

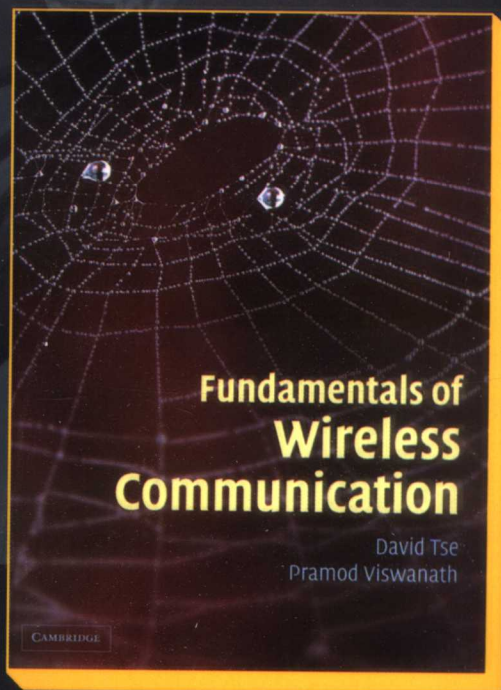
TURING

图灵电子与电气工程丛书

无线通信基础

Fundamentals of Wireless Communication

[美] David Tse 著
Pramod Viswanath 著
李 锵 周 进 等译
马晓莉 审校



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

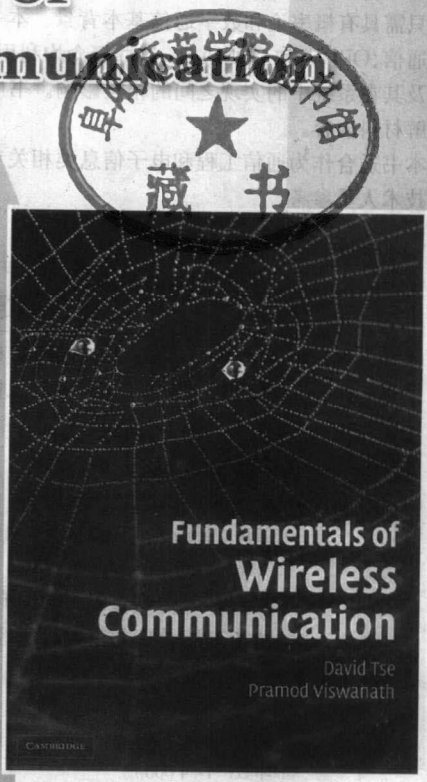
TURING

图灵电子与电气工程丛书

无线通信基础

Fundamentals of Wireless Communication

[美] David Tse 著
Pramod Viswanath 著
李 锵 周 进 等译
马晓莉 审校



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

无线通信基础 / (美)谢(Tse, D.), (美)维斯瓦纳斯(Viswanath, P.)著; 李锵等译.

—北京: 人民邮电出版社, 2007. 7

(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 978-7-115-16154-3

I. 无... II. ①谢... ②维... ③李... III. 无线电通信 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 058173 号

内 容 提 要

本书由无线通信领域新一代权威 Tse 根据教学实际编写而成, 已被加州大学伯克利分校、麻省理工学院等众多名校和高通等世界知名公司作为教材。本书重点介绍无线通信的基本原理, 读者只需具有概率论和数字通信基本背景。本书所涉及的主要问题有 MIMO 通信、空时编码、机会通信、OFDM 和 CDMA 等, 这些概念均利用无线系统的大量实例予以说明。本书着重强调概念及其在系统中的实现之间的相互影响。书中还配有大量的习题和图表, 可以帮助读者进一步理解材料内容。

本书适合作为通信工程和电子信息类相关专业高年级本科生和研究生的教材, 同时也可供工程技术人员参考。

图灵电子与电气工程丛书

无线通信基础

-
- ◆ 著 [美] David Tse Pramod Viswanath
 - 译 李 锵 周 进 等
 - 审 校 马晓莉
 - 责任编辑 朱 巍

 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销

 - ◆ 开本: 700 × 1000 1/16
印张: 27.5
字数: 686 千字 2007 年 7 月第 1 版
印数: 1-4 000 册 2007 年 7 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2006-0312 号

ISBN 978-7-115-16154-3/TN

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

版权声明

Original edition, entitled *Fundamentals of Wireless Communication* by David Tse and Pramod Viswanath, ISBN 978-0-521-84527-4 published by Cambridge University Press in 2005.

This translation edition is published with the permission of the Syndicate of the Press of University of Cambridge, Cambridge, England.

© Cambridge University Press 2005

本书原版由剑桥大学出版社出版。

本书中文翻译版由剑桥大学出版社授权人民邮电出版社出版。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。

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)销售发行。

版权所有,侵权必究。

审、译者简介



马晓莉, 1998年毕业于清华大学, 后赴美国留学, 分别于2000年和2003年获得弗吉尼亚大学电子工程硕士学位和明尼苏达大学电子工程博士学位。2006年至今任教于佐治亚理工学院电气与计算机工程学院, 主要研究领域涉及无线衰落信道中的收发信机设计、空时编码、复域编码、时间和频率选择性信道中的通信、信道估计与均衡算法以及OFDM系统载波频率同步等。



李锐, 现任天津大学电子信息工程学院副教授, 主要研究领域涉及数字信号处理及其应用、通信信号处理、图像信号及盲信号处理方面的研究工作。



周进, 现任民航银川空管站技术保障部技术室主任、计算机工程师, 长期从事计算机网络及民航通信网络方面的研究工作。

译者序

从 20 世纪 90 年代至今,随着人类社会步入信息化时代,电子信息科学技术速度发展惊人,信息产业已成为世界各国国民经济的主导产业之一,推动着世界经济不断向前发展。通信作为信息产业的排头兵,发展速度最快。通信已成为人类社会传递信息、交流思想、传播知识的重要手段,尤其是无线通信技术在过去的十年取得了令人瞩目的成就。

本书是两位作者在加州大学伯克利分校和伊利诺伊大学厄巴纳—尚佩恩分校多年教学与科研的总结,该书采取统一的观点介绍无线通信的基本原理,在读者具备概率论和数字通信基本背景知识的前提下,详细介绍了与无线通信进展有关的概念,全面、系统地论述了 MIMO(多输入多输出)通信、空时编码、机会通信、OFDM 和 CDMA 等主要问题。这些概念均通过 GSM、IS-95(CDMA)、IS-856(1X EV-DO)、Flash OFDM 以及 ArrayComm SDMA 等大量无线系统实例予以说明。本书着重强调概念及其在系统实现之间的相互影响。每章提供的大量习题和图表进一步充实了本书的内容,同时也可以帮助读者更好地理解基本理论。本书既可以作为高等院校电子、信息、通信、计算机等专业研究生课程的教科书,又可以供工程技术人员参考。

本书由李镛、周进翻译,马晓莉审校。参加本书翻译和初校工作的还有张瑞峰、张为、杨爱萍、关欣、赵全明、袁晓琳、王明国、董健、沈运强、鲍虎、肖志涛、汪剑鸣、刘艳艳、马杰、张立民、王淑艳、王昕、周郭飞、史斌、郭利斌、刘志杨、赖焰根、陈敏俊、李健、沈振乾、丁学文、邢喆、刘航、李晓、饶中洋、马爱萍、郭琦等,人民邮电出版社图灵公司的朱巍编辑舒立编辑为本书的后期出版做了大量工作,因此该书的翻译出版是集体智慧的结晶,渗透着众人的汗水。在此,对所有为本书出版提供帮助的人士表示诚挚的谢意!

由于译审者水平有限,加之时间仓促,译文中难免有不妥乃至错误之处,敬请读者不吝指正。

译者
丙戌夏末于塞上风城

致 谢

首先感谢我们研究小组的学生们所提供的无私帮助。特别要感谢 Sanket Dusad、Raúl Etkin 和 Lenny Gropok, 他们精心制作了本书中的绝大多数图片; Aleksandar Jovićic 绘制了书中的部分图片并校对了一些章节; Ada Poon 的研究为编写第 7 章内容起了重要作用, 并且他还绘制了第 7 章以及第 2 章的几张图片; Saurabha Tavildar 与 Lizhong Zheng 的研究成果构成了本书的第 9 章; Tie Liu 与 Vinod Prabhakaran 帮助阐明并改进了第 10 章中 Costa 预编码的表述。

几位研究人员认真阅读了本书的手稿, 并为我们提供了非常有用的建议。在此要衷心感谢 Stark Draper, Atilla Eryilmaz, Irem Koprulu, Dana Porrat 以及 Pascal Vontobel。本书还极大地受益于在加州大学伯克利分校和伊利诺伊大学厄巴纳—尚佩恩分校选修无线通信课程的许多学生提出的宝贵意见, 在此特别要对 Amir Salman Avestimehr, Alex Dimakis, Krishnan Eswaran, Jana van Greunen, Nils Hoven, Shridhar Mubaraq Mishra, Jonathan Tsao, Aaron Wagner, Hua Wang, Xinzhou Wu 以及 Xue Yang 表示诚挚的感谢。

本书的早期书稿已经在如下几所大学的教学中采用: 麻省理工学院、康奈尔大学、西北大学、苏黎世瑞士联邦工学院、科罗拉多大学波尔得分校。衷心感谢这些大学的教师提供的反馈意见, 他们是 Helmut Bölcskei, Anna Scaglione, Mahesh Varanasi, Gregory Wornell 以及 Lizhong Zheng。感谢 Helmut 研究组的 Ateet Kapur, Christian Peel 和 Ulrich Schuster 提供了非常有用的反馈, 同时感谢 Mitchell Trott 为我们讲解 ArrayComm 系统是如何工作的。

本书包含了许多学者的研究成果, 但在此要特别提到两位。一位是 Robert Gallager¹, 他的研究与教学风格为我们写作本书提供了灵感。他教导我们, 为各种纷繁复杂的结果提供统一的、概念上简单的理解, 从而缩减 (shrink) 而不是扩大 (grow) 知识树, 本书就试图使这一格言成为现实。另一位是 Rajiv Laroia², 与他的许多讨论都极大地影响了我们对无线通信系统层次的理解, 他的某些观点也出现在本书“系统观点”的讨论中。

最后, 我们要感谢美国国家科学基金对我们研究工作的支持。

1 Robert Gallager 教授是通信领域的权威人士、信息论奠基人克劳德·香农的学生。——编者注

2 Rajiv Laroia 是 Flash OFDM 开发人之一。——编者注

前 言

写作缘由

无线通信近 10 年来的两项主要进展成就了本书。其一是涌现了物理层无线通信理论的巨大研究热潮。虽然这项研究从 20 世纪 60 年代开始就已成为研究的焦点,但诸如机会通信和多输入多输出(MIMO)通信技术等近年来的发展开拓了如何通过无线信道进行通信的全新视野。其二是无线系统特别是蜂窝网络的迅猛发展,体现了复杂度不断增加的通信概念。这一发展开始于以 IS-95 码分多址接入(CDMA)标准为代表的第二代数字标准,进而发展到最近的以数据应用为重点的第三代系统。本书的目标是以连贯统一的方式介绍现代无线通信的概念,并举例说明这些概念在无线系统中的应用。

本书结构

本书呈现的是由多个紧密相关概念连接而成的一个网络,这些概念大致可以划分为如下三个层次:

- (1) 信道特性与建模;
- (2) 通信概念与技术;
- (3) 这些概念在系统上下文中的应用。

无线通信工程师既要理解所有这三个层次的概念,又要掌握不同层概念间相互影响的密切关系。本书并不是从一层到下一层顺序地讲述不同的主题,而是在各章间交错讲解这些层,从而强调各层概念之间的相互影响。

- 第 2 章:多径无线信道的基本性质及其建模(第(1)层)。
- 第 3 章:利用时间分集、频率分集和空间分集提高可靠性的点对点通信技术(第(2)层)。
- 第 4 章:通过研究三个系统实例介绍蜂窝系统设计,重点放在多址接入和干扰管理的问题上(第(3)层)。
- 第 5 章:从基本容量的观点再次讨论点对点通信,最后讨论现代机会通信的概念(第(2)层)。
- 第 6 章:多用户容量与机会通信,及其在第三代无线数据系统中的应用(第(3)层)。
- 第 7 章:MIMO 信道建模(第(1)层)。
- 第 8 章:MIMO 容量与结构(第(2)层)。
- 第 9 章:分集与多路复用的折中方案和空时码设计(第(2)层)。
- 第 10 章:多用户信道与蜂窝系统中的 MIMO(第(3)层)。

如何使用本书

本书是为一年级研究生编写的无线通信课程教材,读者应具备信号与系统、概率与数字通信等扎实的背景知识,本书的两个附录补充了这方面的基础知识。附录 A 归纳总结了贯穿全书、反复使用的高斯噪声下矢量检测与估计的基本理论。附录 B 介绍了本书讨论信道容量结果时用到的信息论基础知识。虽然信息论近年来在无线通信的发展中起到了重要作用,但本书仅以启发方式介绍容量结果,并利用这些结果启发学生理解通信概念和技术。本书假定读者不具备信息论方面的知识,附录 B 就是专为想进一步深入、全面理解容量结果的读者安排的。

我们已经在加州大学伯克利分校和伊利诺伊大学厄巴纳—尚佩恩分校开设的一学期(15周)无线通信课程中使用了本书的早期版本,已经讲授过第1章~第8章的绝大部分内容以及第9章和第10章的部分内容。根据学生背景和授课时间的不同,教师可以围绕本书的内容来构想其他的方式组织课程,例如:

- 高年级本科生无线通信课程,第2章、第3章、第4章;
- 具有无线信道与系统背景知识的研究生课程,第3章、第5章、第6章、第7章、第8章、第9章、第10章;
- 集中介绍 MIMO 与空时编码的短期课程,第3章、第5章、第7章、第8章、第9章。

书中给出了 230 余道习题。这些习题涉及书中结果的直接推导、实际无线系统的计算、MATLAB 练习以及关于当前研究热点的阅读材料。绝大多数习题详细阐述了文中讨论的概念。至少选取其中一部分题目进行练习对理解书中的内容非常重要。各章最后简短的文献说明提供了与本书讨论内容相关的文献,但并不会穷尽与书中内容相关的大量研究文献。

符 号

特殊集合

\mathcal{R}	实数
\mathcal{C}	复数
\mathcal{S}	小区上行链路上的用户子集

标量

m	表示离散时间的非负整数
L	分集支路数
l	分集支路的索引, 标量
K	用户数量
N	分组长度
N_c	OFDM 系统中的单频数量
T_c	相干时间
T_d	时延扩展
W	带宽
n_t	发射天线数
n_r	接收天线数
n_{\min}	发射天线数与接收天线数的最小值
$h[m]$	标量信道在时刻 m 的复数值
h^*	复数值标量 h 的复共轭
$x[m]$	信道输入在时刻 m 的复数值
$y[m]$	信道输出在时刻 m 的复数值
$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	均值为 μ 、方差为 σ^2 的实高斯随机变量
$\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$	循环对称复高斯随机变量: 实部和虚部是独立同分布的 $\mathcal{N}(0, \sigma^2/2)$
N_0	高斯白噪声的功率谱密度
$\{w[m]\}$	加性高斯噪声过程, 在时刻 m 为独立同分布的 $\mathcal{CN}(0, N_0)$
$z[m]$	在时刻 m 的加性高斯有色噪声
P	单位为焦耳/符号的平均功率限制
\bar{P}	单位为瓦特的平均功率限制
SNR	信噪比
SINR	信号与干扰加噪声之比
ϵ_b	每个接收比特的能量
P_e	差错概率

容量

C_{avg}	加性高斯白噪声信道的容量
------------------	--------------

C_ϵ	慢衰落信道的 ϵ 中断容量
C_{sum}	上行链路或下行链路的总容量
C_{sym}	上行链路或下行链路的对称容量
C_ϵ^{sym}	慢衰落上行链路信道的 ϵ 中断对称容量
p_{out}	标量衰落信道的中断概率
$p_{\text{out}}^{\text{Ala}}$	采用 Alamouti 方案时的中断概率
$p_{\text{out}}^{\text{rep}}$	采用重发方案时的中断概率
$p_{\text{out}}^{\text{ul}}$	上行链路的中断概率
$p_{\text{out}}^{\text{mimo}}$	MIMO 衰落信道的中断概率
$p_{\text{out}}^{\text{ul mimo}}$	在基站采用多天线的上行链路的中断概率

矢量与矩阵

h	复值信道矢量
x	信道输入矢量
y	信道输出矢量
$\mathcal{CN}(0, \mathbf{K})$	均值为零协方差矩阵为 \mathbf{K} 的循环对称高斯随机矢量
w	加性高斯噪声矢量 $\mathcal{CN}(0, N_0 \mathbf{I})$
h^*	h 的复共轭转置
d	数据矢量
\bar{d}	d 的离散傅里叶变换
H	复值信道矩阵
\mathbf{K}_x	复随机矢量 x 的协方差矩阵
H^*	H 的复共轭转置
H^t	H 的转置
Q, U, V	酉矩阵
I_n	$n \times n$ 单位矩阵
\mathbf{A}, Ψ	对角矩阵
$\text{diag}\{p_1, \dots, p_n\}$	对角线元素为 p_1, \dots, p_n 的对角矩阵
C	轮换矩阵
D	归一化码字差分矩阵

运算

$E[x]$	随机变量 x 的均值
$P\{A\}$	事件 A 的概率
$\text{Tr}[\mathbf{K}]$	方阵 \mathbf{K} 的迹
$\text{sinc}(t)$	定义为 $\sin(\pi t)$ 与 πt 的比值
$Q(a)$	$\int_a^\infty (1/\sqrt{2\pi}) e^{-x^2/2} dx$
$\mathcal{L}(\cdot, \cdot)$	拉格朗日函数

目 录

第 1 章 绪 论	1	第 3 章 点对点通信:检测、分集 与信道不确定性	36
1.1 本书目标	1	3.1 瑞利衰落信道中的检测	36
1.2 无线系统	2	3.1.1 非相干检测	36
1.3 本书结构	4	3.1.2 相干检测	39
第 2 章 无线信道	7	3.1.3 从 BPSK 到 QPSK:自由度 研究	41
2.1 无线信道的物理建模	7	3.1.4 分集	43
2.1.1 自由空间、固定发射天线 与接收天线	8	3.2 时间分集	44
2.1.2 自由空间、运动天线	9	3.2.1 重复编码	44
2.1.3 反射墙、固定天线	10	3.2.2 超越重复编码	47
2.1.4 反射墙、运动天线	11	3.3 天线分集	52
2.1.5 地平面反射	12	3.3.1 接收分集	53
2.1.6 由距离和阴影引起的功率 衰减	13	3.3.2 发射分集:空时码	54
2.1.7 运动天线、多个反射体	14	3.3.3 MIMO:一个 2×2 实例	56
2.2 无线信道的输入/输出模型	14	3.4 频率分集	61
2.2.1 无线信道的线性时变 系统	14	3.4.1 基本概念	61
2.2.2 基带等效模型	16	3.4.2 具有 ISI 均衡的单载波	62
2.2.3 离散时间基带模型	18	3.4.3 直接序列扩频	67
2.2.4 加性白噪声	21	3.4.4 正交频分多路复用	70
2.3 时间相干与频率相干	22	3.5 信道不确定性的影响	75
2.3.1 多普勒扩展与相干时间	22	3.5.1 直接序列扩频的非相干 检测	76
2.3.2 时延扩展与相干带宽	23	3.5.2 信道估计	77
2.4 统计信道模型	25	3.5.3 其他分集方案	79
2.4.1 建模基本原理	25	3.6 文献说明	81
2.4.2 瑞利衰落与莱斯衰落	26	3.7 习题	81
2.4.3 抽头增益自相关函数	27	第 4 章 蜂窝系统:多址接入与 干扰管理	88
2.5 文献说明	31	4.1 概述	88
2.6 习题	31	4.2 窄带蜂窝系统	90

4.2.1 窄带分配:GSM 系统	91	5.5 文献说明	158
4.2.2 对网络和系统设计的影响	92	5.6 习题	159
4.2.3 对频率复用的影响	93		
4.3 宽带系统:CDMA	94	第 6 章 多用户容量与机会通信	167
4.3.1 CDMA 上行链路	95		
4.3.2 CDMA 下行链路	105	6.1 上行链路 AWGN 信道	168
4.3.3 系统问题	106	6.1.1 逐行干扰消除获得的容量	168
4.4 宽带系统:OFDM	107	6.1.2 与传统 CDMA 的比较	170
4.4.1 分配设计原理	108	6.1.3 与正交多址接入的比较	171
4.4.2 跳频模式	109	6.1.4 一般 K 用户上行链路容量	172
4.4.3 信号特征与接收机设计	110	6.2 下行链路 AWGN 信道	173
4.4.4 扇区化	111	6.2.1 对称情况:获取容量的两种方案	174
4.5 文献说明	112	6.2.2 一般情况:叠加编码获取容量	176
4.6 习题	113	6.3 上行链路衰落信道	179
第 5 章 无线信道的容量	121	6.3.1 慢衰落信道	179
5.1 AWGN 信道容量	121	6.3.2 快衰落信道	180
5.1.1 重复编码	122	6.3.3 完整的信道辅助信息	182
5.1.2 填充球体	122	6.4 下行链路衰落信道	184
5.2 AWGN 信道的资源	125	6.4.1 仅利用接收端的信道辅助信息	184
5.2.1 连续时间 AWGN 信道	125	6.4.2 完整信道辅助信息	185
5.2.2 功率与带宽	126	6.5 频率选择性衰落信道	185
5.3 线性时不变高斯信道	130	6.6 多用户分集	186
5.3.1 单输入多输出(SIMO)信道	130	6.6.1 多用户分集增益	186
5.3.2 多输入单输出(MISO)信道	131	6.6.2 多用户分集与经典分集	188
5.3.3 频率选择性信道	131	6.7 多用户分集:系统级问题	189
5.4 衰落信道的容量	136	6.7.1 公平调度与多用户分集	189
5.4.1 慢衰落信道	136	6.7.2 信道预测与反馈	193
5.4.2 接收分集	138	6.7.3 利用失谐天线实现机会波束成形	194
5.4.3 发射分集	140	6.7.4 多小区系统中的多用户分集	199
5.4.4 时间分集与频率分集	143	6.7.5 系统级观点	200
5.4.5 快衰落信道	146		
5.4.6 发射端信息	149		
5.4.7 频率选择性衰落信道	156		
5.4.8 总结:观点的转变	156		

6.8 文献说明	203	8.2.1 具有接收端 CSI 时的 容量	247
6.9 习题	204	8.2.2 性能增益	248
第 7 章 MIMO I:空间多路复用 与信道建模	213	8.2.3 完整 CSI	255
7.1 确定性 MIMO 信道的多路复 用容量	214	8.3 接收机结构	257
7.1.1 通过奇异值分解分析 容量	214	8.3.1 线性解相关器	257
7.1.2 秩与条件数	215	8.3.2 逐行消除	261
7.2 MIMO 信道的物理建模	217	8.3.3 线性 MMSE 接收机	263
7.2.1 视距 SIMO 信道	217	8.3.4 信息论的最优性	268
7.2.2 视距 MISO 信道	218	8.4 慢衰落 MIMO 信道	270
7.2.3 仅存在一条视距路径的 天线阵列	219	8.5 D-BLAST:一种中断最优 结构	271
7.2.4 地理位置上间隔的天线	220	8.5.1 V-BLAST 结构的次最 优性	272
7.2.5 视距路径加一条反射 路径	225	8.5.2 跨发射天线编码: D-BLAST	273
7.3 MIMO 衰落信道的建模	227	8.5.3 讨论	274
7.3.1 基本方法	227	8.6 文献说明	275
7.3.2 MIMO 多径信道	228	8.7 习题	276
7.3.3 信号的角度表示	229	第 9 章 MIMO III:分集—多路复用 折中与通用空时码	282
7.3.4 MIMO 信道的角域 表示	231	9.1 分集—多路复用折中	283
7.3.5 角域统计建模	232	9.1.1 公式化表示	283
7.3.6 自由度与分集	233	9.1.2 标量瑞利信道	284
7.3.7 对于天线间隔的依 赖性	237	9.1.3 并行瑞利信道	287
7.3.8 独立同分布瑞利衰落 模型	241	9.1.4 MISO 瑞利信道	288
7.4 文献说明	243	9.1.5 2×2 MIMO 瑞利信道	289
7.5 习题	243	9.1.6 $n_t \times n_r$ MIMO 独立同分布 瑞利信道	291
第 8 章 MIMO II:容量与多路 复用结构	246	9.2 最优分集—多路复用折中的通 用编码设计	294
8.1 V-BLAST 结构	246	9.2.1 QAM 对于标量信道是近 似通用的	294
8.2 快衰落 MIMO 信道	247	9.2.2 并行信道的通用编码 设计	295
		9.2.3 MISO 信道的通用编码 设计	300

9.2.4 MIMO 信道的通用编码设计	303	偶性与发射波束成形 ...	332
9.3 文献说明	307	10.3.3 发射机已知干扰的预编码	335
9.4 习题	307	10.3.4 下行链路预编码	344
第 10 章 MIMO IV:多用户通信	313	10.3.5 快衰落	346
10.1 采用多副接收天线的上行链路	313	10.4 MIMO 下行链路	348
10.1.1 空分多址接入	313	10.5 蜂窝网络中的多副天线:系统级观点	350
10.1.2 SDMA 容量区域	315	10.5.1 小区间干扰管理	351
10.1.3 系统问题	317	10.5.2 采用多副接收天线的上行链路	352
10.1.4 慢衰落	319	10.5.3 MIMO 上行链路	354
10.1.5 快衰落	322	10.5.4 采用多副接收天线的下行链路	354
10.1.6 再谈多用户分集	323	10.5.5 采用多副发射天线的下行链路	354
10.2 MIMO 上行链路	326	10.6 文献说明	356
10.2.1 采用多副发射天线的 SDMA	326	10.7 习题	356
10.2.2 系统问题	328	附录 A 加性高斯噪声环境下的检测与估计	366
10.2.3 快衰落	329	附录 B 信息论基本原理	380
10.3 采用多副发射天线的下行链路	330	参考文献	402
10.3.1 下行链路的自由度	331	索引	410
10.3.2 上行链路-下行链路的对			

第 1 章 绪 论

1.1 本书目标

无线通信是当今通信领域中最活跃的研究热点之一。虽然从 20 世纪 60 年代起无线通信已经成为研究的主题,但最近十余年才是这一领域研究蓬勃发展的时期。这主要是受到几个因素的综合影响。首先是对无限连通性需求的迅猛增长,目前主要受到蜂窝电话的推动,但是很快会转而受到无线数据应用的推动。其次,VLSI 技术的突飞猛进使得复杂信号处理算法和编码技术的小面积、低功耗实现成为现实。再次,第二代(2G)数字无线标准的出台,特别是 IS-95 码分多址接入(Code Division Multiple Access, CDMA)标准,为我们提供了源于通信理论的好想法在实际中具有重大影响的具体说明。近 10 年的研究工作已产生了关于如何在无线信道中进行通信的更为丰富的设想、观点和工具,并且所描绘的图景仍在不断地发展变化。

无线通信之所以成为既富有挑战性又能引起研究人员兴趣的课题,其主要原因有两个,这两个原因对于有线通信而言基本没有什么影响。首先是衰落(fading)现象:由于多径衰落的小尺度效应,以及诸如由距离衰减引起的路径损耗和障碍物引起的阴影等大尺度效应,导致信道的时变特性增强。其次,与有线通信中各发射机—接收机对通常看成相互隔离的点点对点链路不同,无线用户是在空中进行通信,因此彼此之间存在严重的干扰(interference)。这里所说的干扰可以是与同一台接收机通信的发射机之间的干扰(例如蜂窝系统的上行链路),也可以是一台发射机发送给多台接收机的信号之间的干扰(例如蜂窝系统的下行链路),还可以是不同发射机—接收机对之间的干扰(例如不同小区中用户之间的干扰)。如何处理上述衰落和干扰对于无线通信系统的设计是非常重要的,这正是本书讨论的主题。虽然本书从物理层的角度进行阐述,但实际上可以看出,衰落和干扰的管理会在多个层间产生结果。

传统的无线通信系统设计关注于提高空中接口的可靠性(reliability),在这个前提下,衰落和干扰都被看成是必须抑制的有害因素(nuisances)。近期的研究焦点更多地转向了提高频谱效率(spectral efficiency),与此相伴出现的一种新观点是将衰落看成一种可以利用的机会(opportunity)。本书的主要目标是从这两种观点出发,给出对无线通信的统一论述。除了阐述诸如分集和干扰平均等传统主题外,本书将利用相当一部分章节专门介绍诸如机会通信以及多输入多输出(MIMO)通信等更为现代的主题。

本书的一个重要部分是强调系统的观点(system view):一个理论概念或一项技术的成功实现需要我们从总体上理解其与无线系统是如何相结合的。与概念或技术的推导不同,这种系统的观点不是数学公式的延伸,而是主要通过实际无线系统的设计经验获取的。我

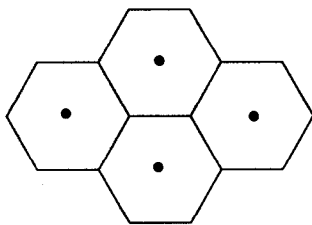
们试图通过给出这些概念如何应用于实际无线系统中的大量实例帮助读者培养这种洞察力。本书采用了五个无线系统的实例,下一节会简单介绍书中涉及的无线系统。

1.2 无线系统

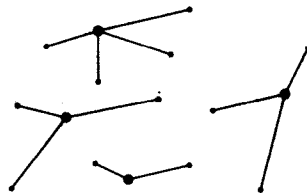
不论大众媒体如何宣传,从1897年马可尼(Marconi)成功演示无线电报开始,无线通信领域已经有着一百多年的历史了。到1901年,实现了横跨大西洋的无线电接收,随之出现了相当一段时间的技术快速进步。在这一百年中,涌现出了许多类型的无线系统,而后又不断消失,例如早期的电视传输是通过无线电发射机实现广播的,后来逐步被有线电缆传输所取代。类似地,构成电话网骨干的点对点微波线路正逐渐被光纤取代。在第一个例子中,安装分布式有线电视网络后无线技术就变得过时了;而在第二个例子中,新的有线技术(光纤)取代了旧的技术。相反的例子是在如今的电话通信领域中,无线(蜂窝)技术在某种程度上取代了有线电话网络(在部分地区有线网络并没有得到很好的发展)。这些实例表明,在许多情况下都存在无线技术与有线技术间的选择,并且这种选择通常随着新技术的出现而变化。

本书主要关注蜂窝网络,因为它是当前能够引起研究人员极大兴趣的研究领域之一,同时许多其他无线系统的特征都可以很容易地理解为蜂窝网络特征的特殊情况或者简单推广。蜂窝网络由大量持有蜂窝电话的无线用户组成,在汽车上、建筑物内、街道上几乎所有地方都可以使用蜂窝电话。另外还有大量的固定基站,为无线用户提供服务。

基站覆盖的区域称为小区(cell),该区域的呼入呼叫均到达该基站。通常用基站位于中心的正六边形区域表示小区,这样一座城市或一个地区就可以划分为正六边形小区的格状结构(参见图1-1a)。实际上,基站位置的设置在某种程度上并不规则,主要取决于设置的位置诸如具有良好通信覆盖并且可以租用或购买的建筑物顶部或山顶等(参见图1-1b)。类似地,移动用户选择基站也是根据是否有良好的通信路径,而不是地理距离。



(a) 将各小区表示为正六边形的示意图



(b) 基站不规则分布,移动电话选择最佳基站的实际情况

图 1-1 蜂窝网络的小区与基站

当用户发出呼叫时,就会连接至具有最佳路径的基站上(通常并非总是距离最近的基站),之后,选定区域内的基站就会通过高速线路或微波链路连接到移动电话交换局(mobile telephone switching office, MTSO),MTSO 也称为移动电话交换中心(MSC),MTSO 再连接到公共有线电话网。因此,来自移动用户的呼入呼叫首先连接到基站,之后再从基站连接到