

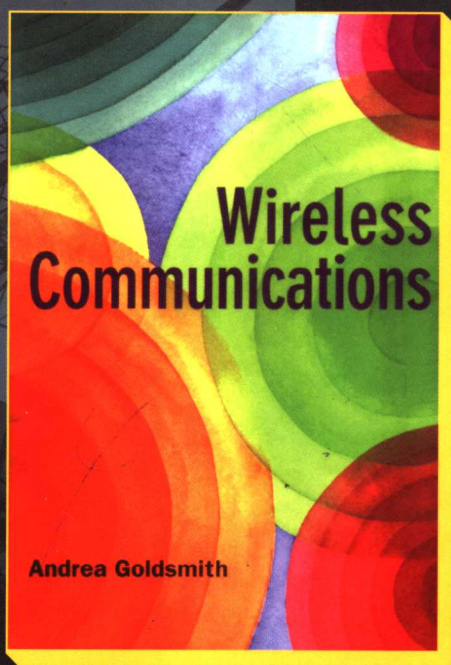
TURING

图灵电子与电气工程丛书

无线通信

Wireless Communications

[美] Andrea Goldsmith 著
杨鸿文 李卫东 郭文彬 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

图灵电子与电气工程丛书

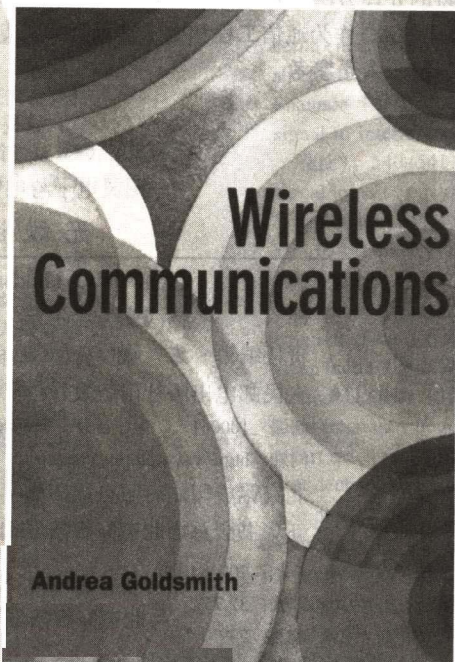
TN92
60

2007

无线通信

Wireless Communications

[美] Andrea Goldsmith 著
杨鸿文 李卫东 郭文彬 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

无线通信 / (美) 哥德史密斯, (Goldsmith, A.) 著; 杨鸿文等译.

—北京: 人民邮电出版社, 2007.6

(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 978-7-115-15993-9

I. 无... II. ①哥...②杨... III. 无线电通信 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 039503 号

内 容 提 要

本书重点论述当前各类无线通信系统中具有普遍性和代表性的基本知识, 包括基本的理论、问题、设计思路和分析方法。全书内容包括无线信道模型、无线信道容量、无线通信中的调制编码技术及均衡处理技术、扩频通信, 还包括多天线系统、多用户系统、多载波调制、自适应调制与编码、蜂窝系统及无线自组织网络等。书中每部分内容的讲述都有全新的视角和独特的处理方法, 并配合丰富的图示、例题和习题。

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, 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

-
- ◆ 著 [美] Andrea Goldsmith
 - 译 杨鸿文 李卫东 郭文彬 等
 - 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: 32.75
 - 字数: 739 千字 2007 年 6 月第 1 版
 - 印数: 1-4 000 册 2007 年 6 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2006-0312 号

ISBN 978-7-115-15993-9/TN

定价: 69.00 元

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

版 权 声 明

Original edition, entitled *Wireless Communications* by Andrea Goldsmith, ISBN 0521837162, published by Cambridge University Press in 2005.

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

© Cambridge University Press 2005

本书原版由剑桥大学出版社出版。

本书中文简体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（中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区除外）销售发行。

版权所有，侵权必究。

译 者 序

近年来无线通信发展非常迅速,大量新标准、新系统不断涌现。伴随着这些具体标准和系统而出现的是大量的新技术、新理论和分析问题的新方法。有志于从事无线通信研究的人都非常期望能够有这样一本新教材:它能够适应无线通信迅速发展的形势,它不是在描述具体系统或标准的具体设计细节,而是在讲述现代无线通信系统的基本理论、概念和分析问题的方法,使我们能够通过它在无线通信理论方面打下坚实的基础,以便进一步从事相关的研究和技术工作。斯坦福大学Goldsmith博士的最新著作《无线通信》正是这样一本书。

本书重点论述当前各类无线通信系统中具有普遍性和代表性的基本知识,包括基本理论、基本问题、基本设计思路和基本分析方法。全书内容包括无线信道模型、无线信道容量、无线通信中的调制编码技术及均衡处理技术、扩频通信,还包括多天线系统、多用户系统、多载波调制、自适应调制与编码、蜂窝系统及无线自组织网络等。每部分内容的讲述都有全新的视角和独特的处理方法,再配合丰富的图示、例题和习题,非常易于读者理解和掌握。

本书可作为相关专业研究生的教材或者本科生的阅读材料。

本书主要由杨鸿文、李卫东、郭文彬翻译,参与翻译工作的有陈晓刚、于萍、陈晓青、采健、尧文彬、孙国辉、靳晶、纪福星、王乐、苏胜蓝、赵朕衢、何雨奇、陶玉娜、张绮瑾、张雪、月球等。选修及旁听北京邮电大学“无线通信原理”课程的黄晶等许多硕士生和博士生也协助进行了译稿的校对工作,在此表示感谢。

由于译者水平有限,译稿中难免存在错误之处。欢迎读者指正,我们将及时通过<http://txyl.ste.bupt.cn>提供中译本勘误表。原版的勘误表请访问<http://www-ee.stanford.edu/~andrea/>。

译 者

2006年10月

前 言

无线通信是一个广阔而又充满生机的领域，在过去的几十年里涌现出无数令人兴奋的技术成果。本书的目的是使读者对无线通信的基本原理有广泛的理解。这些原理包括无线系统的特性和性能极限，对其进行分析的方法和数学工具，还有与无线系统设计有关的深入理解和利弊权衡。同时用各种现实的和预想中的无线通信系统来引出和例证这些基本原理。本书可以用于无线通信领域高年级或研究生水平的教学，也可以作为该领域技术人员和科研人员的参考书。

本书的结构

第1章首先对无线通信进行综述，包括对历史的回顾和对未来的展望，以及对现有系统和标准的概览。第2章和第3章讲述了无线信道的特性，正是这些特性引出了无线系统设计中的很多挑战。其中，第2章的内容涵盖了无线信道中的路径损耗和阴影衰落特性，它们经过较长的距离才发生变化。第3章描述了多径导致的平衰落和频率选择性衰落，它们的变化距离短得多，只有信号波长数量级。第4章讨论无线信道的容量极限及达到该极限的传输方式。虽然在研究这些传输方式时没有考虑复杂度和时延问题，但它们同样对一些获得实际应用的技术具有重要意义，这些技术将在后面章节陆续介绍。第5章和第6章主要介绍无线通信中的数字调制技术及其性能。从中可见，衰落会明显降低性能，所以抗衰落技术对高性能无线通信系统是至关重要的。

接下来的一些章节介绍了减轻平衰落和频率选择性衰落的主要技术。其中，第7章介绍了分集技术的基本原理，包括一种可以明显简化性能分析的新数学工具。这些技术能够去除平衰落的大部分不利影响。第8章全面介绍了各种编码技术，包括已经成熟的分组编码、卷积编码和格码，以及级联码、Turbo码、LDPC码方面的新进展。本章表明，虽然噪声信道编码技术几乎接近了理想性能，但无线系统编码的设计和性能分析方面依然存在许多待解决问题。第9章研究了平衰落中的自适应调制技术，它利用无线信道的时变特性使通信变得健壮且具有较高频谱效率。本章也将自适应调制技术及性能与平衰落信道的容量极限联系在一起。第10章介绍了多天线技术和空时通信系统，空间维的引入带来了高数据速率和对衰落的健壮性。第11章介绍了均衡，它的作用是在接收机中进行信号处理以补偿频率选择性衰落。第12章介绍多载波调制，它在抗频率选择性衰落方面比均衡更简单灵活。第13章介绍了单用户和多用户的扩频技术。这些技术不仅可以减轻频率选择性衰落的影响，还允许多个用户共享无线频谱。

本书的最后3章着重介绍多用户系统和网络。第14章介绍了用于多用户共享无线信道的多址接入和随机接入技术，无论它们的数据流是连续的还是突发的。本章还涵盖了功率控制这种旨在减小多用户间干扰且确保各用户达到预期性能的机制。本章以多用户信道的容量极限及达到此极限的传输策略和信道共享技术结束。第15章涵盖了蜂窝系统的设计、优化和性能分析，以及与此类系统中功率控制和性能极限相关的高级主题。最

后,第16章介绍了自组织无线网络的基本原理和待解决问题。

背景知识

阅读本书的唯一要求是读者需要对概率论、随机过程及傅里叶分析有基本了解。如果有数字通信的背景会很有帮助,但本书也讲述了其中的基本原理,所以不是必需的。本书用三个附录概括了各章所需的主要背景知识。其中,附录A讨论了带通信号和系统的等效低通模型,以简化带通系统的分析。附录B概述了全书涉及的概率论和随机过程的主要概念。附录C介绍了矩阵相关的定义、结论和性质,第10章和第12章运用了这些知识。附录D总结了现有无线系统的主要特性及其标准。

本书特点

由于人们在无线领域中已进行了大量研究,加之无线系统设计很复杂,我们要对本书涵盖的所有问题都进行详尽的介绍是不可能的。所以每章最后都提供大量的参考文献,其中的文献对该章内容有更详细的介绍。本书还包含了近100个实例来例证和强调关键的原理和权衡。另外,本书还收录了约300道课后习题。这些题目分为几大类,用来复习和巩固正文中的内容。其中一些习题旨在对一些关键概念进行例证或进一步深化,同时给出或说明基于这些概念的无线系统的属性;有些习题用来证明正文中给出但并未推导的结论;还有一些习题对典型无线系统中的参数和性能给出了数值解;有些习题还引入了书中未涉及的新概念或系统设计。

教材使用

可以针对课程长短、学生背景情况及课程侧重点将本书作为教材灵活使用。本书的核心部分在第1章至第6章。此后的每章都涵盖一个单独的专题,这些章节在授课中可以省略或在其他课程中介绍。学习本书需要有信号与系统(包括模拟与数字)和概率理论与随机过程的本科课程基础。如果学生有数字通信方面的先修或并修课程,也会有所裨益,这样的话第5章的内容及其他章节中重复的内容可以作为复习内容而快速学习。

本书可以分为三个部分:第1章至第6章为核心内容,第7章至第13章为单用户无线系统设计,第14章至第16章为多用户无线网络。书中大部分内容可以分2至3个小学期或2个完整学期讲授。如果分3个小学期授课,则可以按照本书所分的3个部分学习并在最后做一个深入的研究课题。如果分2个完整学期,第一阶段可以学习第1章至第10章(单用户衰落),第二阶段学习第11章至第16章(频率选择性衰落、多用户系统和无线网络)。对于只有1个小学期或完整学期课程安排的情况,重点可以放在单用户无线系统部分,即第1章至第6章及第7章至第13章中的部分章节。如此,可以通过后续学期的选修课程讲述多用户系统和无线网络(第13章的部分内容和第14章至第16章)。我在斯坦福大学授课时使用了两学期的分法,其中第2学期每隔一年开办一次,包括一些附加文献资料和一些深入的研究。一个学期的课程也可以同时包含第1章至第6章的单用户系统和第13章至第16章的多用户系统,如果时间允许的话,还可以加入第7章至第12章中的一些专题。

配套网站 (<http://www.cambridge.org/9780521837163>) 提供了本书的补充资料, 包括授课用的幻灯片、附加练习和勘误表。

致谢

完成一本书需要耗费大量的人力, 我对在本书编写过程中所有帮助过我的朋友深表谢意。首先要感谢加州理工学院和斯坦福大学使用本书各版本初稿的10届学生, 他们的建议、见识和经验对本书主题的选择、内容涵盖范围及语言语气都有很大价值。John Proakis和其他几位匿名审稿人对本书的初稿提出了有价值、有深度的意见和建议, 并指出了其中的遗漏和不足, 这大大提高了最终稿的质量。我的在读研究生Rajiv Agrawal、Shuguang Cui、Yifan Liang、Xiangheng Liu、Chris Ng和Taesang Yoo非常认真地校对了初稿的许多章节, 提出了新的观点, 重新推导了公式, 检查了打印稿并指出了其中的错误和遗漏。已毕业的学生Tim Holliday、Syed Jafar、Nihar Jindal、Neelesh Mehta、Stavros Toumpis和Sriram Vishwanath仔细地检查了各章并提出了有价值的建议。另外, 我所有在读的和已毕业的学生(包括那些已经提过的和Mohamed-Slim Alouini、Soon-Ghee Chua、Lifang Li和Kevin Yu)的许多研究结论对本书的许多内容都是有力的支持, 尤其在第4章、第7章、第9章、第10章、第14章和第16章中。习题解答是由Rajiv Agrawal、Grace Gao和Ankit Kumar编写的。我同样要感谢我的很多同事, 他们在百忙中抽出时间来阅读并指正某些章节。他们的批评指正极为亲切、慷慨和诚恳。他们深邃而有价值的观点不仅极大地完善了本书, 而且也让我在无线方面受益匪浅。我还要特别感谢Jeff Andrews、Tony Ephremides、Mike Fitz、Dennis Goeckel、Larry Greenstein、Ralf Koetter、P.R.Kumar、Muriel Médard、Larry Milstein、Sergio Servetto、Sergio Verdú和Roy Yates为本书所做的贡献。Don Cox无私奉献着他在工程方面的智慧, 在无线系统的许多细节和设想上给了我很大启示。我也非常感谢多年与我共同进行研究的研究人员以及在Maxim 技术公司和AT&T贝尔实验室的同事们, 他们开阔了我在无线通信和相关领域的视野。

我非常感谢斯坦福大学的同事、学生和领导们, 他们使本书诞生于充满活力且令人兴奋的教学和科研环境之中。我也很感激美国海军研究办公室和美国国家自然科学基金会在本书的整个编写过程中给予的资金支持。还要感谢我的助理Joice DeBolt和Pat Oshiro, 他们为了支持我的研究和教学, 事无巨细地帮助我。我还想感谢加工编辑Matt Darnell在整个出版过程中对一些细节的把握。本书策划编辑Phil Meyler从10年前这本书的策划到现在都一直关注着它。他对此书的鼓励和热情始终如一, 并宽容地接受了本书编写过程中出现的变化和延期。我想不会有更好的编辑能承担如此一项有所回报但又异常艰难、繁重的任务了。

我还要特别感谢两个人, 他们自始至终支持着本书和我的事业。Larry Greenstein通过他渊博的知识和科研经历, 点燃了我最初对无线的兴趣, 他是我的知识源泉和良师益友。Pravin Varaiya作为我的博士导师和我的榜样, 他渊博的知识和惊人的严谨见识与热情深深地影响着我。他是我的动力和灵感之源。

对于我的朋友和家人给予的关爱、支持和动力, 我也深表感激。他们为我提供了一

个坚实的支撑网络，如果没有他们，这本书将不会完成。我要特别地感谢Remy、Penny和Lili，他们给了我关爱和支持，感谢我的母亲Adrienne，她给了我爱并带给我创造力和写作的兴趣。我的父亲Werner深刻地影响着这本书和我的生涯。他是一名资深教授，一位成果颇丰的学者和作者，是机械工程和生物工程中许多领域的先驱¹。他给我从事工程学的建议，使我的事业得以起步，他也是我最主要的啦啦队长。他的自豪、关爱和鼓舞一直支持着我。我有幸帮助他完成最后论文，在本书中也沿袭了与他合作时所感受到的严谨、对细节和拼写错误的一丝不苟。

最后，我无言以表达对丈夫Arturo和孩子Daniel、Nicole的爱和感激。Arturo对本书的编写和我事业的方方面面都给予了无限的支持，他为此做出了很多牺牲。他的鼓励、爱护和奉献，使我在经历学术和家庭生活的起起落落时能继续前进。他是我所梦想的最好的丈夫和朋友，他使我的生活更加充实。Daniel、Nicole是我的阳光，我每天都因他们的爱和甜蜜而更加灿烂。能与这三个特别的人共同生活，我感到无比幸运。谨以此书献给他们。

1. 作者的父亲Werner Goldsmith (1924—2003) 是著名机械工程和生物工程学家，IEEE会士。他们父女均荣膺IEEE会士称号，在科技界一时传为佳话。——编者注

目 录

第1章 无线通信概述	1	第4章 无线信道的信道容量	83
1.1 无线通信的历史	1	4.1 AWGN信道容量	84
1.2 无线愿景	4	4.2 平坦衰落信道的容量	85
1.3 技术问题	5	4.3 频率选择性衰落信道的容量	97
1.4 现有无线系统	7	习题	101
1.5 无线频谱	18	参考文献	104
1.6 标准	20	第5章 数字调制与检测	106
习题	21	5.1 信号空间分析	107
参考文献	22	5.2 带通调制原理	119
第2章 路径损耗和阴影衰落	23	5.3 幅度/相位调制	119
2.1 无线电波传播	24	5.4 频率调制	128
2.2 发送和接收信号模型	25	5.5 脉冲成形	132
2.3 自由空间路径损耗	26	5.6 符号同步与载波恢复	134
2.4 射线跟踪	28	习题	140
2.5 经验路径损耗模型	35	参考文献	142
2.6 简化的路径损耗模型	39	第6章 无线信道中数字调制的性能	144
2.7 阴影衰落	41	6.1 AWGN信道	144
2.8 路径损耗和阴影衰落的混合模型	43	6.2 Q函数的一种等效表示法	152
2.9 路径损耗和阴影衰落造成的中断率	44	6.3 衰落信道	152
2.10 小区覆盖范围	44	6.4 多普勒频移	161
习题	47	6.5 码间干扰	163
参考文献	50	习题	165
第3章 统计多径信道模型	54	参考文献	169
3.1 时变信道的冲激响应	54	第7章 分集	171
3.2 窄带衰落模型	59	7.1 独立衰落路径的实现	171
3.3 宽带衰落模型	69	7.2 接收分集	172
3.4 离散时间模型	77	7.3 发送分集	182
3.5 空时信道模型	78	7.4 利用矩母函数分析分集	184
习题	79	习题	188
参考文献	81	参考文献	190
		第8章 无线信道中的编码	191
		8.1 码设计概述	191

8.2 线性分组码	193	11.6 判决反馈均衡	307
8.3 卷积码	205	11.7 其他均衡方法	308
8.4 级联码	215	11.8 自适应均衡: 训练和跟踪	309
8.5 Turbo码	216	习题	311
8.6 低密度校验码	218	参考文献	314
8.7 编码调制	218	第12章 多载波调制	316
8.8 衰落信道下的编码和交织	222	12.1 多载波数据传输	316
8.9 不等差错保护编码	225	12.2 重叠子信道的多载波调制	319
8.10 信源信道联合编码	228	12.3 子载波衰落的抑制	321
习题	228	12.4 多载波调制的数字实现	323
参考文献	232	12.5 多载波系统中的挑战	332
第9章 自适应调制编码	236	12.6 个案研究: IEEE 802.11a无线 局域网标准	335
9.1 自适应传输系统	236	习题	336
9.2 自适应技术	238	参考文献	338
9.3 速率可变功率可变的MQAM	240	第13章 扩频	340
9.4 一般的 M 进制调制	256	13.1 扩频原理	340
9.5 结合快衰落和慢衰落的 自适应技术	264	13.2 直序扩频 (DSSS)	344
习题	265	13.3 跳频扩频系统 (FHSS)	354
参考文献	268	13.4 多用户DSSS系统	356
第10章 多天线和空时通信	270	13.5 多用户FHSS系统	372
10.1 窄带MIMO模型	270	习题	372
10.2 MIMO信道的并行分解	271	参考文献	377
10.3 MIMO信道的容量	273	第14章 多用户系统	380
10.4 MIMO分集增益: 波束成形	281	14.1 多用户信道: 上行与下行	380
10.5 分集和复用的折中	282	14.2 多址接入	381
10.6 空时调制与编码	283	14.3 随机接入	387
10.7 频率选择性MIMO信道	288	14.4 功率控制	391
10.8 智能天线	288	14.5 下行 (广播) 信道容量	393
习题	290	14.6 上行 (多址) 信道容量	407
参考文献	292	14.7 上下行信道的对偶性	412
第11章 均衡	296	14.8 多用户分集	415
11.1 均衡器中的噪声增强	296	14.9 MIMO多用户系统	416
11.2 均衡器的类型	297	习题	417
11.3 折叠谱和无ISI传输	298	参考文献	419
11.4 线性均衡	301	第15章 蜂窝系统和架构式 无线网络	423
11.5 最大似然序列估计	305	15.1 蜂窝系统的基本概念	423
		15.2 信道复用	425

15.3 SIR和用户容量	430	B.2 随机变量	482
15.4 抗干扰技术	434	B.3 随机过程	486
15.5 动态资源分配	435	B.4 高斯过程	489
15.6 基本速率极限	438	参考文献	490
习题	442	附录C 矩阵的定义、运算和性质	491
参考文献	444	C.1 矩阵和向量	491
第16章 无线自组织网络	448	C.2 矩阵和向量的运算	492
16.1 应用	448	C.3 矩阵分解	494
16.2 设计原则和挑战	451	参考文献	496
16.3 协议层	453	附录D 无线标准摘要	497
16.4 跨层设计	462	D.1 蜂窝电话标准	497
16.5 网络的容量极限	464	D.2 无线局域网	501
16.6 能量受限网络	465	D.3 无线短距离网络标准	503
习题	470	参考文献	504
参考文献	472	索引	505
附录A 带通信号和信道的表示	478		
附录B 概率论、随机变量和 随机过程	481		
B.1 概率论	481		

第1章 无线通信概述

无论从什么角度看,无线通信都是通信产业中发展最快的一部分。正因为如此,无线通信受到媒体的普遍关注,公众对它充满了期待。在过去的10年中,蜂窝系统经历了指数性的快速增长,全球用户数已达20亿。在大多数发达国家,蜂窝电话已成为工作和日常生活中不可缺少的工具。在许多发展中国家,蜂窝系统也在迅速取代过时的有线系统。许多家庭、商务区和校园已经开通了无线局域网,它正在补充甚至替代有线网络。无线传感器网络、自动化高速公路、自动化工厂、智能家居、智能家电、远程医疗等新的应用正从研究设想变为现实。无线通信爆炸式的增长以及笔记本电脑和掌上电脑的大量普及,充分显示出无线网络有着光明的前景。不过,要想设计性能足以支持这些新兴应用并且健壮的无线网络,我们还面临着许多技术上的挑战。本章首先简要回顾无线通信的历史:从前工业化时期的狼烟,到今天的蜂窝系统、卫星系统及其他无线通信网络。然后进一步详细讨论无线技术的愿景,包括有待解决的技术难题。本章还将介绍一些已有的或将要出现的无线通信系统和标准。这些系统和未来无线愿景的差异说明要实现这些无线愿景还有大量的工作要做。

1

1.1 无线通信的历史

最早的无线通信出现在前工业化时期,这些系统使用狼烟、火炬、闪光镜、信号弹或旗语,在视距(距离,后来因望远镜而有所增加)内传输信息。为了能传输更复杂的消息,人们又精心设计出了用这些原始信号组成的复杂信号。为了能传得更远,人们在山顶、道路旁建立了一些接力观测站。直到1838年,这些原始的通信网才被塞缪尔·莫尔斯(Samuel Morse)发明的电报网替代,接着又被电话取代。在电话发明几十年后的1895年,马可尼(Marconi)首次从英国怀特岛(Isle of Wight)到30km之外的一条拖船之间成功进行了无线传输,现代意义下的无线通信从此诞生。从这一天开始,无线通信技术迅速发展,使我们能够在更远的传输距离上实现更好的通信质量、更低的功耗、更小的体积和更便宜的价格,使公网和专网的无线通信、无线电视、无线网络等成为现实。

早期的无线通信传送的是模拟信号。今天大多数的无线通信系统传送的是由二进制比特组成的数字信号,这些比特或者直接来自于数据信号,或者是由模拟信号数字化得到。数字无线通信既可以连续发送比特流,也可以对比特进行分组后以数据包为单位进行发送。后一种情形称为分组无线电(packet radio),其特点是突发传输:数据包的发送可能是间歇性的,没有数据包发送的时候信道是空闲的。当然了,这不表示分组传输不能连续地传送数据包。第一个分组无线网络是1971年夏威夷大学开发的ALOHANET。它把散布在4个岛上的7个校区的计算机节点通过无线传输连接到Oahu岛上的中央计算机。ALOHANET采用星型拓扑结构,中央计算机置于拓扑中心,网中的

任意两台计算机可通过中央计算机建立双向通信。分组无线电系统中的第一个信道接入协议和第一个路由协议就出现在ALOHANET中,其中的许多基本思想至今还在沿用。美国军方对ALOHANET把无线广播和分组数据相结合这一点产生了浓厚的兴趣。从20世纪70年代中期至80年代初,美国国防部高级研究计划署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)投入了巨大的人力物力来开发基于分组无线电的战术通信系统。在这些能够自组织的无线网络中,节点不需要借助任何基础设施就能够自己形成一个网络。DARPA对于自组织网络的投资在20世纪80年代中期达到顶峰,但是,所得到的系统在传输速率等方面的性能和预期的相去甚远。出于军事需要,这些网络目前仍然在继续研发中。分组无线电在商业方面的一个应用是支持广域无线数据业务。早在20世纪90年代初就引入了这种业务,它能提供较低速率(约20kbit/s)的无线数据接入,包括电子邮箱、文件传送和网站浏览。不过因为速率低、成本高以及缺乏“杀手级应用”等原因,这种广域无线数据业务自推出以来从未形成过强大的市场,在20世纪90年代基本消失,取而代之的是无线局域网,以及能同时支持数据的蜂窝电话网。

20世纪70年代,有线以太网技术的出现使许多厂商不再关心无线网络。以太网10Mbit/s的数据速率远远超过了当时的无线通信所能达到的速率。虽然有线网有敷设缆线的不便,但有了这样高的速率,公司也就不介意铺几根线了。一直到1985年,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)授权无线局域网产品可以开放使用工业、科学和医疗(Industrial Scientific and Medical, ISM)频段,这才启动了无线局域网的商业开发。无需FCC许可就能直接使用ISM频段,这对无线局域网商家来说是非常有吸引力的。不过为了不干扰原先分配于ISM频段的主要业务, FCC规定无线局域网必须要用较低的发射功率,并且只能用低频谱效率的信号方式。同时,无线局域网又要受到该频带内主要业务的强干扰。这些因素使最初的无线局域网在数据速率和覆盖范围方面的表现不尽如人意。再加上对安全性的顾虑、标准的不统一以及高成本(第一个无线局域网接入点的报价是1400美元,而有线以太网卡只是几百美元)等因素,导致早期的无线局域网产品销量很低。实际上,早期的无线局域网几乎没有用于数据网的,只能在库存处理这样的低技术应用中派上用场。目前使用的无线局域网采用IEEE 802.11系列标准,虽然数据速率也不算太高(最大速率为几十兆比特每秒),覆盖范围也比较小(大约100m),但性能上已有很大的提升。今天的有线以太网能提供1Gbps的数据速率,倘若没有额外的频谱分配,有线网和无线网的性能差距恐怕会越来越大。虽然无线局域网的数据速率相对较低,但由于其方便且不受连线束缚的优点,它正逐步成为许多家庭、办公室、校园等环境中互联网接入的首选。不过,大部分无线局域网目前支持的业务,像电子邮件和网络浏览等,都还不是带宽密集型的,未来无线局域网所面临的一大挑战就是能够支持大量用户同时使用有时延约束的带宽密集型业务,如视频。同时扩大覆盖范围也是未来无线局域网发展的一个重要目标。

迄今为止,最成功的无线网络恐怕要数蜂窝电话网了。这类系统最早要追溯到1915年在纽约和旧金山之间建立的无线话音传输。到1946年,全美国有25个城市引入了公共移动电话业务。早期的这些系统采用一个中央发射机来覆盖整个城市。这种低效

的频率使用方式,加之当时的无线电技术水平也不高,使这些系统的容量都非常有限,以至于在引入移动电话业务的30年以后,纽约市的系统只能容纳543个用户。

20世纪五六十年代出现了解决容量问题的一种方案,这就是美国电报电话公司(AT&T)贝尔实验室的研究人员提出的蜂窝概念^[1]。蜂窝系统基于这样一个事实,即传输信号的功率随着距离的增大而减小。把两个用户在空间上分隔足够远的距离,就能使它们之间的干扰非常小,于是这两个用户就可以使用相同的频率进行各自的通信,从而使频率被充分利用,系统所能承载的用户数也因此而大量增加。蜂窝系统从概念的提出到真正实现经历了一个漫长的过程。AT&T于1947年向FCC申请蜂窝电话业务的频段,并于20世纪60年代末基本完成了蜂窝系统的设计草案,但首次外场测试1978年才进行,FCC直到1982年才对蜂窝业务颁发许可,而在这个时候,许多初始的设计在技术上已经过时了。1983年第一个模拟蜂窝系统在美国芝加哥市开通,到1984年系统容量就已经饱和,为此FCC把分配给蜂窝系统的频段从40MHz增加到50MHz。蜂窝产业增长速度之快超出了所有人的预料。早在第一个蜂窝系统出现之前,AT&T曾经做过一份市场调查预测,认为需要蜂窝手机的只是医生等少数高收入人群。于是,AT&T在20世纪80年代基本上放弃了蜂窝网络这部分业务,把主要精力转向了光纤网络,后来到蜂窝网络逐渐显示出潜力的时候,AT&T才开始着手重新开展这项业务。到20世纪80年代后期,许多城市的蜂窝网络已经不能满足日益增长的需要。此时,开发具有更大容量和更好性能的数字蜂窝技术已经显得非常迫切。

基于数字通信技术的第二代蜂窝系统于20世纪90年代初面世。数字系统的高容量以及数字电路在成本、速度、硬件功率效率方面的优势带动了蜂窝系统从模拟到数字的转变。第二代蜂窝系统最初主要提供话音业务,后来逐渐演进到可以提供电子邮件、互联网接入、短消息等数据业务。不幸的是,蜂窝电话的巨大市场潜力导致了第二代蜂窝系统标准的多样性。仅在美国就有三个不同的标准,在欧洲和日本还有其他的标准,这些标准都是互不兼容的。不同的城市采用互不兼容的标准,这样一来,只用一部单标准手机在美国国内或世界范围内漫游就是不可能的。目前在一些国家正在着手进行的第三代蜂窝系统的开发中,也存在这种多种不兼容标准共存的现象。多模手机就是这种标准不统一的产物,这种手机集成了多种数字通信标准以便实现全国和全球漫游。考虑到只有模拟系统能够覆盖美国全境,也有一些多模手机同时集成了第一代的模拟通信标准。

卫星通信系统通常按其轨道的高度分为,高度在2000km左右的低轨道卫星系统(low-earth orbit, LEO)、高度在9000km左右的中轨道卫星系统(medium-earth orbit, MEO)以及高度约40000km的地球同步轨道卫星系统(geosynchronous orbit, GEO)。从地球看过去,GEO卫星是静止的,而其他轨道卫星的覆盖区域是随时间变化的。1945年,科幻小说作家Arthur C. Clarke最早提出了用GEO卫星进行通信的构想。不过第一颗人造卫星前苏联1957年发射的“伴星一号”以及美国国家航空航天局(NASA)和贝尔实验室于1960年发射的卫星“回声1号”(Echo-1)都不是GEO卫星,因为以当时的技术很难将卫星送到如此高的轨道。第一颗GEO卫星于1963年由美国休斯公司和NASA发射升空。在此后的几十年间,无论是在商用卫星通信系统中,还是在官方的卫

星系统中, GEO卫星一直占据着主导地位。

地球同步轨道卫星的覆盖区域非常大, 只需要少量几颗卫星(即少量费用)就能覆盖广阔的地域, 甚至可以覆盖全球。不过因为距离远, 所以需要很大的发射功率才能使信号到达卫星, 并且对于像话音这样有时延约束的业务而言, 传播时延也显得太大。因为这些缺点, 人们在20世纪90年代将兴趣转向了低轨道卫星^[2-3], 期望建立一个话音和数据业务能和地面蜂窝系统竞争的卫星系统。但卫星通信系统的终端与蜂窝电话相比, 毕竟个头大、耗电量大、成本高, 这些因素大大影响了卫星系统的普及。卫星通信的最大优势是它的覆盖能力, 特别适合于偏僻地区和有线或蜂窝电话尚未充分铺开的第三世界国家。但这些地区对通信的需求一般不大, 居民一般也没有能力支付卫星通信的费用。而LEO系统在人口密集地区本来可以获得的收入中的绝大部分也被越来越普及的蜂窝系统夺走。由于没有市场, 绝大多数的低轨道卫星系统逐步淡出了商业领域。

卫星通信最适合的领域是广播娱乐节目。工作在12GHz频段的直播卫星可以发送几百路的电视节目, 足以和有线电视竞争。在欧洲和美国运行的卫星数字广播也逐步开始流行, 这些系统能提供接近CD音质的数字音频广播。

4

1.2 无线愿景

展望未来, 无线通信在几十年内仍将是通信发展的前沿。无线通信的愿景是, 不论在世界的任何地方, 人们都可以用小体积的手持设备或笔记本电脑方便地进行多媒体通信。不论是在办公室、校园, 还是街边的咖啡厅, 掌上电脑、笔记本电脑和台式电脑都可以通过无线网络互相通信。在居室里, 无线网络不仅能连接电脑、电话和安全监视系统, 还可以使新型的智能家电交互式工作, 甚至能通过互联网控制这些家电。对于老弱病残, 这种智能家居可以照料他们的生活起居, 可以帮助监视病人, 并在紧要时刻做出应急响应。无线娱乐服务也将渗透到家庭和其他公共活动场所。视频会议可以将彼此分隔的人们联系在一起, 不论是相隔几个街区还是远隔重洋, 错过航班的销售人员或是在加勒比海度假的CEO也照样可以加入到会议中来。无线视频使得远程教育、远程培训和远程医疗成为可能。无线传感器在民用和军用方面都有巨大的价值。民用用途包括火灾监控、有害废弃物处理、建筑物和桥梁的受力监测、二氧化碳气体运动和受灾地区有害气体扩散的监控等方面。这些无线传感器能自行构成网络, 对传感器的测量结果进行处理后, 将信息发送给中央控制器。军用用途包括识别和跟踪敌方目标、探测生化袭击、辅助无人驾驶车辆以及反恐活动等。无线网络还能使分布式控制系统中的远程设备、传感器和制动器通过无线信道相连接, 这样的系统能使得自动化高速公路、移动机器人和可重构的工业自动化成为现实。

以上所描述的多种应用都是无线技术愿景的组成部分。那么, 无线通信准确地说是什呢? 这是一个复杂的话题, 存在许多的方式可以把这个问题分解到不同层面上, 包括不同的应用、不同的通信系统或是不同的覆盖区域^[4]。无线应用包括话音、互联网接入、网页浏览、寻呼及短信、用户信息服务、文件传送、视频会议、娱乐、传感器网络以及分布式控制系统。无线通信系统包括蜂窝电话系统、无线局域网、广域无线数

据网、卫星通信网以及无线自组织网。无线覆盖区域包括室内、校园、城市、地区及全球。对于不同的分类方式,无线通信的表现特征不同,导致了无线通信产业界的丰富细化,体现为大量不同的无线通信产品、标准以及已经提供或拟议提供的业务。出现这种多样性的一个原因是,不同的无线应用有不同的要求。话音系统需要数据速率相对较低(约20kbit/s),能允许较高的误比特率(bit error rate, BER)(约 10^{-3}),但总时延必须小于100ms,否则对端用户就能觉察到这个时延¹;典型的数据系统则要求很高的数据速率(1Mbit/s~100Mbit/s)和非常低的误比特率(10^{-8} 或更小,并且所有出错的比特都必须重传),但不要求时延固定;实时视频系统需要的数据速率很高,对时延的要求和话音系统相当;寻呼和短信需要的数据速率很低,没有硬性的时延要求。需求的多样性使我们很难建造一个单一的无线通信系统,它能同时有效地满足所有要求。而这样的目标对有线网络是可能的,因为有线网络的数据速率能达到吉比特每秒,误比特率可低至 10^{-12} 。而无线网络因为数据速率低,误比特率又高,所以至少在不久的将来,无线系统依然会保持这种细分的形势,不同的应用有各自不同的协议以满足不同的要求。

5

蜂窝电话和无线互联网接入的快速增长使人们对无线通信的未来普遍感到乐观。不过,并不是所有的无线通信应用都是十分成功的。在很多无线通信系统享受着巨大成功的同时,也有许多系统失败了,其中包括第一代无线局域网、铱星系统、包括Metricom在内的广域数据业务以及家庭固定无线接入(无线“电缆”)等。谁也不能预言将来哪一种网络会成功,哪一种会失败。最为重要的是,无线通信的工程师和管理部门必须要有充分的灵活性和足够的创造性,这样才能抓住稍纵即逝的成功机遇。不过,从今天已有的和正在出现的各种无线通信网络中,从无线通信能够达到的应用愿景中,我们可以肯定,无线通信的未来必定会一片光明。

1.3 技术问题

为了使未来的无线应用得以实现,首先必须要攻克许多技术上的难题,这些难题贯穿于无线通信系统设计的各个方面。随着无线终端的功能越来越多,这些小巧的设备必须兼容多种工作模式、支持多种应用、适应多种信息媒体。我们知道,电脑能够处理语音、图像、文本、视频等不同性质的数据。要让价格便宜、轻便的手持设备也能做到这些,电路设计方面就必须要有新的突破。消费者不愿意使用需要经常充电的笨重电池,因此便携终端在信号发送及处理方面消耗的能量一定要最小。处理多媒体和实现网络功能所需要地信号处理过程一般比较耗电,因此在有基础设施的架构式无线网络,例如无线局域网和蜂窝系统中,要尽可能多地信号处理负荷安排在能量充足的固定站点上。与此同时,架构式网络必须要重视可能出现的处理瓶颈、单点故障等问题。无基础设施架构的无线自组织网络有灵活、健壮的特点,适合于多种应用。这些网络中的各种处理和控制都必须在各网络节点上分布式执行,不存在一个能量充足的固定站点,因此如何有效利用能源是一个难题。在一些节点无法充电的网络,比如无线传感网络,能量成为

1. 有线电话的时延限制约为30ms,蜂窝电话将此限制放宽到100ms,IP电话又有所放宽。