

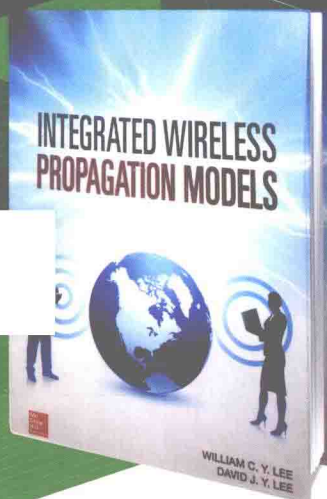
信息与通信技术

Integrated Wireless Propagation Models

综合无线传播模型

Integrated Wireless Propagation Models

【美】 William C. Y. Lee 著
David J. Y. Lee 译
刘青格 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·通信与信息技术

综合无线传播模型

Integrated Wireless Propagation Models

[美] William C. Y. Lee
David J. Y. Lee

刘青格



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书引据经典与展现前沿相结合,全面阐述了无线通信的传播预测模型,并涉及不同媒介传播及毫米波通信等前沿技术。全书共分6章,理论分析与实践数据相融合,对无线通信系统的Lee宏蜂窝、微蜂窝、室内蜂窝预测模型及其集成进行了详细论述和分析比较,为无线网络的设计和管理提供了综合解决方案。

全书图文丰富、语言流畅,非常适合无线通信领域的工程技术人员及前沿技术研发工作者阅读。

William C. Y. Lee, David J. Y. Lee: Integrated Wireless Propagation Models

0-07-183751-5

Copyright © 2015 by McGraw-Hill Education. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in China Mainland.

Copyright ©2015 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权©2015 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2015-6103

图书在版编目(CIP)数据

综合无线传播模型 / (美)李建业, (美)李兆洋著; 刘青格译. —北京: 电子工业出版社, 2015.10

书名原文: Integrated Wireless Propagation Models

ISBN 978-7-121-27289-9

I. ①综… II. ①李… ②李… ③刘… III. ①无线电通信—电波传播—建立模型 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第227687号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 竺南直

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.5 字数: 524千字

版 次: 2015年10月第1版

印 次: 2015年10月第1次印刷

定 价: 68.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

译者序

无线通信已成为全球通信和 IT 界共同关注的热门技术。随着第四代移动通信服务走向成熟，无线通信经历了最初的第一代模拟通信网络、第二代数字蜂窝通信和第三代移动通信，并已进入第五代及 LTE 移动通信的发展，在社会各个领域得到越来越广泛的应用。

由 William C. Y. Lee 和 David J. Y. Lee 所著的《综合无线传播模型》，全面系统地展现了无线通信网络的根本——传播预测模型，是著者 William C. Y. Lee（无线通信网络的前驱者之一）在贝尔实验室及后来移动通信领域几十年工作的总结和升华，堪称无线通信基础及应用的一部经典力作。

本书理论分析和实践数据相融合，不仅系统地介绍了无线移动通信的基本概念和理论，而且重点结合实际数据，给出了 Lee 宏蜂窝模型、微蜂窝模型和室内模型的推导和产生过程，以及最后提升的 Lee 综合模型，由浅入深、循序渐进，并与其他类似模型进行比较，从理论模型、经验模型和统计模型三个纬度呈现了无线传播预测模型的一个概观，完成了将理论数学公式转化为实际可用解决方案的过程，为无线网络的设计和管理，包括覆盖范围、容量和成本等，提供了全面解决方案。

本书引据经典与前沿展现相结合，在纵向提炼和横向比较经典无线传播预测模型的同时，阐述了卫星通信、水下通信、空中通信和毫米波等不同传播媒介的预测模型研究动态，使得本书内容更加丰富和完整。

本书承载过去，支撑未来，为无线通信研发工作者及工程人员提供经典、深刻、全面、实用的传播预测模型，助力未来无线移动通信的不断发展。

需要说明的是，由于书中一些新的专业词汇，国内尚无统一标准译法，只好按实际含义较准确地译出。每章后面均提供大量的参考文献，以期帮助读者。此外，译者对原书中的错漏做了更正，并与著者进行了沟通。

本书由北京航空航天大学刘青格博士翻译。在翻译过程中得到了原著作者 William C. Y. Lee 博士和我的恩师张其善教授的大力支持。由于全书篇幅较大，内容深刻，加之译者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

刘青格

2015 年 8 月于北京航空航天大学

前言

自 1977 年我在贝尔实验室提出宏蜂窝预测模型以来，许多人士想要知道该模型的具体细节。AT&T（美国电话电报公司）曾一度将其作为自己的资产而不予公开。后来，1988 年我研发出了微蜂窝模型。这两个模型在我以前的专著里均有所描述，但由于当时其知识产权尚属 Pactel 所有，不便完全公开。1991 年，我在 Pactel 公司（该公司于 1994 年更名为 Airtouch）任职，David Lee 为我工作，他在 Pactel 市场的不同国家进行了许多测量，以实施蜂窝系统。同时，这两个模型作为系统开发工具的优点也在那些国家得以体现。自 1995 年开始，我们两人一起应用大量实践数据研究室内蜂窝模型（又称皮蜂窝模型）。2008 年，David 问我是否愿意写一本关于以我名字命名的新模型（Lee 模型）的书，他愿意做好所有准备工作。在 David 收集所有必需材料的努力工作下，才有了本书的诞生。

第 1 章介绍所有术语，并描述了移动通信环境的自然现象。第 2 章介绍他人提出的宏蜂窝模型。这些模型是工业界广泛采用的区域-区域模型。第 3 章介绍宏蜂窝模型中的点-点预测模型，共有两个模型，Lee 模型适用于短距离（<10 英里），而 Longly-Rice 模型适用于长距离（>10 英里）。第 4 章介绍微蜂窝模型。Lee 微蜂窝模型出现在本章的第一部分。用于推导微蜂窝预测模型的近场距离基于本人以前发表文章中的方程予以清晰定义。采用了大量来自国内市场和国外市场的不同区域的实践数据来验证 Lee 模型。

第 5 章介绍 Lee 室内模型，包括皮蜂窝模型和毫微微蜂窝模型，推导室内环境近场距离的新定义。许多以前 David 和我发表的文章中描述的 Lee 室内模型在本书中进行了修正，例如 5.3.3 节所述的“同楼层”情形和“楼层间”情形。第 6 章阐述三个 Lee 模型的综合。David 制作了一个软件工具，能够实现同时涵盖三个不同 Lee 模型的预测信号强度图制作。

为帮助读者理解 Lee 模型，本书包含了许多其他预测模型，同时呈现了三个 Lee 模型——宏蜂窝、微蜂窝和室内（皮蜂窝）模型的综合，可用于未来某特定区域整个蜂窝系统的规划。用户应明白，一个合格的预测模型只有在其预测误差标准偏差必须在 $\pm 8\text{dB}$ 之内。对于小蜂窝，预测误差应为 $\pm 5\text{dB}$ 。

测量大范围的信号强度成本很高。因此，可将区域-区域模型产生的特定区域的许多预测曲线图求平均而完成。每一张图代表一个特定的环境。接着，Lee 模型推导了点-点模型，应用地形图和有效天线高度微调信号强度。当蜂窝尺寸较大时，点-点预测模型非常有效。当蜂窝变小时，测量小范围内的信号强度则相当容易且测量成本低，我们可以采集特定有限区域内的更多实践数据。因此，基于实践数据的预测模型更加准确。

Lee 模型是如何提出的？1976 年，贝尔实验室的工程师们正在讨论在没有进行大量测量的区域如何建设蜂窝系统。接着我写了一份有关我的点-点预测的内部备忘录，该预测基于 Okumura 等 1968 年的经典文章，这是提供区域-区域模型基础工作的第一篇文章。在当时，我需要向贝尔实验室的工程师们证明该工具的可用性。最初，1976 年，我请求来自三州电话公司（由纽约贝尔、新泽西贝尔和康涅狄格贝尔三公司组成）的工程师们组成团队帮助我，因为他们能够为我提供其各自所在地域的基础测量数据。而且，他们拥有足够的资源来绘制我所需要的

粗略地形图。首先，我采用美国国防地图办事处（US Defense Map Agent）印制的 50 000：1 比例的商业地形地图。每一张地图约代表 5 英里×8 英里（8 千米×13 千米）。轮廓线步长为 20 英尺。为使在地图上制作沿移动路径的地形曲线变得容易，我们制作了格图。每格约 1/2 平方千米。每一张图含有 18×24 格。三州的工程师应用每一格内地形高度的眼球均值作为该格的代表数值。每一张图有 432（18×24）个数值，每格一值。这是一项冗长的工作。制作了格图之后，我们开始选择三个州区域内的路线进行测量以便获得基础数据。每一特定地图上的规划路线是通过连接测量信号强度的路线所经过的格子而制成的。依据眼球平均高度制定了路线的沿途高度。一旦已知发射端天线的安装位置、高度、功率和增益，以及移动端天线的高度和增益，三州的工程师们便能将这些基础信息传递给我。正是我依据地形轮廓图上相应格子的眼球值通过手工计算来制作了沿移动路径的预测信号强度曲线并在测量之前发给三州工程师们。第二天，三州工程师们将特定规划路线的测量数据与我的预测值进行比较。我从未外出参与测量。因此，测量与预测是完全独立的过程。

该进程经历了一年多，总体上预测值与测量值吻合的非常好。这不但表明我的预测工具较好，同时表明眼球均值高度方法也很好。在三州不同区域进行了一年多的手工计算来预测信号强度，我工作起来就像台计算机。这完全仗着当时我年轻，能量大，也不怕同事们取笑。

最后，1978 年贝尔实验室决定采用我的工具。眼球平均方法表明粗糙格轮廓地图足够了。接着，从国防部地图办事处地形中心（Defense Map Agency Topographical Center, DMATC）购买了 1°×1°的比例为 250 000：1 的磁带。研发了一套软件工具应用这 1°×1°的磁带输入地形数据，采用我的预测工具完成系统规划。软件称为 ACE，后来重命名为 ADMS。自 1983 年开始，AT&T 公司以及后来的贝尔子公司的工程师们进行了这个工具的使用培训，服务于他们的蜂窝市场。1979 年 10 月 30 日，贝尔实验室的专利律师 C. S. Phelan 先生写了封信给我（印于《无线通信的 Lee 要义》第 20 页[McGraw-Hill, 2001]），感谢我的贝尔实验室内部备忘录的贡献，即我写的“一个新移动无线传播模型”，案例 39445-7，1979 年 3 月 30 日。地形数据地图与有效天线高度增益相结合来预测已知点的信号强度是我的点-点预测模型的创作。贝尔实验室不愿授权这个模型而是将其作为内部应用。

1980 年，Hata 写了一篇有关其区域-区域模型的文章，我是该文章的审阅人之一。同时，我也是接收该文章的期刊“*IEEE Transactions on Vehicular Technology*”的副编辑。后来，Hata 模型被国际无线电咨询委员会（CCIR）采用。我很高兴它变为了一个国际知名模型。读者可能不知道，我已在该领域工作了 50 年。如果您对该领域的过去感兴趣，我有很多好故事讲给您听。

这是 McGraw-Hill 出版社出版的我的第四本书。希望本书能够为读者在将来 4G 或 5G 系统中进一步应用预测模型提供清晰的指导。

William C. Y. Lee

致 谢

在本书的准备中，我们参阅了与 Lee 模型有关的诸多模型。因篇幅限制，不能包含所有模型于书中，特此表示歉意。特别感谢许多学者在书的准备过程中给予的友好建议——北京大学的蕉秉立教授；南安普敦大学的 Lajos Hnazo 教授；西南交通大学的范平志教授；新竹交通大学的林一平教授；以色列 Netvision 公司的 Joseph Shapira 博士；俄克拉何马州大学的 J. R. Cruz 教授。

同时感谢 Sherman Yang 先生对手稿的校对帮助。McGraw-Hill 出版社的高级出版人 Steve Chapman 先生和高级编辑 Michael McCabe 先生，以及 Cengage 出版服务的项目经理 Raghavi Khullar 女士和 Kritika Kaushik 女士，帮助我们出版了本书。若没有他们的鼓励和耐心，这本书则未能出版。

最后，感谢我们的妻子给予我们写作和完成本书的时间。同时，这本书也许能够激励我们的子孙：

Bill 的两个外孙，Alex 和 Sophia

David 的儿子，Richard

在将来的事业中遵循我们的脚步。

我们衷心感激北京航空航天大学刘青格博士能在公余的时间翻译此书，以飨国内读者，特在此申谢。

William C. Y. Lee

David J. Y. Lee

目 录

第 1 章 无线通信移动信号建模导论	1
1.1 为什么写这本书?	1
1.2 自由空间通信和移动通信的传播区别	1
1.3 移动信号处理	1
1.4 Lee 模型发展历史	2
1.5 基本系统运行	3
1.6 移动射频信号: 衰落信号	3
1.6.1 移动信号接收环境	3
1.6.2 信号衰落类型	4
1.6.3 衰落信号特性	4
1.6.4 平坦衰落	8
1.6.5 时延扩展引起的信号衰落——频率选择性衰落	9
1.6.6 多普勒扩展引起的信号衰落	10
1.6.7 短期衰落信号和长期衰落信号	10
1.7 频率复用引起的共道干扰	11
1.7.1 基本概念	11
1.7.2 仿真模型	13
1.7.3 仿真结果	14
1.8 传播衰落模型	17
1.8.1 瑞利衰落模型——短期衰落模型	17
1.8.2 对数衰落模型——长期衰落模型	18
1.8.3 无偏均值噪声估计	19
1.8.4 莱斯分布	21
1.9 三种基本传播机制	22
1.9.1 反射	22
1.9.2 衍射	26
1.9.3 散射	33
1.10 预测模型的应用	33
1.10.1 预测模型分类	33
1.10.2 不同大小区域的传播预测模型	34
1.10.3 一般环境下信号强度预测的考虑因素	34
1.10.4 预测干扰信号	36
1.11 总结	36

参考文献	36
附加文献	39
第 2 章 宏蜂窝预测模型 I: 区域-区域模型	40
2.1 自由空间损耗	40
2.2 平面地球模型	40
2.3 Young 模型	41
2.4 布林顿 (Bullington) 组合	43
2.4.1 衰落、对流层传输折射和衍射	44
2.4.2 建筑和树木效应	44
2.5 Egli 模型——杂波因子模型之一	46
2.6 JRC 方法	47
2.7 整合地形的粗地球模型 (TIREM)	48
2.7.1 TIREM 简介	48
2.7.2 陆地传播公式总结	49
2.8 Carey 模型	51
2.9 CCIR 模型	51
2.9.1 模型描述	51
2.10 Blomquist-Ladell 模型和 Edwards-Durkin 模型	53
2.11 Ibrahim-Parsons 模型	55
2.11.1 经验公式的发现	55
2.11.2 两个建议模型	57
2.12 Okumara-Hata 模型和 COST 231 Hata 模型	59
2.12.1 Okumura 方法	59
2.12.2 COST 231 Hata 模型	63
2.13 Walfisch-Bertoni 模型	64
2.14 Ikegami 模型	65
2.15 Walfisch-Ikegami 模型	66
2.16 平坦边缘模型	69
2.17 ITU 模型	70
2.17.1 ITU-R 提案 P.1546	71
2.17.2 ITU-R 提案 P.530-9	73
2.18 身体模型	74
2.18.1 模型 1	74
2.18.2 模型 2	74
2.19 总结	75
参考文献	75
第 3 章 宏蜂窝预测模型 II: 点-点模型	78
3.1 Lee 模型	78

3.1.1	Lee 宏蜂窝模型	78
3.1.2	Lee 单断点模型——点-点模型	79
3.1.3	Lee 模型变形	91
3.1.4	地形高度对信号强度预测的影响	93
3.1.5	地表形态对信号强度预测的影响	96
3.1.6	水增强	103
3.1.7	天线方向效应	108
3.1.8	预测数据文件	121
3.2	微调 Lee 模型	122
3.2.1	地形规范化方法	123
3.2.2	测量数据特性	124
3.2.3	无阻挡情形下测量曲线和预测曲线比较	125
3.2.4	阻挡路径的测量曲线与预测曲线比较	127
3.2.5	结论	132
3.3	改进 Lee 宏蜂窝预测模型	132
3.3.1	简介	132
3.3.2	算法	132
3.3.3	测量数据与预测数据	134
3.3.4	结论	137
3.4	Longley-Rice 模型	137
3.4.1	点-点模型预测	137
3.4.2	区域模型预测	137
3.5	总结	140
3.5.1	模型实施方法	141
3.5.2	模型特征	142
	参考文献	143
第 4 章	微蜂窝预测模型	146
4.1	简介	146
4.2	基本 Lee 微蜂窝预测模型	147
4.2.1	基本原理和算法	147
4.2.2	微蜂窝预测的输入数据	156
4.2.3	建筑对微蜂窝预测的影响	160
4.2.4	地形效应	162
4.2.5	四种情形的预测模型	165
4.2.6	测量数据的特性	166
4.2.7	模型有效性: 测量与预测	168
4.2.8	整合其他属性于模型	173
4.3	微蜂窝预测模型和宏蜂窝预测模型的整合	175

4.3.1	两个模型的整合算法	175
4.3.2	测量数据处理	177
4.3.3	模型有效性: 测量与预测	180
4.4	特定区域的模型调整	183
4.4.1	调整之前的 Lee 微蜂窝模型	183
4.4.2	Lee 模型的调整算法	183
4.4.3	Lee 模型验证	185
4.5	其他微蜂窝预测模型	186
4.5.1	简介	186
4.5.2	经验(路径损耗)模型	187
4.5.3	物理模型	190
4.5.4	非视距(NLOS)模型	192
4.5.5	ITU-R P.1411 模型	194
4.6	总结	199
	参考文献	200
第 5 章	室内(皮蜂窝)预测模型	203
5.1	简介	203
5.1.1	与其他模型的区别	203
5.1.2	室内射频系统的传播损伤和质量测量	203
5.1.3	Lee 室内模型的闪光点	204
5.2	Lee 室内预测模型	204
5.2.1	室内模型近中心距离的推导	204
5.2.2	单楼层(同一楼层)模型	209
5.2.3	确定室内路径损耗斜率	214
5.2.4	Lee 模型的应用	214
5.2.5	测量数据的特征	214
5.2.6	模型验证(测量与预测)	216
5.2.7	覆盖与干扰之间的平衡	217
5.2.8	分析 Lee 室内预测模型	218
5.3	增强 Lee 室内模型	226
5.3.1	增强 Lee 模型的闪光点	226
5.3.2	研究不同情形的测量数据	226
5.3.3	测量数据与预测数据的比较	236
5.3.4	应用测量数据优化 Lee 模型	242
5.3.5	增强 Lee 室内模型的通用公式	247
5.4	路径损耗经验模型	249
5.4.1	Keenan-Motley 模型与 Lee 模型的比较	250
5.4.2	爱立信断点模型	252

5.5	ITU 模型	253
5.5.1	COST 231 多墙模型	253
5.5.2	ITU-R 1238 模型	254
5.6	物理模型——应用衍射几何理论 (GTD)	255
5.6.1	室内射线跟踪模型 (皮蜂窝)	255
5.6.2	FDTD	257
5.7	总结	260
	参考文献	261
第 6 章	Lee 复合模型——三个模型的综合	266
6.1	引言	266
6.2	综合三个 Lee 模型	266
6.2.1	验证宏蜂窝模型	267
6.2.2	验证微蜂窝模型	268
6.2.3	验证建筑物内模型 (皮蜂窝模型)	269
6.3	采用不同预测模型的系统设计	269
6.3.1	系统设计准备	269
6.3.2	设计参数和输入数据	269
6.3.3	系统覆盖	270
6.3.4	CDMA 覆盖	272
6.3.5	采用新技术的特殊区域系统设计	274
6.4	Lee 综合模型的用户菜单	284
6.4.1	Lee 综合模型的整体系统设计流程图	284
6.4.2	室内蜂窝——Lee 室内模型的点-点分析	286
6.4.3	微蜂窝——Lee 微蜂窝模型的点-点分析	289
6.4.4	宏蜂窝——Lee 宏蜂窝模型的点-点分析	291
6.5	如何应用预测工具	294
6.5.1	无线通信链路——信道	294
6.5.2	噪声、损耗和增益的类型	294
6.5.3	接收信号功率与噪声功率	295
6.5.4	计算链路预算所需的信息	296
6.5.5	链路预算分析	297
6.6	如何规划和设计好的无线系统	298
6.6.1	理解系统需求	299
6.6.2	选择正确预测模型	299
6.7	不同传输媒介的传播预测	300
6.7.1	卫星通信信号预测	300
6.7.2	水下通信信号预测	303
6.7.3	航空通信信号预测	304

6.7.4 动车通信信号预测 307

6.7.5 毫米波信号 308

6.8 总结 308

参考文献 309

第1章 无线通信移动信号建模导论

1.1 为什么写这本书？

大约 50 年前，移动通信研究诞生于贝尔实验室^[1]。当时的主要任务集中于理解移动信号沿传输路径传播的自然现象，这类似于医疗领域的疾病诊断过程。接着是治疗过程。如果诊断正确，那么疾病的治疗通常将会更有效。因此，本书汇总了建模自然现象的所有诊断方法，将曾经在诊断信号传播过程中应用的所有工具作一个全面介绍，这样便可根据这些基于自然现象的诸多模型预测信号强度。

1.2 自由空间通信和移动通信的传播区别

移动信号产生如下 3 个主要现象^[2]。

(1) 由于移动单元经常被人造物和建筑物所包围，或位于建筑物内部，传输信号的反射产生许多多径波，导致不同地点的合成信号强度不同；而且，反射信号不同时到达移动单元。因此，第一个波形与最后一个波形之间的时间延迟造成了接收数字符号的失真。这一现象在数据传输中称为符号间干扰（ISI, InterSymbol Interference）。

(2) 因为移动单元沿行进路线从一个位置移动到另一个位置，移动单元在不同地点接收到的来自同一无线路径的信号强度不同。信号强度沿无线路径的变化，称为短期衰落。衰落速率可快可慢，取决于移动端速度。同样由于移动端速度，信号载频频率发生偏移。频率或增加或降低，取决于移动端方向是趋近还是远离基站传输天线。这称为多普勒频移。

(3) 由于移动单元常在地面移动，地面轮廓影响移动单元接收到的信号，使得平均信号强度变强或变弱。研究发现，平均信号强度遵循对数正态分布，称为长期衰落。信号沿传输路径显现出高于或低于信号均值。此外，由于移动环境对信号接收的影响，信号传播经历显著的路径损耗。自由空间传输损耗可达 20dB/dec，而移动环境的传输损耗可达 40dB/dec。

1.3 移动信号处理

移动信号处理主要包括：

(1) 为处理多径（短期）衰落信号，采用分集技术以减少衰落，包括空间分集、极化分集、角度分集、场分量分集等^[3]。有时，扩频中的跳频或 CDMA 也能够减少衰落^[4]。

(2) 为处理对数（长期）衰落，首先基于不同的自然环境^[4,5]建立信号接收模型。基于蜂窝大小，共有三类流行模型：宏蜂窝、微蜂窝和室内（皮蜂窝）。在每一模型环境中，将面对不同的人造建筑，诸如大城市、郊区、农村区域及开阔地区。具有不同的地形，例如水面、

大雾、高山等。一旦能够建模那些特定环境,信号强度便容易预测。其次,在实施移动系统的区域,通过利用预测模型的输出结果巧妙地设置系统设备,可实现该区域希望的信号覆盖。

(3) 一旦理解了某区域的信号覆盖,可采取很多技术来提升信号的接收。一个很有前途的技术是多输入多输出(MIMO)^[6]。这一提升信号接收或提高频谱利用率的技术没有涵盖在本书中。不过,第2.18节将身体模型用于了MIMO系统。

1.4 Lee 模型发展历史

1974年,模拟系统AMTS(Advanced Mobile Telephone Service)的第一个设计阶段已经完成^[8]。贝尔实验室开始寻求现场实施AMTS系统的方法。当时,每一个蜂窝站点的费用超过1百万美元。对于给定开发区域,需要多少蜂窝站点^①才能实现足够的信号强度覆盖?为回答这个问题,发展了Lee模型。当时,所有的传播模型都是区域-区域模型。发展给定区域内沿任意移动路径信号强度预测的点-点模型是一项挑战。Lee模型便是为点-点预测而提出的。在决定是否接受Lee模型之前,需要证实其准确性。贝尔实验室最初建议采用50 000:1比例印制的国防地图引擎(DMA, Defense Map Agent)绘制地形地图。每一地图尺寸约5×8平方英里,等高线以20英尺增加。地图购买于新泽西州莫里森镇(Morristown)的当地地图商店。验证项目由贝尔实验室和三州梯队(纽约贝尔、新泽西贝尔和新英格兰贝尔)联合进行。首先,为了从5×8平方英里的地形图上得到高度格图,地图被划分为18×24格,每一格约1/2平方千米。因为每一格会有几条地形等高线经过,提出采用每一格中高度地形等高线的眼球均值表示该格的高度,这样便产生了高度格地图。项目组成员负责提供其选择的地理区域的高度格图以及在相应区域的测量数据。贝尔实验室将团队成员提供的高度格图应用于Lee模型,得到地图上任意特定街道的信号强度预测值。将预测结果与测量结果进行比较,结果显示测量值与预测值之间的较好匹配。同时表明,眼球均值适用于Lee模型预测。然而,为获得格图的眼球均值处理过程以及Lee模型的手工计算劳动强度都很大。另一途径是购买地形中心国防地图引擎(DMATC, Defense Map Agency Topographic Center)的1°×1°地图磁带。其共有1200×1200数据栅格,每栅格尺寸为3 arc-second×3 arc-second。每栅格的高度值存储在250 000:1数字地图的磁带中。贝尔实验室取每格周围30格(5×6格)的30个高度值的平均值作为该栅格的平均高度。将每栅格的平均高度值与该格的眼球均值相比较,结果表明差别很小。因此,可以采用来自DMA 1°×1°地图磁带的平均高度,从而减少了劳动强度。贝尔实验室编程实现了Lee模型并将DMA磁带信息存入计算机。1978年,采用计算机计算的Lee模型实现被命名为高级覆盖估计(ACE, Advanced Coverage Estimate)。高级覆盖估计(ACE)后来转变为移动系统区域开发(ADMS, Area Deployment of Mobile System)。1983年所有的贝尔子公司开发的蜂窝系统均采用了ADMS工具。Lee模型^[9]在Pactel和AirTouch经历了多次修正。名为Phoenix的预测工具便是基于Lee模型开发的,应用在Pactel的所有市场以及后来的AirTouch市场,包括民用和国际应用,例如德国、英国、意大利、葡萄牙、罗马尼亚、西班牙、朝鲜和日本等。Lee的专著^[2,4,5]中简要描述了Lee模型。1985年,爱立信早期内部预测模型的某些部分也采用了Lee模型。

① 术语“蜂窝站点”由贝尔实验室F.H.Blecher命名,是指具有系统控制特性的基站。

许多商用预测工具也应用 Lee 模型^[9-13]。2008 年, 联邦通信委员会 (FCC) 和国际电们联盟 (ITU) 十分关注 Lee 模型^[14,15]。该模型没有专利授权, 因此可以在本书中记载。

1.5 基本系统运行

无线通信系统中, 天线用来辐射和接收电磁能量。天线扮演着系统与自由空间之间的变换器角色, 称为空中接口。虽然全面理解天线这一主题超出了本书的范围, 但了解天线如何工作以及如何影响移动信号强度是有帮助的。对于许多类型的天线, 可通过天线的物理大小 (尺寸和形状) 或天线波束宽度来估计天线增益。

当移动单元沿街道行进时, 可预测接收到的移动信号。本书正是讨论各不同区域内信号强度均值的预测工具, 如城市、郊区和农村环境下, 以及沿射频路径的不同特征环境, 包括地形、建筑群、树叶多少以及水面等。某些因素要比其他因素重要。信号预测只是统计估计, 因为当移动单元在小范围内移动时, 测量值围绕预测均值变化。

移动信号为衰落信号。可将衰落信号划分为两部分: 第一部分是根据当地环境的自然条件, 信号均值变化遵循一定标准差的对数正态统计分布, 局部信号均值变化称为长期 (对数正态) 衰落; 第二部分是在局部均值信号的慢变化中, 存在快速深度变化, 称为短期 (或瑞利) 衰落, 其源于移动单元附近的多径传播, 在相对短距离内服从瑞利统计。信号信道还具有其他的重要特性, 例如噪声和干扰。当采用宽带信道时, 还会产生频率选择性衰落和符号间干扰等。

20 世纪 80 年代部署第一个移动通信系统时, 将一个大功率发射机放在很高的站点上, 覆盖了只有几个信号信道的大蜂窝。由于自然频谱是有限的, 系统规划需要在覆盖范围和系统容量之间进行平衡。AMPS 系统降低了发射功率, 并采用频率复用技术来同时提高覆盖范围和系统容量。预测工具可帮助工程师优化系统性能。

大范围覆盖的提供需要射频设备的发展和/或通过一个或多个控制点将多个基站连接起来的连接链路, 以便距离移动单元最近的基站能够发送和接收该移动单元的信息。显然, 利用射频链路构建一个国家网络是复杂和昂贵的。另一个选择是利用已经存在的公共电信网络 (PTN, Public Telephone Network)。如果应用 PTN 作为骨干网络将基站连接起来, 则在基站和固定网络之间存在很多连接点。每一蜂窝站点 (基站) 只需覆盖一个小区域。这本身便成为多蜂窝站点的蜂窝系统获得更大频率复用的关键一步。而且原则上, 任一蜂窝站点覆盖范围内的移动单元都需要连接到国内和国际电话网络。

这一应用策略的潜力在最初便被意识到了, 但是在系统实施之前, 需要解决现场的许多重要议题, 这将依靠信号强度预测工具, 以及新问题出现时预测工具的持续更新能力。

1.6 移动射频信号: 衰落信号

1.6.1 移动信号接收环境

1.6.1.1 静止环境

在某一点接收到的移动信号可能很强, 但仅仅离开原位置一个波长, 信号也许就非常弱。这是因为移动天线高度近乎于地面, 通常接收到的来自基站的移动信号不是视距信号。由于

周围环境的反射、折射或散射将产生信号的两个或多个波路径，它们会在不同时刻到达移动端接收天线。

这些波路径的组合产生了合成信号，到达移动端时，幅度、相位都将不同于原始传输信号。公路间隔半个波长倍数的地点，接收信号也彼此不同。

1.6.1.2 移动环境

当移动单元沿街道行进、爬山或在建筑内移动时，移动端天线沿路径接收到的信号时强时弱，这被称为信号衰落。移动通信接收中，移动信号衰落是很难处理的。在系统实施之前，如果能够统计预测（长期衰落）接收信号，则可现场规划一个高效系统，实施系统所花费的时间、劳动和费用将大大减少。否则，将不得不采用现场实验方法。此外，预测工具还会帮助工程师发现信号强度出乎意料的高或低的原因。

1.6.1.3 障碍环境

接收的移动信号可能遇到以下两类障碍环境。

(1) 人造物或森林的障碍或无障碍：

- 无人造物或森林的障碍：视距（LOS，Line-of-Sight）情形；
- 有人造物或森林的障碍：非视距（NLOS，Non-Line-of-Sight）情形。

(2) 地形障碍或无地形障碍：

- 无地形障碍：无阴影区域；
- 受地形障碍：阴影区域。

1.6.1.4 直射路径和散射路径

(1) 直射路径：未受地形阻碍的射频路径，包括视距路径（LOS）和非视距路径（NLOS）。

(2) 衍射路径：受阴影区域地形阻碍的射频路径。

1.6.2 信号衰落类型

不同衰落类型^[17]取决于原始传输信号的自然特性及相关参数，如路径损耗、带宽、符号周期和频率。

移动无线通信介质具有不同类型的散射和多径现象，产生严重的信号衰落，也影响移动射频衰落信号。如前所述，两种类型衰落——长期衰落和短期衰落，一起构成了移动射频信号衰落。

对于短期衰落，衰落类型可进一步划分为：

(1) 基于接收信号的时延扩展：平坦衰落和频率选择性衰落。

(2) 基于信号带宽：接收到的移动信号衰落可随信号带宽增大而减弱。CDMA 信号衰落小于窄带信号衰落。

(3) 基于移动端速度和脉冲响应速率：快衰落和慢衰落。

(4) 基于移动端速度：平坦衰落和多普勒扩展引起的时间选择性衰落。

在进一步描述不同类型衰落之前，需要首先介绍衰落信号的特性。

1.6.3 衰落信号特性

1.6.3.1 局部均值

如图 1.6.3.1 中的 $r(t)$ 或 $r(x)$ 为实际接收信号，单位为 dB。基于信号衰落产生的原因^[2,17]，