

中等专业学校
电子信息类

DIANZIKEJIDAXUECHUBANSHE

XILIEJIAOCAI

规划教材

中专电子技术

通信技术

王钧铭 主编

01001011
11010110



电子科技大学出版社

UESTC PUBLISHING HOUSE

中等专业学校 规划教材
电子信息类

通信 技术

王钧铭 主编

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书系中等专业学校全国电子信息类、电子技术专业“九五”规划教材，重点介绍了模拟信号与数字信号的传输原理，光纤通信技术、卫星通信技术、移动通信及交换技术，并对各种通信网络如电信网、移动电话网、有线电视网及部分数字通信网组成及工作原理作了简单的介绍。本书内容浅显，所涉及的知识面较宽，比较适合中等专业学校无线电技术专业的学生使用，也可作为电子类工程技术人员和管理人员的培训教材及电子技术专业参考用书。

声 明

本书无四川省版权防盗标识，不得销售；版权所有，违者必究，举报有奖，举报电话：（028）6636481 6241146 3201496

中等专业学校 规划教材
电子信息类

通信技术

王钧铭 主编

出 版：电子科技大学出版社 （成都建设北路二段四号，邮编：610054）

责任编辑：舒 标 林 亮 陈 立

发 行：新华书店

印 刷：四川建筑印刷厂

开 本：787×1092 1/16 印张 15.25 字数 371 千字

版 次：1999 年 11 月第一版

印 次：1999 年 11 月第一次

书 号：ISBN 7-81065-218-4/TN·17

印 数：1~3000 册

定 价：17.00 元

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办协商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系全国电子信息类中等专业学校电子技术专业教学指导委员会 1996—2000 年的规划教材，经该委员会评选出版。

本教材由南京无线电工业学校王钧铭高级讲师担任主编，张丽华高级讲师参加编写了第四章。主审是北京无线电工业学校的刘莲青高级讲师，责任编委是上海电子技术学校的吴汉森高级讲师。

本教材共有八章，内容包括：模拟与数字信号传输，当前通信领域里的三大骨干系统——光纤通信系统、卫星通信系统和移动通信系统和组成，各种通信网络如公用电话网、有线电视网、无线寻呼网、综合业务数字网和分组交换数据网的结构等，在一定程度上反映了现代通信技术。由于受篇幅的限制，每一个内容都难以详尽介绍，对使用本教材者来说也不可能就此能掌握通信技术。我们的目标在于帮助读者建立一个完整的通信系统的概念，掌握通信的基本原理，了解通信技术的现状与发展趋势。

通信技术这门课程与其它课程的最显著的区别在于它的系统性。如果读者能够通过本教材的学习和一定的训练获得一种用系统的、全局的观点分析问题的能力，这将是本教材的成功之处。因此希望读者在使用本教材时要注意各章节的前后联系、本课程与其它课程的联系以及通信技术与其它技术的联系。适当地查阅一些参考书、参加一些讨论和参观一些实际的通信系统或设备对于学好这门课将会有很大的帮助。

虽然多年来编者一直从事通信技术的教学和研究，但对于通信领域里快速涌现的新技术、新概念、新知识等等深感应接不暇，对书中的有些内容难免有认识和理解上的不足，希望能得到批评指正。

编 者
1999 年 6 月

目 录

第一章 通信技术概论	1
§1.1 绪 言	1
§1.2 信 号	1
一、基带信号与频带信号	2
二、数字信号与模拟信号	3
§1.3 信 道	3
一、信道类型与特点	3
二、双绞线 (twisted Wire) 电话信道	5
三、同轴电缆 (Coaxial Cable) 信道	6
四、光导纤维 (Optical Fiber) 信道	7
五、中波 (Medium Wave) 地表面波传播信道	8
六、直射波信道	9
七、短波电离层反射信道	9
§1.4 通 信 系 统	10
一、通信系统的基本组成	10
二、通信系统的分类	11
三、通信系统的性能指标	11
§1.5 通 信 网	12
一、通信网的基本结构	12
二、通信网的转接方式	14
三、信号交换	14
§1.6 通信技术的现状与发展	15
一、通信技术的现状	15
二、通信技术发展的总体趋势	16
习题与思考题	18
第二章 模拟信号传输	19
§2.1 绪 言	19
§2.2 模拟信号的基带传输	19
一、模拟基带信号的特性	19
二、模拟信号的基带传输系统	20
§2.3 模拟调制与解调技术	20

一、调幅 (AM)	21
二、单边带调制 (SSB)	23
三、频率调制与解调 (FM)	27
§2.4 频分多路复用 (FDM) 技术	31
§2.5 无线电发射机	34
一、无线电发射机的基本组成	34
二、发射机的主要技术指标	34
三、短波单边带发射机	36
四、调频发射机	37
§2.6 无线电接收机	38
一、超外差接收技术	38
二、无线电接收机的组成方案	44
三、短波单边带接收机	48
四、调频接收机	50
习题与思考题	50
第三章 数字信号及其传输	52
§3.1 绪 言	52
§3.2 数字信号基带传输	53
一、数字基带信号	53
二、数字信号的基带传输	57
三、码同步技术	61
四、帧同步技术	63
§3.3 数字编码	65
一、信息码	66
二、模拟信号的数字编码	66
三、信道编码	77
四、差错控制编码	80
§3.4 数字调制与解调	83
一、二进制振幅键控 (ASK)	83
二、二进制频移键控 (FSK)	85
三、二进制相移键控 (PSK) 及二进制差分相移键控 (DPSK)	88
四、多相制相移键控	90
五、多进制正交幅度调制	93
六、调制解调器	96
§3.5 时分多路复用 (TDM)	98
一、时分多路复用的基本概念	98
二、30/32 路 PCM 通信系统的帧结构与终端组成	99

§3.6 数字复接	100
一、数字信号的复接	101
二、数字复接中的码速变换	102
三、异步复接	103
习题与思考题	104
 第四章 卫星通信	 106
§4.1 绪 言	106
§4.2 卫星通信系统的组成	106
一、卫星通信系统	106
二、同步卫星通信	108
三、移动卫星通信	108
四、卫星通信线路计算	109
五、卫星通信的频段选择	112
§4.3 卫星转发器	112
一、卫星转发器	112
二、东方红三号通信广播卫星简介	115
§4.4 卫星地面发射站	116
一、卫星地面发射站组成及工作原理	116
二、大功率发射设备	117
三、天线系统	119
§4.5 卫星地面接收机	122
一、卫星地面接收机组成及工作原理	122
二、卫星电视接收机	123
§4.6 卫星通信的多址联接技术	125
一、频分多址方式 (FDMA)	126
二、时分多址 (TDMA) 方式	127
三、空分多址方式 (SDMA)	128
四、码分多址 (CDMA) 方式	130
五、四种多址联接方式的比较	131
习题与思考题	132
 第五章 光纤通信	 133
§5.1 绪 言	133
§5.2 光纤、光缆及光纤的连接	133
一、光纤	133
二、光缆	136
三、光缆的敷设	137

§5.3 光纤通信系统	141
一、光发射机	141
二、光接收机	144
三、中继器	146
§5.4 波分复用技术 (WDM)	148
习题与思考题	149
第六章 移动通信	150
§6.1 移动通信的基本概念	150
一、移动通信系统分类	150
二、移动通信系统的工作方式	152
三、移动通信系统的特点	153
四、移动通信的主要技术动向和发展趋势	154
§6.2 移动通信中的调制与解调	156
一、最小移频键控 (MSK)	156
二、受控调频 (TFM)	161
三、预调制高斯滤波最小移频键控 (GMSK)	162
§6.3 移动通信网的构成	162
一、无线服务区的结构	162
二、带状网	163
三、蜂窝状移动通信网	164
四、移动通信的联网结构	164
§6.4 移动通信系统中的信令	165
一、模拟信令	166
二、数字信令	167
三、蜂窝系统信令的内容和传输控制	168
§6.5 移动通信交换设备的特殊功能	170
§6.6 无线寻呼系统	171
一、无线寻呼系统的基本组成	172
二、信令及编码方式	172
三、寻呼接收机	174
四、本地无线寻呼网的结构和系统组成	176
五、区域无线寻呼网的结构和系统组成	178
习题与思考题	179
第七章 通信网	180
§7.1 绪 言	180
§7.2 公用电话网	180

一、公用电话网的网络结构	180
二、信令 (Signalling)	183
三、电话信号传输	189
四、电话网中的数据传输	191
§7.3 有线电视网	196
一、CATV 系统的组成	197
二、前端设备	198
三、信号传输与分配网络	199
四、光纤有线电视网	202
§7.4 综合业务数字网 (ISDN)	204
一、ISDN 的基本概念及定义	204
二、ISDN 的网络体系	205
三、ISDN 用户 / 网络接口及接入参考配置	207
§7.5 分组交换数据网	210
一、分组交换网 (PSN) 的基本工作原理	210
二、分组交换技术	212
三、分组交换网的通信协议	213
习题与思考题	216
第八章 程控交换技术	217
§8.1 绪 言	217
一、程控交换系统的基本组成	217
二、交换系统的基本功能	218
三、程控交换机的类型	219
§8.2 空分交换与时分交换的基本原理	219
一、空分交换原理	219
二、时分交换原理	220
§8.3 程控交换机的外部接口	224
一、模拟用户线接口	224
二、数字用户线接口	226
三、数字中继线接口	227
四、公用服务电路	229
习题与思考题	231

第一章 通信技术概论

§1.1 绪 言

通信的基本任务是解决两地之间信息的传递与交换。由于通信双方之间的距离客观存在，因此首先必须在两地之间建立信息传递的通道。这种有形或无形的、用于传递信息的通道称为信道(channel)。信道有其自身的特性，我们一方面要研究信道，同时还要寻找能适合在信道中传输的信息的载体，也就是信号(signal)。我们以前所学到的各种已调信号如 FM 信号、SSB 信号等就是几种适合高频信道的信号。

一个包括发送设备、信道和接收设备的信号传输系统能够完成从一地到另一地之间的信息传递。双向的传输系统可以实现信号在两个终端设备之间的互连，因此被称为通信链路(link)，如图 1-1 所示。

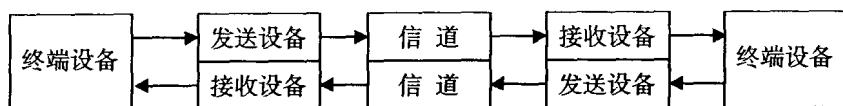


图 1-1 通信链路

为了使信号能够更有效、更可靠地在传输系统中进行传递，对信号的处理是非常必要的。信号的处理可以是最简单的滤波、整形等，也可能是复杂的数据压缩、抗干扰编码等。通信系统的性能与其信号处理能力有非常密切地关系。

多用户通信系统互连的通信体系称之为通信网(communications network)。它以转接交换设备为核心，由通信链路将多个用户终端连接起来，在管理机构（包含各种通信与网络协议）的控制下实现网上各个用户之间的相互通信。

综上所述，一个完备的通信系统（网络）应由四大部分构成，即通信链路、终端信号处理设备、转接交换设备和管理机构，它们所要传输、处理和转接的对象是信号，因此首先必须对信号有一个基本的认识。

§1.2 信 号

信号是信息的表现形式。它可以是声音、图像、电压、电流或光等。这里主要讨论的是电信号，或者是由其它形式转换以后的电信号，如话音信号和图像信号。对信号的描述

可以有两种方法，即时域法和频域法。时域法研究的是信号的电量（电压、电流或功率）随时间变化的情况，通常可以以观察波形的方法进行；频域法研究的是信号的电量在频率域中的分布情况，也称为信号的频谱分析，可以用频谱分析仪观察信号的频谱。图 1-2 是一个话音信号的波形和频谱图。对于数字信号，也常用逻辑分析的方法来比较信号的状态变化情况，有的资料将其称之为信号的数据域分析。

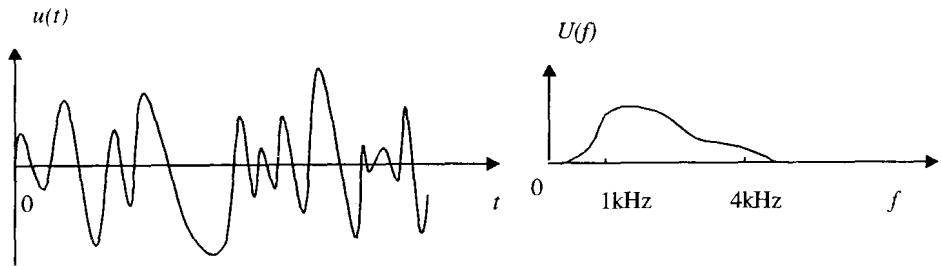


图 1-2 话音信号的波形与频谱图

信号的时域和频域描述可以通过傅立叶变换进行转换。设信号 $u_s(t)$ 的频谱密度为 $U_s(f)$ ，则有：

$$U_s(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u_s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1-1)$$

$$u_s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} U_s(f) e^{j2\pi ft} df \quad (1-2)$$

式 (1-1) 和式 (1-2) 分别称为傅立叶变换和傅立叶反变换。

电信号可以有多种分类方法。若以频率划分，可分为基带信号和频带信号；若以信号参数的状态划分，则可以分为模拟信号和数字信号。

一、基带信号与频带信号

基带信号是指含有低频成分甚至直流成分的信号，通常原始信号都是基带信号。基带信号所占据的频带宽度相对于它的中心频率而言很宽，不适合于较长距离传输，更不能进行无线电发送。话音信号是一种典型的基带信号，它由人的声音经话筒转换而成，其频率在几十个 Hz 到十几个 kHz 范围内。计算机数据也是一种基带信号。

频带信号的中心频率相对较高，而带宽又窄，因此适合于在信道中传输。基带信号经过各种正弦调制可以转换成频带信号。常见的调制方式有振幅调制（AM）、单边带调制（SSB）、频率调制（FM）和相位调制（PM）。如果调制信号是数字信号，则还可以有数字键控方式的调制，如振幅键控（ASK）、频移键控（FSK）、相移键控（PSK）以及差分相移键控（DPSK）等。近年来还出现了很多窄带调制方式，如 MSK、16QAM 等。

二、数字信号与模拟信号

自然界存在的信号大多是模拟信号，其主要的特征有两个，一是时间上连续，任意时刻的信号值都是它的一部分；其次是状态连续，任意时刻的值和与其相邻时刻的值相关，从数学角度上讲，模拟信号的值对时间的导数（ dV/dt ）总是存在的。常见的模拟信号有话音信号、电视图像信号以及来自于各种传感器的检测信号等。

数字信号是另一种形式的信号，它具有离散且有限的状态。目前常见的数字信号多为二进制信号，其二个状态分别用“1”和“0”表示。图 1-3 是几种数字信号的例子。相对而言，模拟信号比较适合于传输，数字信号则比较适合于处理。

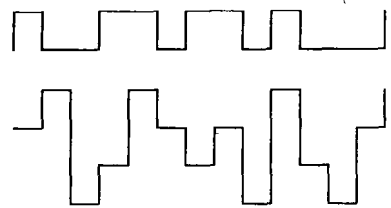


图 1-3 几种数字信号的例子

模拟信号与数字信号是可以相互转换的。模拟信号可以通过 A/D 转换（数字编码）变为数字信号，而数字信号通过 D/A 转换（解码）可以变为模拟信号，在通信中常见的数字编解码方式有 PCM^①编码、增量调制以及在此基础上改进的各种方式。值得一提的是，当数字信号需要在模拟信道中传输时，数字基带信号必须进行正弦调制，将基带信号转换成频带信号，以适应模拟信道的传输特性，比如计算机数据要通过模拟电话线传输时，必须使用调制解调器（Modem），有些资料把这种方式称为数字信号的模拟传输。

§ 1.3 信 道

一、信道类型与特点

1.信道的分类

信道是信号传递的媒介。现有的信道有两大类，一类是有线信道，它由有形的介质构成，如双绞线、同轴电缆、光导纤维等。另一类是无线信道，由无形的空间构成。从信道的特性看，信道可以分为恒参信道和随参信道两类。有线信道是恒参信道，其传输特性恒定不变，信号在传输过程中受干扰的影响也比较小；无线信道包含了从发送端到接收端之间的无线空间，以天线作为信道的接口设备。无线信道的频率范围很宽，从极低频一直到微波波段，其中根据频率的不同和传播方式的不同又可以分为很多种信道。表 1-1 列出了各种无线信道的工作频率和它们的传播方式。

^① Pulse Code Modulation 脉冲编码调制。

表 1-1 无线信道的工作频率和传播方式

名称	频率范围	波长范围	主要传播方式	用途
长波	30-300kHz	1-10km	地表面波	远距离通信、导航
中波	300-3000kHz	0.1-1km	地表面波	调幅广播、船舶通信、飞行通信
短波	3-30MHz	10-100m	地表面波 电离层反射	调幅广播、 调幅与单边带通信
超短波	30-300MHz	1-10m	直射波 对流层散射	调频广播、调频广播与通信 雷达与导航、移动通信
微波	300MHz 以上	1m 以下	直射波	微波接力通信、卫星通信 移动通信

在表中所列的信道中，除了电离层反射信道、对流层散射信道以及移动通信中用到的信道属于随参信道外，其它所有信道都可以看作是恒参信道。顾名思义，随参信道是指性能参数随时间变化的信道，而恒参信道的参数则固定不变。我们可以用这样的数学模型来描述信道对输入信号的作用：

$$e_o(t)=k(t) \times e_i(t)+n(t)$$

式中， $e_i(t)$ 是信道的输入信号，也即发送设备的输出信号； $e_o(t)$ 是信道的输出信号，也即接收设备的输入信号。 $k(t)$ 是信道的衰减系数，对恒参信道而言它是一个常数； $n(t)$ 代表信道中叠加的噪声，也称为加性噪声。这个数学模型的物理含义是：在一个通信系统中，接收端所接收到的信号与发送端所发送的信号有比例关系，发送的信号越强，接收的信号也越大；信道使信号在传输过程中受到衰减，并且衰减量可能会随时间变化；无论发送端是否发送信号，接收端都会收到加性干扰。

2.恒参信道对信号传输的影响

由于恒参信道的参数变化很缓慢，可以认为恒参信道是一个线性时不变网络，与滤波器有类似的特性。因此信道的传输特性可以用幅度—频率特性和相位—频率特性来表征。

图 1-4 是一个理想的基带信

道的传输特性。在 $0 \sim f_c$ 的频率

范围内，信道的传输系数为一常数，表示信道对信号的各个频率成分有相同的衰减；相移是一条负斜率直线，表示信号的各个频率成分在信道中传输时有相同的时延，因此理想信道不会造成信号的线性畸变（线性失真）。实际上，如果信号的相对带宽很

窄，则实际信道特性一般不会对造成信号的幅频畸变和相频畸变，只有在传送宽带信号时才

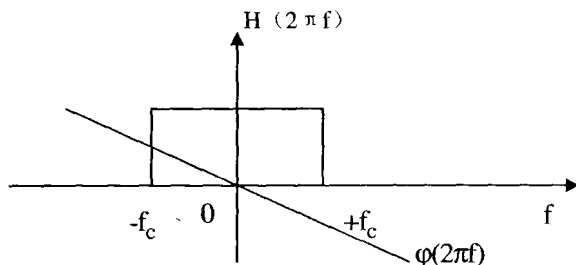


图 1-4 理想传输系统的幅频特性与相频特性

会考虑信号的畸变。相频畸变对语音信号的影响较小，而对图象信号和数据信号的影响较大。为了减少线性畸变，往往在系统中附加一个线性的补偿网络，使系统总的特性在信号的频率范围内平稳，这一措施通常称为“均衡”。

3. 随参信道对信号传输的影响

随参信道的特性比恒参信道要复杂得多，对信号的影响也严重得多，其根本原因在于它包含了一个复杂的传输媒介。各种随参信道的传播机理不同，对信号的影响也有所不同，但都会造成信号的随机衰落(break up)，包括一致性衰落和选择性衰落。所谓一致性衰落指的是在信道输出端，所传输的信号整个频谱中各个频率成分都随时间一起变大或变小，严重时信号很小以致于不能被正常接收；选择性衰落是指信道对信号频谱中各个频率成分的衰落随时间作不同的变化，有的频率成份增大，有的减小，各成份之间的相互关系被破坏，类似于产生了线性失真，但是是随机变化的。通信系统对随机衰落的处理有多种方法，有关内容将在后面的章节中介绍。

二、双绞线 (twisted Wire) 电话信道

PSTN^①中的接入网（电话端局与用户之间的电话网）主要由双绞线作为传输介质。所谓双绞线就是一对绞合在一起的相互绝缘的导线。它可以作为计算机主机之间的联接线路，或是电话机与端局交换机之间的通信线路，也称作为传输线。

双绞线最常用于声音的模拟传输。虽然语音的频谱在 20~15000Hz 之间，但是进行可理解的语音传输所需要的带宽却窄得多。一条全双工音频通道的标准带宽是 300~3400Hz。在一根双绞线上，使用频分多路复用技术可以进行多个音频通道的多路复用。每个通道的带宽为 4kHz，并在通道间提供适当的隔离。双绞线的带宽可达 268kHz，具有 24 条音频通道的容量。

双绞线的物理参数与其结构有关，基本参数包括：

两根导线之间的电容	$C \text{ (F/m)}$
导体电阻	$R \text{ (}\Omega/\text{m)}$
导体之间的漏导	$G \text{ (S/m)}$
电感	$L \text{ (H/m)}$

这些参数对信道的特性都会有一定的影响。一条有一定长度的双绞线可以被看作是 n 个单位长度的导线的级联，如图 1-5。设每级的电压传输系数为 K ，则总的传输系数 k 等于 K^n 。^②

若用分贝表示，有：

$$\begin{aligned} k(\text{dB}) &= 20 \log_{10} (K^n) \\ &= n \times 20 \log_{10} (K) = -n\alpha \text{ dB} \end{aligned}$$

^① Public Switched Telephone Network 公共交换电话网。

^② 这里假定每级的输入阻抗与负载阻抗都相同。

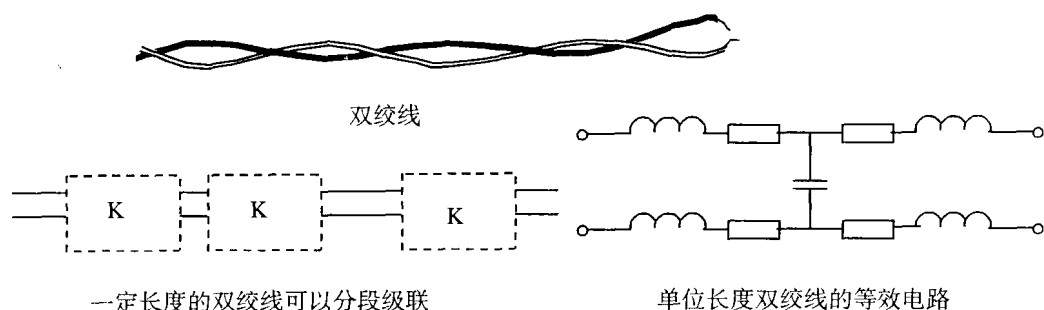


图 1-5 双绞线的等效

这里 $\alpha = -20 \log_{10}(K)$ 是单位长度的电线的衰减量，单位 dB/m。由此可见，双绞线的衰减量与其长度成正比。通常用于模拟话音传输的双绞线的长度不超过 5~6km，更长的线路需要加中间放大器。

必须注意到，由于双绞线存在着分布电抗，因此其衰减还与频率有关，并且随着频率的升高而增大。为了使信道在较宽的频率范围内有平坦的特性，必须在信道中接入频率补偿电路，通常被称作均衡器。对于一般的双绞线，往往在线路的适当位置上接入一个负载线圈以改善其传输特性。

双绞线按其线径的大小有不同的规格，表 1-2 列出了各种常用双绞线的线规。长途线路一般使用 19 号标准的电线，本地电话回路一般使用 26 号标准以下的电线，而且主要是采用无屏蔽的 24 号标准电线。

双绞线一般用于点到点的连接。在低频传输时，双绞线的抗干扰性相当于或高于同轴电缆，但是超过 1MHz 时，同轴电缆应比双绞线明显优越。

为了线路的敷设方便，生产厂家将 6~3600 对双绞线封装在一个护套内形成电话线缆。相邻对线拧成的螺距不同，用以限制相互之间的串音（Crosstalk）。

表 1-2 中、美线规对照表

号数	中规线径 (mm)	美规线径 (mm)
19	0.900	0.912
20		0.812
21	0.800	0.723
22	0.710	0.664
	0.630	
23	0.560	0.573
24		0.511
25	0.500	0.455
26	0.450	0.405
	0.400	

三、同轴电缆（Coaxial Cable）信道

同轴电缆的频带宽度要比双绞线宽得多，其上限频率一般可达到几百 MHz 以上，视线径而定。它的衰减与频率的平方根成正比，因此在远距离传输和宽带工作时仍需要用到均衡器。同轴电缆目前主要用于本地网（LAN）、有线电视（CATV）和海底电缆通信中。同轴电缆由芯线、内衬层、屏蔽层和外护套构成，由于同轴电缆的特殊结构

(图 1-6)，电缆内部的信号不会泄漏到外部，同样外部的干扰也不会进入到线缆内部，因此同轴电缆信道有很好的保密性和抗干扰性。

四、光导纤维 (Optical Fiber) 信道

1. 光导纤维的结构与工作原理

光导纤维是由高纯度的石英玻璃制成的，其直径约为 $125\mu\text{m}$ 。图 1-7 是一种阶跃折射率型光导纤维的结构示意图。它有两层，芯层是由较高折射率的材料制成，直径约 $50\mu\text{m}$ (多模光纤) 或 $10\mu\text{m}$ (单模光纤)，外包层材料的折射率较低，只要光的入射角足够小，光信号就能沿着芯层传播，并且在两层之间产生全反射。

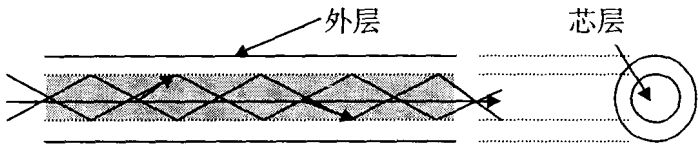


图 1-7 光导纤维结构图与光的传播原理

假设有一个很窄的光脉冲信号被送入长度为 L 的光纤，其中一部分的入射角为零，则这部分的传输延迟

$$\tau_{\min}=L/v_1=n_1L/c$$

式中， $v_1=c/n_1$ 是光在芯层中传播的速度， n_1 为光纤纤芯折射率。光脉冲另一部分的入射角为 θ ，则这部分光在芯层中走过的路径的总长度为 P ，且有

$$P=L/\cos\theta$$

其延迟时间为

$$\tau(\theta)=P/v_1=n_1L/c\cos\theta$$

在最坏的情况下，即入射角为 $\theta_{\max}$ 时 ($\cos\theta_{\max}=n_2/n_1$ ， n_2 为光纤外层折射率)，有

$$\tau_{\max}=n_1L/cn_2$$

由此可见，光信号在芯层中传播时由于入射角的不同而造成时延的不同，因而使信号的延续时间变长，这种现象称为光脉冲扩展，如图 1-8 所示。光脉冲展宽现象会导致信道的带宽下降，当信号相邻两个脉冲靠得很近时，相邻的脉冲就难以被区分，在传送较高速度的数

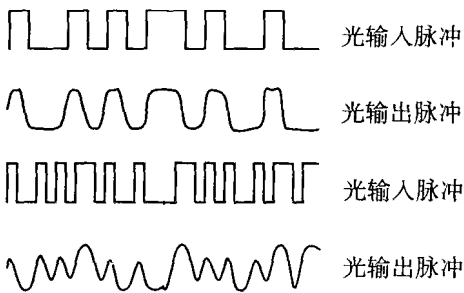


图 1-8 光信号的扩散