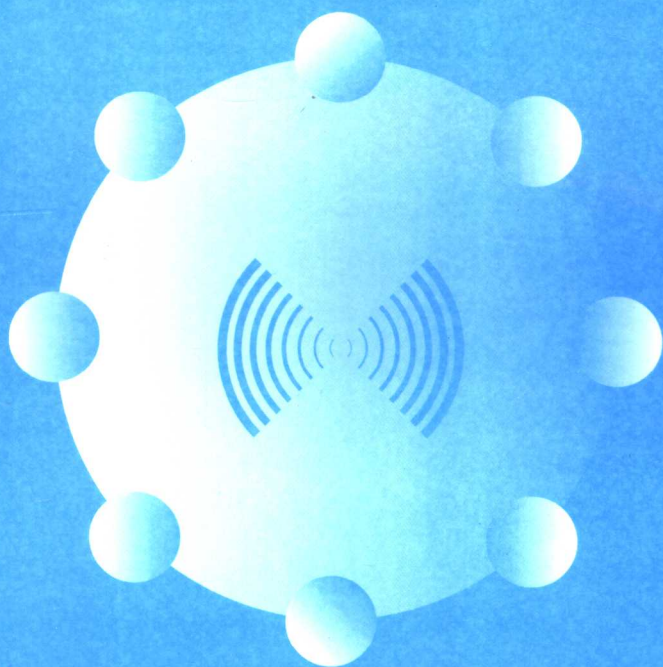


通信原理及其应用

(第2版)

王秉钧 王少毅 韩敏 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

通信原理及其应用

(第2版)

王秉钧 王少毅 韩敏 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书比较系统扼要地讲述了现代通信系统的基本原理、基本性能和具体应用。全书共分9章,包括绪论、模拟调制系统、模拟信号的数字传输、数字信号的基带传输、数字信号的载波传输、通信系统的抗噪声性能、信道复用和多址技术、信道编码、通信系统举例等。各章均有习题,并附有部分习题答案。

本书着重物理概念的阐述,突出对基本知识的理解、应用和吸收新的技术成果,简化了部分烦琐的数学推导,可满足不同专业、不同层次学习对象的需要。本书通俗易懂、重点突出、便于自学。

本书可作为高等院校通信工程、信息工程、电子工程、计算机、自动化及其他相关专业本科生、高职生、函授生的教材,也可供从事这方面工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理及其应用/王秉钧,王少毅,韩敏编著.

2版. —北京:国防工业出版社,2006.6

ISBN 7-118-04504-7

I.通... II.①王...②王...③韩... III.通信理论 IV.TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 036060 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20½ 字数 471 千字

2006 年 6 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

本书是作者 2000 年出版的《通信原理及其应用》的修订版。本次修订考虑到 21 世纪信息科学的发展趋势。与前几年相比,现代通信技术已经取得许多新的重大发展,尤其在移动通信和接入网等领域出现了许多新的调制、编码和信息传输方式,因此本次修订在结构和内容方面作了相应的变化,充实了许多新内容。

随着信息化社会的到来,信息与通信日益广泛地渗透到各行各业和各个学科。目前,不仅传统的通信工程专业设置通信原理课程,而且信息工程、电子工程、计算机、自动化以及其他相近专业均陆续开设此课。但目前国内教材模式比较单一,多偏重于基本理论、数学模型和分析方法,内容比较抽象,需要较强的数学基础。至于通信系统的具体内容则由后续一系列专业课来解决。然而,许多非通信专业,甚至不少学校的通信专业以及不同层次的教学对象不具备在此基础上学习的条件,因此组织教学比较困难。本书的目的是提供一本适应性、实用性均较强的教材,既要讲清通信原理的主要问题,又要充实通信系统实际应用方面的内容。全书着重原理和物理概念的理解,而不仅仅追求数学理论的严谨。因此,本书不仅适用于不同专业、先修课程各异的本科生,也可作为大专、高职、函授以及在职人员的培训教材。

使用本教材时可根据课程设置的具体情况 & 教学要求的侧重点不同进行灵活掌握。

本书由王秉钧、王少毅、韩敏编写。在此对参加第 1 版编写的窦晋江、张广森、葛方晖等同志表示感谢。

由于编者水平所限,书中可能存在疏漏和错误,恳请读者批评指正。

作者

2005 年 12 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 通信与通信系统	1
1.1.2 模拟通信、数字通信和数据通信	1
1.1.3 有线通信和无线通信	3
1.2 信息及其度量	7
1.3 信道	8
1.3.1 信道的分类	8
1.3.2 信道模型	8
1.3.3 恒参信道与变参信道特征	10
1.4 信道容量	11
1.5 通信系统的主要性能指标	15
1.5.1 通信系统的有效性	15
1.5.2 通信系统的可靠性	17
习题	18
第2章 模拟调制系统	19
2.1 调制的作用和分类	19
2.1.1 调制的目的和作用	19
2.1.2 调制的分类	20
2.2 标准调幅(AM)	21
2.2.1 标准调幅的波形及其频谱	21
2.2.2 调幅波的功率分布和效率	23
2.2.3 AM信号的产生和解调	25
2.3 抑制载波双边带调幅(DSB)	27
2.3.1 DSB的波形及其频谱	27
2.3.2 DSB调幅波的产生和解调	27
2.4 单边带调幅(SSB)	29
2.4.1 滤波法产生单边带信号	30
2.4.2 相移法产生单边带信号	30

2.4.3 单边带信号的解调	31
2.5 残留边带调幅(VSB)	33
2.5.1 VSB 调制原理	33
2.5.2 VSB 信号的解调	35
2.6 调幅应用举例	36
2.6.1 调幅广播	36
2.6.2 立体声广播	37
2.6.3 广播电视	39
2.6.4 单边带通信	39
2.7 角度调制	40
2.7.1 角度调制的一般概念	40
2.7.2 频率调制(FM)	42
2.7.3 宽带调频波的产生	47
2.7.4 调频信号的解调	49
2.8 调频应用举例	52
2.8.1 调频广播	52
2.8.2 广播电视伴音	54
习题	54
附录 A2	56
A2-1 傅里叶变换	56
A2-2 傅里叶变换的性质	57
A2-3 常用傅里叶变换对	57
A2-4 贝塞尔函数	58
第3章 模拟信号的数字传输	60
3.1 抽样定理	60
3.1.1 低通信号的抽样定理	60
3.1.2 带通信号的抽样定理	62
3.2 模拟脉冲调制	64
3.3 脉冲编码调制(PCM)	64
3.3.1 脉码调制的基本原理	65
3.3.2 量化	67
3.3.3 压缩与扩张	69
3.3.4 编码	74
3.3.5 逐次比较型编译码原理	75
3.4 增量调制(ΔM 或 DM)	78

3.4.1 预测编码的概念	78
3.4.2 增量调制(ΔM 或 DM)分析	79
3.5 差分脉码调制(DPCM)	82
3.6 自适应差分脉码调制(ADPCM)	83
3.7 语音压缩编码	84
习题	88
第4章 数字信号的基带传输	91
4.1 数字基带信号的常用波形和码型	91
4.2 数字基带信号的频谱分析	98
4.3 无码间串扰的基带传输特性	100
4.4 部分响应信号	106
4.4.1 部分响应波形	106
4.4.2 部分响应基带传输系统的相关编码和预编码	107
4.4.3 部分响应系统的一般形式	108
4.5 眼图和均衡	110
4.5.1 眼图	110
4.5.2 均衡	111
习题	112
第5章 数字信号的载波传输	117
5.1 二进制振幅键控(2ASK)	117
5.1.1 2ASK 信号的产生	117
5.1.2 2ASK 信号的频谱特性	118
5.1.3 2ASK 信号的解调	119
5.2 二进制频移键控(2FSK)	120
5.2.1 2FSK 信号的产生	120
5.2.2 2FSK 信号的频谱特性	121
5.2.3 2FSK 信号的解调	122
5.3 二进制相移键控(2PSK 和 2DPSK)	123
5.3.1 二进制相移键控(2PSK/BPSK)	123
5.3.2 二进制差分相移键控(2DPSK)	124
5.3.3 2PSK 及 2DPSK 信号的频谱特性	127
5.4 多进制数字调制系统	127
5.4.1 MASK 系统	128
5.4.2 MFSK 系统	130
5.4.3 MPSK/MDPSK 系统	131

5.4.4 MQAM 系统	137
5.4.5 CAP 调制系统	138
5.5 恒包络调制系统	139
5.5.1 交错正交相移键控(OQPSK)	139
5.5.2 $\pi/4$ 差分正交相移键控($\pi/4$ DQPSK)	140
5.5.3 最小频移键控(MSK)	142
5.5.4 高斯滤波的最小频移键控(GMSK)	145
5.6 正交频分复用(OFDM)	146
5.7 扩频调制	150
5.7.1 直接序列扩频(DS)	150
5.7.2 跳频(FH)	152
习题	153
第 6 章 通信系统的抗噪声性能	155
6.1 噪声及其表示方法	155
6.1.1 白噪声	155
6.1.2 限带高斯白噪声	156
6.1.3 窄带高斯噪声	157
6.1.4 正弦波加窄带高斯噪声	158
6.2 调幅系统相干解调的抗噪声性能	159
6.3 AM 系统包络检波器的抗噪声性能	162
6.3.1 大信噪比情况	163
6.3.2 小信噪比情况	164
6.3.3 门限效应	164
6.4 调频系统的抗噪声性能	165
6.5 调频(FM)的门限效应	168
6.6 二进制 PCM 系统的抗噪声性能	171
6.7 无码间串扰基带传输系统的抗噪声性能	172
6.8 二进制数字调制系统的抗噪声性能	175
6.8.1 2ASK 系统	175
6.8.2 2FSK 系统	177
6.8.3 2PSK 和 2DPSK 系统	179
6.8.4 二进制频带传输系统的简单比较	181
6.9 多进制数字调制系统的抗噪声性能	182
6.10 数字信号的最佳接收	182
6.10.1 匹配滤波器与相关器	183

6.10.2	最佳基带传输系统	187
6.10.3	二进制确知信号最佳接收的误码性能	189
6.10.4	二进制数字调制信号的最佳接收误码率	192
	习题	194
附录 A6		197
A6-1	误差函数表	197
A6-2	Q 函数表	199
A6-3	概率的一些基本知识	199
A6-4	随机信号和噪声分析	200
第 7 章	信道复用和多址技术	202
7.1	多路复用和多址技术的基本概念	202
7.2	频分多路复用(FDM)	203
7.2.1	FDM 系统基本原理	203
7.2.2	光纤通信系统中的波分复用(WDM)	205
7.3	时分复用(TDM)	206
7.3.1	TDM 基本原理	206
7.3.2	准同步数字系列(PDH)	209
7.3.3	数字复接的码速调整	211
7.3.4	同步数字系列(SDH)	212
7.4	码分复用(CDM)和空分复用(SDM)	216
7.5	多址技术	216
7.5.1	频分多址(FDMA)	218
7.5.2	时分多址(TDMA)	219
7.5.3	码分多址(CDMA)	221
7.5.4	ALOHA 方式	223
7.6	蜂窝移动通信中的多址技术	226
7.7	光纤通信中的多址技术	229
7.8	局域网中的多址技术	233
	习题	235
第 8 章	信道编码	237
8.1	差错控制的基本概念	237
8.1.1	差错控制方式	238
8.1.2	差错控制编码的分类	240
8.1.3	码长、码重、码距、码率和编码增益	240
8.1.4	检、纠错能力与最小码距的关系	241

8.2 常用检错码	241
8.3 线性分组码	244
8.3.1 基本概念	244
8.3.2 监督矩阵 H	246
8.3.3 生成矩阵 G	247
8.3.4 错误图样 E 与校正子 S	248
8.3.5 汉明码	250
8.3.6 交织码	250
8.4 循环码	252
8.4.1 循环码的特点	252
8.4.2 码多项式	252
8.4.3 生成多项式	253
8.4.4 生成矩阵	254
8.4.5 监督多项式与监督矩阵	254
8.4.6 系统循环码的编码及编码电路	255
8.4.7 系统循环码的译码及译码电路	256
8.4.8 截短循环码	258
8.4.9 几种重要循环码	259
8.5 卷积码	261
8.5.1 基本概念	261
8.5.2 卷积码的图解表示方法	262
8.5.3 卷积码的解析表示方法	263
8.5.4 卷积码的距离特性	264
8.5.5 卷积码的译码	265
8.6 级联码	267
8.7 Turbo 码	268
8.8 网格编码调制(TCM)	270
习题.....	273
第9章 通信系统举例.....	275
9.1 移动通信系统	275
9.1.1 移动通信的基本概念	275
9.1.2 移动通信系统的组成	275
9.1.3 移动通信的应用	276
9.1.4 小区制移动通信网的构成方法	277
9.1.5 分层蜂窝结构	278

9.1.6 蜂窝移动通信中的越区切换和漫游	281
9.2 GSM 数字蜂窝移动通信系统	282
9.2.1 GSM 系统的组成	282
9.2.2 GSM 系统的频率配置	287
9.2.3 GSM 系统的主要参数	287
9.3 CDMA 数字蜂窝移动通信系统	288
9.3.1 IS-95 CDMA 系统	288
9.3.2 IS-95 CDMA 系统的主要参数	291
9.3.3 cdma 2000 1x 系统的主要参数	292
9.3.4 3G 和未来移动通信系统	292
9.4 光纤通信系统	294
9.4.1 光纤通信的基本概念	294
9.4.2 光纤通信系统的组成	295
9.4.3 光纤通信的类型	296
9.5 光纤与光缆	298
9.5.1 光纤结构和类型	298
9.5.2 光纤的导光原理	299
9.5.3 光纤的传输特性	300
9.5.4 光缆	303
9.6 光源与光发射机	303
9.6.1 光源	303
9.6.2 光发射机	304
9.7 光电检测器与光接收机	305
9.7.1 光电检测器	305
9.7.2 光接收机	306
9.8 光中继器	306
9.9 光纤中继段传输距离的计算	307
习题	309
附录 B 部分习题答案	311
参考文献	318

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 通信与通信系统

人类在生产、生活和社会活动中总是伴随着消息的传递,这种传递消息的过程叫做通信。完成通信这一过程的全部设备和传输媒介构成了通信系统。

通信过程一般可用图 1.1.1 的模型概括。其中,信源的作用是产生(形成)消息。发信机将消息转换为适于在信道中传输的信号。信号是消息的直接反映,是与消息一一对应的。在电信系统里,它可以由电压、电流或电波等物理量来体现。在此,信道是指将信号由发信机传输到收信机的媒介或途径(通道)。在通信系统中,传递消息的同时,总伴随着噪声。噪声的来源很多,它散布在系统各点,但为了方便,在图 1.1.1 中将噪声源集中表示在一个方框里。收信机的作用与发信机相反,它是将信号转换为消息。收信者是消息传输的对象,它的作用与信源相反。信源和收信者可以是人或是设备,因此,有时也叫做发终端和收终端。

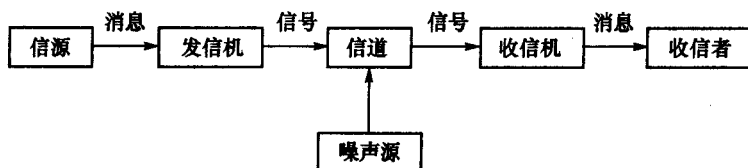


图 1.1.1 通信系统模型

1.1.2 模拟通信、数字通信和数据通信

通信系统中传输的消息是各式各样的,有语音(也称话音)、文字、符号和图像等。按照信号参量的取值方式及其与消息之间的关系,可将信号划分为两类,即模拟信号与数字信号。模拟信号是指代表消息的信号参量(幅度、频率或相位)随消息连续变化的信号。如代表消息的信号参量是幅度,则模拟信号的幅度应随消息连续变化,即幅度取值有无限多个。但在时间上可以连续,也可以离散。图 1.1.2 为时间连续和时间离散的模拟信号。

数字信号是指它不仅在时间上是离散的,而且在幅度取值上也是离散的(即幅值被限制在有限个数值之内)信号。图 1.1.3 所示的二进制数字信号就是以“1”和“0”两种状态的不同组合来表示不同的消息。

根据通信系统中所传送的是模拟信号还是数字信号,可以把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。应当指出,模拟通信与数字通信是按信道中所传送的信号差异来

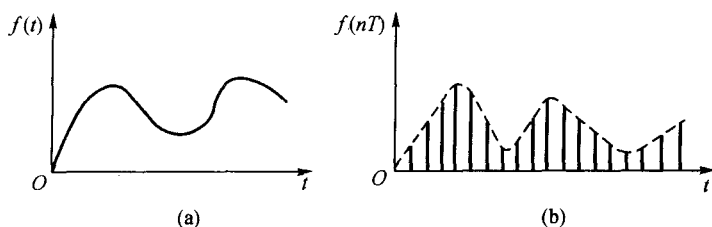


图 1.1.2 模拟信号

(a) 时间连续的模拟信号；(b) 时间离散的模拟信号。

区分的,而不是根据信源输出的消息来划分的。在图 1.1.1 中,若信源发出的是模拟消息,经发信机变换成的电信号是随时间连续变化的,称这种通信方式为模拟通信。若信源发出的模拟消息,当把与之对应的信号经过模/数(A/D)变换、数字化处理后,以数字信号形式来传送的通信方式叫做数字通信。在数字通信系统中可以使用数字传输方式,也可以使用模拟传输方式。

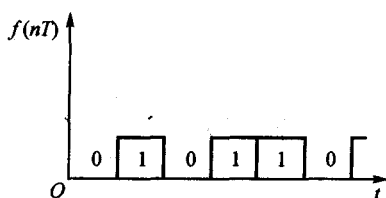


图 1.1.3 数字信号示意图

图 1.1.1 通信系统模型是对各种通信系统的简化概括,它可以反映通信系统的共性。根据所研究的对象或关心的问题不同,还会出现一些不同形式的具体的通信系统模型。例如,结合模拟通信系统的要求,可将图 1.1.1 具体化为图 1.1.4。

可见,在模拟通信系统中,发信机简化为调制器,收信机简化为解调器,主要是强调在模拟通信系统中调制的重要作用。从原则上讲,调制和解调对信号的变换起着决定性作用,是保证通信质量的关键。至于放大、滤波、变频等过程都可以看作是理想线性的,并将它们合并到信道中去。

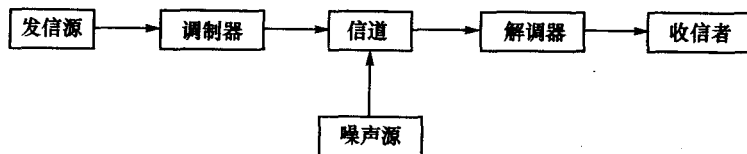


图 1.1.4 模拟通信系统模型

对于数字通信系统,图 1.1.1 可以具体化为图 1.1.5。其中信源编码是为提高通信系统传输有效性而对数字信号进行的一种变换。通常将代表信源消息的连续信号变换为

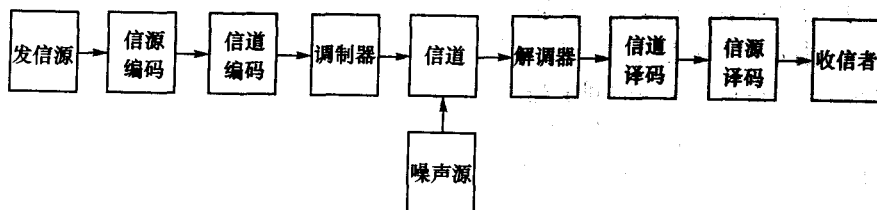


图 1.1.5 数字通信系统模型

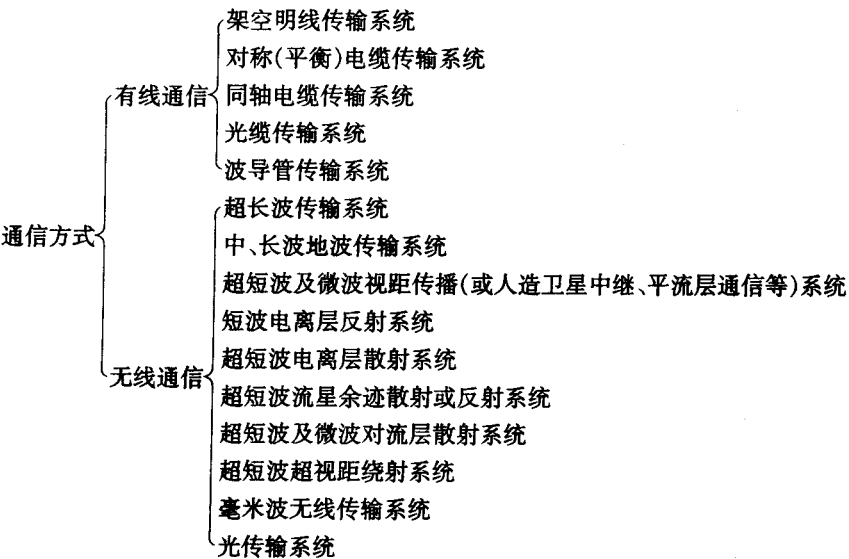
数字序列,也列入信源编码。信道编码是为提高通信系统传输抗干扰性而对数字信号进行的一种变换(检错、纠错编码)。此外,还有用来保密的保密编码(图 1.1.5 未画出)。信道译码的作用是发现或纠正传输过程中引入的差错,解除信道编码器所加入的多余码元。调制器和解调器只是对用模拟传输方式的数字通信系统才是必要的。信源译码器的作用是把数字信号还原。

应当指出,实际数字通信系统并非必须包括图 1.1.5 中的所有环节,如基带传输系统就不包括调制与解调环节。至于采用哪些环节,取决于具体的设计条件和要求。此外,在数字通信系统中同步系统是不可或缺的。但因它的位置往往不是固定的,因此图中没有画出。

若信源本身发出的消息是数字形式的信号(电报、数据、指令等),则不管用数字传输方式还是用模拟传输方式,这种通信方式均称为数据通信。数据通信有三个特征:①它是机器(计算机)对机器(终端设备)或机器(计算机)对人的通信;②它传输和处理离散的数字数据,而不是连续的模拟数据;③它的通信速度很快,可以传输和处理大量的数据。

1.1.3 有线通信和无线通信

电信系统多利用电磁波传递电信号。电磁波传播有两种形式:一种是沿导体传播;另一种是沿自由空间传播,称无线电波传播。利用电磁波沿导体传播来传送声音、数据、文字、图像或其他信息的各种通信方式称有线通信。利用无线电波在空间传播来传送声音、数据、文字、图像或其他信息的各种通信方式称无线通信。两种通信方式的典型传输系统如下:



1. 有线通信

(1) 架空明线 架空明线是指架设在电线杆上的通信用金属导线。用作架空明线的导线有铜线、青铜线、铜包钢线、铁线、铝线等。与电缆相比,架空明线的优点是:架设容易、建设快,同时由于线径较粗、线间距离大,故线间电容小,衰耗比电缆小得多。缺点是:线对数量有限;线对多时架设困难;易受外界影响;随频率升高辐射损耗迅速增加,线对间

串话也急剧增加;保密性差;线路容易受到损坏,维护工作量较大。

(2) 双绞线 双绞线是由两根各自封装在彩色塑料皮内的铜线互相扭绞而成的,扭绞的目的是使它们之间的干扰最小。在多对双绞线外面套一层保护套构成双绞线电缆,通过相邻线对间变换的扭距,可使同一电缆内各线对间干扰最小。双绞线分为屏蔽型(STP)和非屏蔽型(UTP)两种类型。其结构示意图如图 1.1.6 所示。STP 是在 UTP 外面再加上一个由金属丝编织而成的屏蔽层,以提高其抗电磁干扰能力。因此,STP 抗外界干扰性能优于 UTP。但 UTP 要比 STP 价格便宜。相互扭绞的一对双绞线可作为一条通路,其输入阻抗有 100Ω 和 150Ω 两种。

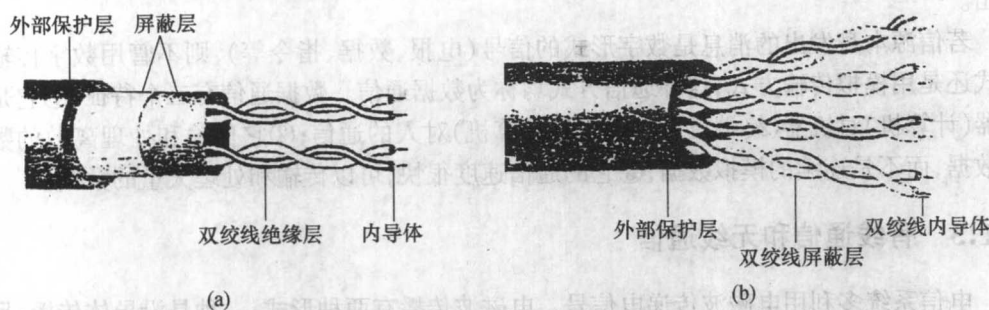


图 1.1.6 双绞线结构

(a) 屏蔽型; (b) 非屏蔽型。

双绞线既可用于传输模拟信号,也可用于传输数字信号。双绞线常用于声音的模拟传输。其频谱在 $20\text{Hz} \sim 20\,000\text{Hz}$,在一根双绞线上,可使用频分多路复用实现多个音频通道,每个通道的带宽为 4kHz 。双绞线的最高带宽可达 268kHz ,具有 24 条音频通道的容量。

在双绞线上传输数字信号,数据传输速率可达 1.5Mb/s ,最高上限为 10Mb/s ,采用特殊技术可达 100Mb/s 。

双绞线一般用于点到点的连线,在低频传输时,抗干扰性能相当于或高于同轴电缆。但频率超过 $10\text{kHz} \sim 100\text{kHz}$ 时,同轴电缆性能明显优越。

双绞线的带宽取决于铜线的粗细和传输距离,用于传输模拟信号,每隔 $5\text{km} \sim 6\text{km}$ 需要一级放大;用于传输数字信号,每隔 $2\text{km} \sim 3\text{km}$ 就要用转发器转发一次。双绞线用于远程中继线时,最大传输距离为 15km ,用于局域网时,与集线器间的最大距离为 100m 。双绞线的抗干扰性能取决于双绞线电缆中相邻线对的扭曲长度及适当的屏蔽。

(3) 对称电缆 对称电缆是在同一保护套内有许多对相互绝缘的双导线的电缆。导体材料是铜或铝。导线直径为 $0.1\text{mm} \sim 1.4\text{mm}$ 。为减小各线对之间的相互干扰,每一对线拧成有一定扭绞节距的绳。这种电缆的传输损耗比明线大得多,通频带在 $12\text{kHz} \sim 250\text{kHz}$ 之间,但其传输特性比较稳定。

(4) 同轴电缆 同轴电缆由外导体、内导线和绝缘垫片构成,如图 1.1.7 所示。它是将电磁波封闭在同轴管内,因此,即使工作频率较高,同轴电缆之间电磁波的相互干扰也较小,因此适用于高频段、大容量载波电话(电报)通信。很多大容量长途通信干线均采用同轴电缆结构。同轴电缆分小同轴电缆和中同轴电缆。小电轴电缆的通频带在 $60\text{kHz} \sim$

4 100kHz 之间,增音段长约为 8km 和 4km,中同轴电缆的通频带在 300kHz~60 000kHz 之间,增音段长度约为 6km、4.5km 和 1.5km。

计算机网络最常用的同轴电缆有 RG-8(50Ω)以太网粗电缆和 RG-58(50Ω)以太网细电缆。而 RG-62(93Ω)是 ARCnet 网络及 IBM3 270 网使用的;RG-59(75Ω)用于 FDM 模拟信号发送,还可用于 CATV 系统。

50Ω 电缆仅用于数字传输、基带传输。典型的基带电缆的最大距离限制在几千米,宽带电缆可以达到几十千米,取决于传输的是模拟信号,还是数字信号。

(5) 光缆 光在高折射率的媒质中具有聚焦特性,把折射率高的媒质做成芯线,折射率低的媒介做成芯线的包层,就构成光纤,如图 1.1.8 所示。光纤集中在一起构成光缆。光纤可以传输光信号,通信容量极大,传输损耗极小,没有串话现象,不受电磁感应干扰。制造光纤的主要材料——石英的资源丰富,因而光纤发展甚为迅速。

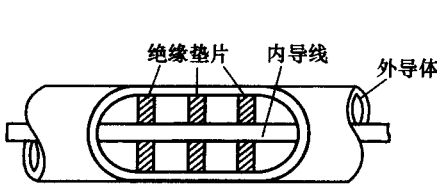


图 1.1.7 同轴电缆结构

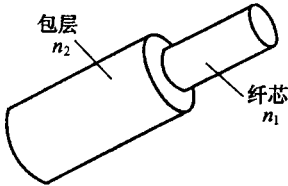


图 1.1.8 光纤外形

(6) 波导通信 利用毫米波段电磁波在波导管中作远距离极多路通信,称为波导通信。优点是通信容量大、抗干扰性强、保密性好、可靠性高。目前应用不广。

2. 无线通信

无线通信是利用电磁波在空间的传播来传输信号的。图 1.1.9 示出了几种常用无线通信方式的示意图。

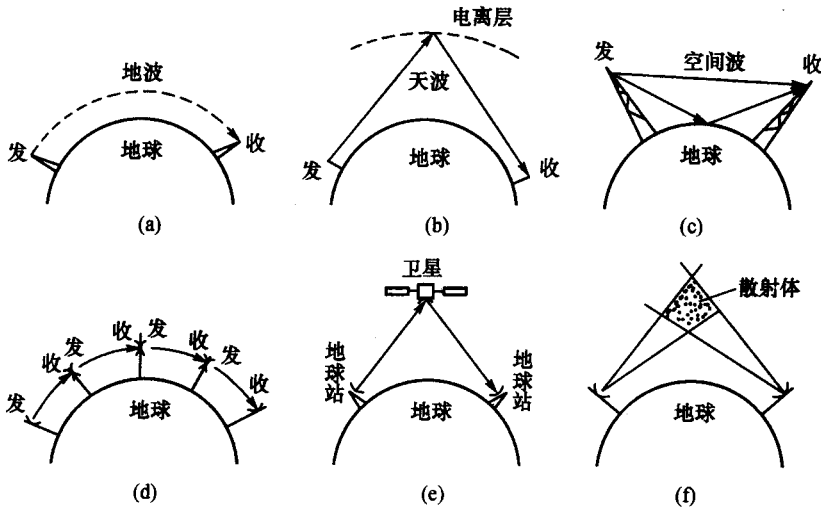


图 1.1.9 常用无线通信方式示意图

(a) 地波传播; (b) 天波传播; (c) 空间波传播; (d) 微波中继通信; (e) 卫星通信; (f) 散射通信。

(1) 超长波通信 波长 $10\text{km}\sim 100\text{km}$ (频率 $3\text{kHz}\sim 30\text{kHz}$)的无线通信为超长波通信。它的优点是:①通信距离远;②通信稳定可靠,特别是在磁暴、太阳黑子爆发、核爆炸情况下,短波通信极不稳定,甚至会完全中断,而超长波通信不受影响;③超长波具有穿透海水的能力,一般能穿透 $15\text{m}\sim 30\text{m}$ 深。因此,超长波通信特别适合于对水下潜艇的通信,以保证潜艇的隐蔽性。它的缺点是:发射设备,尤其是发射天线非常庞大,在战争中易被摧毁;造价高;频带窄,通信容量小。超长波通信在军事上很有价值,主要用于远航舰艇、水下潜艇以及地下通信。

(2) 长波通信 波长 $1\,000\text{m}\sim 10\,000\text{m}$ (频率 $30\text{kHz}\sim 300\text{kHz}$)的无线电通信为长波通信。长波传播主要靠地波,通信距离远,主要用于越洋通信、水下通信、地下岩层通信及导航等。

(3) 中波通信 波长 $100\text{m}\sim 1\,000\text{m}$ (频率 $300\text{kHz}\sim 3\,000\text{kHz}$)的无线电通信为中波通信。中波传播靠地波和天波。白天主要是地波,晚上是天波与地波,天波可达较远距离。此种通信主要用于无线电广播,还用于海洋、航空的无线电通信以及无线电导航。

(4) 短波通信 波长 $10\text{m}\sim 100\text{m}$ (频率 $3\text{MHz}\sim 30\text{MHz}$)的无线电通信为短波通信。短波通信靠地波和天波传输。地波通信距离近,天波通信距离远。短波是电离层反射的最佳波段,可利用电离层的多次反射进行远距离通信(一次反射最远距离可达 $4\,000\text{km}$)。短波通信比较方便,设备较简单,价格也便宜,但可靠性和稳定性与昼夜、季节变化有关。在发生磁暴、极光、核爆炸时,短波通信因电离层骚动而极不稳定,甚至会完全中断。它适用于中、远距离通信。短波通信应用历史久远,曾经是远距离无线通信的主要手段。随着卫星通信和光纤通信的广泛应用,短波通信的开发和利用一度处于停滞状态。但由于自适应技术、数字信号处理技术、差错控制技术、超大规模集成电路技术的发展,20 世纪 80 年代短波通信开始“复苏”。现代短波通信的质量已可与卫星通信质量相比。短波通信主要用于气象、石油、地质、航海、救灾等部门和移动通信,尤其是现代军事通信中,短波通信仍有重要地位和广泛的应用。短波通信主要采用单边带调制方式。

(5) 超短波通信 波长 $1\text{m}\sim 10\text{m}$ (频率 $30\text{MHz}\sim 300\text{MHz}$)的无线电通信为超短波通信。它的电磁波传播方式主要为直线视距传播,称为空间波传播,其次靠山峰的绕射传播。它主要用于电视、雷达、移动通信。

(6) 微波通信 频率范围为 $300\text{MHz}\sim 1\,000\text{GHz}$ 的无线电通信为微波通信,包括微波中继通信和卫星通信。电磁波都是直线视距传播。由于工作频率高、工作频段宽、通信容量大、工作稳定可靠,所以这种通信方式获得迅速发展。

(7) 散射通信 散射通信是利用空中介质对电磁波的散射作用,在两地间进行的通信。对流层、电离层、流星余迹、人造散射体等都具有散射电磁波的性质。如果发射机发出的电磁波照射到这些地方,就会向各个方向散乱地辐射出去,其中朝斜前方向射去的电磁波能到达很远的地方。远处的接收机,如果有足够高的灵敏度,就能将散射来的微弱电磁波接收下来实现通信。由于散射通信中电磁波传输损耗很大,到达接收端信号很微弱,为了实现可靠通信,一般要采用大功率发射机、高灵敏度接收机和高增益、窄波束天线。

(8) 光通信 光通信包括红外线通信、紫外线通信和激光通信,一般主要指激光通