子显示固定系统的设计强烈依赖于运行环境的传播特性。由于安装费用和不动产租费使得基站很贵,因此蜂窝系统的经济运作要求用最少数量的基站去实现一个可接受的服务水平。上面的分析是针对从基站到用户的下行链路而言的。一个同样的分析可应用于上行链路的信号干扰比,一个例外是每个移动台的发送功率由通信基站来控制,所以移动台并不发送全部相同的功率。

在实际城市环境中所遇到的传播特征在某些重要方面同上述介绍的简单依赖关系有很大差别。对高架基站,接收功率的距离依赖关系具有  $P = P_T A / R^n$  的形式,这里  $n$  典型地在 3 和 4 之间。对更高级系统的低架基站, $A$  和  $n$  依赖于相对于平行街区栅格的方向,且  $n$  能够比 4 大。除了距离依赖关系,发现信号在两个更小尺度长度上有明显的随机性变化,这两种变化分别叫作快衰落和阴影衰落。这种衰落的影响大大增加了(1-1)中的  $P/I$  值。对于工作在建筑群内的系统,传播也是不同的。在不同环境中观察到的信号变化将在第 2 章中讨论。

### 1.3 覆盖区域的六边形小区

上面描述的一维小区的想法已被利用来实现在一个城市区域的二维覆盖,其概念性形状是六边形。使用六边形代表小区形状是因为当传播在水平面上是各向异性的时候,六边形是能最大程度地覆盖铺排一平面的规则多边形,且因为它们能模拟在水平面上各向同性传播的相等接收信号强度的圆形轮廓。当六边形小区被广泛地用于理解和评价系统概念时,在实现系统规划中,地形和其他影响导致了非常不规则的小区形状,甚至对架高的基站天线也一样。同样,安装基站要受到实际问题中可寻找到且可接受场所的很大影响,因此可能是不规则的六边形栅格。

对每区域有  $N_R = 7$  六边形小区情况在图 1-2 中给出。任意两个小区之间的位移都能够用两个夹角为  $60^\circ$  的基本矢量  $\mathbf{v}_1$  和  $\mathbf{v}_2$  的线性组合来表示,如图 1-2 所示。如果小区半径  $R_C$  被定义成中心到六边形顶点之间的距离,则  $|\mathbf{v}_1| = |\mathbf{v}_2| = \sqrt{3} R_C$ 。由  $\mathbf{v}_1$  和  $\mathbf{v}_2$  定义的平行四边形同六边形具有相同的过渡周期,因此两者有相同的面积。六边形的面积为  $|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2| = 3R_C^2 \sin 60^\circ$ 。

频率再用区域能够由任意整数个  $N_R$  邻接的小区组成,且在定义了该再用区域的形状后,所有其他的区域均可通过频率再用矢量  $\mathbf{U}_1$  和  $\mathbf{U}_2$  的一线性组合把已定义了的区域平移获得<sup>[7]</sup>,如图 1-2 中标明的。任何两个使用相同频率的小区之间的位移也可用这两个矢量的线性组合来表示。由于区域和由  $\mathbf{U}_1$  和  $\mathbf{U}_2$  定义的平行四边形有相同的过渡周期,因此区域面积由  $|\mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2|$  得出。这个面积也等于单个小区面积的  $N_R$  倍。位移矢量可以用基线矢量表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= k_1 \mathbf{v}_1 + m_1 \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{U}_2 &= k_2 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 \end{aligned} \quad (1-2)$$

这里常数  $k_{1,2}$  和  $m_{1,2}$  是整数。利用这些常数,由一个区域覆盖的面积为:

$$|\mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2| = |k_1 m_2 - k_2 m_1| |\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2| \quad (1-3)$$

由于  $|\mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2|$  等于  $N_R$  乘以小区面积  $|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2|$ , 所以:

$$N_R = |k_1 m_2 - k_2 m_1| \quad (1-4)$$

#### 1.3.1 对称再用图样

通过给定任何整数  $N_R$  值,对不同的整数  $k_{1,2}$  和  $m_{1,2}$  选择,区域可以有各种不同的形状。

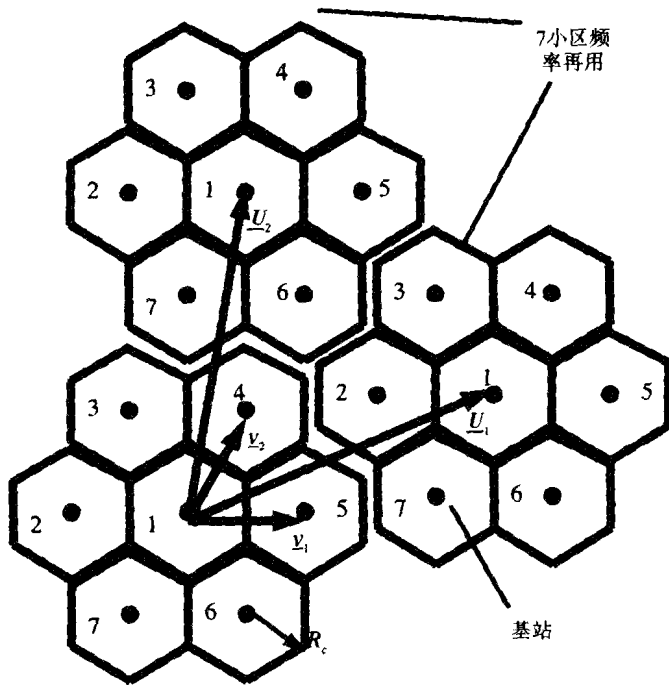


图 1-2 用来覆盖具有  $N_R = 7$  的对称区域地面的六边形小区

$k_{1,2}$ 和  $m_{1,2}$ 的不同选择导致区域具有不同的形状,但它们均具有相同的  $N_R$ 。对于  $k_{1,2}$ 和  $m_{1,2}$ 的某些选择,再用矢量  $U_1$  和  $U_2$  将具有相等的幅值和  $60^\circ$ 的角度,如图 1-2 所示。这种选择导致使用相同频率的共用信道小区相对任何参考小区均排列成一对称的圆环。从参考小区圆环上的共用信道小区的中心到中心距离都全部相等。在第一个环上,如图 1-3 所示有六个共用信道小区,它们距参考小区的距离是  $D = |U_{1,2}|$ 。具有相同  $N_R$  值的非对称布置使某些共用信道小区较对称区域形状的  $D$  值更接近参考小区,这会引起更大的干扰值。

对于对称再用图样,只有一些再用因子  $N_R$  是可能的。为找到这些值,通过要求  $U_1$  和  $U_2$  有相同幅值并把  $U_1$  反向旋转  $60^\circ$ 后,就可用  $k_1$  和  $m_1$  来表示  $k_2$  和  $m_2$  系数。注意到  $v_2$  是从  $v_1$  逆转  $60^\circ$ 得到的,且矢量  $v_2 - v_1$  同矢量  $v_2$ ,  $v_1$  具有相同幅值,并相对  $v_2$  逆时针旋转了  $60^\circ$ 后就可满足。可以发现旋转矢量  $U_2$  能用在(1-2)式  $U_1$  中相同系数表示的旋转基准矢量,即

$$U_1 = k_1 v_2 + m_1 (v_2 - v_1) = -m_1 v_1 + (m_1 + k_1) v_2 \quad (1-5)$$

比较(1-2)和(1-5)可以看出  $m_2 = m_1$  和  $k_2 = m_1 + k_1$ ,因此很容易验证  $|U_1| = |U_2|$ ,且它们之间的夹角为  $60^\circ$ 。把  $m_2$  和  $k_2$  的关系代入到(1-4)中可得。

$$N_R = m_1^2 + m_1 k_1 + k_1^2 \quad (1-6)$$

把  $m_1, k_1$  的整数值代入(1-6)中就可得出一个  $N_R$  值,使得这  $N_R$  个共用信道小区对称地分布在任何有关参考小区的圆上。这些  $N_R$  值分别为 1、3、4、7、9、12、13 等。

### 1.3.2 对称再用图样的干扰

当(1-6)式把  $N_R$  同再用图样联系起来的时候,另一个方程对研究对称图样的  $N_R$  和信扰

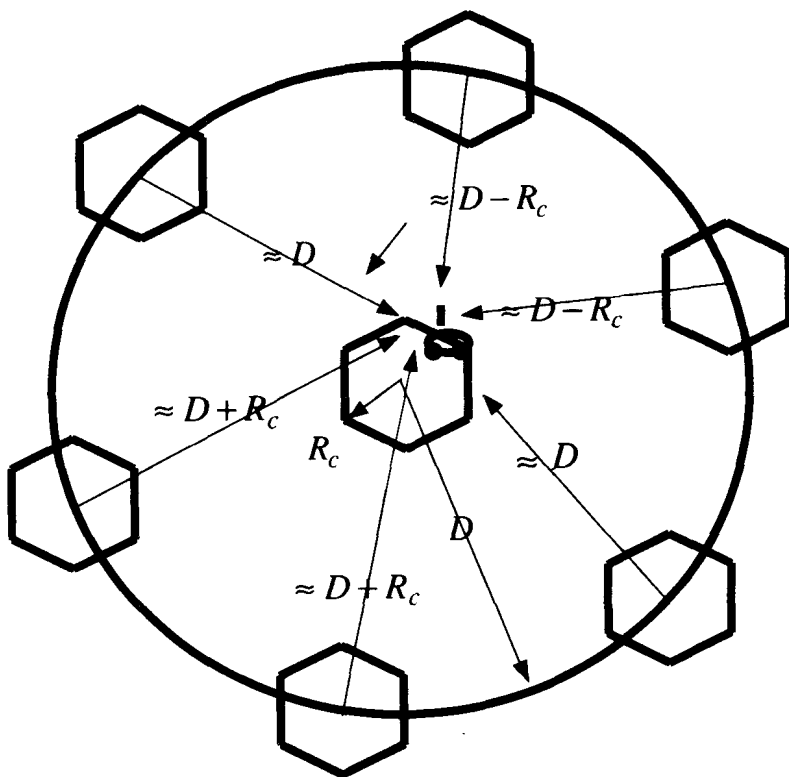


图 1-3 从位于服务基站的第一圆环的干扰 FDMA 基站到小区边界上移动台之间的距离

比关系更为有用。正如前面注意到的,区域面积可通过  $|U_1 \times U_2| = D^2 \sin 60^\circ$  来用  $D$  表示,而小区面积则为  $|v_1 \times v_2| = 3(R_c)^2 \sin 60^\circ$ 。由于区域面积是小区面积的  $N_R$  倍,所以

$$N_R = \frac{|U_1 \times U_2|}{|v_1 \times v_2|} = \frac{1}{3} \left( \frac{D}{R_c} \right)^2 \quad (1-7)$$

为了估算来自共用信道小区下行链路干扰,考虑在如图 1-3 中所示的小区半径上的一个移动台,且为简单起见假定从控制基站接收的信号是  $P = P_{TA} / R_c^n$ 。到两个最近共用信道基站的距离大约为  $D - R_c$ ,因此来自这两个基站的干扰信号是  $I = 2P_{TA} / (D - R_c)^n$ 。因此对模拟 FM 要求的  $P/I$  变成

$$50 \leq \frac{P}{I} = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{R_c} - 1 \right)^n \quad (1-8)$$

或相反地

$$\frac{D}{R_c} \geq 1 + \sqrt[n]{100} \quad (1-9)$$

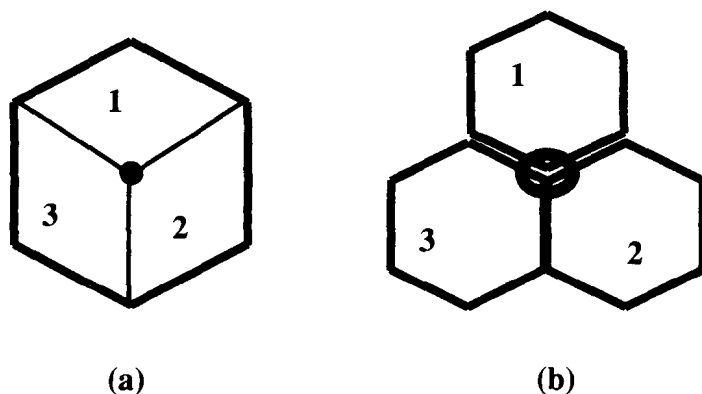
对自由空间传播,距离指数  $n = 2$ ,所以从(1-9)我们可以看出  $D/R_c = 11$ 。当把该不等式代入到(1-7)中时,可得  $N_R = 40.3$ ,它满足  $k_1 = 6$  且  $m_1 = 1$  的对称区域,从(1-6)可得  $N_R = 43$ 。考虑在第一个圆环上的其他共用基站将要求甚至更高的  $N_R$  值。作为比较,对平地传播,  $n = 4$ ,所以从(1-9)得出  $D/R_c = 4.2$ 。把它代入(1-7)中,要求  $N_R = 5.9$ ,它能被  $N_R = 7$  的对称图样很好地满足。这个结果的意义是为对某一频率再用区域提供适当服务,要求在  $n$



$n=2$ 时至少有 43 个基站;而如果  $n=4$ ,则仅需要 7 个基站(假定传播具有  $P = R_T A / R_C^n$  的形式,且只考虑二级干扰)。由于 AMPS 系统有大约 400 个信道,则对  $n=2$ ,每个基站应该处理 10 个呼叫;而对  $n=4$ ,则每个基站应处理将近 60 个呼叫,节省了大量的基础设施投资。当考虑远程通信量的统计特征时,对  $n=4$  可以节省得更多<sup>[2]</sup>。

## 1.4 扇形化小区

前面例子显示出传播特征对一个干扰受限系统是非常重要的。对覆盖大的小区高架基站天线,距离依赖关系具有  $P = P_T A / R_C^n$  形式,通常  $n$  比 4 稍小一些,关于这一点存在另外具有随机属性的变化。考虑实际距离指数  $n$  和另外的变化,  $N_R = 7$  的再用因子并不能用来胜任限制来自所有共用信道基站的干扰,以保证 AMPS 系统有一很好的性能。例如,如果基站信号的功率  $P$  由于衰落减少了 10dB,则  $P/I$  将比(1-8)所得值小 10 倍。注意,如果  $n=4$ ,且  $D/R_C = 4.6$ ,则从(1-7)可以发现对于  $N_R = 7$ ,不考虑衰落时从(1-8)求得的  $P/I$  是 82.1,但考虑衰落时,只有 8.21。



(a) 使用 120°定向天线以辐照小区的传统方法 (b) 单个基站服务三个小区的  $N_R = 21$  样图

图 1-4 在基站的方向性天线被用来提高信/扰比

为了在不增加基站的情况下提高  $P/I$  比,通过在基站上使用在覆盖区内各向异性的方向性天线来修改蜂窝概念。典型地,天线波束宽度为 120°的三个天线被用来把每一个  $N_R = 7$  样中的六边形分成三个扇形,如图 1-4(a)所示。扇区化具有减少产生干扰基站数量和增加在小区顶点边界上移动台到最近干扰基站距离的效果,但须把实际再用图标的数量增加到  $N_R = 21$  作为代价。另外,可以考虑把小区组织成  $N_R = 21$  的对称再用图样,但基站位于小区的顶点上,而不是小区的中央。这样一种方式在图 4-1(b)中表明。从中可以看到每个基站服务于三个小区,这样的小区可以通过波束宽度为 60°的天线来实现。由于这种方式的天线波束宽度比图 1-4(a)中扇区化的天线波束宽度小,这使得来自使用相同频率的其他基站的干扰更低<sup>[8]</sup>。

## 1.5 CDMA 的空间再用

理解传播特性是怎样影响 CDMA 系统设计,最简单的方法是考虑从基站到移动台的下行