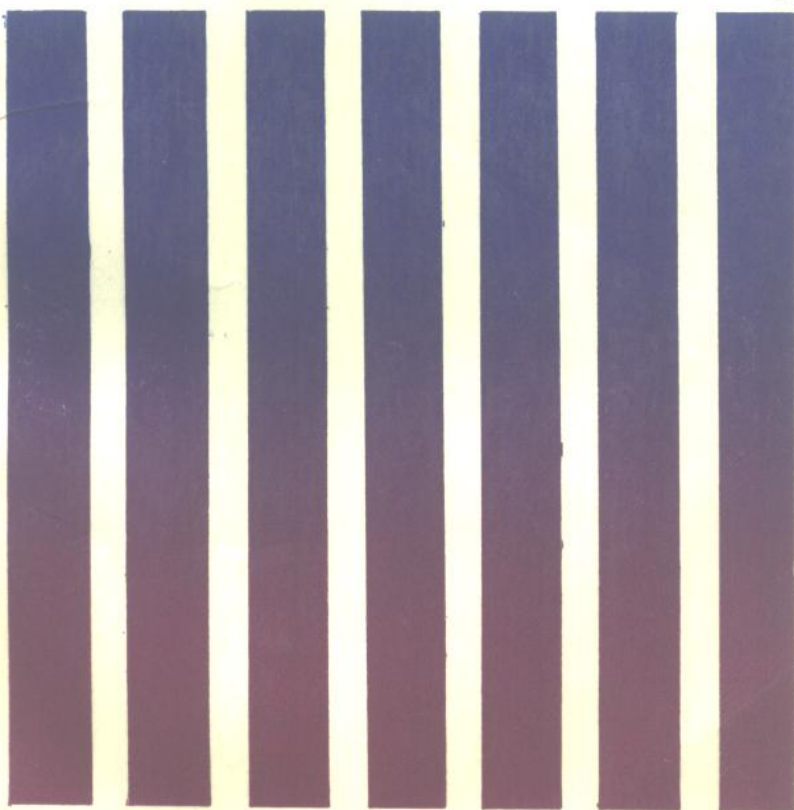


信息传输 调制和噪声

(第三版)

〔美〕M. 施瓦茨 著 柴振明 黄颂恩 方永绥 译



Xinxi Chuanshu Tiaozhi he Zaosheng

人民邮电出版社

信息传输、调制和噪声

(研究通信系统的统一方法)

(第三版)

【美】 M·施瓦茨 著

柴振明 黄颂恩 方永绥 译

人民邮电出版社

**INFORMATION TRANSMISSION
MODULATION, AND NOISE
A Unified Approach to Communication Systems
Third Edition
Misha Schwartz**

内 容 提 要

本书讲述通信系统和通信理论基础。内容根据数字通信的发展在第二版的基础上作了全面修订,增加了很多新材料。共六章:1. 信息传输概论,2. 线性系统的频率响应,3. 数字通信系统,4. 调制技术,5. 通信系统性能受噪声的限制,6. 统计通信理论与数字通信。此外,还有附录:概率论基础。全书叙述严谨,深入浅出,说理清楚。每章均有习题。适合通信工程和有关信息处理专业的大学生、研究生和科技人员学习。

信 息 传 输、调 制 和 噪 声

(研究通信系统的统一方法)

(第三版)

(美)M·施瓦茨 著

柴振明、黄颂恩、方永绥 译

责任编辑:林秉方

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京兴华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32

1988年5月 第一版

印张: 25 8/32 页数: 404

1988年5月河北第1次印刷

字数: 670千字

印数: 1-2 500册

ISBN7-115-03518-0/TN·040

定价: 7.70 元

译者序

本书是M.施瓦茨所著的“信息传输、调制和噪声”一书第三版的译本*。自原书第二版问世以来,通信技术和通信系统又有了快速发展。尤其近些年来,通信业务量迅速增加,对通信质量的要求越来越高,集成电路和数字电路在日新月异地发展,以及数字计算机技术更普遍地应用。这些因素促使通信领域的面貌发生了快速而深刻的变化。因此,施瓦茨在第三版中无论是在内容的选取上还是在材料的编排上都作了全面的调整和大幅度的增减,特别是增加了许多有关数字通信系统的新材料,从而使全书的内容更能体现近代通信系统和通信理论的发展。

自四十年代以来,信息传输和处理技术,除了在通信领域外,还广泛地渗透到其他许多领域,如雷达、声纳、自动化和遥测处理、全息技术以及天文学、地震学、生物学等等。信息和通信理论的基本研究,大大促进了近代信息系统的发展。现已大量涌现品种繁多的通信系统,除了已经广泛采用的调幅和调频系统外,越来越多的通信中采用了脉冲调制和脉冲编码,以及时间划分和频率划分多路复用等技术。在喻为信息时代的今天,通信系统的大容量化和数字化仍然是最明显的发展趋势。

要融汇贯通地了解各种信息系统,必须重视应用统一的方法来研究。为设计出各种情况下的最佳通信系统方案,必然要用到信息论和通信论的原理和概念。对此,施瓦茨的这本书是一本较好的基础读物,它着重讲述信息传输系统的共同原理,并给出现代通信系统的一个完整的论述。国外不少高等学校用它作为通信专业高年级的教材和研究生基础课补充材料。新版后的该书在内容上更为丰

*原书第一、二、三版分别于1959, 1970和1980年出版。第二版中译本于1979年由梁振明译出,人民邮电出版社出版。

富、编排上更为紧凑，书中说理清楚，并结合实际应用，穿插现代通信系统的范例，因此它也很适于有关工程人员自学参考。

限于译者水平，译文中一定有不少缺点和错误，尚请有关专家和读者不吝指正。

译 者

作者前言

我们为这第三版再次对原书进行了全面更新和修订。这是由于通信领域中数字系统不断地发展和加强，使本版有必要大大增加有关数字通信方面的内容和材料。然而，调制理论作为一种经典概念，仍然在实际中广泛应用，因此在新版中我们还是对它作了全面和深入的论述。

我们在第三章中新增加了 Δ 调制、双二进制和部分响应信号发送技术、以及数字信号时分复用技术等小节。同时还增加了信号非均匀量化技术的新材料。第三章包括进了一些新的应用例子。

在第四章中所增加的新材料有：数字信号的构象、正交幅度调制传输、以及调制解调器设计的一些新概念（这些有关数据多路复用器以及调制解调器论述的新材料，使得本书对哪些在数据传输和计算机通信方面感兴趣的学生、教师 and 实际专业人员特别有用）。在第四章中还新增加了频分多路复用技术的小节。它含有选自电话和卫星通信系统的例子，尤其对近代卫星多路复用通信技术作了详细的论述。

在第五章中增加了在出现噪声这一干扰因素条件下通信系统性能的计算，几种空间探测器的讨论，以及卫星通信系统的信噪比的计算。在有关热噪声和热噪声谱密度的一节中，着重研究了线性系统中的噪声问题，这使我们能够利用实际的参数来进行这些计算。

第六章的大部分内容都是新的。这一章把在高斯白噪声信道上传作数字传输的新内容与正交幅度调制和 M 元正交信号构象特性的应用例子结合在一起阐述。此外，我们还对错误纠正和检出一节中的内容作了全面的扩充。

第二章的材料基本上也作了重新调整。而以前出现在第五章中的概率论材料，现在被移到了附录部分。这样做的目的是使第五、

六章的内容更加连贯。如果读者缺乏概率论方面的知识，可以从附录的材料和所给的许多习题中获得这一学科的比较详细而又深入的介绍。当然，这一附录材料也很适用于那些想要复习一下概率论知识的读者。

从总体上看，本书给出了现代通信系统的一个完整的论述。我们设想读者事先并不具备有通信系统的预备知识，而在完成本书学习后，能够对现代数字通信系统和通信理论的进展有所了解。和以前两版一样，所有这些材料都力求按先简后繁、先易后难的顺序编排。许多理论上的概念是通过一些具体而又生动的实际例子来说明的。注重理论和实践相结合，以及在相应段落穿插介绍实际系统的例子，正是本书前两版的一大特点。而这一特点在新版中被进一步发扬。我们选用来自电话、空间通信和卫星通信等方面的应用例子来充实全书各个章节，其中包括有这三个方面中某些已商品化的实际系统的例子。

适当地选取书中的材料，本书可以用于不同类型的课程。例如，对于那些准备花一整学年来讲授现代通信系统的学校来说，大体上是可以讲完全书内容的。换句话说，第一学期可采用第一至第四章的材料作为通信系统基本论述的教材。而在第二学期可采用第三、四章的部分材料，加上第五、六章的材料开设数字通信导论课程，或者作为现代通信理论导论的教材。

我们在哥伦比亚大学开设了高年级二个学期的连续课程，它们包括了本书大部分的材料。第一学期的课程称为通信系统导论，采用的是第一、二章全部和第三、四、五章部分的材料。由于修读这一课程的学生已经具备傅里叶分析的基础知识，因此用较快的速度来讲授第二章。这些学生在此期间也同时在学习概率论课程，因此只是在他们掌握了概率论基础知识后，才出现涉及到概率论涵义的第五章内容。这样正好使学生有机会感受到概率论和统计学原理的一些饶有意义的。对于那些不要求以概率论作为预修或并修课程

推移到以后的课程中去。或者，如前所述，可以将附录作为概率论的必要背景材料，再适当结合书中少量正文材料一起讲授。

这两学期的第二学期课程被称为数字通信系统导论。除了那些已完成第一学期课程的学生以外，它尚可供有相当程度的通信专业知识的低年级研究生来选修。也就是说，这一课程相对于第一学期的课程有一定程度的独立性。它综述了第三、五章的部分内容，然后把主要授课时间放在第六章上。如果时间允许的话，在学期末还可以介绍一些选自最新数字通信系统文献中的材料。

在写作本书时，作者再次从许多读者、各大学同行的评论、批评和建议中获得教益。作者特别要向T.E.斯特恩和Y.齐维迪斯两位教授表示感谢，他们分别参加了上面提到的两学期连续课程和第一学期导论性课程的教学工作。书中的许多例子得自工业界一些朋友和同事的帮助。作者也愿借此机会特别感谢贝尔实验室的罗伯特·艾伦，喷射推进实验室的斯坦利·布特曼，Codex公司的大卫·福尼以及GTE-Lenkurt公司的亚当·伦德尔等朋友们。

米沙·施瓦茨

目 录

译者序

前 言

第一章 信息传输概论..... (1)

1-1 典型数字通信系统的设计 (2)

1-2 信息和系统容量 (9)

1-3 信息传输中的二进位码 (14)

1-4 系统容量和消息的信息量之间的关系 (16)

习题..... (26)

第二章 线性系统的频率响应特性..... (28)

2-1 傅里叶级数复习 (31)

时间-频率对应关系 (37)

功率考虑 (39)

周期性冲激 (40)

2-2 傅里叶积分及其性质 (41)

2-3 信号通过线性系统: 频率响应特性 (61)

2-4 理想化网络的响应特性 (70)

2-5 相位变化对信号传输的影响 (78)

2-6 冲激和网络的冲激响应 (82)

卷积 (83)

周期性信号 (86)

2-7 电视带宽的要求 (90)

2-8 总结 (92)

习题..... (93)

第三章 数字通信系统 (105)

3-1 引言 (105)

3-2 奈奎斯特抽样 (106)

抽样定理的进一步讨论 (111)

抽样信号的解调 (114)

3-3 信号时分多路复用技术介绍 (121)

3-4 模拟-数字转换在脉冲编码调制中的应用 (125)

3-5 脉冲编码调制的量化噪声与压缩扩展技术 (134)

相等级距的量化噪声 (136)

采用压缩扩展技术的信噪比 (140)

3-6 脉冲幅度调制系统和脉冲编码调制系统的例子 (150)

一个无线电遥测PAM系统 (151)

转换 (155)

实验气象卫星用的PCM遥测系统 (157)

水手号空间探测器的遥测系统 (159)

用于短程电话通信的贝尔T1 PCM系统 (161)

3-7 Δ 调制 (164)

3-8 数字信号时分多路复用 (181)

引言 (181)

比特交插方式的多路复用器和比特填充方法 (187)

字符交插方式的多路复用器 (194)

帧的丢失和捕捉 (203)

3-9 波形和带宽的考虑 (208)

3-10 双二进制技术和相关编码 (223)

改进的双二进制通信 (229)

预编码 (231)

错误检测 (235)

相关编码或部分响应编码	(235)
3-11 总结	(237)
习题	(240)
第四章 调制技术	(249)
4-1 引言	(249)
4-2 二进制通信	(252)
开关键控	(253)
移频键控	(256)
移相键控	(260)
二进制信号的检波	(261)
4-3 数字通信的调制技术：多符号信号	(266)
正交振幅调制	(269)
应用于电话数据设备的调制解调器	(274)
4-4 振幅调制	(280)
平方律调制器	(285)
分段线性调制器	(286)
变频	(290)
4-5 单边带传输和平衡调制器	(292)
4-6 单边带信号的表征方法：希尔伯特变换	(296)
4-7 解调或检波	(300)
4-8 频率调制	(306)
窄带调频	(312)
宽带调频	(317)
4-9 调频信号的产生	(330)
4-10 频率解调	(333)
零交点检波器	(338)
4-11 频分多路复用技术：电话等级系列	(341)
4-12 卫星通信系统的应用：FDMA, SPADE系统	(346)

频分多址联接 (FDMA)	(349)
按需分配多址联接 (DAMA)	(351)
SPADE系统	(352)
4-13 总结	(354)
习题	(356)
第五章 通信系统性能受噪声的限制	(377)
5-1 二进制传输的错误率	(379)
最佳判定电平	(386)
5-2 PCM系统的信息容量: 信号功率、噪声和带宽的 关系	(390)
5-3 PCM中继器的错误分析	(395)
5-4 噪声功率和噪声频谱的表示	(401)
5-5 随机信号和噪声通过线性系统	(416)
5-6 匹配滤波器检测: 应用于基带数字通信	(422)
5-7 窄带噪声的表征	(434)
5-8 二进制高频传输的比较: 对噪声中的二进制信号 同步检波	(441)
5-9 非相干二进制传输	(449)
瑞利和赖思统计特性	(450)
错误概率的计算	(456)
5-10 调频和调幅系统的信噪比	(463)
5-11 调幅检波器的频谱分析	(471)
5-12 调频对噪声特性的改进	(478)
用去加重改进信噪比	(487)
5-13 热噪声的考虑	(496)
5-14 对空间和卫星通信的应用	(511)
通信卫星性能计算	(516)
5-15 总结	(517)

习题.....	(519)
第六章 统计通信理论与数字通信.....	(542)
6-1 统计判定理论	(544)
6-2 信号矢量——多样值检测	(549)
6-3 最佳二进制传输	(562)
最佳波形	(568)
6-4 相加高斯白噪声信道的M元传输	(576)
匹配滤波器检测	(588)
6-5 信号构象和错误概率计算	(591)
二进制信号	(593)
正交调幅 (QAM)	(596)
6-6 M元正交信号	(602)
应用于空间信道	(611)
6-7 香农容量表达式	(615)
6-8 检出并纠正错误的分组码	(619)
引言	(619)
分组编码	(620)
汉明距离和二进制对称信道	(633)
循环码	(635)
循环码的生成: 多项式编码	(642)
利用循环码检出错误	(648)
6-9 总结	(654)
习题.....	(655)
附录: 概率论基础.....	(677)
A-1 导论.....	(677)
A-2 条件概率和统计独立性.....	(685)
A-3 概率的公理算法.....	(694)

A-4 离散的和连续的概率分布	(702)
质量类比	(710)
导出分布函数的普遍化方法	(712)
A-5 统计平均与密度函数举例	(715)
二项分布	(724)
矩形分布	(726)
高斯分布或正态分布	(728)
A-6 随机变数的函数变换	(733)
A-7 n 个独立变数的分布	(739)
两个独立随机变数	(739)
诸独立变数之和; 特征函数	(742)
n 个高斯分布的变数之和	(744)
均匀分布	(745)
随机相位分布	(747)
A-8 相关随机变数	(749)
习题	(755)
索引	(763)
英汉名词对照表	(783)

第一章 信息传输概论

本书专门研究通信系统，即用来传输信息的系统。在研究的过程中，我们将着重考虑信息通过一个系统传送时所受该系统的限制，并将在信息处理能力的基础上对各种不同系统试作某些比较。

一个完整的系统通常包括发信机、媒质和收信机，信息通过媒质而传送，收信机在其输出端使输入到系统的信息能以可辨识的形式复现。在大多数通信工作中，信息的传输与对选定的正弦信号的调制，即这个正弦信号随时间的变化密切相关，这个正弦信号称为载波。因此，一个典型系统的方框图就如图1-1所示。

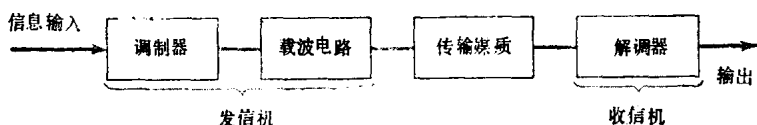


图 1-1 通信系统

发信机通常包括需要发送的信息源—话音信号，电视信号，计算打印输出，空间探测器的遥测数据，或者是从一个遥控的自动工作站发送到中心控制站的遥测数据等。

当信号通过传输媒质（或常称为信道）时会引起失真，噪声和干扰信号会混杂进去，因而当信号最后到达目的地被接收时，对它作出正确的解释便成为主要的任务。

本书的目的就是详细地讨论通过产生失真的信道传送各种信号的后果，不管这些信道是电话通信时的电缆或明线，无线电通信时的空间，还是比较特殊的信道，例如水下通信时的水或地震波通信中的地球等。我们将研究传输失真和相加的噪声造成对信息传输的

限制，只要有可能，一开头讨论就采用关于这些效应的简单模型。我们将比较发送所需信息的各种方式，以及接收端所用的各种技术，来探讨在干扰影响下改善信号传输的方法。

虽然本书的侧重点放在图1-1所示的那种通信系统，但书中许多材料也非常适用于信号处理的广阔领域。在那些方面我们较少涉及信号传输问题，而更多地是考虑信号收到之后的解释。这些信号很可能正是前面提到的那类信号，但也可能包括某些数据信息，诸如生物学中的信号（例如脑电图和心电图的数据），计算机打印出来的科学实验的数据，商业数据，气象资料等等。这里的基本问题是分析收到的数据，即从常有的使信号变得含糊不清的因素（即“噪声”）中提取所需要的或确切的信息。为处理这类随机信号（最常见的是数字形式的）而发展起来的技术，密切依赖于研究信息传输所发展起来的原理¹。

1-1 典型数字通信系统的设计

为展示信息传输的一般问题的梗概和更准确地强调通信中所遇到的某些问题，我们将在本节中详述从一处向另一处发送典型的数字数据消息而产生的问题。在提出的问题中，有许多将在本书中依次进行比较深入的发挥和研究。我们重视数字式的（或二进制位的）数据消息，因为它正在迅速成为传输信号最常用的方式，不管这个消息本来就是数字形式的，如像计算机的打印输出，还是转换成数字式的，例如遥测数据和许多电话语音通信就是如此。本节中所引用的二进制数据消息，作为信号的一种特别简单的形式，在本书中从头至尾将要用到它。

关于二进制消息或二进制信号，我们指的是由已知波形的两种脉冲组成的脉冲序列，各脉冲按有规则的间隔出现，如图1-2中所

1 有关的详细论述，可参阅M. Schwartz and L. Shaw, "Signal Processing," McGraw-Hill, New York, 1975。

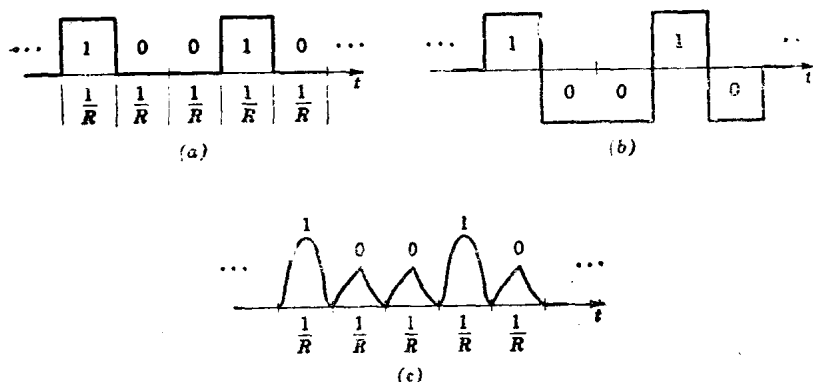


图 1-2 二进制信号传输 (a)通—断序列; (b)极性序列; (c)任意波形

示。虽然脉冲的波形假定是已知的, 但出现这种或另一种形式, 即出现在图1-2中的1还是0, 事先是不知道的, 因而所传送的信息实际上是由来的二进制1和0的特定序列给出的。为简单起见, 在本书中我们将普遍采用图1-2a和b中的矩形脉冲波形, 而其他形状的信号波形也同样可以使用。

图示脉冲每 $1/R$ 秒出现一次, 即以 R 次/秒的速率出现。 $1/R$ 秒通常称为二进制间隔, 而且认为信号源每秒输出 R 个二进制数字或 R 个二进制单位 (或比特, 信息量单位bit, 取“二进制数字”的英文binary digits头尾字母组成)。举个例子, 若 $1/R=10^{-3}$ 秒, 则 R 等于1000比特/秒。若 $1/R=1$ 微秒, 则 $R=10^6$ 比特/秒。

现在假定要把这个二进制符号序列发送到相隔某一距离的地方。一个典型的系统方框图示于图1-3, 它是图1-1的详细一点的画法。图中画出的两个滤波器, 一个在发信端, 一个在受信端, 代表

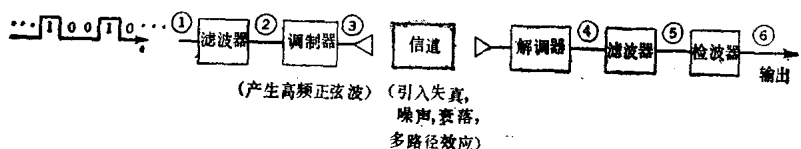


图 1-3 数字消息的传输