



国外名校最新教材精选

WILEY

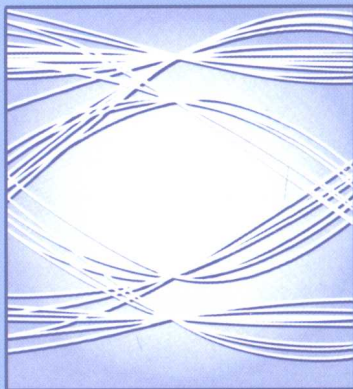
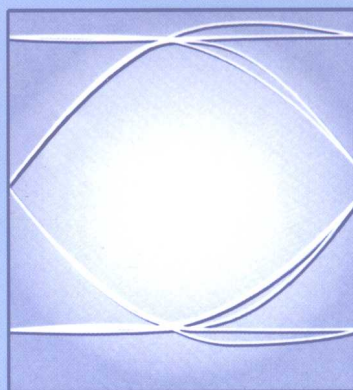
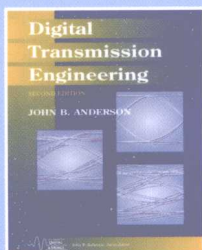
数字传输工程

Digital Transmission Engineering

〔美〕 约翰·B·安德森 著

任品毅 冯兴乐 译

(第2版)
Second Edition



JOHN B. ANDERSON



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

 国外名校最新教材精选

Digital Transmission Engineering
(Second Edition)

数字传输工程
(第2版)

[美] 约翰·B·安德森 著

John B. Anderson
Lund University

任品毅 冯兴乐 译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

JOHN B. ANDERSON

Digital Transmission Engineering, Second Edition

ISBN: 978-0-471-69464-9

Copyright ©2005 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning, or otherwise, except as permitted under Section 107 or 108 of the 1976 United States Copyright Act, without either the prior written permission of the Publisher, or authorization through payment of the appropriate per-copy fee to the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, (978) 750-8400, fax (978) 750-4470, or on the web at www.copyright.com. Requests to the Publisher for permission should be addressed to the Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, (201) 748-6011, fax (201) 748-6008, or online at <http://www.wiley.com/go/permission>.

All Right Reserved. This translation published under license.

陕西省版权局著作权合同登记号 图字 25-2006-021 号

图书在版编目(CIP)数据

数字传输工程:第2版/(美)安德森(Anderson,J.B.)著;
任品毅、冯兴乐译. —西安:西安交通大学出版社,
2008.10

书名原文:Digital Transmission Engineering, Second Edition
ISBN 978-7-5605-2814-4

I. 数… II. ①安…②任…③冯… III. 数字
传输系统 IV. TN919.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 141041 号

书 名	数字传输工程(第2版)
著 者	(美)约翰·B·安德森
译 者	任品毅 冯兴乐
策划编辑	赵丽平
责任编辑	鲍 媛

出版发行	西安交通大学出版社 (西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)
网 址	http://www.xjtpress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行中心) (029)82668315 82669096(总编办)
传 真	(029)82668280
印 刷	西安交通大学印刷厂

开 本	787mm×1092mm	1/16	印 张	22.75
印 数	0001~3000		字 数	540 千字
版次印次	2008 年 10 月第 1 版	2008 年 10 月第 1 次印刷		
书 号	ISBN 978-7-5605-2814-4/TN·111			
定 价	48.00 元			

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

译者序

时光飞逝,数字通信也在向着高传输速率和高移动性方面不断发展。其支持的业务从语音到多媒体业务,包括实时的流媒体业务,同时也应满足高速移动环境下的可靠传输。本书全面系统地论述了数字通信系统的基本理论,并介绍了典型的数字通信系统及数字通信系统中采用的关键技术,其中的思想和方法正应用在当今复杂系统中。本书内容完整,可读性强。全书共分为7章,内容上注重理论和实际应用的结合。在每章后面既有帮助读者理解所学内容的助学例题,又有帮助读者巩固所学内容的大量课外习题。

本书译自约翰·B·安德森所著的“Digital Transmission Engineering (Second Edition)”。该书作为通信工程专业高年级本科生或研究生通信原理课程教材,被国外大学普遍采用,影响广泛,因而具有较高的知名度。此次新版在第一版的基础上,增加了反映通信系统最新发展技术方面的内容,并重新组织、改写而成。

本书是作为高年级本科生和一年级研究生的教材以及希望能从中完成对该项技术学习的工程师们的参考书而编写的。其内容表述符合教学法,同时在每章末尾都配有难度适中、指导性较强的习题。

全书由任品毅和冯兴乐翻译及整理,其中任品毅参与了第1~4章的工作,冯兴乐参与了第5~7章的工作。在翻译过程中,得到了本书的责任编辑赵丽萍和鲍媛两位老师的大力协助,没有她们的帮助,本书将难以完成,在此表示衷心的感谢。最后,但绝不是最少的,感谢冯亦琳、冯佳、汪瑞、吴广恩四位研究生对本书文稿的协助整理。由于本书内容的新颖性和译者不可避免存在的主观片面性,书中不妥和错误之处在所难免,殷切地希望广大读者及同行专家批评指正。

第1版前言

本书讨论了数字数据信号通过时间和空间传输,其中的思想和方法正应用在当今复杂系统中。既然设计背后的思想精妙深奥,理论和概念就显得至关重要,但工程实践和验证也是不可或缺的,并需要同等的重视。故本书努力将清晰的理论基础和工程视角结合起来。

数字传输不是基础课程。作者记得在19世纪60年代中期学习数字通信理论和计算机编程时,被告知这些是很难的科目,与其问路于盲不如自己慢慢消化,毕竟那时这两门课都是新事物。幸运的是,自那以后我们已经学会如何讲授这些课程。编程被证明是较容易的,一如所料,孩子们都能学会编程甚至用其来恶作剧。另一方面,数字传输仍然是一门高阶课程。30多年后的今天,学生和应用工程师们仍需要4~5年的训练才可以和60年代人掌握的东西一样多。

特别是在美国,本科教育比欧洲早一年结束,且现在有一种把数字通信下放到本科教育阶段的趋势。毋庸置疑,如果只涉及一些较简单的原理这是可行的,但是诸如一部CD播放机或蜂窝电话的技术细节则过于精妙复杂,显然不能为没有经过科班训练的工程师所掌握。里德-所罗门编码和最大似然序列估计也不在日常经验之内。本书的目标不是淡化这些问题,而是尽可能用简单有效的方法阐释它们。

从少数研究者和发明家似懂非懂的发现开始起步,任何一门新的技术课程都有其自然的演进。如果该领域相当重要,它将从期刊文献和专利逐渐过渡到专题论著和教材,这个过程艰难且耗时费力。发现来之不易,找到一点儿教学阐释,且不要说好的,同样是艰巨的挑战。数字通信工程领域的教材(不是指开拓性的专著)开始

出现于 1975 至 1985 年之间。我们现在远过了早期教材阶段。数字通信已经成熟,并几乎没有什么未解的谜团。是时候考虑什么才是对这门课程的最好阐释了,作者希望其中的一些能在本书中找到。为了更简单地讲解并引入更浓厚的工程氛围,我们改写了基带脉冲和载波调制的全部内容。同步和信道的物理本质是实际通信链路中设计的两个关键部分,通常它们都占用一半以上的设计量。在同等教材中本书首次给予它们各自一个章节的详细讨论。均衡部分则是对现有研究成果的重新组织。

1~5 章的内容是作者多年来给一年级研究生讲授数字通信入门课程的基础。它全面涵盖了脉冲和载波调制、干扰和失真、网同步,以及信道、天线和传播的工程内容。此外,差错控制编码、移动信道和某些高级技术组成了第 6、7 章和 5.4 节,供学有余力的同学使用。

本书假定读者已经学习过概率论、变换和系统论的专门课程。模拟通信课程的学习对于理解本书也是有帮助的。我们努力避免过多使用随机过程的知识,尽管后者会提供许多有价值的见解并且是进一步学习(如检测理论)的基础。

我们尝试避免某些教材百科全书式的体例,用较大的篇幅涵盖太多的细节但对学生来说却难以阅读。这些书自有其用处,但却不适合一年级的水平^①。我们试着采用中等篇幅充分解释有限的问题,删去了许多重要但琐碎的问题,但并非不尊重研究这些问题的科学家和工程师。我们在正文中引用参考文献的优先原则对某些作者可能意味着不公正。首要原则是引用学生进一步学习所需要的最可读的资源。然后引用有关该问题发展历程的文献,第三才是近期的进展。

基于软件算法的信号处理在通信系统中起到了越来越重要的作用,所有的工程师们工作中都需要一台计算设备。有鉴于此,在正文中的很多地方都包含了基于 MATLAB 的小程序。一些重要的作业也需要使用这些简单的程序。学生和教师都应知道:掌握软件工具的使用和相关的信号处理思想需要大量时间。

① 这是欧洲工科课科最后一年的水平。

软件课堂演示和自己使用之间有很大的不同。作者的经验是熟练地使用这些工具需要增加 15% 的课程时间(两周)。

本书所包含的教学思想和内容取舍在过去 15 年的教学中不断发展。难以想象一本好的教材没有多年与大量学生的互动就能形成。本书中的大多数文字都可追溯到某一次课堂提问和随后的讨论,也许仅仅是某一次汗颜的讲述。为此,本书献给:使本书得以形成的学生们。我们希望他们的痛苦现在能少一些。

在此很荣幸地感谢一些组织和个人。首要的是,本书的出版得益于以下两个基金会的支持:德国洪堡基金会,它在 1995 年授予作者洪堡再邀请研究奖金,和瑞士科学工程委员会,它给予作者 1996~1997 信息技术国家访问讲座教授资格。为支持学术工作和著作而给予这类奖励是悠久的传统,现在有一点半途而废。作者衷心希望再次见证两会的慷慨和理想。

本书最初的 LaTeX 手稿由 Priscilla Magilligan 和 Lena Månsson 录入。他们令人鼓舞的不懈努力和很多建议都值得赞赏。再次感谢 IEEE 出版社的 Dudley Kay, John Griffin 和 Savoula Amanatidis 的支持和鼓励。许多同仁的阅读、评论和研讨促成了本书的完成,特别感谢隆德大学的 Rolf Johannesson 和 Per Ståhl;德意志航空学会和慕尼黑科技大学的 Joachim Hagenauer 和 Robert Schweikert。伦斯勒理工学院的 Asad Islam 帮助完成了习题解答。来自行业同事的支持对本书来说是很重要的。特别感谢爱立信公司的 Sandeep Chennakeshu 和 Kumar Balachandran,朗讯科技的 Krishna Balachandran,通用电子研发公司的 Richard Frey。最后,作者要感谢妻子 Janet 一直以来的支持。当阅读本书有一点沉闷的时候,读者不妨尝试看看她的大作。

约翰·B·安德森
瑞典,隆德
1997 年 6 月

第2版前言

时光飞逝,数字通信也在不断发展,是推出修订版的时候了。第1版的指导思想集中于阐释核心问题及理论和实践的有效结合。这受到了普遍欢迎,因此我们在第2版里将强化这一做法。为此新补充了一些程序和例题,同时删去了部分看起来有些偏离的主题。使用过第1版的老生会注意到新版增加了频谱扩展一节,同时移动通信部分更加完善和适合教学。这反映了过去七年里蜂窝移动网络的日渐重要。对光纤传输部分的处理亦是如此,并增加了一倍数量的课后习题。这些新增部分固然最显而易见,但某种程度上几乎书中的每一个句子都经过重新润色。希望已尽可能多地减少了模糊和不妥之处,并且第1版中的错误均已修改。

过去七年里许多讲授本书的同仁和我们的大量讨论使我们受益匪浅。很荣幸在此感谢 Gray Saulnier 和 James Leblanc,以及 Goran Lindell,他也是本书的评审。我们必须感谢为本书的出版而辛勤工作的编辑 Tony VenGraitis 和 John Griffin 以及 Wiley 的工作人员。最后要感谢所有的学生,无论他们是在瑞典、欧洲,还是在美国和加拿大,他们一直在讨论、关注本书,并帮助我发现其中的纰漏。因此,本书献给他们。

约翰·B·安德森

瑞典,隆德

2004年9月

目 录

译者序

第1版前言

第2版前言

第1章 数字传输的引言	(1)
1.1 一些历史和一些主题	(2)
1.2 为什么要数字化	(5)
1.3 本书的内容	(7)
1.4 计算机程序	(9)
参考文献	(10)
第2章 基带脉冲传输	(11)
2.1 引言	(11)
2.2 脉冲串的性质	(12)
2.3 脉冲串频谱	(24)
2.4 传输失真	(29)
2.5 信号空间分析	(34)
2.6 最大似然接收机	(45)
习题	(60)
参考文献	(63)
第3章 载波传输	(65)
3.1 载波调制	(65)
3.2 相移键控	(67)
3.3 正交发射机和接收机	(77)
3.4 广义的相移键控	(80)
3.5 正交幅度调制	(86)
3.6 频移键控	(98)
3.7 FSK 检测器	(108)
3.8 传输损伤	(112)
习题	(118)

参考文献	(122)
附录 3A:带通滤波器的基带表示	(123)
附录 3B:带通噪声	(126)
附录 3C:离散时间实现和仿真	(129)
第4章 同步	(132)
4.1 一些同步原则	(133)
4.2 相位同步器电路	(134)
4.3 模拟锁相环	(142)
4.4 PLL 对噪声的响应	(153)
4.5 设计实例	(159)
4.6 数字锁相环	(165)
4.7 符号定时恢复	(173)
4.8 帧同步与网络	(178)
习题	(191)
参考文献	(196)
附录 4A:QPSK 中的数据噪声	(197)
第5章 信道	(200)
5.1 波导信道	(201)
5.2 简单无线电链路	(208)
5.3 陆地无线电信道	(222)
5.4 衰落信道	(229)
习题	(242)
参考文献	(245)
附录 5A:衰落的仿真	(247)
附录 5B:衰落的随机过程分析	(248)
第6章 纠错编码	(251)
6.1 信道模型和信息论	(252)
6.2 奇偶校验码基础	(257)
6.3 编码性能	(263)
6.4 格型码	(269)
6.5 格型译码器	(279)
习题	(285)
参考文献	(288)
第7章 先进主题	(290)
7.1 离散时间信道模型	(291)

7.2 均衡器 I:线性均衡器	(302)
7.3 均衡器 II	(310)
7.4 衰落信道上的调制	(317)
7.5 非相干解调	(321)
7.6 扩展频谱	(326)
习题.....	(335)
参考文献.....	(340)
附录 7A:最小均方误差均衡器	(341)

程序列表

- 程序 2.2-1 RC 脉冲
- 程序 2.2-2 根升余弦脉冲
- 程序 2.2-3 脉冲串
- 程序 4.3-1 两极点 PLL 的误差响应
- 程序 4.3-2 二重积分 PLL 的误差响应
- 程序 4.6-1 模拟到离散时间的变换
- 程序 4.6-2 离散时间阶跃误差响应
- 程序 5A-1 相关瑞利幅度
- 程序 7.1-1 存在 ISI 时信号之间的距离
- 程序 7.1-2 匹配滤波器及 PAM ISI 模型
- 程序 7.2-1 PAM 模型的 LE-LS 及 DFE-LS 均衡器
- 程序 7.2-2 MF 模型的 LE-LS 及 DFE-LS 均衡器

主要例题列表

每个程序中都包含了已应用的例子。

- 例 2.2-1 T1 载波系统
- 例 2.2-2 脉冲 $\text{sinc}(t/T)$
- 例 2.2-3 升余弦脉冲
- 例 2.2-4 NRZ 脉冲作为奈奎斯特脉冲
- 例 2.2-5 根升余弦脉冲
- 例 2.3-1 二元 RZ 格式
- 例 2.3-2 二元曼彻斯特格式
- 例 2.4-1 窄带脉冲的滤波
- 例 2.4-2 宽带脉冲的滤波
- 例 2.5-1 简单脉冲的 Gram-Schmidt 过程
- 例 2.6-1 离散时间 ML 检测
- 例 2.6-2 对脉冲串积分和清零接收机
- 例 2.6-3 无任何滤波器——采样接收机
- 例 2.6-4 孤立脉冲的粗糙匹配滤波
- 例 3.2-1 Sinc Pulse BPSK
- 例 3.2-2 Sinc 脉冲 QPSK
- 例 3.5-1 V.32ALT 调制解调器星座图
- 例 3.5-2 V.29 调制解调器星座图
- 例 3.6-1 小调制指数的二元和四元 CPFSK
- 例 3.6-2 二元 CPFSK 的能量-效率
- 例 3.6-3 最小频移键控
- 例 3.6-4 宽带 FSK 无线电传打字机
- 例 3.7-1 GSM 数字蜂窝电话中的 GMSK
- 例 4.4-1 进行与不进行编码的 PSK
- 例 4.5-1 无噪信道中的脉冲成形 QPSK
- 例 4.5-2 深空 BPSK 链路

- 例 4.5-3 蜂窝无线通信的符号定时
- 例 4.6-1 采用窄带环路的QPSK定时——例 4.5-1 的回顾
- 例 4.8-1 一个长度为 7 的 PN 序列
- 例 4.8-2 一个初级标志
- 例 4.8-3 T1 帧捕获
- 例 4.8-4 美国 TDMA 数字蜂窝电话帧
- 例 4.8-5 DS1 到 DS2 的复用器
- 例 5.1-1 22 AWG 双绞线参数
- 例 5.2-1 室温电阻
- 例 5.2-2 测量 F
- 例 5.2-3 具有长天线引入线的标准接收机
- 例 5.2-4 同步地球卫星 UHF 上行链路
- 例 5.2-5 地球到火星链路
- 例 5.3-1 小角度地球-卫星链路
- 例 5.3-2 50 km 链路的衍射
- 例 5.3-3 标准陆地链路
- 例 5.4-1 GSM 移动电话中的衰落
- 例 6.1-1 BSC 信道容量
- 例 6.1-2 BEC 信道容量
- 例 6.1-3 二进制输入 AWGN 信道
- 例 6.2-1 汉明编码
- 例 6.4-1 码率为 $1/3$, 内存为 2 的卷积码
- 例 6.4-2 码率 $2/3$, 存储长度为 2 的卷积码
- 例 7.1-1 六极点巴特沃兹二进制信道
- 例 7.1-2 模拟单极点指数二进制信道
- 例 7.1-3 离散时间单极点指数二进制信道
- 例 7.1-4 六极点巴特沃兹 ISI 的离散模型
- 例 7.1-5 单极点指数 ISI 的离散模型
- 例 7.2-1 六极点巴特沃兹的 LE-LS 均衡器
- 例 7.2-2 指数 ISI 的 LE-LS 均衡器
- 例 7.3-1 具有麻烦零点的信道上的 DFE-LS
- 例 7.6-1 第三代 WCDMA 系统

第 1 章

数字传输的引言

- 1.1 一些历史和一些主题
- 1.2 为什么要数字化
- 1.3 本书的内容
- 1.4 计算机程序

什么是数字传输？它是如何产生的？它为什么会问世？我们如何应用和分析系统？这些问题是促使我写此书的动机，而最后一个问题则是本书的主要话题。

现代电信业是上两个世纪三个伟大趋势的汇合：首先，是以电报、电话和无线电形式的电磁信号技术的发明；其次，是使得这些发明实用和有效的数学理论的发展；最后，微电路，即“芯片”，使得这些发明变小、变快、更可靠，并且非常便宜。

人们相互之间有通信的需求这一点必须加上，这无需解释并且可能是简单、绝对的。这种需求的刺激也反复资助了新通信业务的产生，不管它是 19 世纪 60 年代穿越伦敦的电报业务还是 20 世纪的蜂窝电话。一个投资公理曾经说到，美洲电话和电报总是一项好的投资：形式好的时候，股票就会上涨；形式不好的时候，人们就会相互转告并且抱怨。AT&T 公司是一个有百年历史的巨人，自 1985 年以来已经消失，并且被其他公司所替代。为什么会这样是一个有趣的问题，但不是本书的问题。对我们而言，现在最重要的就是仅有少量的领域——在我们的脑海中就是运输和健康——吸引着投资，并且狂热的公众支持着通信的相关领域。这一事实是数字通信的经济基础。

尽管本书是关于工程分析的书，但是在第 1 章中留有了一些讨论关于发展历史的空间，以及为什么模拟通信会为数字通信让路这一基本问题的空间。若没有这些，将不会有人对工程感兴趣。本书的规划对这一章进行了总结。

1.1 一些历史和一些主题

表 1.1 中给出了在电子通信悠远迷人的历史中的一些主要事件。一些列出的日期可能会令人误解,因为潮流和发明通常都产生于混乱之中并且在很多地方同时产生。基于此原因,很多日期都是近似的,尤其是一些近期变革的日期很难确定。一些变革,诸如我们现在称之为软件算法的描述,仅在时间上演进缓慢。关于该历史一个特别可读的研究,其较为中立的立场,以及其人性的推理已经由 I. Lebow 所发表^[1]。其简介请参见参考文献[4]。

表 1.1 数字通信历史中的重要里程碑

年代	事件
约 1820	奥斯特证明了电流可以产生磁场
1830~1840	亨利发现了感应现象;法拉第和其他人证明了改变磁场将产生电场
1834~1842	多种电报系统的演示
1844	莫尔斯商用电报,从巴尔的摩到华盛顿
1864	麦克斯韦发表了其电磁理论
1866	第一个永久的越洋电报
1860~1876	贝尔和其他公司的各种电话系统演示
1878	由加拿大汉密尔顿的贝尔建立了第一个电话交换系统
1887	赫兹的实验对麦克斯韦定理进行了验证
1894~1898	马可尼和其他人在远距离上演示了无线电通信
1901	马可尼发送了第一个越洋的无线电信号,从大不列颠到加拿大
1904~1906	弗莱明发明了二极管;德福雷斯特发明了三极管
1907	费森登将语音传输了 320km
约 1918	阿姆斯特朗设计了超外差接收机
1920	美国宾夕法尼亚州匹兹堡的 KDKA 电台,广播了第一个现代无线广播
约 1925	伦敦的贝尔德演示了机械电视系统
1928	约翰逊和奈奎斯特的高斯热噪声文章
1929	斯福罗金演示了电子电视系统
约 1933	阿姆斯特朗设计了调频
1936	伦敦的大不列颠广播公司播放了商用电视
约 1940	第一次使用雷达
约 1945	对雷达设计了匹配滤波器
1945~1950	建造了早期的计算机;采样定理的证明问世;信号空间理论应用于通信
1948	美国的布拉顿、巴丁和肖克利演示了半导体;香农发表了其信息论
1950~1955	计算机软件起步;微波远程传输起步

续表 1.1

年代	事件
1953	第一个越洋电缆
约 1958	匹配滤波器应用于通信系统;第一块芯片演示
约 1960	纠错码的研发快速起步
约 1960	激光于美国问世
约 1965	通信卫星使用有源异频雷达收发机;到太空探测器的远距离通信起步
1967	福尼提出了格码;维特比提出了维特比算法
1970	低损耗光纤系统演示
1970~1975	微处理器问世;大规模集成电路问世;语音和图像数字化的研发快速起步
约 1976	频带高效的编码调制出现;第一次安装数字电话干线
1979	接收到来自木星的图像
约 1980	开始安装数字光纤电话干线
1985~1990	在欧洲开始盛行蜂窝移动电话
约 1990	因特网的使用加速
1992	第一个数字移动电话系统 GSM 在欧洲问世

注:大部分日期是约数。

研究历史的一个原因就是认清导致今天这一种结构的潮流。我们现在浏览表 1.1,并且阅读其关于数字通信系统的发展趋势的说法。尽管在下面的某些部分中这是显而易见的,但是我们仍然对之进行讨论,以避免这一更大的危险。

就我们现今所知,通信起始于 19 世纪。非常有趣的是,除了照明光纤,我们今天所用到的电磁传输技术,也就是说无线和有线电报和电话,均是在 19 世纪问世的。对电和电磁的科学认识也是如此,没有这些科学的认识,所有发明将会变得毫无意义。无线电在舰船上很快就找到了应用,但是最初它并不是像我们今天使用的那样对媒体进行信道划分。1912 年泰坦尼克号灾难的一个主要原因就是所有的无线电操作者都使用相同的频带。因为泰坦尼克号拥有最大功率的发射机并且始终在发射,所以附近的其他操作者都受到了强烈的干扰并且关掉了他们的无线设备。于是,沉船早期发出的求救信号没有被附近的船只听到。

由此产生了在本书扮演一个重要角色的主题——即,无线传输分信道和使用载波的这一事实。我们常说只有将语音信号转换为电磁信号的形式才能使之适合传输,这在 1912 年变成了事实,但是以车载立体声形式出现的千瓦语音“发射机”,在今天已变得非常平常。其关键点就是电磁传输可以通过改变其载波而将信号的频谱搬移到一个最适合传输频率上去。对于海底通信而言,盐水的物理本质意味着最佳的频率位于语音范围附近。但是此时的有效天线将是数百公里长,于是所有受限于普通经济条件的无线业务都使用一个较高的频率。沿地表进行几百公里的传输需要使用中波频段(这些术语在表 1.2 中进行了定义);对于几千公里的传输,需要使用短波频段,而深空通信则需要使用微波和毫米波频段。所有这些由不同物理定律所驱动并且由载波所搬移,使得无线传输变得经济可行。使用载波传输的第二个重要理由就是若每一个都用一个不同的载波进行搬移,则很多用户可以共享相同频谱;这一点的必要性已