

现代电子通信

系统方法

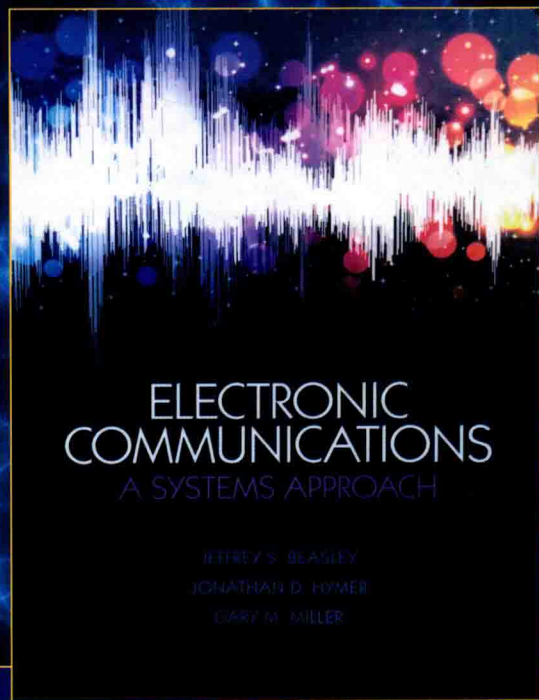
杰夫瑞 S. 比斯利 (Jeffrey S. Beasley)

[美] 乔纳森 D. 海默 (Jonathan D. Hymer) 著

加里 M. 米勒 (Gary M. Miller)

裴昌幸 等译

*Electronic
Communications
A Systems Approach*



现代电子通信 系统方法

杰夫瑞 S. 比斯利 (Jeffrey S. Beasley)
[美] 乔纳森 D. 海默 (Jonathan D. Hymer) 著
加里 M. 米勒 (Gary M. Miller)
裴昌幸 韩宝彬 易运晖 赵楠 孟云亮 陈娜 译

*Electronic
Communications
A Systems Approach*

ELECTRONIC
COMMUNICATIONS
A SYSTEMS APPROACH

JEFFREY S. BEASLEY
JONATHAN D. HYMER
GARY M. MILLER



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电子通信: 系统方法 / (美) 杰夫瑞 S. 比斯利 (Jeffrey S. Beasley) 等著; 裴昌幸等译.
—北京: 机械工业出版社, 2016.11

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Electronic Communications: A Systems Approach

ISBN 978-7-111-55209-3

I. 现… II. ①杰… ②裴… III. 通信技术—高等学校—教材 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 254953 号

本书版权登记号: 图字: 01-2013-9379

Authorized translation from the English language edition, entitled Electronic Communications: A Systems Approach, by Jeffrey S. Beasley, Jonathan D. Hymer; Gary M. Miller, published by Pearson Education, Inc. Copyright © 2014.

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 Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2017.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书用系统的方法对无线通信、有线通信、模拟通信技术和数字通信技术做了全面的阐述, 并涵盖了正弦波、电抗和共振等电子技术相关知识。对新一代无线系统的实现技术 (包括 3G 和 4G) 进行了详细介绍, 其中有限脉冲响应滤波器和数字信号处理、复指数和解析信号、DSP 调制/解调、扩频技术等是其他通信技术教材没有的内容。本书可作为高等工科院校电子信息工程、通信工程专业的本科生教材。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 谢晓芳 王颖

责任校对: 殷虹

印刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版次: 2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 31.25

书号: ISBN 978-7-111-55209-3

定价: 109.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

本书由新墨西哥州立大学 Jeffrey S. Beasley(杰夫瑞 S. 比斯利)、摩圣安东尼奥学院 Jonathan D. Hymer(乔纳森 D. 海默)、Gary M. Miller(加里 M. 米勒)编著。读者对象是电子信息、无线通信、通信系统维护和电信初学者等。也可作为高等院校无线电技术、通信、电子工程等专业的教材。

本书着重强调物理概念,虽然数学分析仅用到代数和三角的知识,但足以满足学生对基本概念和关键技术问题的理解。考虑到内容的完整性和系统性在有关章节对傅里叶级数和复指数等内容进行了必要讨论。

本书共分为 16 章。涵盖的内容主要包括:调制、通信电路、发射机、接收机、数字通信技术、数字调制与解调、电话网、无线通信系统、计算机通信与互联网、传输线、波的传播、天线技术、波导、雷达,以及光纤通信系统等。每章末尾都附有习题和思考题,非常便于实验和自学。

本书内容丰富,理论联系实际,适用面广。与同类书籍或教材相比,在数字信号处理(DSP)和软件无线电(SDR)方面的内容尤为全面、突出和实用。本书不仅反映了当今的技术水平,也预见未来通信与信息技术的发展。

裴昌幸教授负责统稿和审校,并翻译了前言、第 1 章、附录、缩略语以及词汇表,韩宝彬高工翻译了第 4、5、6、11、14、15、16 章,易运晖副教授翻译了第 12、13 章,赵楠副教授翻译了第 2、3 章,孟云亮博士翻译了第 7、8 章,陈娜博士翻译了第 9、10 章。另外,西安电子科技大学通信工程学院无线通信和网络测量团队的教师和研究生也对本书的翻译整理做出了贡献,对于他们的辛勤劳动和无私奉献在此表示衷心感谢。

由于译者水平有限,加之时间紧迫,翻译中难免会有不确切和错误之处,恳请专家和读者提出宝贵意见。

前 言

电子通信领域作为该行业业务领域最大和原创应用最多的领域，正在发生根本性转变。在大规模集成方面，由于计算机的革命和进步，传统上由分立元件所构建的模拟电路功能模块，现在基本上被执行数字信号处理操作的集成电路取代。在系统发生全面变化的情况下，促使人们必须采取一种新的方法来研究，进而出现了许多与传统的强调分立电路不同的新课题。本书的主要目的是通过介绍功能模块如何协同工作完成其预定任务，促进对通信系统的深入了解。

尽管转向以数字方式实现系统，但其基本概念、约束条件和已有的通信技术在 20 世纪确定的主题仍保持不变。本书全面介绍各种形式通信技术，并特别强调似乎孤立的概念中突出相互关系的主题因素。为此，特别在前几章安排了框架描述，给出拓展基础概念和重要主题的总体概念框架。例如，所有通信系统可以借助极为重要的特性描述，如：带宽、功率谱密度以及对系统工作产生影响的因素(例如噪声)。当从特征和约束的双重视角观察系统时，读者可以着手建立最初看起来毫无联系的概念之间的关系。结论是，即使是最先进的、高度集成的系统也是由子系统经过完善思路实现的，只有熟悉模拟背景知识才能有好的思路。出于这一原因，前几章基本上对调制技术和模拟电路进行讨论，即使从模拟到数字领域的转换也加快了进度。对模拟电路中基本概念的深入理解，为在数字领域的工作搭建了理解概念的平台。有了这样的基础，从模拟到数字概念的过渡要比初次接触数字电路相对容易。

特色与读者

本书适合作为电子通信、无线通信、通信维护或电信专业的教材。数学分析一直维持在代数和三角的水平，但是足以增强对关键的基本概念的理解。傅里叶级数和复指数表示的内容参见第 1 章和第 8 章。

有几章中的许多插图以及章后的习题改编自杰夫端·比斯利和加里·米勒的《现代电子通信》。那些现在在其第 9 版中出现的经典内容，已经成为该领域的标准。正因为如此，它为这本书的系统级方法提供了良好的基础。目前，整个通信系统均为单个集成电路，而不是由多级的许多集成电路和分立元件所组成。过去的五年，广泛采用数字信号处理(DSP)和软件无线电已成为趋势。相对于同类的教科书或《现代电子通信》以前的版本，本书在数字信号处理和软件无线电这两个主题方面覆盖面更为广泛。最近五年，许多技术都更接近于实验室的新颖产品，而不是主流消费产品。总之，本文采取自上而下的观点，而不是一种侧重于由分立元件电路构建出发的“自下而上”的理念。

本书涉及的主题包括：调制、通信电路、发射机、接收机、数字通信技术、数字调制与解调、电话网、无线通信系统(短程和广域无线通信)、传输线、波的传播、天线、波导和雷达，以及光纤系统。本书旨在为读者提供一个完整的知识结构，特别是在基础章节，让读者可以把许多事实和概念统一成一个整体。通过把不成文的概念明确地联系在一起，

希望能帮助读者从概念层面拓展认识和加深理解，而不是要求他们依靠大量看似无关的事实死记硬背。

其他主要特点如下。

- 回顾了某些基本电子学概念。由于课时的限制或差异，可能会导致学生修完基本电子学及电路课程后很长一段时间才学习通信课程。考虑到这些实际情况，本书已经扩大了最初讲授的“电子基础和设备”(或者“电路”)教程中一些概念的覆盖面，包括正弦波、电抗和谐振的性质以及放大类型，供教师选讲。
- 包含的主题和章末的习题与思考题都是专门针对准备美国联邦通信委员会(FCC)的通用无线电话操作员证书(GROL)考试的内容。在通信行业 FCC GROL 含金量很高；许多公司用它筛选应聘者，在某些行业(特别是航空电子设备行业)必须具有 GROL。
- 扩大了数字通信和 DSP 的覆盖范围。本书涵盖最新一代无线系统应用技术的原理，包括第三代和第四代(3G 和 4G)无线数据网。另外，在后续章节已大幅扩充和增加的内容有：数字调制、DSP、有限冲击响应滤波器、扩频实现方式、正交频分复用和多输入多输出(MIMO)组态。
- 讨论了其他通信教科书中尚未发现的主题。在其他教科书中要么简单介绍或根本没有出现的内容，在此做了讲解或大幅扩充：SINAD(接收机灵敏度)测试，静噪系统设计，DSP 调制/解调、扩频技术，无线网络(包括 802.11n、蓝牙和 ZigBee)，增强型数字蜂窝语音网(GSM 和 CDMA)，2W 集群无线系统，软件无线电和认知无线电，腔体滤波器/双工器/合路器，阻抗匹配和网络分析(包括 S 参数)，麦克斯韦方程以及链路预算和路径损耗计算。
- 介绍了频率分析的概念和复指数。增加了一节讨论基于 DSP 实现的数字调制解调器(现在已成为主流实现技术)背后的某些数学概念。

每门课程都有其核心概念、约束和挑战。电子通信也不例外，本书化繁为简，其中涵盖了大量科研成果和技术。

补充材料

与本书配套的实验教材(ISBN: 0-13-301066-X)。

- 测试题库(计算机测试题库)：这个电子学测试题库可以用于开发定制的测验、测试和考试。
- 在线 PowerPoint 演示文稿。
- 在线教师资源手册。

为了在线访问补充材料，教师需要申请讲师访问代码。访问 www.pearsonhighered.com/irc 网址^⓪，在那里你可以注册一个教师登录代码。注册后 48 小时内，你将接收到一封确认 e-mail 和一个登录代码。一旦接收到你的代码，就可以登录并下载你想要使用的材料。

⓪ 关于本书教辅资源，用书教师可向培生教育出版集团北京代表处申请，电话：010-57355169/57355171，电子邮件：service.cn@pearson.com。——编辑注

温馨提醒

多年来，我一直教授通信电子学。我注意到，许多学生在接触这门课程时感到有些胆怯，也许是因为这门课程过于偏重数学，有些深奥。我也注意到，很多学生并不是绝对地把他们在学校中学习这门课程作为唯一手段，他们在课余时间还在学习这门课程。因而，对电子的乐趣不仅在于动手实践，还因为它提供了修补和实验的机会。有机会用我的双手去工作，去探索，去尝试，是最初吸引我把电子作为一个职业和研究领域的动力。为此，我鼓励你们必须在课余时间抓住各种机会从事与电子通信系统有关的探索。也有许多精心设计的无线广播和通信套件，如 Elenco、TenTec 和 Elecraft 厂商的套件，它们不仅允许你探索这门课程描述的基本通信概念，还将使你们体验到用自己的双手在第一时间打开它所创造的快感。另外，业余无线电爱好者在世界各地往往采用无线电和自己设计的天线，体验与他人通信的乐趣。在美国的业余无线电运营商全国性组织是美国无线电中继联赛 (ARRL)，它位于康涅狄格州纽因顿市，还可访问互联网 www.arrl.org 查找。ARRL 出版物为读者提供了介绍通信系统设计和操作的丰富内容。我也鼓励学生使用本教科书探索课堂之外的领域，正是这种个人鼓励使本书与众不同。

致谢

我要再次感谢杰夫瑞·比斯利 (Jeff Beasley) 和加里·米勒 (Gary Miller) (《现代电子通信》的作者) 把其文稿的整理工作委托给我。关于其第 3 版我接受过训练，有一天我会成为 MEC (现代电子通信) 系列图书的作者之一，这给了我很多惊喜。我感到受宠若惊，只希望能够保持其卓越的风格。我还要感谢我的同事史蒂夫·豪尔沙尼 (Steve Harsany)，他认真地审查了章末的习题与思考题，以及在编写附录 A 中所做出的贡献；还有以前的学生斯科特·库 (Scott Cook) 可贵的协助研究。肯·米勒 (Ken Miller)、乔·丹尼 (Joe Denny)、萨拉·道姆 (Sarah Daum)、布雷克杰马 (Jemma Blake) 和摩圣安东尼奥学院的全体同事，也通过审查书稿提供了宝贵的意见，对此我也深表感谢。当然，任何错误都由我一个人承担。最后，感谢我的导师 Clarence E. 先生——“皮特”·戴维斯，他多年来真正教会我知道什么是无线电！也是他帮我获得了今天的成果！谢谢您。

——Jonathan D. Hymer

摩圣安东尼奥学院

加利福尼亚州核桃市

目 录

出版者的话	
译者序	
前言	
第 1 章 通信基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 通信工作中的分贝概念	5
1.3 信息与带宽	12
1.4 噪声	19
1.5 噪声的指标和计算	22
1.6 故障排除	27
总结	29
习题与思考题	30
第 2 章 振幅调制	33
2.1 振幅调制概述	33
2.2 双边带振幅调制	33
2.3 载波抑制和单边带振幅调制	43
总结	46
习题与思考题	47
第 3 章 角度调制	49
3.1 角度调制概述	49
3.2 时域频率调制	50
3.3 频域 FM	53
3.4 相位调制	63
3.5 噪声抑制	66
总结	70
习题与思考题	71
第 4 章 通信电路	73
4.1 放大器	73
4.2 振荡器	76
4.3 频选电路	80
4.4 混频和乘法电路	89
4.5 锁相环和频率合成	91
总结	97
习题与思考题	98
第 5 章 发射机	100
5.1 AM 发射系统	100
5.2 AM 发射机测量	104
5.3 单边带发射机	107
5.4 FM 发射机	109
5.5 立体声 FM	115
总结	116
习题与思考题	117
第 6 章 接收机	119
6.1 接收机指标	119
6.2 调谐射频接收机	119
6.3 超外差接收机	121
6.4 直接变频接收机	135
6.5 解调和检波	136
6.6 立体声解调	145
6.7 接收机噪声、灵敏度和 动态范围的关系	146
6.8 自动增益控制和噪声控制	151
总结	157
习题与思考题	158
第 7 章 数字通信技术	160
7.1 数字通信简介	160
7.2 脉冲调制与复用	160
7.3 采样率与奈奎斯特频率	165
7.4 脉冲编码调制	167
7.5 编码原理	178
7.6 误码检测与纠正	181
7.7 数字信号处理	187
总结	192
习题与思考题	193
第 8 章 数字调制与解调	195
8.1 数字调制技术	195
8.2 调制信号的带宽	204
8.3 M 进制调制技术	205
8.4 频谱效率、噪声性能与滤波	210
8.5 复指数信号与解析信号	215
8.6 宽带调制	219
总结	232

习题与思考题	233	12.10 阻抗匹配和网络分析	353
第 9 章 电话网	234	总结	355
9.1 概述	234	习题与思考题	356
9.2 基本电话操作	234	第 13 章 波的传播	359
9.3 数字有线网络	239	13.1 电与电磁波的转换	359
9.4 T 载波系统和复用	245	13.2 电磁波	359
9.5 分组交换网络	251	13.3 非自由空间中的波	361
9.6 SS7	253	13.4 地面波和空间波传播	363
9.7 故障诊断	256	13.5 天波传播	364
总结	258	13.6 卫星通信	368
习题与思考题	259	13.7 品质因数和卫星链路 预算分析	375
第 10 章 无线通信系统	260	总结	379
10.1 无线计算机网络	260	习题与思考题	379
10.2 蜂窝电话语音系统	269	第 14 章 天线	381
10.3 移动和蜂窝数据网	283	14.1 基本天线理论	381
10.4 无线安全	286	14.2 半波偶极子天线	382
10.5 双工集群无线电系统	289	14.3 辐射电阻	388
10.6 软件无线电	292	14.4 天线馈线	390
总结	294	14.5 单极天线	392
习题与思考题	295	14.6 天线阵列	394
第 11 章 计算机通信和互联网	297	14.7 专用天线	396
11.1 字母数字码	297	14.8 微波天线	399
11.2 计算机通信	300	14.9 微波系统链路预算和路径损耗 计算	403
11.3 局域网	306	总结	407
11.4 LAN 的搭建	310	习题与思考题	408
11.5 LAN 互联	311	第 15 章 波导和雷达	411
11.6 互联网	312	15.1 传输系统比较	411
11.7 IP 电话	313	15.2 波导的类型	412
11.8 接入到网络	314	15.3 波导传播的物理图解	414
11.9 故障诊断	317	15.4 其他类型的波导	415
总结	319	15.5 波导的其他考虑因素	417
习题与思考题	320	15.6 终端和衰减	418
第 12 章 传输线	322	15.7 定向耦合器	420
12.1 概述	322	15.8 波导能量耦合和谐振腔	420
12.2 传输线的类型	322	15.9 雷达	422
12.3 传输线的电气特性	325	15.10 微集成电路波导	425
12.4 直流电压传播	329	15.11 故障诊断	427
12.5 匹配传输线	331	总结	428
12.6 谐振传输线	333	习题与思考题	429
12.7 驻波比	339		
12.8 史密斯圆图	343		
12.9 传输线应用	350		

第 16 章 光纤	431	16.10 安全	455
16.1 概述	431	16.11 故障诊断	456
16.2 光的特性	432	总结	458
16.3 光纤简介	435	习题和思考题	458
16.4 光纤的衰减和色散	438	附录 A FCC 通用无线电话操作员	
16.5 光组件	441	证书要求	460
16.6 光纤连接	446	缩略语	462
16.7 系统设计和操作注意事项	448	词汇表	477
16.8 综合布线和施工	451		
16.9 光网络	452		

第 1 章

通信基本概念

1.1 概述

控制电子能量实现远距离通信不仅是技术进步的一个里程碑，也是成就人类文明的一大变革。今天电子技术的基本应用继续充满活力和激动人心，因为它仍然使整个社会处在通信革命之中，它正在不断地从完全模拟技术向数字系统转型。数字技术发展的关键是满足未来便携设备高速信息传输日益增长的需求。最新一代的智能手机和其他无线设备的需求，以及高清晰电视的广泛应用与激增，只不过是永无休止发展中的数字技术的最近的两个侧面。

本书对无线和有线、模拟和数字通信系统方面进行了全面论述。与其他学科类似，通信系统的学习是通过基本原理和反复加深这些概念来掌握的。这些基本原理出现在本教材的前三章，但这些基本原理的证明全部在后面的章节进行。进而，所有电子通信系统（无论模拟或数字）所涉及的重要特性都可能就在前面章节分析，如：功率分布和带宽以及限制它们工作的基本约束条件——噪声。这些共性和约束条件在第 1 章讨论。

1.1.1 通信系统与调制

任何通信系统的功能就是将信息从一点传输到另一点。所有系统由三部分组成：发射机、接收机和信道，信道也称为信息传输链路。信道通常是无线的，无论是地表大气层或自由空间（真空）都能行成收发之间的通路；或者信道也可由物理传播媒介形成，例如铜线、传输线、波导或光纤。正如我们很快就可以看到的，信道特性很大程度上决定着系统的最大信息容量。

无线电台或电视台，其发射机使用电波把节目传输到广域分散的接收机中，这就是我们熟知的最好例证。与此同时，其他通信系统还可以使用有线和无线链路，例如：蜂窝电话与其基站采用无线链路通信，但此接口仅仅是由许多基站、交换机和监控设施所组成的庞大的基础设施的一部分。基站与运营的移动交换中心（涉及内部路由和外部运营网络设备）之间的链路可以采用有线或无线的。分属于不同无线和有线运营商的交换中心共同形成的全球电话系统，最大可能是采用光缆互联，其次有可能采用铜线或卫星互联。其他熟悉的例子还有很多：例如卫星电视和无线电服务信息是无线电通过外层空间和大气层到达地面接收机进行传输的；宽带因特网之所以能将信息传到用户中，是因为它是通过由铜线、同轴电缆或有些地区所采用的光纤链路组成的网络来实现传输的。不管它们是简单还是复杂，所有系统均可认为由发射机、链路和接收机这些基本部件组成。

通信领域的基础是“调制”技术。调制是将相对于表示信息的低频电压（例如，声音、图像或数据）在发射载波的高频信号上存留印迹的过程。载波其名称所意味的是它要将运载信息从发射机经由信道到达接收机。后面称为消息（intelligence）的低频信息以保留其原有意义的方式被载波承载，但它占用的频带远高于调制之前的频带。接收消息后要恢复，即从高频载波中分离出来，这一过程称作解调或检测。

在这里，你可能会想到：“信息传输为什么要通过调制/解调这个过程？为什么不直接发送信息？”举个例子，当我们要使用无线电波发送语音消息到周围的接收者时，我们能使用传声器把这个消息由声学振动转换成电信号，再把这些电信号作用到发射天线吗？虽然理论上是可能的，但用这样低的频率直接发送信号会出现两个实际问题：首先无法分享；其次是所需天线的尺寸很大。人声音的频率范围是 $20\text{Hz} \sim 3\text{kHz}$ ，如果在一个给定地理区

域的多点，以无线电波直接发送这些频率，则由于发射波之间的干扰，它们全部都将不能正常工作。另外，要高效传输如此低频率的无线信号，所要求的天线将需要达到数百甚至数千英尺(1ft=0.305m)——这是不切实际的，这个道理我们在第14章就会明白。

解决上述问题的办法是调制，其中将高频载波用作传输低频消息的发送中介，通过所谓的频分复用过程，给定区域内每个发射机单独分配一个载波频率，通信信道(在这种情况下也称无线频带)被分配给多个发射机同步使用，从而允许一个通信介质同时接入多个不同用户。同样重要的是，调制信号使用的频率可提高到足以允许采用合理的天线长度。在通信研究中经常遇到的概念肯定是“调制”，正是由于这个原因，第2章和第3章对于这一重要课题将进行深入分析。

载波的特性。由于载波通常是正弦波，因而波形特点是有序的。回顾基础的交流电理论，正弦波看上去具有图1-1所示形状。例如，由电子振荡器或电枢在磁场中旋转的发电机产生的一个周期波，可以用向量 \overline{OB} 来表示，其长度表示导体内产生的电压峰值，在机械发电机的例子中，该值表示导体切割磁场中的磁力线产生的电压值。如果假设向量 \overline{OB} 起始位置位于图中OA处，我们发现，连续增加角 θ ，向量 \overline{OB} 就沿着OA形成的圆周逆时针移动，旋转的速度或速率直接决定着旋转的频率：旋转的速度越快，形成的波形频率越高。

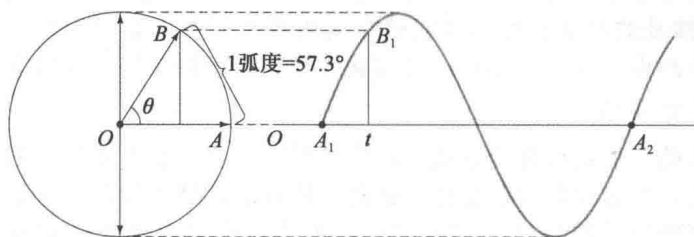


图 1-1 由旋转向量所表示的正弦波

为什么将这一波形称为正弦波呢？回看图1-1，我们在OA的水平延长线上t点处画一条与从A点沿圆周移动到B点距离相同的水平线，从B点延伸水平线到t上面的B₁点，我们发现B₁t点与从半径端点B引到所定义的OA线具有相同的高度。换言之，从B到OA画一条垂线，就形成一个斜边为OB的直角三角形，其垂线长度就等于B₁t，线段B₁t就表示到达B点的旋转向量所产生的瞬时电压的幅度。正因为这个原因，角度 θ 的正弦是 θ 所对的直角三角形的边长与其斜边之比。如果我们定义OB为任意的一个单位长度，那么垂线B₁t的值即为t点的瞬时电压，也即 θ 角正弦所定义的值。正弦波交变电压的瞬时值用通过OB线段沿圆周逆时针旋转到达线段OA每点创建的垂线表示，而对应垂线到达时间用横轴A₁到A₂的长度表示，旋转向量绕一周的每个旅程就表示交变电压的一个完整周期。

如果图1-1中向量 \overline{OB} 沿弧线从A到B的距离等于OB长度，则对应的角度 θ 就等于一个角度测量单位，叫作1弧度。按照这一定义，弧度就是角度所对应的弧长等于半径的弧，近似等于57.3°。因为圆的周长等于其半径的 2π 倍，所以绕圆一周便为 2π 弧度(量值 π 定义为圆的周长与它的直径的比)。所以，如果向量 \overline{OB} 旋转一周，它通过的角度就是 2π 弧度。交变电压的频率等于每秒钟发生的周期数。换句话说，也就是向量 \overline{OB} 绕圆周每秒钟旋转的次数。所以，向量每秒钟绕过的弧度数将是频率的 2π 倍。该量称为角频率或角速度，常用希腊字母 ω 表示。

因而

$$\omega = 2\pi f$$

角速度的单位通常为rad/s或者(°)/s，图1-1中从O点到t点表示时间刻度。

当应用于某个电量(如电压)时，角速度就被指定为所考虑的那个电量(电压)的时间变

化率。换一种说法,电量(如电压或电流)总体变化的 ω 表示循环频率 f 的 2π 倍或每秒完成的循环次数。角速度和循环频率是明显相关的:角速度越高,则频率越高。角速度的概念非常有用,因为许多电现象(特别是容性和感性电抗)都涉及变化速率,所以它们的表达式中总包含一个 π 项。另外,通过变化速率项中的表现波形,我们可以援引一些三角原理来描述单一的或合成的正弦波的行为。由于调制的本质是正弦波组合的分析,表示合成三角关系的功能是非常有用的。

根据以上分析,任何正弦波都可以用下面的表达式表示:

$$v = V_P \sin(\omega t + \phi) \quad (1-1)$$

其中: v ——瞬时值; V_P ——峰值; ω ——角速度 $=2\pi f$; ϕ ——相角。

循环频率包含在 ω 项中,但对于相角 ϕ 可能还不熟悉。相角表示正弦波超前或滞后任意开始时刻 $t=0$ 的瞬时弧度数。在第3章我们将会看到,频率和相角是相互关联的:瞬时频率变化将引起相角变化,反之亦然。

如果表达式(1-1)代表载波,载波受到调制,它的一个或多个特性参数必然发生改变。对于振幅调制(AM),其振幅项 V_P 发生改变;对于频率调制(FM),频率项(包含在 ω 项中)发生改变;若相角 ϕ 发生改变,则产生相位调制(PM)。由于频率和相位之间存在特定关系,后两种调制形式常统称为角度调制。在任何时候应该牢记一个事实:振幅、频率和相位是正弦载波仅能改变的特征参数。在任何系统中,调制的本质是:无论出现多么复杂的情况,最终只能改变这三个参数中的一个或多个。

虽然调制肯定不是无线系统独有的,但这个概念最熟悉的应用是AM和FM无线电广播。无线电波的发现促进了物理科学电学的诞生,而电子学作为物理科学领域的一个学科,很多核心思想大部分都出自于那些最初开发用于无线电通信的应用。无线系统将是本教材许多章节的重点内容,不仅因其在历史上的重要性,也因为早期无线系统中首次研制的许多电路经修改后的形式至今还用于其他电子学领域。

1.1.2 电磁波频谱

无线系统发射与接收之间究竟存在着什么?回忆学过的电的基础知识,电和磁是交织在一起的,一个影响着另一个。磁场围绕移动着的电荷(即电流);同样,每当磁场和导体间发生相对运动时,电路中就会产生电流。电场和磁场二者无论是通过电压、电位变化还是通过电流流通而相互产生的,在普通导体以及“自由空间”(即真空中),电场和磁场将互相垂直,并以相互垂直方向行进,此能量形式称为电磁能。对于不变化的即直流电流和电压,电场和磁场二者的大小是常数,所以在自由空间中不再相互产生。然而对于交变电流,电场和磁场具有产生电压和电流的特性,一个正弦源以电(电压)和磁(电流)场的工作频率产生,其形状为正弦的且相互垂直。

电磁能表现为电荷在导体中运动,但对于交流情况该能量也存在导体的范围之外,事实上,传播远离其源。采用适当的传感器,把能量从一种形式变换成另一种形式,在导体中流动的交流电就会变为超出导体的物理局限而存在的连续波(该波是不依赖物质的能量转换的机械波)。正如导体中那样,在自由空间电磁波的存在恰恰就是存在电场和磁场。电压电位定义的电场和加速电荷所产生电场都会产生电流,电流反过来又会产生垂直于电场的磁场,移动磁场又会由此创建另一电场,以此类推。这样,由运动电场和磁场所产生的电磁波就从其产生点通过空间传播到它的目的地。在无线系统中发射机和接收机间的传输是通过天线实现的。发射机产生的电流供给其天线并被转变成电磁能。而在目的地端,运动的电磁场触碰到接收天线导体,便在接收机输入天线内产生电流。

电磁能存在于从直流(0Hz)直到可见光甚至更高频率电磁波内。的确,光是电磁波。由于电磁波频谱是由信号占据的所有频率范围内正弦成分组成的,许多我们熟悉的领域和服务都沿用电磁波频谱。音频,转化为人耳可以听到的声波形式,其频率范围从20Hz到大约20kHz。50kHz及以上的频率范围是无线电波频率,在这个频段,电磁能可以产生并

由合理长度的天线辐射。调幅广播，其频率范围从 540kHz 到 1.7MHz；调频广播的波段分配在 88~108MHz，20MHz 的频段。蜂窝电话依据载波和地理特征所使用的频率范围在 800MHz 或 1.8~2.1GHz 内。家庭微波烤箱的微波频率为 2.4GHz，正如个人电脑的无线网络。其他家庭无线设备，其中一些无绳电话和较新的最佳本地网工作频率为 5.8GHz，这些频率都处在波长很短的微波范围，所需要的专门技术将在后续章节介绍。

这些说法在通信系统中可以按载波频率进行分类。表 1-1 给出了常用于无线服务的电磁波频谱的一部分名称。需要说明的是，电磁波频谱还可以扩展到超出表中所表示的更高频率。在表中处在特高频以上的频段也叫做毫米波段，这对于物理学家和天文学家是特别感兴趣的。频率更高的光谱范围，包括红外线，可见光和紫外线，非常高的频率就是 X 射线、 γ (伽马)射线和宇宙射线。

表 1-1 无线电频谱

频率	名称	缩写
30~300Hz	极低频	ELF
300~3000Hz	音频	VF
3~30kHz	甚低频	VLF
30~300kHz	低频	LF
300kHz~3MHz	中频	MF
3~30MHz	高频	HF
30~300MHz	甚高频	VHF
300MHz~3GHz	超高频	UHF
3~30GHz	极高频	SHF
30~300GHz	特高频	EHF

1.1.3 通信系统

图 1-2 以方框图形式表示了一个简单的通信系统。调制级具有两个输入——载波和

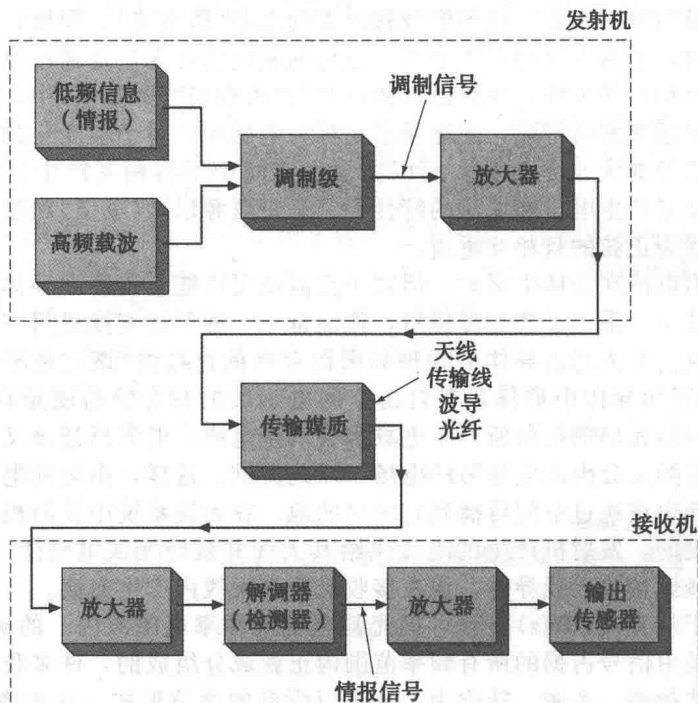


图 1-2 通信系统框图

信息信号，二者合起来产生调制信号，这个信号随后被放大，在大功率无线系统中它通常要放大成千上万倍，随后才传输。已调信号的传输可以是无线方式或物理媒质的，如：铜线、同轴线或光纤。接收单元提取传输来的信号并重新放大，以补偿因为传输而引起的衰耗。被放大的信号随之作用于解调器(常称为检测器)，这样信息就从高频载波中被提取出来。解调出的信息被馈送到放大器，使之提高到能激励扬声器或任何其他输出传感器。

从最基本的到最复杂的所有通信系统，基本上都要受到两个因素限制：带宽和噪声。因为这个原因，我们将投入相当大的篇幅研究这些重要问题，这是告知和统一通信技术的发展主题。同时，这些问题也是由最基本到最复杂的所有通信系统的首要主题之一。可使用一个多世纪以来形成通信工程基石的一些原理，特别在前三章，将用很多篇幅来研究这些主题，因为它们揭示了涵盖后续各章的系统级要讨论的问题。下面，我们必须讨论分贝这个单位，因为它适用于所有的通信系统问题的研究。

1.2 通信工作中的分贝概念

任何通信系统所定义的特性都会遇到很宽范围的功率电平。例如，广播电台发射机可能提供数万瓦特功率的信号到天线，但在其覆盖范围的接收机天线得到的信号功率却在皮瓦数量级(10^{-12} W)内。一个简单的收发信机(由发射机和接收机组成，如移动双向无线电台)所具有的功率从接收机的飞瓦(10^{-15} W)数量级到发射机输出的千瓦(10^3 W)数量级或更高。在接收机一侧，信号电压处于毫伏(10^{-3} V)或微伏(10^{-6} V)电平数量级，考虑到差别这样大的变化范围值通常的测量单位都是难以表示的。但功率和电压很宽的变化范围在通信系统分析中经常遇到，因而涉及同时计算非常大和非常小的电量数值。正是这个原因，我们所采用的测量单位不仅要考虑测量范围的扩展，而且要使得计算所涉及非常大或非常小量的乘法和除法更容易处理。当其中功率、电压、电流的量值以比值的对数形式表示时，这一测量就变得相当容易。

术语分贝(dB)是我们熟悉的声音强度的单位。在声学中，分贝表示声压水平相关比率，0dB的环境认为是绝对沉默的，从140~160dB范围表示声压处在喷气发动机附近。该术语是从贝尔这一单位导出的，为了纪念亚历山大·格雷厄姆·贝尔(Alexander Graham Bell)而命名。电话和声音电平之间的历史关系是不意外的，电话工程师们以及早期在人耳朵上实现的设备觉察不到音量的线性变化。电话系统所配置的放大器和信号处理设备，必须在长距离范围能够保持人声音的自然度。研究人员发现，人类感知量的增加可更准确地模拟成一个指数关系，其中功率只有增加10倍而不是倍增，音量或响度方可感到明显倍增。分贝(1/10贝尔)原来定义在声学或电系统中用于表示较小感知的声强变化。

分贝这一符号绝不是仅仅用来表示最终转化为声波形式的声级或其他信号，该术语多用于差别较大的两个感兴趣数量的比较。虽然分贝来源于功率比，但也用来表示电压比和电流比。基于分贝的计算被广泛用于噪声分析、音频系统、微波系统增益计算、卫星系统链路预算分析、天线功率增益、光预算计算以及其他通信系统测量。表示比值的有增益和衰减。当参考绝对电平时，分贝这一单位可以与那些代表绝对功率、电压或电流的电平时同时使用。

我们将会看到，由分贝定义的以及很多派生而来的对数的特性及其效用，由于这些特性可能是读者不熟悉的，所以我们将首先详细介绍这些特性。

1.2.1 对数

简单地说，对数就是指数。你们必须非常熟悉“10的幂次”的表示法，其中数字10本身自乘一次或多次后，产生一个每次增加10的一个因子的操作过程(你可能也听说过数量级这个术语，当正确使用于科学的语境时，这种表达是指10的幂次的关系)。上标数称为指数，表示10的倍数出现在这个表达式中的数目。这样， $10 \times 10 = 100$ ，就可表示成

$10^2=100$ ，因为数字 10 被它本身自乘了一次产生的结果就是 100。同样的 $10 \times 10 \times 10 = 1000$ ，表示成指数形式是 $10^3=1000$ 等等。作为一种表达，在表达式 $10^2=100$ 中，上标 2 称为指数，10 称为基数，结果 100 称为得数；指数 2 也可称为以基数 10 为底的 100 的对数。这样的表示还可写为 $\log_{10} 100=2$ ，并读作“以 10 为底 100 的对数等于 2”。更一般的说法，一个数对于给定底的对数(log)就是基数上标的那个“幂”。任何一个数都可以表示为一个基数的对数，在分贝表示中总是选用底数为 10 即常用对数。对于常用对数底数可不给予明确表示，这样上面的表达式将简写为 $\lg 100=2$ ，并称作“100 的对数等于 2”。按照指数 2 同样的推理，表达式 $10^3=1000$ 可表示为 $\lg 1000=3$ 。100 和 1000 之间任何数的常用对数，即对于 100~1000 之间的任何数以 10 为底的幂将处在 2~3 之间。换言之，100~1000 之间的一个数的对数将是 2 再加上一些小数部分，其整数部分叫做特征数，小数部分叫做尾数；这两个值过去已被列在便于使用的对数表中，而现在很容易用科学计算器计算，常用对数在科学计算器上用“log”键表示。它是与自然对数有区别的，自然对数的底数以 e 表示，其值等于 2.71828...，自然对数在科学计算器上用“ln”键表示，是函数 e^x 的指数。这些术语描述了一些自然现象，包括电容器的充电和放电速率，以及电感周围的磁场的扩展与收缩速率，自然对数不应用于分贝计算。

非常大和非常小的数字变换成指数形式，便可使用指数的两个非常有用的特性，叫作乘法法则和除法法则，以便发挥作用。乘法法则说明以指数形式表示的两个数相乘，其结果是乘数相乘，指数相加，即

$$(A \times 10^n)(B \times 10^m) = (AB) \times 10^{n+m}$$

在上面的表达式中，注意答案中 n 与 m 相加。如果这些数被变换成它们等价的指数形式，就不必进行非常大数的乘法。同样，指数形式的大数除法按照除法法则，有

$$(A \times 10^n)/(B \times 10^m) = (A/B) \times 10^{n-m}$$

上述除法法则对于大数或小数相除简化为其指数的简单减法。这些特性虽然是非常有用的，但当所有的计算都必须完成时，笔和纸仍是不可缺少的。

由于对数是基于指数的，它所遵循的有关指数法则也适用于对数，有关的对数法则可综合如下：

$$\lg(ab) = \lg a + \lg b \quad (\text{法则 1})$$

$$\lg(a/b) = \lg a - \lg b \quad (\text{法则 2})$$

且有

$$\lg a^b = b \lg a \quad (\text{法则 3})$$

因此，使用对数能够完成原来我们所说的以一种更方便的形式比较两个非常大或非常小的数字。另外的优点是上述法则的扩展：因为以分贝为单位的量表示的是功率、电压或电流的比，这些分贝数就可以简单地相加减。那些非常大和非常小的数的乘法和除法就简化为它们分贝表达式中的对数相加或相减。

对数的反转是反对数，对于给定底数的一个数的反对数(antilog)就是简单地按照底数提升到该数。例如(假设是常用对数的反)， $\text{antilg} 2 = 10^2$ 或 100，对数或反对数很容易用计算器求得。与上述计算相同，反对数确定的表示是 10^x ，而有的计算器可能有一个 INV 键提供反对数函数，计算时要与 log 键配对使用。

1.2.2 以分贝表示功率比

电子学中，分贝最基本的定义是功率比的对数，即

$$\{P\}_{\text{dB}} = 10 \lg(P_2/P_1) \quad (1-2)$$

也就是说，式(1-2)说明 1dB 为 $10 \lg(P_2/P_1)$ 为 1 时的功率级。按照惯例，表达式分子中的 P_2 应处在较高的功率电平，这样所得结果为正数。该惯例约定之时，考虑到对数表的制作是比较容易的，对于计算器普及的今天，本约定不再是绝对必要的。但是请注意，如果较小的功率值出现在分子中，结果将得到一个负的分贝值，表示功率衰减(负增