

TURING

图灵电子与电气工程丛书

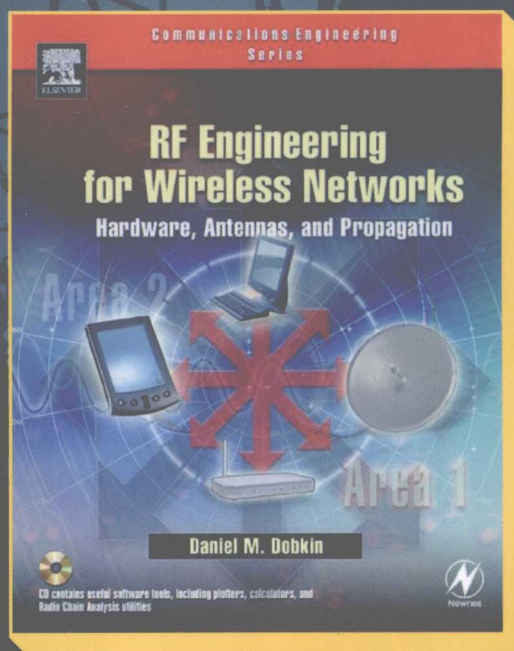


# 无线网络射频工程

## 硬件、天线和电波传播

RF Engineering for Wireless Networks  
Hardware, Antennas, and Propagation

[美] Daniel M. Dobkin 著  
李晋文 等译



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

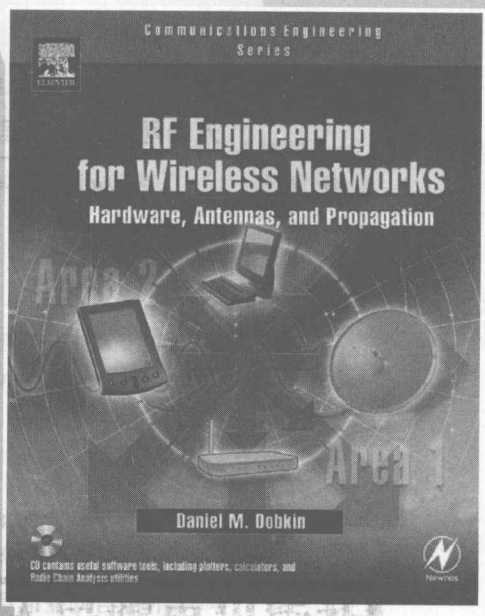
**TURING**

图灵电子与电气工程丛书

# 无线网络射频工程 硬件、天线和电波传播

## RF Engineering for Wireless Networks Hardware, Antennas, and Propagation

[美] Daniel M. Dobkin 著  
李晋文 等译



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目(CIP)数据

无线网络射频工程:硬件、天线和电波传播/(美)  
多布金(Dobkin, D. M.)著;李晋文等译. —北京:人民  
邮电出版社, 2008. 10

(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 978-7-115-18575-4

I. 无… II. ①多…②李… III. 无线电通信—射频  
IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 115524 号

## 内 容 提 要

本书围绕无线网络中的射频工程这一重要问题展开, 主要介绍三个方面: 硬件、天线和电波传播。全书共分八章, 主要内容包括无线网络简介, 无线通信基础和无线局域网基础, 无线发射机和接收机的架构、实现和性能评估, 面向无线网络应用的天线理论基础和设计, 电波传播, 室内网络和室外网络等。

本书内容详实, 涉及知识面宽, 可作为无线通信和微波专业的高年级本科生和研究生的教材, 也可供无线网络工程师和研究人员参考。

图灵电子与电气工程丛书

## 无线网络射频工程: 硬件、天线和电波传播

◆ 著 [美] Daniel M. Dobkin  
译 李晋文 等  
责任编辑 舒 立

◆ 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

◆ 开本: 700×1000 1/16  
印张: 22

字数: 457 千字 2008 年 10 月第 1 版  
印数: 1-4 000 册 2008 年 10 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2007-3616 号

ISBN 978-7-115-18575-4/TN

定价: 55.00 元

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

反盗版热线: (010) 67171154

## 译者序

随着 Internet 的飞速发展,从 WAN 到 MAN,再到 LAN 和 PAN,这些技术已逐渐成熟。目前,各类网络中最具增长潜力的毫无疑问是无线网络。怎样不通过电缆,摆脱物理连接上的限制,使设备互联起来呢?为了找到这个问题的答案,十多年来,人们不断探索,形成了当今令人眼花缭乱的无线通信协议和产品,无线网络正在越来越广泛地影响和改变着人们的日常生活。

射频工程是无线网络设计和实现的基础,也是决定无线网络功能和性能的关键技术之一。无论是无线网络架构师、无线网络产品设计师还是无线网络工程师都需要深入了解无线网络中的射频工程,具体包括用于无线网络的接收机和发射机、天线、复杂环境下的电波传播以及射频对无线网络总体性能的影响等。目前市面上已经有很多无线网络方面的书籍,但主要集中在无线网络架构和协议这一层次上。而市面上已有的微波射频工程方面的书籍又基本上专业书籍,内容中包含大量关于电磁场理论、电波传播、天线理论和射频电路理论的数学推导,让希望了解射频工程的无线网络工程师望而却步。因此十分需要一本专门介绍无线网络中的射频工程,指导工程师和设计师进行设计和评估的教材。本书就是这样一本将无线通信、网络和射频工程结合起来,理论结合实践的实用教材。

本书内容详实,同时涉及无线通信、无线网络和射频工程多个技术领域,而且能够理论结合工程实践,深入浅出,便于不同层次的读者阅读,文字准确,写作风格既严谨又优雅。以上所有这些优点都是我希望将本书介绍给中国读者的原动力,但同时也给我的翻译工作带来了巨大的压力和挑战。

在本书的翻译过程中,我的儿子呱呱坠地了,因此我想将这本译著特别献给我的妻子肖迪军女士和儿子。翻译本书耗费了我大量的精力,使得我无法全力照顾他们,为此感到非常愧疚,同时对他们给予我的大力支持和理解表示由衷的感谢!

本书主要由李晋文翻译。在本书的翻译过程中还得到了胡绘斌博士、杨虎副教授、王晓东副研究员、研究生邱磊和叶良丰的很多帮助,在此特别表示感谢。此外,参与翻译的人还有:闫志强、岳虹、张波涛、邓彬、刘齐军、林龙信、肖枫涛、张聪、韩智文、马蓉、焦贤龙、邝祝芳、奚丹、肖国尊。Be Flying 工作室的负责人肖国尊负责本书翻译质量和进度的控制与管理,在此予以衷心感谢。

最后,由于译者水平有限,文中难免存在不当或欠妥之处,欢迎读者批评指正。

李晋文

2007年10月于国防科技大学

# 目 录

第 1 章 绪论	1	3.3.6 802.11a 物理层	61
1.1 有线虽美,无线亦不可或缺	1	3.3.7 802.11g 物理层	66
1.2 预备知识	2	3.3.8 802.11(In)安全性	67
1.3 内容概述	3	3.4 HiperLAN 与 HiperLAN 2	70
1.4 致谢	4	3.5 从 LAN 到 PAN	71
1.5 补充读物	5	3.5.1 蓝牙	71
第 2 章 无线通信基础	6	3.5.2 802.15.3	74
2.1 时谐信号及其指数表示	6	3.5.3 UWB PAN:进展报告	75
2.2 电磁波和复用	9	3.6 小结	80
2.3 调制和带宽	14	3.7 补充读物	80
2.3.1 简单调制	14	第 4 章 无线发射机和接收机	82
2.3.2 正交频分复用	24	4.1 无线电概论	82
2.3.3 超宽带:一种几乎可以 免除干扰的通信方式	33	4.1.1 无线设备问题	82
2.4 无线链路概述:系统、功率、噪声 和链路预算	38	4.1.2 无线设备体系结构	83
2.4.1 链路的定性分析	38	4.1.3 一种“典型的”WLAN 设备	87
2.4.2 定量计算	40	4.2 无线器件	88
2.5 小结	45	4.2.1 ADC 和 DAC	88
2.6 补充读物	45	4.2.2 放大器	93
第 3 章 无线局域网基础	46	4.2.3 混频器与频率变换	112
3.1 各种规模的网络	46	4.2.4 频率合成器	123
3.2 从 LAN 到 WLAN	48	4.2.5 滤波器	126
3.3 802.11 WLAN	50	4.2.6 开关	132
3.3.1 802.11 架构	50	4.3 无线系统设计	134
3.3.2 MAC 与 CSMA/CA	51	4.4 无线芯片和芯片组示例	141
3.3.3 802.11 经典的直接序列 物理层	54	4.5 小结	151
3.3.4 增强的 802.11 标准 概览	58	4.6 补充读物	152
3.3.5 Wi-Fi 物理层		第 5 章 天线	155
		5.1 不采用传统的电磁场分析 方法	155

5.2 辐射:无线导线 .....	155	<b>第7章 室内网络</b> .....	246
5.3 理想偶极子 .....	157	7.1 室内环境 .....	246
5.4 天线的辐射方向图 .....	161	7.2 如何建造建筑物 .....	246
5.5 接收机天线 .....	167	7.2.1 建筑基础 .....	246
5.6 普通天线概述 .....	171	7.2.2 低层商业建筑 (一到三层) .....	247
5.6.1 半波偶极子 .....	171	7.2.3 中高层商业建筑 .....	251
5.6.2 四分之一波长单极子 .....	173	7.2.4 住宅 .....	252
5.6.3 折叠偶极子 .....	173	7.2.5 国际风格 .....	254
5.6.4 波导天线 .....	175	7.2.6 超大型建筑 .....	254
5.6.5 抛物面反射体天线 .....	177	7.3 建筑材料的微波特性 .....	254
5.6.6 微带(贴片)天线 .....	178	7.4 真实的金属障碍物 .....	261
5.6.7 相控阵天线 .....	181	7.5 现实中的室内传播 .....	262
5.6.8 方位各向同性天线 .....	185	7.6 多大功率才算足够 .....	269
5.6.9 辐射电缆 .....	186	7.7 室内干扰源 .....	271
5.6.10 八木宇田天线 .....	187	7.7.1 微波炉 .....	271
5.6.11 自适应天线阵 .....	189	7.7.2 其他的 WLAN 设备 .....	274
5.7 电缆和连接器 .....	192	7.7.3 蓝牙与 Wi-Fi 的比较 .....	274
5.8 小结 .....	198	7.7.4 无线电话 .....	276
5.9 补充读物 .....	198	7.8 室内网络工具 .....	278
<b>第6章 电波传播</b> .....	200	7.8.1 室内工具箱 .....	278
6.1 自由空间的电波传播 .....	200	7.8.2 测量 .....	279
6.2 地表环境下的电波传播 .....	200	7.8.3 室内传输模型 .....	280
6.2.1 背景:射线和几何光学 .....	202	7.9 小结 .....	281
6.2.2 折射指数 .....	203	7.10 补充读物 .....	282
6.2.3 吸收 .....	204	<b>第8章 室外网络</b> .....	285
6.2.4 金属的反射 .....	207	8.1 雨雪、炎热和黑夜等 .....	285
6.2.5 介质的反射和折射 .....	208	8.2 视线基站 .....	286
6.2.6 连续媒质的折射 .....	211	8.3 室外覆盖网络 .....	288
6.2.7 绕射和散射:基础知识 .....	213	8.3.1 传播 .....	288
6.2.8 绕射和散射:举例 .....	217	8.3.2 干扰 .....	296
6.3 多径传播:衰落和时延 .....	232	8.3.3 回程传输 .....	297
6.3.1 用分集天线来抗衰老 .....	234	8.4 点对多点网络 .....	300
6.3.2 用扩频调制来抗衰老 .....	235	8.5 点对点网桥 .....	302
6.3.3 用方向性天线来抗衰老 .....	236	8.6 长距离无需授权频段的链路 .....	304
6.4 电波传播的统计模型 .....	241	8.7 安全注意事项 .....	308
6.5 小结 .....	244	8.8 小结 .....	310
6.6 补充读物 .....	245	8.9 补充读物 .....	311

---

<b>附录 1 管理问题</b> .....	313	<b>附录 2 测量工具</b> .....	325
A1.1 一段历史 .....	313	<b>附录 3 反射和匹配</b> .....	329
A1.2 美国标准 .....	314	A3.1 反射系数 .....	329
A1.3 欧洲标准 .....	319	A3.2 一个简单的匹配例子 .....	330
A1.3.1 ISM 频段;ETSI EN 300 328 V1.5.1 \ \ \ .....	319	A3.3 补充读物 .....	333
A1.3.2 HiperLAN 频段 ERC/DEC(99)23 和 EN 301 893 .....	320	<b>附录 4 洛仑兹规范</b> .....	334
A1.4 日本标准 .....	321	A4.1 没有捷径可走 .....	334
A1.5 中国标准 .....	322	A4.2 洛仑兹规范的推导 .....	334
A1.6 小结 .....	323	A4.3 位函数之间的耦合 .....	336
A1.7 补充读物 .....	324	<b>附录 5 功率密度</b> .....	337
		<b>附录 6 常规的电磁学</b> .....	340
		<b>附录 7 文中所用符号表</b> .....	342

# 第 1 章 导 论

## 1.1 有线虽美,无线亦不可或缺

多年前,我从一位老同学那里获得的一句金科玉律,就是要保证所有部分连通——没有连线,就没有数据。导线将电压和电流从一处传输至另一处,其工作原理很简单,也可预测——至少对于足够低的数据传输速率和足够短的传输距离是如此。而且,导线是可以看得见摸得着的。

然而,导线也是一种恼人的、有时甚至是主网络不可缺少的连接纽带。看看普通个人计算机或者工程用工作站的后面,你很难发现哪个插口是接哪个电缆的。在咖啡屋,一个人将笔记本电脑接到墙上的以太网端口会让人好奇;不同座位上的五个人都这么做,五条在座椅、人之间的地板上散落的线,就会让人觉得不美观而且存在安全隐患。再有,归还租借的汽车时拿到即刻打印的发票是令人高兴的事,然而,如果租车公司的服务生要沿着一大排车,身后拖着长长的线,花费令人难熬的时间来办理,就会导致等待的汽车排成长队,让那些站在柏油路上、急着赶飞机的商务人士无可奈何。所以,导线有时也会无能为力。

因此,我们不得不甩掉连线,打破常规,实现不连线,仍有数据。怎么做呢?甩掉原本用于传输电流的导线会带来怎样的复杂问题?如何克服这些问题?还会存在哪些限制?显然,相比于有线传输,无线链路中信号的调制、发射、传播和接收机制都发生了巨大变化。虽然这些变化大部分可以被数据传输网络所隐藏(如果这些可以很好地实现),我们还是不能下结论,认为有线已经被无线所超过。

本书主要介绍在进行无线数据传送时必须采取的措施、遇到的困难以及受到的限制。书中重点介绍局域网(LAN)和个域网(PAN),也会说明这些局域通信技术在某种情况下也可以用于远程通信。集中论述了基于无线 LAN(即 Wi-Fi 网络)的 IEEE 802.11 协议,并讨论相关的技术,这些内容有广泛的适用性。

此外,本书还涉及了最新无线技术标准的发展,并给出了相关商业应用示例,但不会进行深入、全面的探讨。尽管我们处在信息迅速发布的时代,但是相比技术和工业的持续快速发展,任何对最新技术的总结都会显得滞后。因此,我们希望读者在阅读



完本书后,能够理解无线技术的基本工作原理,认清技术的实际发展状况。

更重要的是,本书的侧重点是信号,而不是位。虽然也会涉及无线网络技术的数字处理,但重点是位转换成电压和电压转换成位之间的处理过程。对于用于数字通信的开放系统互连参考模型(OSI),很多人已经非常熟悉,该标准对完成网络中两个终端用户之间通信的各种任务进行了分层(如图 1-1 所示)。本书内容对应于 OSI 模型中无线数据链路的物理层,以及涉及访问控制子层的少量内容,而未涉及其他更高层次的内容。对无线数据链路的更高层次及网络集成的某些方面感兴趣的读者,可以参考目前已有的许多关于无线 LAN 数字层面的优秀图书,本章最后也给出了部分这样的读物。

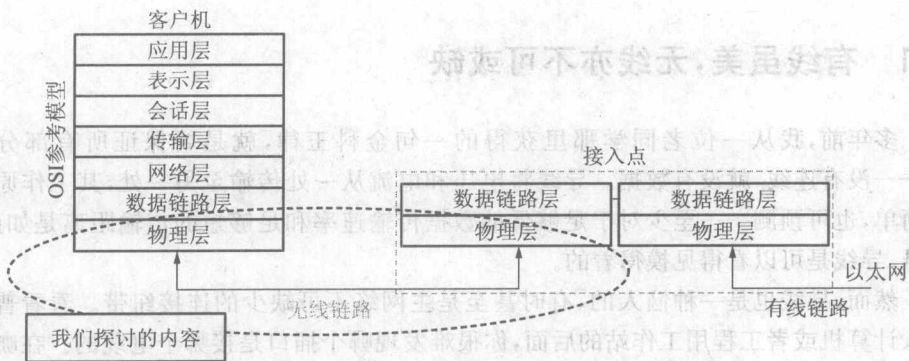


图 1-1 相对于 OSI 参考模型的位置

## 1.2 预备知识

本书力求自成一体,并不需要读者事先熟悉无线电技术,而只需要具备一些物理方面的背景知识,了解电气工程中电压、电流、电阻、电容和电感的基本概念及其常用符号。本书在假设读者熟悉时谐波(正弦)激励的前提下,简要回顾了如何用复指数表示这些信号。虽然我们反复强调物理意义而不是数学方法,但是读者还是应该对数学知识有所了解,理解求导和积分的含义,即便有一定的困难。在关于天线和电波传播的讨论中,不可避免要涉及矢量和梯度等数学概念。同样,本书在假设读者熟悉信号的时域和频域表示的前提下,简要回顾了在无线通信中扮演重要角色的傅里叶变换理论的内容。

具有一定专业知识背景的读者可能会发现,本书没有他们期望的复杂矢量问题:书中没有借助麦克斯韦方程,也没有矢量叉乘积,而且已尽可能地减少使用矢量场的散度。此外,虽然介绍了绕射的某些细节,但没有对著名的惠更斯原理做详细的讨论。虽然定义了近场区和远场区,但它们真正的区别仅在数学上而不是物理上。事实上,本书用专门的矢量和标量来表示电磁场,如  $A$  和  $\phi$  表示实际电流和电荷。本书沿用了

Carver Mead 在 *Collective Electrodynamics* 一书中的部分信号表示,其结果与用常用方法表示得到的结果是相同的,但我希望能尽量使复杂问题更简单。当然,有专业知识背景的读者也可以借助更传统的方法来表述电磁场。

### 1.3 内容概述

图 1-2 给出了本书其余内容的概览。

本书首先介绍一些无线通信的基础知识。先介绍多路复用的概念,然后考察用高频载波调制传送信息时会发生什么,以及为什么在带宽、数据率和噪声容限之间要不可避免地存在折中。回顾了用于数字数据传输的普通调制方式,包括两种有些奇特的方法:正交频分多址和脉冲超宽带,这两种方式在现代无线领域中正在扮演越来越重要的角色。我们还将介绍无线链路的概念和无线电领域用于描述电压、功率和噪声的专用术语。

为将问题讲清楚,不可避免地要涉及数字领域中无线局域网的一些基础内容,重点是 IEEE 802.11 系列标准,蓝牙技术(“蓝牙”得名于古丹麦国王 Harald “Bluetooth” Blätand),以及 IEEE 里其他任务组制订的标准。本书在强调有关无线方面的标准时,也会讨论一些编码和加密方面的技术,因为数字设计师正寻求用这些方法来补偿无线链路的不确定性。

然后进入数字无线电相关领域:放大、噪声和失真,变频和失真信号,频率综合和相位噪声,滤波器和滤波。总结了如何设计满足性能要求的无线电路结构,并选择性价比高的芯片。最后给出了一些用于无线局域网和无线个人网的无线芯片的例子,并简要讨论了其他一些难点:如何使用 PC 主板加少量的外部元件以及集成芯片一起构成低成本的数字无线电系统。

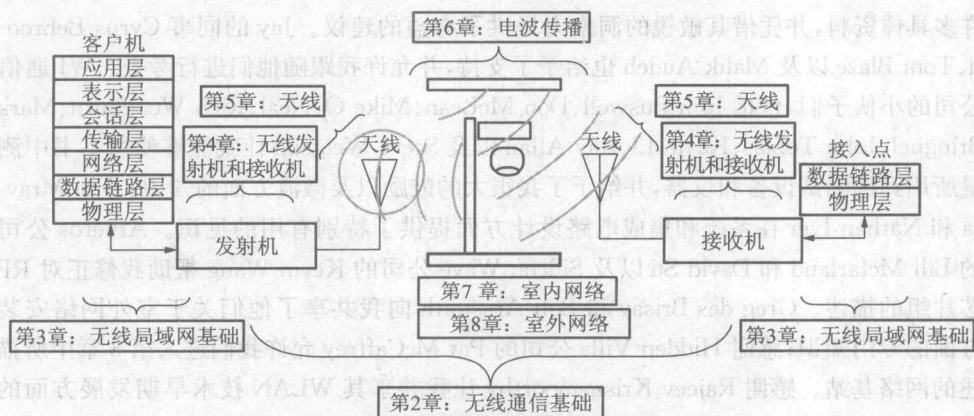


图 1-2 本书内容结构概要

在考察了信号的产生之后,我们继续研究使用天线发送和接收信号。为简化分析,书中把天线仅仅作为一个避免电流抵消的元件。给定了天线的电气特性,我们就可使用天线的方向性估算接收天线接收到的信号强度,虽然只是理想情况下的结果。简要地综述了一些常用天线的工作原理,把重点放在理解为什么用阵列天线能产生单个辐射单元所不能产生的有意义的结果。

接下来抛弃前面的理想假设,分析真实复杂环境中的电波传播。当遇到各种各样的障碍时,从微观到宏观世界,电波都会发生反射、吸收、绕射和折射,产生电波世界中的各种难题:衰减、衰落和多径效应。书中将研究如何借助分集天线、合理的调制方式以及更高级的自适应天线阵技术来克服电波传播的衰落。

在介绍完理论后,我们将投入实际的室内和室外网络的分析和规划工作中。首先回顾了如何把已有室内建筑详细的结构参数与关于微波吸收和反射的材料参数(来源于已公开出版的资料而不是建筑商)结合起来,分析预测电磁波的传播路径。综述了能够自动完成网络规划任务的一些软件工具和软件输出的一些例子。然后让我们流盼的目光转向室外,考察建筑物如何通过反射和绕射约束信号的传播,以及树木如何在限制室外微波链路中起到重要作用。我们还将考查区域覆盖网络、提供因特网接入的点对多点网络,以及固定位置间的点对点链路。地球是圆的,这一客观事实提醒我们,前面讨论的只是短距离电波传播,本书也将限于这一范围。本书的最后一章将简要介绍室外网络使用的安全防范,为了方便读者理解,本书附录还提供了规范、测量相关内容,以及书中略去的一些公式推导。

## 1.4 致谢

本书得到了很多人的帮助。特别感谢 Tropos 网络公司的 Jay Kruse 详细审阅了许多具体资料,并凭借其敏锐的洞察力提供了有益的建议。Jay 的同事 Cyrus Behroozi、Tom Blaze 以及 Malik Audeh 也给予了支持,并允许我跟随他们进行考查。WJ 通信公司的小伙子们,包括 Ron Buswell、Don McLean、Mike O'Neal、Rich Woodburn、Mark Bringuel、John Tobias、Kevin Li、Ray Allan 以及 Steve Weigand 让我能够使用本书中测量所用到的测试设备和仪器,并给予了我很大的鼓励以及微波方面的知识。Jim Mravca 和 Nathan Iyer 在系统和集成电路设计方面提供了特别有用的见识。Atheros 公司的 Bill Mcfarland 和 David Su 以及 Silicon Wave 公司的 Kevin Wang 帮助我修正对 RF 芯片组的描述。Greg des Brisay 和 Bob Arasmith 向我共享了他们关于室外网络安装方面的专门知识;感谢 Hidden Villa 公司的 Pat McCaffrey 允许我们进入第 8 章中所描述的网络基站。感谢 Rajeev Krishnamoorthy 让我共享其 WLAN 技术早期发展方面的知识。感谢 Miki Genossar 提供了 IEEE 标准中超宽带方面工作的指南。感谢 Ekahau 公司的 Markus Moisisio 和 Jussi Kiviniemi 以及 ABP 系统公司的 Baris Dandar 提供演示软件和综述方面的指导。Skip Crilly 为我解释了 Vivato 访问点,还要感谢 Elsevier 公

司本书的编辑,他们是 Mark Andrews、Martin Chaplin、Rob Martin、Ana Bakas、William Stone、Franz Chen、W. R. Vincent、Richard Adler、David Freer、Simon Perras、Luc Bourchard 以及 Vinko Erceg、Harry Helms,他们始终令人愉快并不断鼓励我。最后,必须要感谢与我患难与共的妻子 Nina,她不但容忍我无数个周末加班加点不在身边,而且每次都应我的紧急请求,为我及时提供浏览中国信息产业部网站所需的专业语言支持。

## 1.5 补充读物

关于网络方面的一般性介绍

**Understanding Data Communications**(6<sup>th</sup> Edition), Gilbert Held, New Riders, 1999: 简单易懂的一本书,虽然某些内容已经过时。

**Communication Networks**, Alberto Leon-Garcia and Indra Widjaja, McGraw-Hill, 2003: 一本重点介绍因特网协议的专业性教材。

无线局域网介绍

**802.11 Networks: The Definitive Guide**, Matthew Gast, O'Reilly, 2002: 至少在数字方面,完整地综述了标准和工具。

**Jeff Duntemann's Drive-By Wi-Fi Guide**, Paraglyph Press, 2003: 装配通用设备方面的入门级介绍和必备手册。

**Wireless LANs**, Jim Geier, Macmillan, 1999: 虽然该书提供的技术信息已经有点旧了,但是这本书在如何规划和管理网络安装工程方面,提供了非常好的介绍。

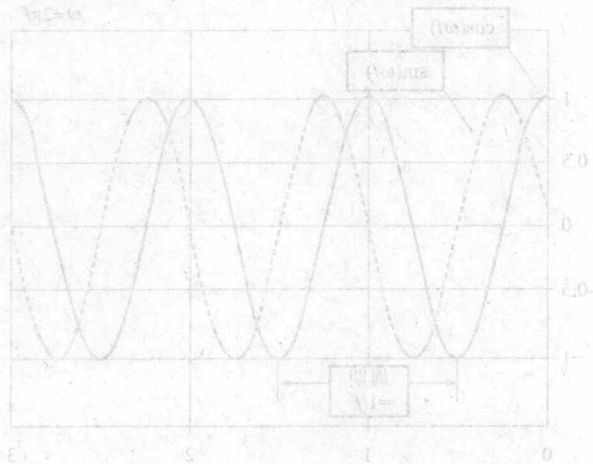


图 1-9 图

## 第 2 章

# 无线通信基础

1.5 林东林

### 2.1 时谐信号及其指数表示

在讨论无线之前,先简要地提醒读者需要熟悉无线电工程中三个容易混淆的概念:正弦信号、复数和虚指数。熟悉这些内容的读者也可以跳过这一部分。

无线电中所有的工作都是通过对时间周期变化的信号作微小的改变(即调制)来完成,平滑周期信号的原型都是正弦的(图 2-1),通常记作角频率  $\omega$  和时间  $t$  的乘积。

这些函数的值都只在最大值 1 和最小值  $-1$  之间变化。当变量为 0 时,余弦函数从 +1 开始,正弦函数从 0 开始,从图中我们可以看到,正弦函数和余弦函数的波形其实是相同的,区别仅仅是变量(即相位)有一个偏移量而已。

$$\cos(\omega t) = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2-1)$$

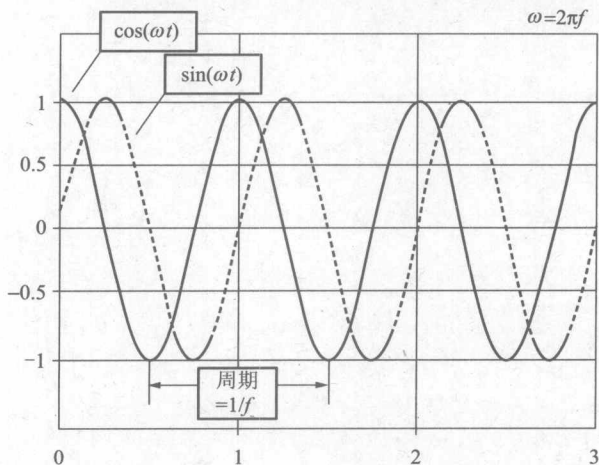


图 2-1 余弦和正弦函数

我们说正弦函数落后余弦函数  $90^\circ$  (请注意在这里及以后, 本书都用弧度来表示角度, 但说的时候仍然用度)。正弦和余弦的周期都是  $1/f$ , 其中  $f = \omega/2\pi$  为频率 (每秒内的周期数, 单位为 Hz)。

现在我们换个话题, 简要讨论一下复数, 因为用一两页纸就可以讨论清楚。请读者回忆一下, 虚数的引入是为了使负实数能够开平方根, 虚数单位为  $i = \sqrt{-1}$ 。复数就是实数与虚数的和, 通常表示为  $a+ib$ 。电气工程师通常用  $j$  替换  $i$ , 而用  $i$  来表示交流电流, 在本书中仍将采用物理学和数学中的习惯, 即用  $i$  来表示虚数单位。改变复数中虚部的符号即可得到它的共轭复数  $Z^* = a-ib$ 。

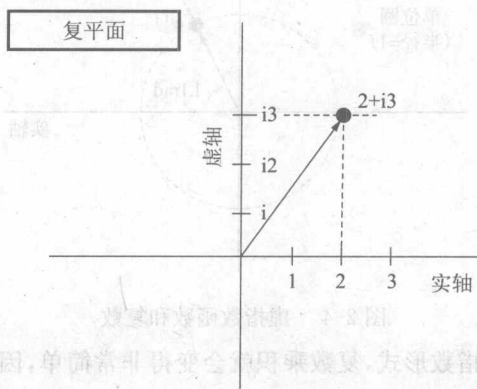


图 2-2 在平面内用向量表示复数

复数可以用图 2-2 这样一个平面来描述, 以实部作为  $x$  坐标轴, 以虚部作为  $y$  坐标轴。对复数的运算基本上与代数中完全一样, 但必须记住需要同时对实部和虚部进行运算。如, 两个复数的代数和表示为

$$(a+ib) + (c+id) = [a+c] + i[b+d] \quad (2-2)$$

也可以在复平面上用几何向量和来表示, 两个复数构成一个平行四边形的两条边, 对角线就是它们的和 (如图 2-3 所示)。

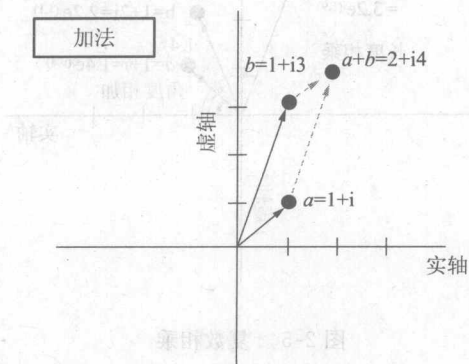


图 2-3 复数相加

复数相乘也可以用类似的方式来处理,不过,如果事先定义了复数的长度(也被称作复数的模)和幅角,那么复数乘法就会变得非常简单。定义一个长度为1和幅角为 $\theta$ 的复数等同于一个指数函数其变量的虚部等于 $\theta$ (如图2-4所示)。则任意一个复数可以表示为模和虚指数的乘积,该虚指数的变量等于复数的幅角(用弧度表示)。

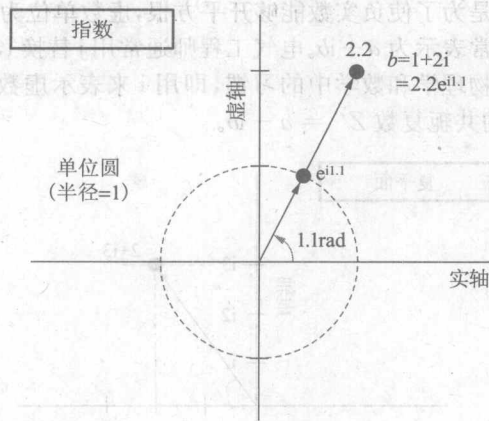


图 2-4 虚指数函数和复数

因此,把复数写成指数形式,复数乘积就会变得非常简单,因为两个复数的积就是指数函数变量相加求和。

$$(e^a) \cdot (e^b) = e^{[a+b]} \quad (2-3)$$

计算两个复数的积只需要将它们的模相乘,幅角相加就可以得到(如图2-5所示)。

$$(\rho_1 e^{i\theta_1}) \cdot (\rho_2 e^{i\theta_2}) = [\rho_1 \rho_2] e^{i[\theta_1 + \theta_2]} \quad (2-4)$$

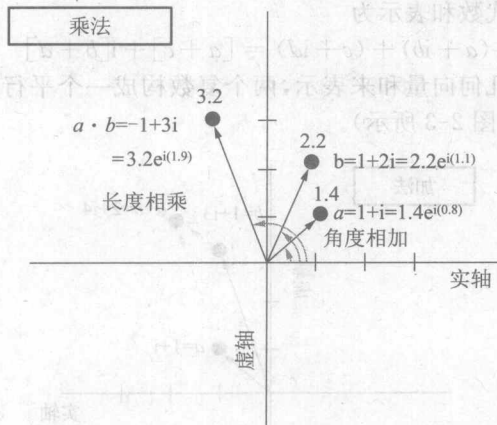


图 2-5 复数相乘

我们不顾麻烦引入这些不真实的量的原因是,它们提供了一种特别方便的时谐信号表示方法。因为辐角为 $\theta$ 的单位向量的 $x$ 分量和 $y$ 分量恰好分别对应于它的余弦和正

弦,定义虚数的指数为

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta) \quad (2-5)$$

因此,如果  $\theta$  为时间的线性函数,则可以得到时谐信号的一种非常通用且紧凑的表示方法为

$$\begin{aligned} e^{i(\omega t + \phi)} &= \cos(\omega t + \phi) + i\sin(\omega t + \phi) \\ &= [\cos(\omega t) + i\sin(\omega t)] \cdot [\cos(\phi) + i\sin(\phi)] \end{aligned} \quad (2-6)$$

采用这种表示方法,信号可以被想象为随时间旋转具有恒定长度的矢量,该矢量在实轴和虚轴上的投影分别为我们非常熟悉的正弦和余弦(如图 2-6 所示)。相位偏移量  $\phi$  表示矢量的初始时间  $t = 0$  时的幅角。

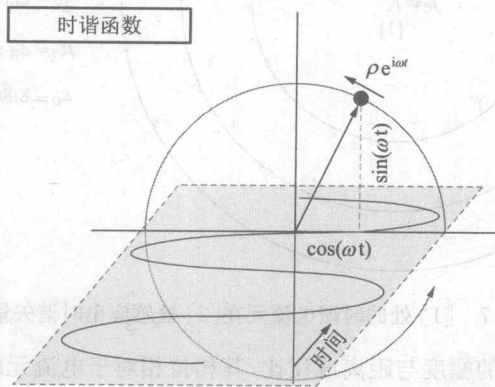


图 2-6 虚指数可以表示正弦电压或电流

在某些情况下,信号的复数表示只是作为中间的计算工具,以简化相移和其他运算,在最后都会仅考虑信号实部,最多再加上正负频率的指数,然后最终转化为一个实值函数。(使用式(2-5)和式(2-6),读者可以证明:正频率和负频率的指数和恰好等于一个纯实数或者纯虚数。)然而,在实际的无线电中,实时谐信号  $\cos(\omega t + \phi)$  可以看作实载波  $\cos(\omega t)$  与复数  $I + iQ = [\cos(\phi) - i\sin(\phi)]/2$  的积,其中,虚部通过与  $\sin(\omega t)$  相乘然后滤波得到(这里  $I$  和  $Q$  分别表示同相和正交,即  $90^\circ$  相移)。在第 4 章中讨论无线电时,还将详细介绍这种正交分解。

最后,介绍一下指数表示的另外一个独特而方便的特征:对指数函数求导和积分时,若指数本身是自变量的线性函数,则只需要简单地对原函数乘以或除以该线性函数的斜率即可:

$$\frac{d}{dx}(e^{ax}) = ae^{ax} \quad \int e^{ax} dx = \frac{1}{a}e^{ax} \quad (2-7)$$

## 2.2 电磁波和复用

现在我们已经了解了必备的基础知识,把注意力转向本章讨论的主题:使用电磁波携带信息。某一点[1]处的电流元  $\vec{J}$  在远区[2]处感应出磁矢量位  $\vec{A}$ 。如果电流元是



时谐的,则感应磁矢量位  $\vec{A}$  也是时谐的,如图 2-7 所示。

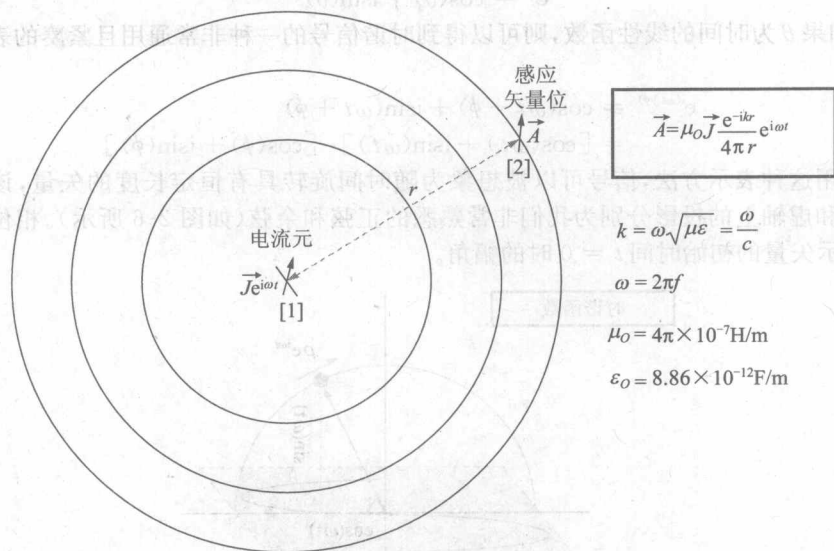


图 2-7 [1] 处的时谐电流元在 [2] 处感应出时谐矢量位

感应磁矢量位  $\vec{A}$  的幅度与距离成反比,其相位相对于电流元的相位也存在一个相移(读者可以证明  $\vec{A}$  与电流元在时间上的延迟为  $r/c$ )。感应磁矢量位进而也会影响位置 [2] 点的电流,因此改变  $J[1]$ , 增加延迟和衰减,就可以检测到  $J[2]$  也发生了变化,因此,应该可以利用电磁场磁矢量位  $\vec{A}$  的这种扰动效应来实现远距离通信。

从原理上讲,电流元在任一点上都会感应出磁矢量位,在利用电磁波进行通信时,也正是电磁场感应这种普遍现象导致了一个严重问题。在接收机所在位置处的磁矢量位,可以被看作所有可能发射源  $J$  共享的通信媒质。然而,怎样才能检测出我们感兴趣的信号呢?

多个用户共享一个通信信道称为复用(multiplexing)。有许多种方法可以成功地定位需要接收的信号,而抑制其他信号。以下给出了一些很重要的例子:

- 频分复用(frequency-division multiplexing): 只接收给定频率和波形(当然是指正弦波)的信号。
- 空间复用(spatial multiplexing): 把信号限制在某一特定的地理区域。前面已经说过,在理想情况下,感应磁矢量位的强度以  $(1/\text{距离})$  速度衰减,在实际的环境中,由于在电磁波传播路径上存在各种各样的障碍物,随距离的增加信号的衰减会更快。因此,只要合理地选择信号功率、位置以及灵敏度,就能够只接收附近的信号。
- 时分复用(time-division multiplexing): 将信号限制在一组特定的时隙(time slot),只要恰当地使发射机和接收机协同起来(保持同步),就能够只接收所期