

通信系统原理

TONGXIN
XITONG YUANLI

袁丽娜 陈华君◎主编

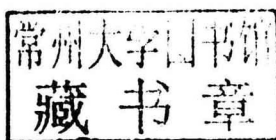


电子工业出版社

通信系统原理

TONGXIN
XITONG YUANLI

袁丽娜 陈华君◎主编



电子工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

通信系统原理 / 袁丽娜, 陈华君主编. -- 成都:
电子科技大学出版社, 2016.9
ISBN 978-7-5647-2715-4

I. ①通… II. ①袁… ②陈… III. ①通信系统
IV. ①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 185097 号

通信系统原理

袁丽娜 陈华君 主编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 罗 雅
责任编辑: 罗 雅 李 倩
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: ues_tcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 四川永先数码印刷有限公司
成品尺寸: 185mm × 260mm 印张 10.25 字数 256 千字
版 次: 2016 年 9 月第一版
印 次: 2016 年 9 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-2715-4
定 价: 34.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

自从有了人类活动，就产生了通信。随着电信号和电磁波的发现，人类通信领域也因此产生了根本性的变革。现代通信技术的发展日新月异，而且正在迅速地向各个领域渗透，可以说各个行业乃至人们的生活都离不开通信技术的应用。因此学习和掌握通信的基本原理和技术，是电子、通信和信息类学生必不可少的重要内容。

现代通信技术和计算机网络技术的飞速发展和相互融合推动了信息储存、处理和传输技术的不断进步。通信专业的教材和教学在这一背景下也需要与时俱进，以适应信息社会的发展。

本书阐述信息的处理、传输以及通信系统的基本原理，是编者多年通信领域教学和科研的成果总结，比较全面、系统地论述了现代通信技术和系统的基本理论。

本书的主要特点有：

- (1) 内容系统、全面，章节编排讲究，材料充实丰富；
- (2) 语言简练、通俗易懂、条例清楚，便于自学；
- (3) 图文并茂，实用性强；
- (4) 列举大量实验，直观系统了解通信系统；
- (5) 每章附有适量的习题。

本书虽经许多老师和学生使用，并得到很多专家和同事的指正，但是现代通信的发展日新月异，限于编者的水平，书中缺点在所难免，欢迎广大读者批评斧正。

编 者

目 录

第 1 章 通信系统概述	1
1.1 通信的历史回顾	1
1.2 通信系统	3
1.3 信道	8
1.4 噪声	14
1.5 通信系统的主要性能指标	15
1.6 现代通信系统的发展趋势	18
习题 1	23
第 2 章 数字信号的基带传输	24
2.1 数字基带信号波形与频谱	24
2.2 无码间串扰的基带传输系统	30
2.3 改善数字信号基带传输性能的措施	37
习题 2	44
第 3 章 模拟信号的数字传输	46
3.1 概述	46
3.2 抽样定律	48
3.3 模拟信号的脉冲调制	53
3.4 PCM 通信系统	57
3.5 增量调制(ΔM)	61
3.6 各种改进型的增量调制	68
习题 3	75
第 4 章 数字信号的最佳接收	76
4.1 引言	76
4.2 二元假设检验和各种判决准则	76
4.3 二元确知信号的最佳接收	85
习题 4	92

◆◆通信系统原理

e - Labsim 平台实验模块介绍	94
S2:信号源及频率计模块	94
S3:抽样定理及滤波器模块	95
S4:数字信号处理模块	96
S8:调幅及频分复用模块	97
第一部分 基础实验	98
实验 1 无失真传输系统	98
实验 2 多径衰落信道 - 瑞利衰落信道的 MATLAB 仿真	100
实验 3 模拟线性调制系统 MATLAB 仿真	103
实验 4 FDM 频分复用传输系统	106
第二部分 原理实验	109
实验 1 抽样定理与信号恢复	109
实验 2 交错四相移相键控(OQPSK)调制及解调实验	113
实验 3 GMSK 调制及相干解调实验	119
实验 4 矢量调制星座图实验	126
实验 5 PSK 信号载波恢复实验	129
实验 6 数字基带传输 MATLAB 仿真	133
实验 7 OFDM 技术的 MATLAB 仿真	137
第三部分 综合实验	141
实验 1 GSM 通信系统实验	141
实验 2 TDMA(时分多址)移动通信	144
实验 3 CDMA 扩频通信系统实验	148
附录 CDMA 通信系统组成框图	156
参考文献	157

第1章 通信系统概述

1.1 通信的历史回顾

通信是指人们通过某种媒介进行信息传递。早期进行远距离通信的基本方式都是直接依靠人的视觉与听觉，如古代的烽火狼烟、击鼓鸣号、飞鸽传信、驿马邮递等。19世纪中叶以后，随着电磁波的发现，电信号作为新的信息载体，人类通信领域也因此产生了根本性的变革，开始了通信的新时代。

本书主要讨论电通信的理论与应用的相关内容，以下首先简要回顾电通信的发展历程。

1837年，毕业于耶鲁大学的美国艺术家兼发明家莫尔斯（S. F. B. Morse），因一次在大西洋邮船上被同船乘客电磁原理的讲演所吸引，于是投身电学领域，研究出用“点”“划”“线”表示信号的莫尔斯电码，并成功研制出世界上第一台电磁式电报机。1844年，莫尔斯在国会大厦用莫尔斯电码发出了人类历史上的第一份电报，实现了有线长途电报通信。

1864年，英国物理学家麦克斯韦（J. C. Maxwell）建立了一套电磁理论，提出了麦克斯韦方程，预言了电磁波的存在，说明了电磁波与光具有相同的性质，两者都是以光速传播。

1876年，美国发明家贝尔（A. G. Bell）发明了世界上第一台电话机，1878年在相距300 km的波士顿和纽约之间成功地进行了首次长途电话实验。1925年成立的以贝尔命名的贝尔实验室，则是晶体管、激光器、发光二极管、数字交换机、通信卫星、电子计算机、蜂窝移动通信设备、电视、有声电影、立体声录音以及通信网等许多重大发明的诞生地，拥有的专利已超过25 000项。

1887年，德国物理学家海因里斯·赫兹（H. R. Hertz）用电波环进行了一系列实验，发现了电磁波的存在，用实验证明了麦克斯韦的电磁理论。频率的国际单位以赫兹的名字命名，以纪念他对电磁学的贡献。他的实验成为近代科学技术史上的一个重要里程碑，也促进了无线电的诞生和电子技术的发展。

1901年，意大利电气工程师和发明家马可尼（G. M. Marconi）首次实现了在英国与纽芬兰之间（3540 km）横跨大西洋的无线电通信。事实上马可尼在大学期间，就已经利用电磁波进行了约2 km的无线电通信实验，图1-1为早期的通信科学家。

1918年，美国无线电工程师阿姆斯特朗（E. H. Armstrong）发明了超外差式接收机，并于1933年发明频率调制技术。

◆◆通信系统原理

1928年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)提出了奈奎斯特准则和奈奎斯特抽样定理。同年法恩斯沃思(P. T. Farnsworth)推出第一台电子式电视机。

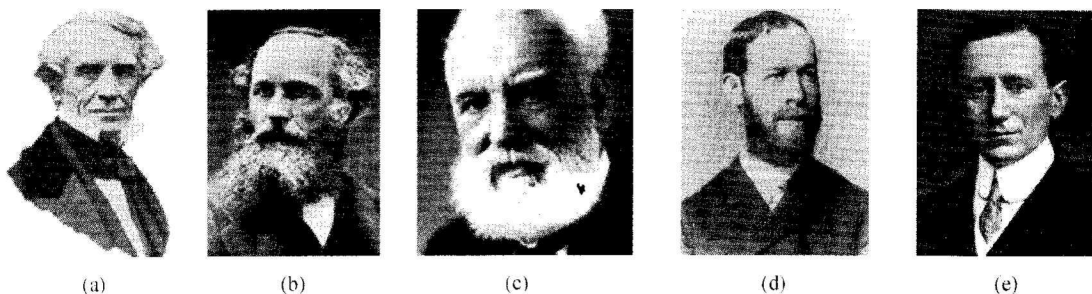


图 1-1 早期的通信科学家

(a) 莫尔斯; (b) 麦克斯韦; (c) 贝尔; (d) 赫兹; (e) 马可尼

1937年,里弗斯(A. Reeves)发明脉冲编码调制PCM(Pulse Code Modulation),PCM在20世纪70年代末期以后广泛应用于市话中继传输、数字程控交换、用户电话机以及应用于其他音频编码,如CD、DVD等。

1943年,诺斯(D. O. North)提出数字信号最佳接收的匹配滤波器原理。

1946年,第一台电子数字计算机面世,它由美国宾夕法尼亚大学莫尔电工学院制造,同期冯·诺伊曼(J. V. Neumann)研制了被认为是现代计算机原型的通用电子计算机。

1948年,贝尔实验室发明了晶体管,1960年晶体管用于数字交换和数字通信。

1958年,美国宇航局发射世界上第一颗有源广播试验通信卫星“斯科尔”(SCORE),进行了磁带录音信号的传输。1960年美国发射的“回声”(ECHO)无源反射卫星,进行了调频电话和电视的转播。1964年美国发射的“辛康3号”(SYNCOM-III)同步轨道试验卫星,成功转播了东京奥运会。中国的试验通信卫星(STW satellite)于1984年4月8日发射升空。

1958年,仙童公司的罗伯特·诺伊斯(R. Noyce,英特尔创始人之一)与德州仪器公司的基尔比(J. Kilby)间隔数月分别发明了集成电路(IC, Integrated Circuit),开创了微电子学的历史。

1960年,贝尔实验室制造出第一台激光器。

20世纪70年代,大规模集成电路(LSI, Large Scale Integration)、数字程控交换系统、光纤通信系统先后推出。

比较有代表性的大规模集成电路:1971年Intel推出1 kB动态随机存储器(DRAM),同年推出全球第一个采用MOS工艺的微处理器4004;1974年RCA公司推出第一个CMOS微处理器1802;1976年16 kB DRAM和4 kB SRAM问世;1978年64 kB动态随机存储器诞生,不足 0.5 cm^2 的硅片上集成了14万个晶体管;1979年Intel又推出5 MHz 8088微处理器;之后,IBM基于8088推出全球第一台PC。

1970年,法国成功开通了世界上第一个数字程控交换系统,它标志着交换技术从传统的模拟交换进入数字交换时代。

1970年,美国康宁(Corning)公司研制成功石英光纤,1976年,美国在亚特兰大进行了世界上第一个实用光纤通信系统的现场试验。

第1章 通信系统概述

20世纪80年代,出现了超大规模集成电路(VLSI, Very Large Scale Integration)、互联网(Internet),同时卫星通信系统和光纤通信系统得到广泛应用。

1988年,16MDRAM问世,1 cm²大小的硅片上集成有3500万个晶体管,标志着进入超大规模集成电路阶段。

1983年,美国研制成功了用于异构网络的TCP/IP协议,从而诞生了真正的Internet。

1986年,美国国家科学基金会(NSF, National Science Foundation)利用TCP/IP协议,在5个科研教育服务超级电脑中心的基础上建立了NSFnet广域网。如今,NSFnet已成为Internet的重要骨干网之一。

20世纪80年代开始,西方很多公司开始意识到未来个人通信全球化的巨大需求,即5W: Whoever(任何人)、Wherever(任何地点)、Whenever(任何时间)、Whomever(任何对象)、Whatever(采用任何方式),相继发展了卫星移动通信系统。

1980年,美国标准化FT-3光纤通信系统投入商业应用;1983年,日本敷设了纵贯日本南北的光缆长途干线;1988年,第一条横跨大西洋TAT-8海底光缆通信系统建成;1989年,第一条横跨太平洋TPC-3/HAW-4海底光缆通信系统建成。

1991年,GSM(Global System of Mobile Communication)移动通信系统投入商业运行;1995年,第一个CDMA(Code Division Multiple Access)商用系统(被称为IS-95A)在美国运行;20世纪90年代以后,Internet的使用不再限于研究与学术领域,已可以用于商业用途,世界各地无数的企业及个人纷纷涌入Internet,带来Internet发展史上一个新的飞跃。1994年4月,中国率先与美国NSFnet直接互联,标志着我国最早的国际互连网络的诞生。

21世纪的通信发展趋势,将具有宽带化、智能化、个人化和综合化的特征,能向用户提供多种形式、大容量、高速率的通信业务,能满足用户任何时间、任何地点向其他人通过声音、数据、图像、视频等方式相互交换信息的要求。这样的网络不可能是单一网络,而是涉及固定和移动、有线和无线等各类通信网的网络。

1.2 通信系统

1.2.1 通信系统的模型

通信的任务是完成消息的传递和交换。以点对点通信为例,可以看出要实现消息从一地到另一地的传递,必须有三个部分:一是发送端,二是接收端,三是收发端之间的信道,如图1-2所示。

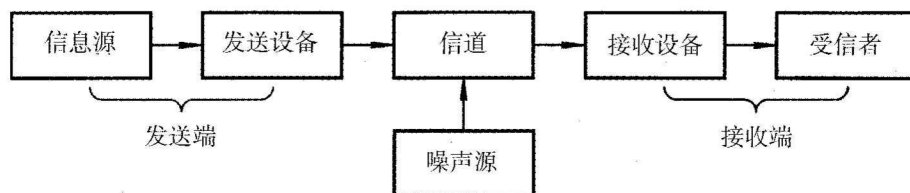


图1-2 通信系统的模型

◆◆通信系统原理

这里，信息源（简称信源）的作用是把待传输的消息转换成原始电信号，如电话系统中的电话机可看成是信源，信源输出的信号称为基带信号。所谓基带信号，是指没有经过调制（频率搬移）的原始信号，其特点是频率较低。基带信号可分为数字基带信号和模拟基带信号。为了使原始信号（基带信号）适合在信道中传输，由发送设备（发送设备是一个总体概念，它可能包括许多具体电路与系统）对基带信号进行某种变换或处理，使之适应信道的传输特性要求。信道是信号传输的通路，在信道中不可避免地会叠加噪声。在接收端，从收到的信号中恢复出相应的原始信号。受信者（也称信宿或收终端）将复原的原始信号转换成相应的消息，如电话机将对方传来的电信号还原成了声音。在图 1-2 中，噪声源是信道中的所有噪声以及分散在通信系统中其他各处噪声的集合，这种表示并非指通信中一定要有一个噪声源，而是为了在分析和讨论问题时便于理解而人为设置的。

按照信道中传输信号的形式不同，通信系统可以分为模拟通信系统和数字通信系统，为了进一步了解它们的组成，下面分别加以论述。

1.2.2 模拟通信系统

我们把信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统。模拟通信系统的组成（通常也称为模型）可由一般通信系统的模型略加改变而成，如图 1-3 所示。

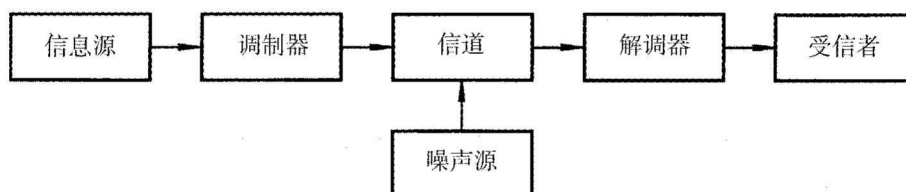


图 1-3 模拟通信系统模型

对于模拟通信系统，它主要包含两种重要变换。一种是把连续消息变换成电信号（发端信息源完成）和把电信号恢复成最初的连续消息（收端受信者完成）。由信源输出的电信号（基带信号）具有频率较低的频谱分量，一般不能直接作为传输信号而送到信道中去。因此，模拟通信系统里常有第二种变换，即将基带信号转换（调制）成适合信道传输的信号，这一变换由调制器完成；在接收端同样需经相反的变换（解调），它由解调器完成。经过调制后的信号通常称为已调信号。已调信号有三个基本特性：一是携带有消息，二是适合在信道中传输，三是具有较高频率成分。

必须指出，从消息的发送到恢复，事实上并非仅有以上两种变换，通常在一个通信系统里可能还有滤波、放大、天线辐射与接收、控制等过程。对信号传输而言，由于上面两种变换对信号起着决定性作用，因而它是通信过程中的重要方面。而信号在其他过程中并没有发生质的变化，只不过是对信号进行了放大和信号特性的改善，因此，我们认为这些过程都是理想的，而不去讨论它。

1.2.3 数字通信系统

信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。数字通信系统可进一步细分为数字频带传输通信系统、数字基带传输通信系统、模拟信号数字化传输通信系统。下面分别加以说明。

1. 数字频带传输通信系统

数字通信的基本特征是，它的消息或信号具有“离散”或“数字”的特性，从而使数字通信具有许多特殊的问题。例如，前面提到的第二种变换，在模拟通信中强调变换的线性特性，即强调已调参量与代表消息的模拟信号之间的比例特性，而在数字通信中则强调已调参量与代表消息的数字信号之间的一一对应关系。

另外，数字通信中还存在以下突出问题。第一，数字信号传输时，信道噪声或干扰所造成的差错，原则上是可以控制的。这是通过所谓的差错控制编码来实现的。于是，就需要在发送端增加一个编码器，而在接收端相应地需要一个解码器。第二，当需要实现保密通信时，可对数字基带信号进行“扰乱”（加密），此时在接收端就必须进行解密。第三，由于数字通信传输的是一个接一个按一定节拍传送的数字信号，因而接收端必须有一个与发送端相同的节拍，否则就会因收发步调不一致而造成混乱。另外，为了表述消息内容，基带信号都是按消息特征编组形成的码组，于是，在收发之间一组的编码的规律也必须一致，否则接收时消息的真正内容将无法恢复。

在数字通信中，称节拍一致为“位同步”或“码元同步”，而称码组一致为“群同步”或“帧同步”，故数字通信中还必须有“同步”这个重要环节。

综上所述，点对点的数字频带传输通信系统模型一般如图1-4所示。图中，同步环节没有示意出，这是因为它的位置往往不是固定的，在此我们主要强调信号流程所经过的部分。

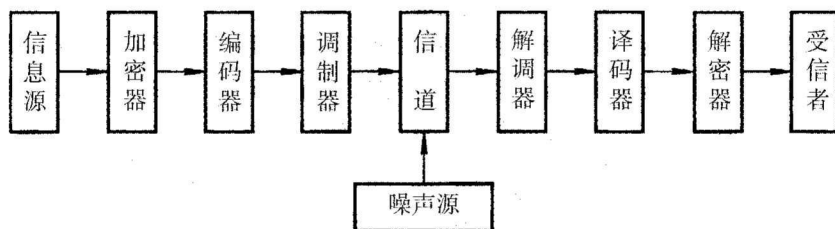


图 1-4 点对点的数字频带传输通信系统模型

需要说明的是，图1-4中的调制器/解调器、加密器/解密器、编码器/译码器等环节在具体通信系统中是否全部采用，取决于具体设计的条件和要求。但在一个系统中，如果发送端有调制器/加密器/编码器，则接收端必须有解调器/解密器/译码器。通常，把带有调制器/解调器的数字通信系统称为数字频带传输通信系统。

2. 数字基带传输通信系统

与频带传输系统相对应，我们把没有调制器/解调器的数字通信系统称为数字基带传输通信系统，其模型如图1-5所示。

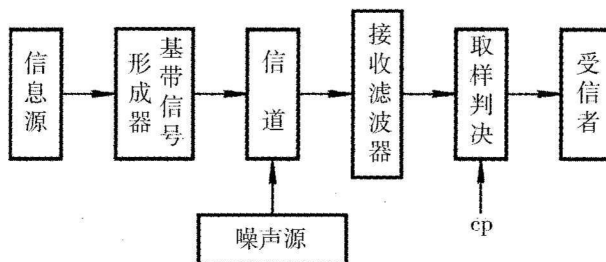


图 1-5 数字基带传输通信系统模型

◆◆通信系统原理

在图 1-5 中,基带信号形成器可能包括编码器、加密器以及波形变换设备等,接收滤波器也可能包括译码器、解密器等。

3. 模拟信号数字化传输通信系统

上面论述的数字通信系统中,信源输出的信号均为数字基带信号。实际上,在日常生活中,大部分信号(如语音信号)为连续变化的模拟信号,要实现模拟信号在数字系统中的传输,则必须在发送端将模拟信号数字化,即进行 A/D 转换;在接收端需进行相反的操作,即 D/A 转换。实现模拟信号数字化传输的通信系统模型如图 1-6 所示。

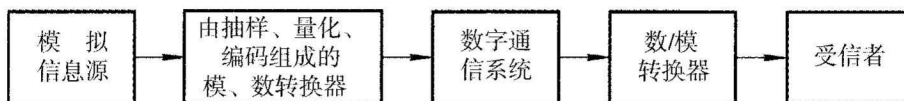


图 1-6 模拟信号数字化传输通信系统模型

1.2.4 数字通信的主要优缺点

数字通信的主要优缺点都是相对于模拟通信而言的。

1. 数字通信的主要优点

(1) 抗干扰、抗噪声性能好。在数字通信系统中,传输的是数字信号。以二进制为例,信号的取值只有两个,这样发送端传输的以及接收端需要接收和判决的电平也只有两个值:为“1”码时取值为 A,为“0”码时取值为 0。传输过程中由于信道噪声的影响,必然会使波形失真。在接收端恢复信号时,首先对其进行抽样判决,再确定是“1”码还是“0”码,并再生“1”“0”码的波形。因此,只要不影响判决的正确性,即使波形有失真也不会影响再生后的信号波形。而在模拟通信中,如果模拟信号叠加噪声,即使噪声很小,也很难消除。

数字通信的抗噪声性能好还表现在微波中继(接力)通信时,它可以消除噪声积累。这是因为数字信号在每次再生后,只要不发生错码,它仍然像信源中发出的信号一样,没有噪声叠加在上面。因此,中继站再多,数字通信仍具有良好的通信质量。而模拟通信中继时,只能增加信号能量(对信号放大),不能消除噪声。

(2) 差错可控。数字信号在传输过程中出现的错误(差错),可通过纠错编码技术来控制。

(3) 易加密。数字信号与模拟信号相比,它容易加密和解密。因此,数字通信的保密性好。

(4) 易于与现代技术相结合。由于计算机、数字存储、数字交换以及数字处理等现代技术飞速发展,许多设备、终端接口均采用数字信号,因此极易与数字通信系统相连接。正因为如此,数字通信才得以高速发展。

2. 数字通信的主要缺点

数字通信相对于模拟通信来说,主要有以下两个缺点。

(1) 频带利用率不高。数字通信中,数字信号占用的频带较宽。以电话为例,一路数字电话一般要占据(20~60)kHz的带宽,而一路模拟电话仅占用约4kHz的带宽。如果系统传输带宽一定的話,模拟电话的频带利用率要高出数字电话5~15倍。

(2) 需要严格的同步系统。数字通信中,要准确地恢复信号,必须要求接收端和发送

端保持严格同步。因此，数字通信系统及设备一般都比较复杂，体积较大。

随着数字集成技术的发展，各种中、大规模集成器件的体积不断减小，加上数字压缩技术的不断完善，数字通信设备的体积将会越来越小。随着科学技术的不断发展，数字通信的两个缺点也越来越显得不重要了。实践表明，数字通信是现代通信的发展方向。

1.2.5 通信系统的组成

通信的目的是交换不同地点的消息，即传输消息。例如，将地点 A 的消息传输到地点 B ，或者反过来将地点 B 的消息传输到地点 A 。待传输的消息可以是语言、文字、图像或者数据等。消息在发送端首先被变换为各种形式的电信号，然后经过各种各样的信道（例如有线通信中的明线、电缆，无线通信中的短波、微波等）传输到接收端；接收端再把接收到的电信号还原为与发送端相同或者尽可能相同的消息。

传输消息有时也称为传输信息，信息可以理解的消息中所包含的对受信者有意义的内容。本书中对消息和信息不做严格的区分，两者可以混用。

将各种通信系统和设备中消息传输的完整过程高度概括，就可以得到如图 1-7 所示的通信系统模型。

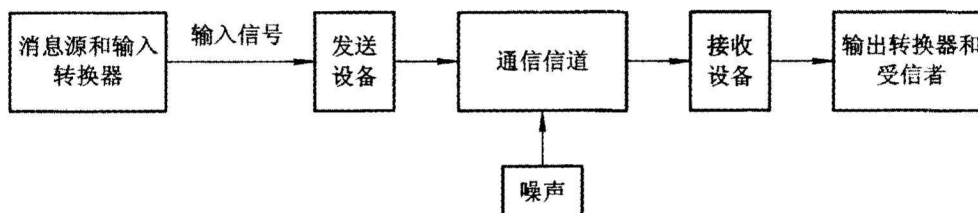


图 1-7 通信系统模型

在图 1-7 中所中，消息源是需要传输的消息来源，如语言、文字、图像、数据等。输入转换器的作用是把消息源的消息转换为电信号，例如通电话时，话筒就是转换器，它把语言转换为话音信号。通常，这种直接由消息转换得到的电信号的频率都是比较低的，而且最高频率和最低频率的比值很大，称为基带信号。

基带信号可以直接经放大器等向信道传输，这种传输称为基带传输。但是，通常基带信号需要通过调制，把信号的频谱搬移到比较高的频率范围后再进行传输。这种经过调制后的信号称为频带信号，相应的传输方式称为频带传输。

发送设备输出的信号，可以通过各种不同的信道传输。常用的信道有架空明线、电缆等有线信道和中长波、短波、微波等无线信道。信号在信道中传输时，有各种噪声与信号混在一起。噪声主要来自信道，而发送设备和接收设备中也有一定的噪声。为了便于描述，在通信系统模型中，通常将噪声集中画在一起表示。

接收设备的主要任务是从受噪声影响的有噪信号中区分信号和噪声，并提取出信号。

1.3 信 道

1.3.1 信道的分类

信道是用于在发送端和接收端之间传输信号的通道。

按照信号的传输媒质，信道可分为：有线信道和无线信道。按照信道的特性，可分为：恒参信道和随参信道。按照信道的模型，又可分为调制信道和编码信道。

固定电话网、有线电视网和光纤网均为有线信道，移动电话、卫星通信和无线电广播等均为无线信道。

若信道仅指传输媒质，称为狭义信道。有时候为了分析方便，将传输媒质和其他通信设备一起看成信道，称为广义信道。对应于模拟和数字通信系统，广义信道又分别称为调制信道和编码信道。调制信道和编码信道以及媒质的关系如图 1-8 所示。

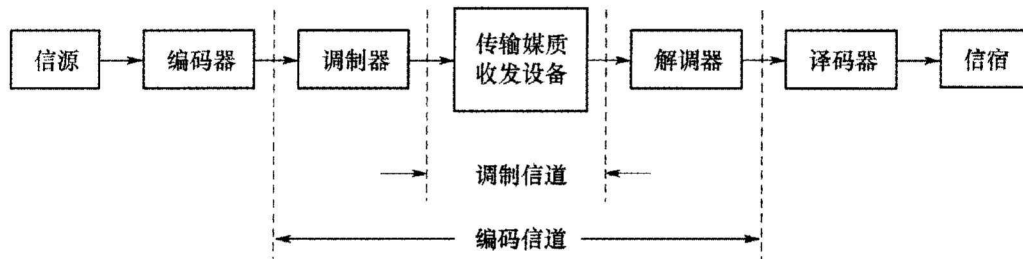


图 1-8 调制信道和编码信道

对于模拟通信系统，我们关注的是发送端调制器输出至接收端解调器输入之间，信道对信号的影响，这时将发送设备和接收设备（不含调制解调器）和媒质一起看成信道。

用 $e_i(t)$ 表示信道输入， $e_o(t)$ 表示信道输出， $n(t)$ 表示信道噪声， $k(t)$ 表示信道特性，信道的输出由信道输入、信道特性、信道噪声共同决定。信道噪声是叠加在信号上的，称为加性噪声，而信道特性对信号的影响通常在有输入信号时才存在，因此可以将信道对信号的影响简化表示为相乘的关系，称为乘性噪声。信道输入输出之间的关系可用式 (1-1) 表示。

$$e_o(t) = k(t)e_i(t) + n(t) \quad (1-1)$$

对于数字通信系统，我们关注的是数字信号传输前后之间的关系，即编码器输出至接收端译码器输入之间，这时将调制解调器也看成信道的一部分。数字信号符号个数有限，例如二进制信号，符号为“0”或“1”，这时信道对信号的影响用传输概率体现，可表示为矩阵形式。

$$[P]_{Y|X} = \begin{bmatrix} P(0/0) & P(1/0) \\ P(0/1) & P(1/1) \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

此处 $X = [0/1]$ ， $Y = [0/1]$ 分别表示信道输入和输出信源。 $P(0/0)$ 和 $P(1/1)$ 是正确传输概率， $P(0/1)$ 和 $P(1/0)$ 是错误传输概率。信道的转移关系也可以用线图形式表示，如图 1-9 所示。

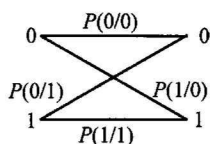


图 1-9 二进制编码信道线图

信道特性 $k(t)$ 的性质决定了信道是恒参还是随参。恒参信道指信道的特性可以用恒定（或近似恒定）的传输函数表示，即 $k(t)$ 是确定函数；随参信道则是信道的特性只能用随机过程表示，也就是说其特性随时间会发生改变，即 $k(t)$ 是随机过程。

1.3.2 常用信道

对于常用的通信方式：固定电话、电视、广播、微波通信、卫星通信、移动通信，常用信道有对称电缆、同轴电缆、光纤、无线广播信道、微波中继、卫星中继、无线移动信道等。其中，有线信道、无线信道中的微波中继和卫星中继是恒参的，其他无线信道是随参的。

1. 对称电缆

对称电缆是由两根相互绝缘的导线绞合而成的，因此又称为双绞线，两条导线绞合可以减轻电磁干扰。双绞线损耗较大，但性能较稳定，主要用于近距离传输话音信号和数字信号，即固定电话网中用户接入和局域网。图 1-10 是双绞线示意图和实物图。

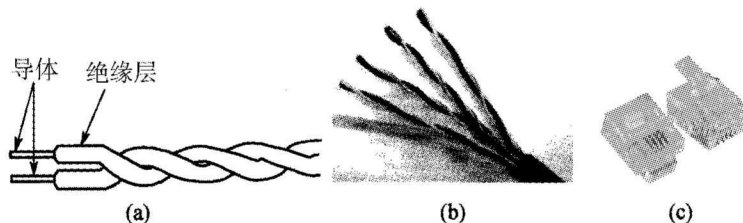


图 1-10 双绞线

(a) 示意图；(b) 双绞线；(c) 电话线接头

2. 同轴电缆

同轴电缆是指有两个同心导体的电缆，内导体以硬铜线为导线，外包一层绝缘材料，外导体是密织的网状导体，网外再覆盖一层保护性材料。网状导体起到屏蔽作用，使内导体传输的信号不受外界电磁干扰。与双绞线相比，同轴电缆带宽更宽，抗干扰能力更强，但是其体积大，价格比双绞线高，且直接传输距离近。同轴电缆主要用于有线电视网络和视频监控。图 1-11 是同轴电缆示意图和实物图。

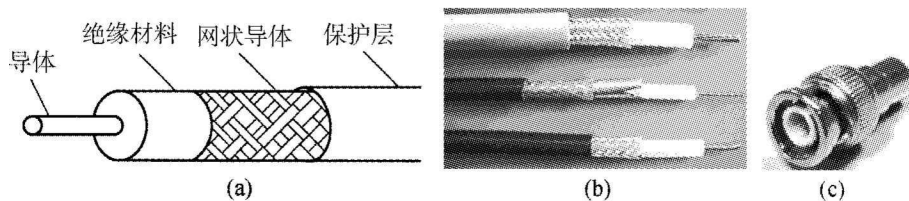


图 1-11 同轴电缆

(a) 同轴电缆结构示意图；(b) 同轴电缆；(c) 同轴电缆接头

◆◆通信系统原理

3. 光纤

光纤是光导纤维的简称，用于传输光信号。光纤在使用前必须由保护结构包覆，包覆后的缆线被称为光缆。光缆由内芯、包层和包覆层组成。内芯和包层都是高纯度的石英玻璃介质，它们的折射率不同，内芯的折射率大于包层，于是光波会在边界处不断产生反射，从而约束光信号在内芯传输。

光纤通信是利用光导纤维传输光信号来实现通信的，与其他通信方式相比有许多显著的特点：①衰耗极低，而且在相当宽频带内各频率的衰耗几乎相同，中继距离长，特别适合长途干线通信；②具有极大传输带宽，传输容量极大，一对金属电话线至多只能同时传送一千多路电话，而根据理论计算，一对细如蛛丝的光导纤维可以同时通一百亿路电话。③在有电磁干扰的环境下也能实现正常通信；④光纤接头不产生放电，可用于矿井、石油化工等易燃易爆环境；⑤熔点高，可在建筑物不慎起火时，保证缆内光纤通信畅通；⑥生产光纤的主要原料硅，来自于取之不尽、用之不竭的石英砂，不含有色金属，节省金属资源，且尺寸小、重量轻、不会锈蚀、化学稳定性相当好。

光线在光纤中有两种传播模式：单模和多模。将光纤的线芯和包层交界面上产生全反射的光线称为光的一个传输模式，当光纤的芯直径较大，光波以多个特定角射入光纤截面并传播，此时光纤中就有多个模式，传输多个模式的光纤称为多模光纤。当光纤芯直径很小时，只允许一种最基本的模式传播，模式单纯，称为单模光纤。单模光纤频带更宽，传输容量更大。光缆结构示意图如图 1-12 所示。

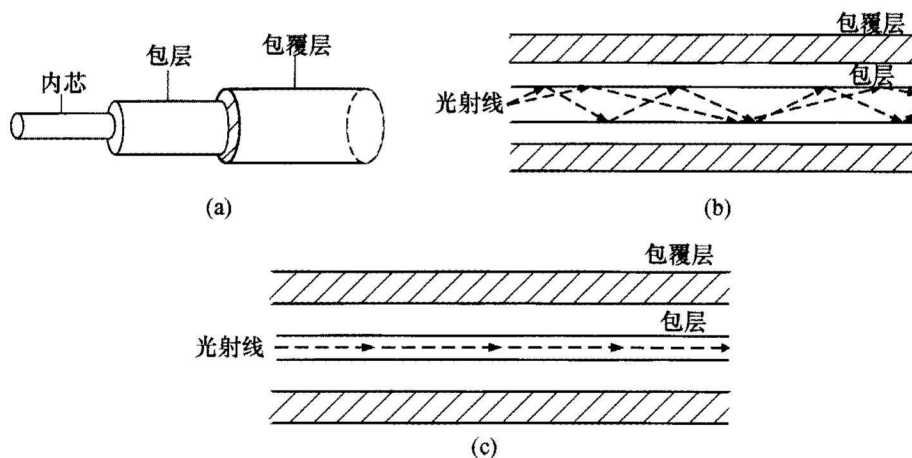


图 1-12 光缆和光纤结构示意图

(a) 光缆示意图；(b) 多模光纤；(c) 单模光纤

最早提出用光纤进行通信的是华裔科学家高锟 (Charles Kuen Kao)，于 1964 年提出在电话网络中以光代替电流，以玻璃纤维代替导线；1965 年，提出以石英基玻璃纤维做远程信息传递；1966 年，发表了一篇题为《光频率介质纤维表面波导》的论文，开创性地提出光导纤维在通信上应用的基本原理。由于他在光纤领域的特殊贡献，他被称为“光纤之父”。2009 年，高锟获得诺贝尔物理学奖。

4. 无线电广播信道

无线电广播信道处于几百千赫至几百兆赫，无线电广播按波长主要有中波 (AM 调幅

广播)、短波和超短波 (FM 调频广播)。对于 AM 和 FM 广播,发射台通过安装在高塔上的天线辐射,将信号送达广阔的周边地区。对于短波广播,通过电离层反射波实现信号传输,其信道特性受天气和季节影响明显,因此是随参信道。

5. 微波中继信道

微波中继信道通过中继接力的方式传输电磁波。微波一般指频率为 300 MHz ~ 300 GHz 的电磁波,微波频率比一般的无线电波频率高,微波具有直线传播的特点,其路径上不能有任何障碍物,因此称为视距通信。一般微波通信的中继距离在 50km 左右,中继距离是两个中继站的间隔。若要实现更远距离通信,需要通过中继接力的方式。微波中继信道性能稳定,因此是恒参信道。微波中继信道如图 1-13 所示。

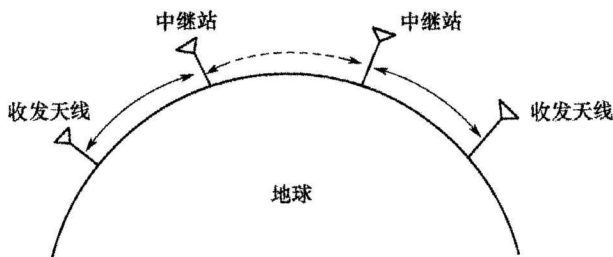


图 1-13 微波中继信道

6. 卫星中继信道

卫星中继实际上是微波中继的特殊形式,它以地球的同步通信卫星为中继站。卫星的同步轨道运行方向与地球自转方向一致,卫星在轨道上的绕行速度等于地球自转的角速度,因此相对于地球是静止的。卫星中继信道具有距离远、覆盖地域广、频带宽和稳定可靠的特点,但同时传输时延大。利用三颗同步通信卫星可以覆盖地球上除南北极之外的几乎所有区域。卫星中继信道如图 1-14 所示。

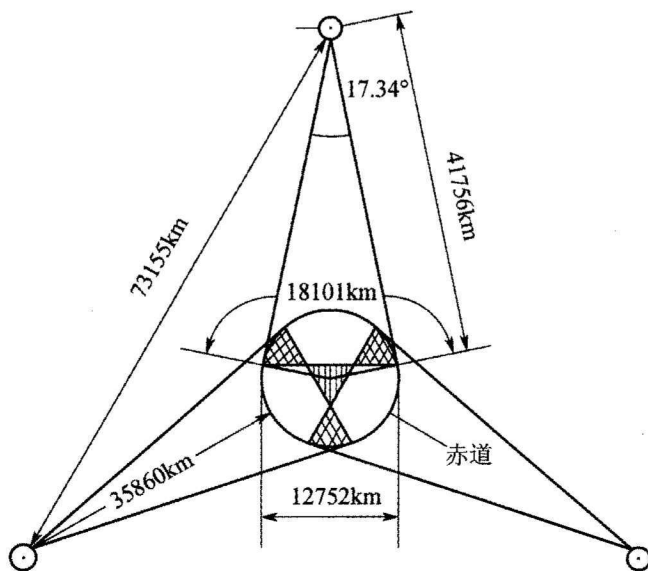


图 1-14 卫星中继信道

7. 无线移动信道

无线移动信道通常工作在几百兆赫至几吉赫,通过基站实现不同电话用户之间的通