

信息传输 调制和噪声

Xinxi Chuanshu

Tiaozhi he Zaosheng

[美] M·施瓦茨 著

柴振明 译

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)

(美) M·施瓦茨 著

柴振明 译

人民邮电出版社

INFORMATION TRANSMISSION,
MODULATION, AND NOISE
A Unified Approach to Communication Systems
Second Edition 1970
MISCHA SCHWARTZ
MCGRAW-HILL BOOK COMPANY

内 容 提 要

本书讲述通信系统和通信论基础，侧重于数字通信。内容包括信息的概念、信号在网络中的传输过程、各种调制系统、噪声、各种通信系统的比较和通信论简介。书中对分析信息传输系统、随机信号和噪声所需的基本数学方法，如频谱分析、概率论和数理统计等，均有简明介绍。讲法由浅入深，说理比较清楚，适合于通信工程和有关信息处理专业的大学高年级学生、研究生、科技人员的参考或自学。

信息传输、调制和噪声

〔美〕 M·施瓦茨著

柴振明 译

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津市第一印刷厂印刷

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 1979年12月第一版

印张：22 8/32 页数：356 1979年12月天津第一次印刷

字数：613 千字 印数：1—15,200 册

统一书号：15045·总2325—有5130

定 价：2.70元

译 者 序

近代通信技术和理论的迅速发展,研制了多种类型的通信系统。从直接用音频传输和早期的电码而发展至现代的数字通信和编码通信。调制方式除了调幅和调频外,近二十年来采用脉冲和编码调制日益增多。使用频带从低频及至光波。通信距离也大大增加,深空数据传输的距离远达几百万公里以上。通信业务的迅速增加,广泛使用了频分和时分多路传输技术。近年来最明显的发展趋势是大容量化和数字化。前一趋势除了通信需要量的增加外,还由于通信质量要求不断提高,通信网的扩大,和视频图像信息传输普遍应用(如广播电视网、可视电话等)。信息传输量的极大增加,使微波通信和光纤通信得到加速发展和重视。近代集成电路和数字电路的进展、数字计算机的普遍使用,也促进通信系统的数字化。

信息的传输和处理技术,除了在通信的领域外,四十年代以来,也广泛渗透到其他的许多方面,如各种雷达和声纳、自动化和遥测数据的处理、全息技术、计算技术,以至天文学、地震学、生物学研究等等。

信息和通信理论的基本研究,促进了近代信息系统的发展。要分析和深入了解现有的各种通信系统,设计各种情况下的最佳方案,必需应用信息论和通信论的概念。M·施瓦茨所著的“信息传输、调制和噪声”是这方面的一本基础读物,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的补充材料。书中说理较为清楚,并能结合实际应用,所以也适于有关工程技术人员自学的参考。

原书于1959年初版，1970年再版。本书根据第二版并参考初版本译出，译稿中对几个不妥的例子作了删改，并订正了一些数字错误。为保持原书的系统性，基本上按原文全部译出，希望读者本着“洋为中用”的方针，根据需要选读。译者限于水平，译文中一定还有不少缺点和不妥之处，尚请读者批评指正。

译者

前 言*

本书准备用作电气工程系高年级通信系统课程的教科书。内容主要讲述系统的带宽和噪声在限制信息传输方面的基本作用，说明构成近代信息传输系统基础的统一原理。特别侧重于数字系统和通信系统的统计分析。

自从四十年代初期以来，通信学的领域迅速地扩大了。除了通常所用的调幅和调频系统外，现在我们还常用脉冲调制和脉冲编码系统、以及抽样数据伺服系统等等。时间划分和频率划分多路传输技术已广泛采用。数字通信系统的比重越来越大。数据处理在我们的日常生活中起着日益重要的作用。

以往在大学电子工程高年级开设一、二门无线电工程之类课程，现在是很不够了。要融会与了解各种信息系统的大量新材料，而在课程又挤得很紧的情况下，必须重视应用共同的统一方法来研究。自从1948年以来，维纳和香农在通信论方面的创始性研究，已引起人们对信息传输统一原理的注意。本书着重讲述所有信息传输系统的共同原理，作者希望通过本书能够使读者更好地了解他可能遇到的种类繁多的通信系统。

本书的内容是按大学通信专业高年级用的水平编写的，可用来衔接二、三年级开设的线性系统课程和研究生班的随机过程和统计通信理论等课程。在学习本书之前学生一般已经修读了电子学基础、网络、脉冲电路和通信电子学等课。因此，本书的重点放在讨论方框图上，其中的具体电路结构则在上述课程中学习，而本书可作为那些内容的应用和归纳。书中的部分材料，也曾在有的大学用作一年级研究

* 根据原书一、二版前言综合编译并略有删改——译者。

生的补充教材。

本书初版出版以来，作者十分愉快地注意到在许多大学的正规课程中，以及在许多企业和大学办的进修班中都被采用。在雷达、声纳、通信等领域和涉及信号与数据处理内容的其他领域中的工程技术人员也广为用于自学。本书初版受到读者的热诚欢迎，说明书中编写上的一些特点，诸如数学内容联系物理意义，理论和实际相结合，在适宜的段落介绍实际系统的例子等，能为读者很好接受，在再版本中也力求保留这些特点。

本书第一章以全面考察一个典型的数据通信系统为开端，来指出当信号通过系统时可能出现的那些问题的性质，并提示书中要发挥的论题。接着定性地讨论系统的信息容量。表明对信息容量的限制是由于系统中贮能器件的存在和由于不可避免的噪声起伏。探究这些限制的涵义是本书的主要论题之一。

在第二章中阐明能量贮存限制或时间响应限制可表为带宽限制。为此，引入傅里叶级数、傅里叶积分和频谱概念，并同时间响应联系起来。然后详细地研究了可代表简单二进制信号的基本脉冲通过线性系统传输的情况。

第三章是对基本频带数字通信的概括介绍，引用第二章的材料来研究模拟信息转换为数字信息、时分多路信号、脉冲幅度调制和脉冲编码调制等问题。本章还讨论了如何由脉冲整形来避免符号间干扰。列举了无线电遥测、空间通信、电话通信等方面的一些数字系统的例子。

第四章把第三章的基带分析引伸到高频正弦波传输。介绍了键控开关、键控移频和键控移相等高频二进制系统，并在带宽的基础上进行互相比较。分析了同步检波和包络检波，然后详细地研究了各种模拟式调制系统，包括调幅、单边带调幅和调频。从这里可以看到，先讨论二进制键控移频对阐明模拟信号调频系统特别有用。

更进一步讨论近代通信系统必须应用统计概念。为使本书尽可能自成体系，第五章介绍了必要的概率论基础。包含有对于通信工程的

一些应用例子，以使内容阐述明瞭而有趣。这些包括脉码调制中的误码计算和中继器的分析，以及对衰落媒质的统计性质的讨论。

第六章关于随机信号和噪声。同第五章中一样，在有可能之处，引述的论题都从物理观点进行阐明，以便自然地引入比较高深的内容，这些分析通常是在研究生课程中讲的。通过对噪声窄带表示法的讨论，使我们能够定量地比较高频二进制系统，还能够以易于理解的方式转到调幅和调频接收机的分析。

第七章讨论噪声的物理根源。分别处理散粒效应噪声和热噪声。对于散粒效应噪声，按泊松过程进行讨论，并作为第六章讲的随机过程的应用例子。对于热噪声，先以定性的、物理概念的方式，而后在应用中接近代物理的方法，引入适用于光频的量子效应概念。

关于“统计通信理论”的第八章，先讲在噪声中进行最佳二进制通信的基本问题。然后，以空间通信为例的一些典型计算，说明在一定的信号功率和噪声大小、以及在指定错误概率的条件下，二进制传输速率受到怎样的限制。借助香农定理来指出：通过适当的编码方法，还可能进一步降低错误概率。然后介绍一个信息反馈系统，它至少在概念上真能实现香农容量。这使读者能更深入理解著名的香农表达式的意义。本章末了介绍错误检出和纠错编码。

适当地选取书中的材料，本书可用于不同安排的课程。例如，作为一学年的教材，大体上可讲完全书。这时，第一学期可用前四章，包括通信系统的基本论述部分。后四章中引入统计概念，以便较深入地讨论，这可作为第二学期的教材。如果作为一个学期的课程，并且学生已学过概率论和傅里叶分析，那么主要时间可花在以下章节：第一章简介之后讲第二章全部内容。第三章基本上取全部材料，接下去第四章选择一部分（包括关于二进制通信的第4-2节，加上模拟式调幅和调频系统的一些材料）。第五章概率论简单复习一下，而着重讲第5-6节关于噪声中检出二进制信号的内容。这用来衔接第三章数字系统和第六章随机信号和噪声分析。第六章可用头四节内容，接着学习第八章的基本全部内容。时间允许的话，可再选第四章和第六章中

的一些内容。

在写本书时，读者、别的大学的同事、特别是本学院的同事提出的评论、批评和建议，使作者受益匪浅。作者对他们表示感谢。

米沙·施瓦茨

(布鲁克林理工学院)

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	(13)
1-4 系统容量和消息的信息量之间的关系	(16)
习题	(25)
第二章 信号通过网络的传输	(28)
2-1 傅里叶级数复习	(31)
2-2 信号通过线性网络的传输	(40)
2-3 线性网络, 滤波器的转移函数和复频谱	(48)
2-4 傅里叶积分	(52)
2-5 理想化网络的响应特性	(57)
2-6 无失真传输	(64)
2-7 相位变化对信号传输的影响	(66)
2-8 任意形状脉冲的带宽-时间反比关系	(71)
2-9 线性网络的冲激响应	(75)
2-10 频率分析中冲激的应用	(95)
2-11 电视带宽的要求	(98)
2-12 总结	(100)
习题	(101)
第三章 数字通信系统	(116)
3-1 引言	(116)

3-2	奈奎斯特抽样	(117)
3-3	抽样定理的进一步讨论	(122)
3-4	抽样信号的解调	(125)
3-5	时分多路传输和脉冲幅度调制系统	(131)
3-6	脉冲编码调制: 完成模拟向数字转换	(138)
3-7	脉冲编码调制系统的信息量, 信号功率和带宽 的交换	(146)
3-8	脉冲编码调制的量化噪声	(151)
3-9	信号的整形、符号间干扰和带宽	(155)
3-10	脉冲幅度调制系统和脉冲编码调制系统的例子	(163)
3-11	脉冲位置调制	(177)
3-12	总结	(182)
	习题	(183)
第四章	调制技术	(187)
4-1	引言	(187)
4-2	二进制通信	(189)
4-3	振幅调制	(202)
4-4	单边带传输和平衡调制器	(212)
4-5	单边带信号的表征方法: 希尔伯特变换	(217)
4-6	解调或检波	(220)
4-7	频率调制	(227)
4-8	调频信号的产生	(250)
4-9	频率解调	(256)
4-10	总结	(263)
	习题	(264)
第五章	信息传输系统分析中的统计方法	(278)
5-1	概率论引述	(279)
5-2	条件概率和统计独立性	(287)
5-3	概率的公理算法	(296)

5-4	离散的和连续的概率分布	(303)
5-5	统计平均与密度函数举例	(316)
5-6	应用: 脉码调制的错误率	(332)
5-7	随机变数的函数变换	(342)
5-8	n 个独立变数的分布	(348)
5-9	在脉码调制中继器方面的应用	(358)
5-10	瑞利衰落和相乘噪声	(364)
5-11	相关随机变数	(376)
5-12	总结	(381)
	习题	(383)
第六章	随机信号和噪声	(393)
6-1	时间平均和集合平均	(394)
6-2	自相关函数和频谱分析	(399)
6-3	随机信号和噪声通过线性系统	(409)
6-4	在匹配滤波器检测方面的应用	(414)
6-5	窄带噪声的表征	(427)
6-6	二进码高频传输的比较: 对噪声中的二进码信 号同步检波	(434)
6-7	非相干二进码传输	(439)
6-8	雷达信号检测和相位检测	(450)
6-9	调频和调幅系统的信噪比	(464)
6-10	调幅检波器的频谱分析	(471)
6-11	调频对噪声特性的改进	(479)
6-12	脉位调制的信噪比	(496)
6-13	随机信号的自相关函数和功率谱	(500)
6-14	自相关函数的性质	(507)
6-15	总结	(510)
	习题	(511)
第七章	噪声的物理根源	(525)

7-1	散粒效应噪声	(528)
7-2	热噪声	(549)
7-3	晶体管的噪声模型: 散粒效应噪声和热噪声相 组合	(563)
7-4	噪声指数和噪声温度	(567)
7-5	总结	(576)
	习题	(578)
第八章	统计通信理论和数字通信	(586)
8-1	统计判定理论	(588)
8-2	信号矢量—多样值检测	(593)
8-3	最佳二进码传输	(606)
8-4	香农容量的再检验	(619)
8-5	M元正交信号	(621)
8-6	一个空间通信的例子	(627)
8-7	为实现带宽有限信道容量的一个信息反馈设计 方案	(630)
8-8	错误的检出和纠正	(645)
8-9	总结	(663)
	习题	(665)
索引		(676)
英汉名词对照表		(694)

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。

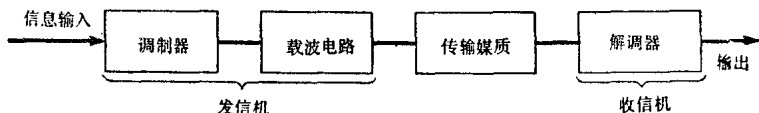


图 1-1 通信系统

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 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（或二进位制的）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码数据消息，作为信号的一种特别简单形式，在本书中从头至尾将要用到它。

关于二进码消息或二进制信号，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到的二进码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。

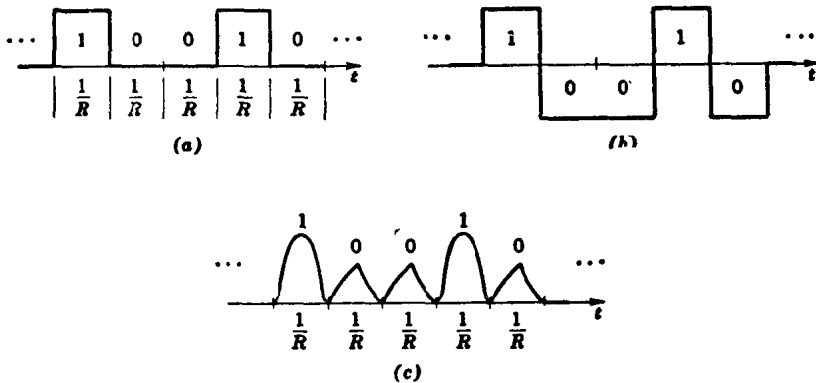


图 1-2 二进制信号传输 (a) 通一断序列; (b) 双极性序列; (c) 任意波形

图示脉冲每 $1/R$ 秒出现一次,即以 R /秒次的速率出现。 $1/R$ 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bits,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,代表对信号进行滤波,它们可以是系统的整机电路内固有的,也可以是作为系统设计的部件而专门加入的。收信端的解调器用来分离出在发信端调制器中所引进的高频正弦波的调制信号。为使信号能有效地辐射到空间(或者图中信道所代表的别的什么媒质)中去,调制过程是必要的。

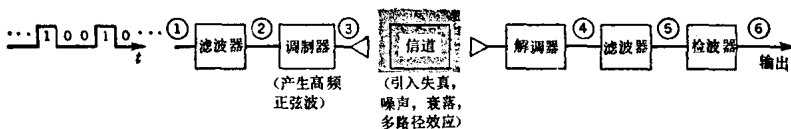


图 1-3 数字消息的传输

收信端的检波器的作用是“尽可能好地”再生发送来的数字数据所代表的原信号序列。

相应于图1-3中标着数字各点的典型波形，画在图1-4中。图中表

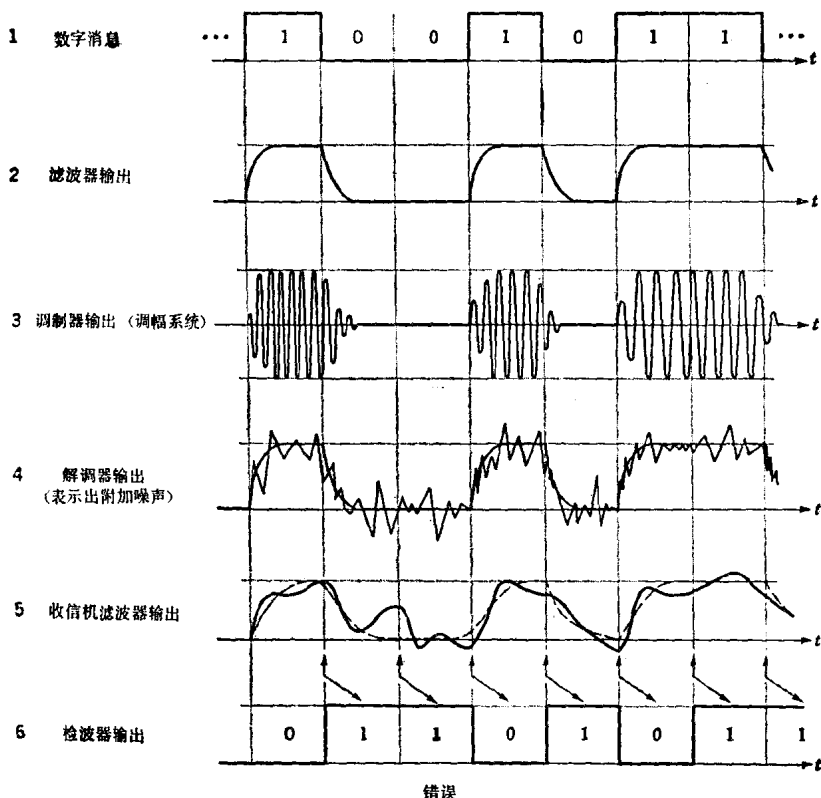


图 1-4 数字系统中各点的波形

明，滤波器引起了符号伸长，重叠到邻接的时隙上。如果延伸得太长，它们会扰乱邻接的时隙内发送的真实符号，造成符号解释的混乱，并在系统输出端可能造成错误。符号间干扰在许多数据通信系统中是个重大的问题，经由电话线路传输数据时，这个问题特别麻烦。在以后的章节内我们将有机会进一步讨论这个问题，并且说明用来克服它的