

21 世纪高等学校电子信息类教材

光纤通信

● 陈才和 主编

11-43

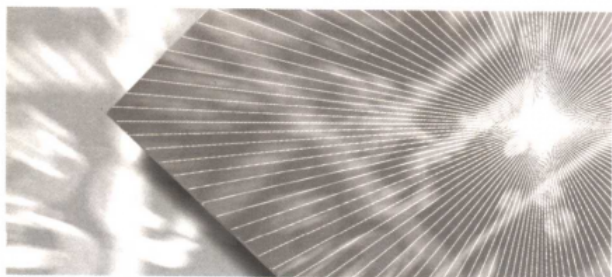


电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪高等学校电子信息类教材

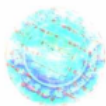


- 光纤通信
- 激光原理及应用
- 通信原理教程
- 模拟电路与数字电路
- 电子测量技术
- 数字信号处理原理与实现
- 多媒体通信技术基础
- 现代交换原理
- 数据压缩
- 计算机通信网基础
- 数字系统设计与PLD应用技术
- 电磁场理论基础
- 电子电路基础
- VLSI设计基础
- 信息论——基础理论与应用
- 微机系统与接口
- 通信电子线路
- 自动控制原理
- 微波技术与天线
- 电子技术基础实验与课程设计
- 电子工程物理基础

ISBN 7-121-00220-5



9 787121 002205 >



策划编辑：韩同平
责任编辑：王羽佳
封面设计：闫欢玲

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 7-121-00220-5

定价：27.00 元

21 世纪高等学校电子信息类教材

光 纤 通 信

陈才和 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书内容包括通信系统基本模型及其分类、光纤传输理论、光纤系统中的信号传输原理、光纤传输器件、光源与光发射机、光检测器与光接收机、光放大器、光纤通信系统、现代光纤通信技术、光纤参数及光纤通信系统特性测量原理和方法几部分。

本书可作为非通信专业光纤通信课程的教材。在使用时应注意根据不同专业和不同先修课程的学习情况,选择各章中的相关内容讲授,有些内容可由学生自学,重点应放在基本理论、处理方法和原理应用的学习上。本书也可供从事光纤通信的科技人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/陈才和主编. —北京:电子工业出版社,2004.8

21 世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-121-00220-5

I. 光... II. 陈... III. 光纤通信—高等学校—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 080634 号

责任编辑:王羽佳

印 刷:涿州京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:22.75 字数:582.4 千字

印 次:2004 年 8 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:27.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

光纤通信是通信技术新的重要发展方向,具有信息容量大、重量轻、所占空间小、抗电磁干扰、串话少、保密性强等明显优点。光纤通信目前已形成产业,并仍以惊人的速度向更高阶段发展,高水平的光纤通信技术在不断涌现,如波分复用(WDM)技术、相干光纤通信(COFC)技术、光纤放大器和光孤子通信等。特别是采用光纤放大器构成的全光通信系统,正在引起通信领域的一场革命。另外,光集成与光电集成是从根本上改变光通信面貌的重大高新技术,已经并仍在光纤通信中发挥着重大作用。

光纤通信这一高新技术的发展,不仅需要大批通信专家、科技人员参与,还必须大批光学和光电子学专家和科技人员共同奋斗。为适应光纤通信技术发展对光学和光电子学人才培养的需求,国内许多院校的非通信专业,近年来在本科、研究生课程中开设了“光纤通信”课程。教学实践证明,该课程的建立,对扩宽学生专业面、活化专业起到了很好的作用。

国内现有的光纤通信方面的书籍大都是针对通信专业的,非通信专业方面的教材还比较少,所以迫切需要出版一本适合非通信专业教学需要的光纤通信教材,以满足教学需求。在电子工业出版社和天津大学各级领导的支持下,经过出版社编辑和全体参编人员的共同努力工作,这本教材与读者见面了。

本教材是一本适用于非通信专业的光纤通信教材。适用于电气信息、电气信息与科学、仪器仪表、电子信息科学、光电信息科学、物理学等非通信专业类大学本科技术基础课教学,可作为非通信专业研究生的光纤通信教学用书,也可供从事光纤通信的科技人员和大专院校相关专业师生参考。

本教材由天津大学陈才和教授主编,长春理工大学石邦任教授主审。

本课程参考学时为 60~80 学时,全书共分 10 章。第 1 章主要讲述通信系统基本模型及其分类、光通信的发展与展望,并介绍了信息、信道、信道容量等基本概念。第 2 章主要讲述光纤传输理论、光纤材料及其制作工艺原理、光纤波导的传输特性,并介绍了单模光纤的最新进展。第 3 章主要讲述光纤系统中信号传输的基本原理,重点讨论了模拟通信的基本原理和基本性能,介绍了数字基带和频带信号的传输,并简述了数字信号的功率密度谱和带宽的概念,使读者建立起数字通信的一些基本概念。第 4 章主要讲述光纤器件和光集成器件,引入了用于全光通信网光器件的最新内容,主要包括:光纤、光缆、光放大器、各类光纤无源器件及光波导开关阵、集成光学调制器、光分插复用(OADM)、光交叉复用(OXC)和波导光栅阵列(AWG)等的工作原理、特性参数和结构特点。第 5 章主要讲述光发射机用光源(LED 和 LD)的工作原理、结构和特性参数,光源与光纤的耦合,光发射机的基本工作原理、调制方式,并简要介绍了驱动与补偿电路的基本工作原理。第 6 章主要讲述光接收机用的光检测器的基本工作原理、结构和特性参数,简要讨论了光接收机的灵敏度、噪声特性和设计方法。第 7 章介绍了几种主要的光放大器的原理、结构、特性及应用。第 8 章主要介绍了光纤通信系统的设计原理、光纤数字通信和模拟通信系统、光纤通信的复用技术,并讨论了光纤通信的多终端网络系统。第 9 章主要介绍了现代光纤通信技术,包括相干光纤通信和光孤子通信的基本工作原理和特点。第 10 章主要介绍了光纤参数及光纤通信系统特性测量原理和方法。

本教材在使用时应注意根据不同专业和不同先修课程的学习情况,选择各章中的相关内

容讲授。第 7~9 章对非通信专业本科生可以不讲,可对研究生讲授。教材中的有些内容可以由学生自学,重点应放在基本理论、处理方法和原理应用的学习。

本教材由陈才和教授编写第 1~6 章,袁一方教授编写第 7、9 章,丁桂兰副教授编写第 10 章,井文才副教授编写第 8 章。在本教材的编写过程中,南开大学的袁树忠教授提出了许多宝贵的意见和建议,研究生宁春梅、钟娟娟、高洪宇、李岷、刘洋和博士生吴波参加了书稿的绘图、打印及编辑整理工作,在此表示感谢。

由于编者水平所限,书中误漏难免,敬请读者批评指正。

编 者
2004 年于天津大学

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 通信系统的基本概念	(1)
1.1.1 通信系统的组成	(1)
1.1.2 数字通信的主要特点	(3)
1.2 通信系统的分类	(3)
1.3 信息及其量度	(4)
1.4 信道与信道容量	(6)
1.4.1 信道	(6)
1.4.2 信道容量	(7)
1.5 光通信概述	(8)
习题	(14)
第 2 章 光纤传输理论	(16)
2.1 光纤的结构及基本性质	(16)
2.1.1 光纤的结构	(16)
2.1.2 光纤的分类	(17)
2.1.3 光纤的传光原理	(19)
2.2 光纤的材料和制作方法	(23)
2.2.1 光纤材料	(23)
2.2.2 光纤预制件(预制棒)的制备	(24)
2.2.3 光纤的拉丝与涂敷	(26)
2.2.4 光纤的套塑	(27)
2.3 阶跃折射率光纤的模式理论	(28)
2.3.1 均匀光纤的矢量解	(28)
2.3.2 均匀光纤的标量解——LP 模	(43)
2.4 渐变折射率光纤的近似分析	(49)
2.5 单模光纤	(52)
2.5.1 概述	(52)
2.5.2 单模光纤的结构	(53)
2.5.3 单模传输的理论分析	(54)
2.5.4 单模光纤的频率色散	(57)
2.5.5 单模光纤的极化	(59)
2.5.6 保偏光纤和单偏振光纤	(60)
2.6 光纤的传输特性	(61)
2.6.1 光纤的色散特性	(61)
2.6.2 光纤的损耗特性	(68)

2.7 单模光纤的进展和应用	(70)
习题	(74)
第3章 光纤系统中的信号传输原理	(76)
3.1 引言	(76)
3.2 模拟信号的传输	(78)
3.2.1 模拟信号的调制及分类	(78)
3.2.2 调幅信号的传输	(79)
3.2.3 调频信号的传输	(95)
3.3 脉冲信号传输	(110)
3.3.1 取样、量化和编码	(110)
3.3.2 线性编码 PCM	(113)
3.3.3 压缩和扩张	(114)
3.3.4 差分脉冲编码和增量调制	(114)
3.4 数字基带信号的传输	(115)
3.4.1 数字信号的表示方法	(115)
3.4.2 数字基带信号传输与码间串扰	(118)
3.5 数字信号的频带传输	(122)
3.5.1 概述	(122)
3.5.2 数字幅度调制(ASK)	(123)
3.5.3 数字频率调制(FSK)	(128)
3.5.4 数字相位调制(PSK)	(132)
3.5.5 各种数字调制系统的性能比较	(137)
习题	(138)
第4章 光纤传输器件	(140)
4.1 光缆	(140)
4.1.1 光缆的结构	(140)
4.1.2 带宽	(142)
4.1.3 设计要求	(144)
4.2 光连接器	(145)
4.2.1 光纤连接损耗与影响因素	(145)
4.2.2 光纤连接器的构造	(148)
4.3 光纤耦合器	(151)
4.3.1 光纤耦合器的定义及分类	(151)
4.3.2 光纤耦合器的基本原理与结构	(152)
4.3.3 光纤耦合器的性能参数	(153)
4.3.4 各类光纤耦合器的特性	(154)
4.3.5 其他类型的耦合器	(156)
4.4 光波分复用器/解复用器(WDM/DWDM)	(158)
4.4.1 光波分复用器/解复用器的性能指标	(158)

4.4.2 光波分复用器/解复用器的光学特性	(159)
4.4.3 各种类型光波分复用器/解复用器的结构原理	(160)
4.5 光衰减器	(164)
4.5.1 光衰减器的作用和工作原理	(164)
4.5.2 光衰减器的性能和测试	(164)
4.6 光开关调制器	(165)
4.6.1 开关分类	(166)
4.6.2 机械光开关	(166)
4.6.3 电光开关	(167)
4.6.4 热光开关	(170)
4.6.5 液晶光开关	(171)
4.6.6 磁光效应光开关	(172)
4.6.7 声光开关	(172)
4.6.8 调制器	(173)
4.7 光偏振控制器	(175)
4.7.1 起偏器	(175)
4.7.2 偏振控制器	(176)
4.8 光交叉连接与光分插复用	(176)
4.8.1 光交叉连接器	(176)
4.8.2 光分插复用	(180)
4.9 阵列波导光栅	(181)
4.9.1 AWG 器件的原理及其参数	(181)
4.9.2 AWG 的偏振相关性	(186)
4.9.3 AWG 在现代通信网络中的应用	(187)
习题	(190)
第 5 章 光源及光发射机	(191)
5.1 引言	(191)
5.2 半导体发光二极管	(193)
5.3 半导体激光二极管	(194)
5.4 半导体光源与光纤的耦合	(205)
5.5 光源的直接调制和光发射机	(207)
5.5.1 光源的直接调制	(208)
5.5.2 光发射机的组成及各部分的功能	(214)
5.6 光源的外调制与光发射机	(218)
5.6.1 光源的外调制及其应用	(218)
5.6.2 电光调制与电光调制器	(219)
习题	(240)
第 6 章 光检测器与光接收机	(242)
6.1 概述	(242)

6.2 光检测器	(243)
6.2.1 半导体的光电效应	(243)
6.2.2 PIN 光电二极管	(244)
6.2.3 APD 雪崩光电二极管	(248)
6.2.4 长波长光检测器	(250)
6.3 光接收机的噪声分析	(251)
6.3.1 散弹噪声	(251)
6.3.2 热噪声	(253)
6.3.3 前置放大器的噪声	(253)
6.4 量子极限灵敏度	(256)
6.4.1 数字光接收机的量子极限灵敏度	(256)
6.4.2 模拟光接收机的量子极限灵敏度	(257)
6.5 前置放大电路的设计	(258)
6.5.1 低阻抗前置放大电路	(258)
6.5.2 高阻抗前置放大电路	(258)
6.5.3 互阻抗前置放大电路	(259)
6.5.4 光接收机前置的设计	(260)
6.6 数字光接收机的灵敏度计算	(261)
6.6.1 噪声的高斯分布与误码率的计算	(261)
6.6.2 PIN 光接收机的灵敏度	(263)
6.6.3 APD 光接收机的灵敏度	(263)
6.6.4 归一化	(264)
6.6.5 光接收机噪声和灵敏度公式的修正	(267)
6.7 模拟光接收机的灵敏度	(269)
习题	(270)
第 7 章 光放大器	(271)
7.1 光放大器的原理与一般特性	(271)
7.1.1 光放大器的原理	(271)
7.1.2 光增益谱宽与放大器带宽	(272)
7.1.3 增益饱和	(273)
7.1.4 放大器噪声	(273)
7.1.5 光放大器在光波系统中的应用	(274)
7.2 半导体光放大器	(276)
7.3 光纤拉曼放大器	(279)
7.3.1 FRA 工作原理	(279)
7.3.2 FRA 的耦合方程和增益饱和	(281)
7.3.3 FRA 的性能及其应用	(282)
7.4 掺饵光纤放大器	(282)

7.4.1 掺饵光纤放大器的工作原理	(283)
7.4.2 增益频谱	(284)
7.4.3 小信号增益和饱和特性	(284)
7.4.4 放大器噪声	(286)
7.4.5 掺饵光纤放大器的优点及应用	(287)
习题	(288)
第8章 光纤通信系统	(289)
8.1 光纤通信系统设计	(289)
8.1.1 光纤通信系统的总体估算	(289)
8.1.2 系统部件的选择	(292)
8.2 光纤模拟通信系统	(294)
8.2.1 光纤图像模拟传输系统	(295)
8.2.2 光纤脉冲模拟传输系统	(299)
8.3 数字光纤通信系统原理	(301)
8.4 光纤通信中的复用技术	(302)
8.4.1 波分复用系统	(303)
8.4.2 光频分复用系统	(307)
8.4.3 光时分复用系统	(309)
8.5 光纤通信多终端网络系统	(311)
8.5.1 光纤局域网 LAN	(311)
8.5.2 光纤宽带综合业务数字网(B-ISDN)	(316)
习题	(317)
第9章 现代光纤通信技术	(319)
9.1 相干光通信技术	(319)
9.1.1 相干光通信技术	(319)
9.1.2 相干光通信技术的理论基础	(319)
9.1.3 光发射机及调制格式	(320)
9.1.4 调制的实现	(321)
9.1.5 光接收机	(322)
9.1.6 影响相干光通信系统性能的几个问题	(324)
9.2 光孤子通信	(325)
9.2.1 光孤子特性及非线性薛定谔方程	(325)
9.2.2 孤子的传输信息和传输能量补偿	(328)
习题	(332)
第10章 光纤参数及光纤通信系统特性的测量	(333)
10.1 光纤参数的测量	(333)
10.1.1 光纤损耗的测量	(333)

10.1.2 光纤色散的测量	(336)
10.1.3 光纤折射率分布的测量	(339)
10.1.4 光纤数值孔径的测量	(342)
10.1.5 单模光纤模场直径的测量	(344)
10.2 光纤通信系统特性的测量	(349)
10.2.1 光接收机灵敏度的测量	(349)
10.2.2 光接收机动态范围的测量	(349)
10.2.3 光纤通信系统测量中的眼图	(350)
习题	(350)
参考文献	(351)

第 1 章 绪 论

1.1 通信系统的基本概念

1.1.1 通信系统的组成

1. 通信系统的一般模型

所谓通信,从广义上讲就是将消息从发信者传输到收信者的过程。消息是用以载荷信息的有次序的符号序列或连续的时间函数,如待传输的文字、符号、数据、语音、静止图片和活动图像等。前者称为离散消息(指消息状态是可数的,时间上是离散的),后者称为连续消息(指消息状态连续变化,时间上是连续变化的)。通信系统中传输的具体对象是消息,这种传输利用通信系统来实现。完成通信过程的全部设备和传输媒质,称为通信系统。19 世纪末迅速发展起来的以电信号(或光信号)为消息载体的通信系统,称为现代通信系统。通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

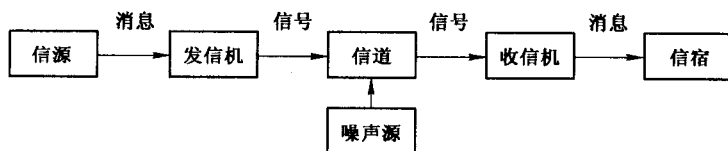


图 1-1 通信系统的一般模型

信源的作用是产生(形成)消息。信源分为模拟信源和数字信源。模拟信源(如电话机、电视摄像机)输出连续幅度的模拟信号,数字信源(如电传机、计算机等数字终端设备)输出离散的数字信号。信宿的作用是将复原的原始信号转换成相应的消息,是传输信息的归宿点。

发信机的作用是将消息变换成适于在信道中传输的信号。信号为消息的载荷者,是消息的直接反映,与消息一一相对应。信号可分为两类:连续信号(模拟信号)和离散信号。载荷信息的物理量(如电信号的幅度、频率、相位,光信号的光强度、频率、相位、偏振态等)的改变,在时间上是连续的,称为连续信号;在时间上是离散的,称为离散信号;如果不仅在时间上离散,而且取值也离散,则称为数字信号。

将消息转换为信号一般经过变换、编码和调制三个步骤,可分别进行,也可混合进行,这要根据具体系统而定。

变换是将表达消息的非电量变换为电量的变化。例如,电话是利用送话器把语音的声压(非电量)变换为相应的电流变化。对这类变换设备的一般特性要求线性度好,即作用与响应成正比,否则将引起失真。变换方式有多种多样,在需要频谱搬移的场合,调制是最常见的变换方式。

调制就是将基带信号变换成适合信道传输特性的频带信号(即实现频带搬移)。它是用基带信号去控制消息载体信号的某一参量,使该参量随基带信号的大小而线性变化的处理过程。

例如,在电通信连续波调制中,简谐振荡有三个参量(振幅、频率、初相位)可以改变,利用基带信号去控制这三个参量中的某一个,从而实现相对应的调制。对应的三种调制方式为:调幅、调频和调相。通常将基带信号称为调制信号,将高频振荡信号称为载波信号,将经调制后的高频振荡信号称为已调信号或已调波。已调信号必须经过电压和功率放大、滤波等处理过程,以保证输入信道的已调信号具有足够大的电压和功率。调制过程对通信系统是至关重要的,因为调制方式在很大程度上决定了系统可能达到的性能。调制的目的可概括为:提高射频便于辐射、实现信道的复用、改变信号带宽和改善系统性能。

信道是将信号从发信机传输到收信机的媒质或途径。信道既给信号以通道,也对信号产生各种干扰和噪声,信道的固有特性和干扰直接关系到通信的质量。通信系统中应用信道可分为两大类:有线信道(如架空明线、对称电缆、同轴电缆、光纤等)和无线信道(如海水、地球表面、自由空间等)。不同信道有不同的传输特性,相同媒质对不同频率信号的传输特性也是不同的。例如,在自由空间媒质中,电磁能量是以电磁波的形式传播的,然而不同频率的电磁波却有着不同的传播方式。1.5 MHz 以下的电磁波主要沿地表传播,称这种电磁波为地波。由于大地不是理想的导体,电磁波沿大地传播时,一部分能量被损耗掉,频率越高,损耗越大。1.5~30 MHz 的电磁波,主要靠天空中电离层的折射和反射传播,称为天波。频率越高,电磁波被电离层吸收的能量越小,电磁波穿入电离层也越深。当频率超过一定值后,电磁波穿透电离层而不再返回地面。30 MHz 以上的电磁波主要沿空间直线传播,称为空间波。由于地球表面的弯曲,空间波的传播距离受限于视距范围,因此架高发射天线可以增大传输距离。

收信机的作用与发信机相反,完成解调、解码等任务,将信号转换为消息。对于多路复用信号,收信机还有解除多路复用和实现正确分路的功能。

2. 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号传递信息的通信系统,如图 1-2 所示。需要说明的是,实际的数字通信系统,并非包括图 1-2 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,取决于具体的条件和要求。在数字通信系统中,同步系统是不可缺少的。但由于它的位置往往是不固定的,因此图中没有画出。

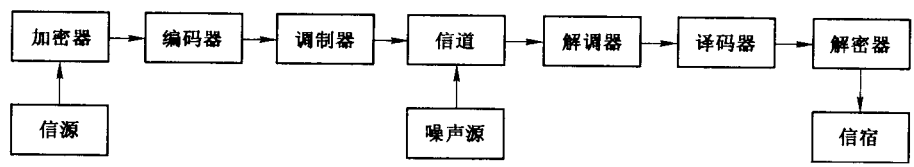


图 1-2 数字通信系统模型框图

在数字通信系统中,为某种目的需要,对数字信号进行某种变换,这种变换称为编码,进行编码的设备称编码器。编码一般包括:信源编码、信道编码、纠错编码和保密编码。数字通信还涉及其他很多技术问题,如数字调制、数字复接、同步等。

在图 1-2 所示的数字通信系统模型框图中,各部分作用如下。

信源编码有两个作用,一是模/数转换,即将模拟信号转换成数字信号;二是数据压缩,以降低数字信号的数码率。编码比特率在通信系统中直接影响传输所占的带宽,而传输所占的带宽直接反映了通信的有效性。信源译码是信源编码的逆过程,即完成数/模转换和数据解压缩。

数字信号在信道中传输时,由于噪声、衰落以及干扰等因素,将会引起差错。因此,在数字

通信系统中必须进行信道编码,以提高通信系统抗干扰能力,并且尽可能地控制差错,实现可靠通信。在接收端对收到的信号还必须进行译码,以获得原始码型。

为了保证数字信号与所传信息的安全,将输入的明文信号人为地扰乱,即加上密码,这种处理过程称为加密。在接收端对接收到的信号还必须进行解密,以恢复明文信号。

在数字通信系统中,调制与解调是一个重要环节。数字信号的调制是把各种数字信号脉冲(基带信号)转换成适于在信道中传输的数字调制信号(已调信号或频带信号)。数字信号的解调是数字调制的逆过程。

在某些有线信道中,若传输距离不太远且通信容量不太大时,数字基带信号可以直接传输,这种传输方式称为数字信号的基带传输。而在另外一些信道,特别是无线信道和光信道中,数字基带信号则必须经过调制,将信号频谱搬移到高频处才能在信道中传输,我们把这种传输称为数字信号的调制传输,又称数字信号的频带传输或数字信号的载波传输。

在通信系统中,同步具有相当重要的地位,它是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的前提。同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致。按照同步的作用不同,分为载波同步、位同步、群同步和网同步。数字复接是依据时分复用的基本原理,把若干低速数字信号合并成一个高速的数字信号,以提高传输容量和传输效率。

1.1.2 数字通信的主要特点

在通信系统中,数字通信相对于模拟通信具有以下优点:① 抗干扰能力强,可消除噪声积累;② 差错可控,传输性能好;③ 便于与各种数字终端接口,用现代计算技术对信号进行处理、加工、变换、存储,形成智能网;④ 便于集成化,从而使通信设备微型化;⑤ 便于加密处理,且保密性能高。

特别需要指出的是,一般而言,数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带为代价换取的。以电话系统为例,一路模拟电话通常只占据 4 kHz 的带宽,但一路接近同样话音质量的数字电话却要占据约 20 kHz~60 kHz 的带宽,因此数字通信的频带利用率不高。数字通信的另一个缺点是对同步要求高,系统设备比较复杂。

1.2 通信系统的分类

通信系统有多种分类方法。

(1) 按传输媒质的不同进行分类

可分为有线通信和无线通信两大类。对于电通信,有线通信有架空明线通信、对称电缆通信、同轴电缆通信,无线通信有微波接力通信、卫星中继通信;对于光通信,包括有线光通信和无线光通信(即大气激光通信)。

(2) 按通信业务和用途进行分类

可分为常规通信和控制通信等。常规通信又可分为话务通信和非话务通信。话务通信业务主要包括电话服务业务、语音信箱业务和电话智能网业务。非话务通信主要包括分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子信箱、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。控制通信包括遥测、遥控、遥信和遥调通信等。

(3) 按传输信号的特征进行分类

可分为模拟通信系统和数字通信系统。模拟通信,信道中传输的是模拟信号;数字通信,

信道中传输的是数字信号。

(4) 按消息传递的方向与时间关系进行分类

可分为单工通信、半双工通信和双工通信。通信时消息只能单方向传输的工作方式,称为单工通信,如遥测、遥控;通信时通信双方都能收发消息,但不能同时进行收发消息的工作方式,称为半双工通信,如同一载频的无线电对讲机就是按这种通信方式工作的;通信双方可同时进行收发消息的工作方式,称为双工通信,如普通电话就是一种最常见的双工通信方式。

(5) 按调制方式进行分类

可分为基带传输和调制传输通信。基带传输通信是将未经调制的信号进行直接传输的通信。调制传输通信是将调制后的信号进行传输的通信。

(6) 按传输信号的复用方式进行分类

可分为频分复用、时分复用、码分复用三种复用方式的通信。频分复用通信是用频谱搬移的方法,使不同信号占据不同的频谱范围的通信。传统的模拟通信都是采用频分复用通信。时分复用通信是用脉冲调制的方法,使不同信号占据不同的时间区间的通信。随着数字通信的发展,时分复用通信的应用越来越广泛。码分复用通信是用正交脉冲系列分别携带不同信号的通信,这种通信方式主要用于空间通信的扩频通信中。

1.3 信息及其量度

通信系统中传输的具体对象是消息,但通信的最终目的是传递信息。所以研究具体通信系统之前需要明确信息的含义。如前所述,人们通常把文字、符号、数据、语音、静止图片、活动图像等都看成消息的集合。这些消息的集合具有一定的统计特性或概率特性,因此,信息可定义为:信息是对消息的统计特性的一种定量描述。度量信息量的物理量称为信息量,也称信息。消息出现的可能性(概率)越小,则消息中包含的信息量就越大。当消息出现的概率为1时,则它传递的信息量为0。从工程观点看,一个消息的信息量与传输此消息的时间成正比,这可以用传送英文字母的莫尔斯码(Morse code)的例子得到证明。在用莫尔斯码传送英文字母时,每一个字母用莫尔斯码的符号的某种组合表示,并具有一定长度,用较短的码字表示较常出现的字母,如e、t、a和o;用较长的码字表示不常出现的字母,如x、k、q和z。这表明传递确定性较大(概率较大)的字母比传递确定性较小(概率较小)的字母需用的时间短,即其信息量较小。

设某离散消息 x 出现的概率为 $P(x)$,则该消息所含的信息量 I 为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.3-1a)$$

若对数底 a 取2时,则上式表示为

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \quad (1.3-1b)$$

若 $P(x) = 1/2$, $I = 1$ bit,故1 bit代表 $P(x) = 1/2$ 消息所含的信息量。对数底 a 取2时,信息量的单位为bit(比特)。若对数底 a 取 e 时,则式(1.3-1a)表示为

$$I = \ln \frac{1}{P(x)} \quad (1.3-1c)$$

此时,信息量的单位为nit(奈特)。1 nit = $(\log_2 e)$ bit = 1.443 bit。若对数底 a 取10时,则式(1.3-1a)表示为

$$I = \lg \frac{1}{P(x)} \quad (1.3-1d)$$

式(1.3-1d)的单位是哈特莱。上述三种度量单位中广泛使用的单位为 bit。

【例1】(1) 有一个二进制离散源(0,1),每一符号波形等概率独立发送,试求传送此二进制波形之一的信息量为多少比特?

(2) 若有一个四进制离散源(0,1,2,3),每一符号波形等概率独立发送,试求传送此四进制波形之一的信息量为多少比特?

解:

(1) 据题义,此二进制每一波形出现的概率 $P(x) = 1/2$,则传送此二进制每一波形的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) = -\log_2 \left(\frac{1}{2} \right) = 1 \text{ bit}$$

(2) 据题义,此四进制每一波形出现的概率 $P(x) = 1/4$,则传送此四进制每一波形的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 P(x) = -\log_2 \left(\frac{1}{4} \right) = 2 \text{ bit}$$

可见,四进制每一波形所含的信息量恰为二进制每一波形所含的信息量的 2 倍。因为每一个四进制波形需用 2 个二进制波形表示。以上结果可推广到 $M(M=2^K)$ 进制每一波形所含的信息量,恰好为二进制每一波形所含的信息量的 K 倍。

【例2】有一个二进制离散源(0,1),每一符号波形不以等概率出现,若 0 出现的概率为 $1/3$,试求出 1 的信息量为多少比特?

解:

据题义,由于全概率为 1,因此出现 1 的概率为 $2/3$,故出现 1 的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) = -\log_2 \left(\frac{2}{3} \right) = 0.585 \text{ bit}$$

以上讨论的是单个消息所含的信息量,但实际信源(或消息源)总是由若干个可能发生的消息组成的。可以证明:若干独立消息之和的信息量是每个消息所含信息量的线性叠加,即信息具有相加性。

设有 n 个消息,其概率分别为 $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$,则每一消息的平均信息量(即统计独立的 n 个符号的离散信息源的平均信息量) H 为

$$H = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1.3-2)$$

式(1.3-2)与统计力学中的熵相类似,故在信息论中,通常称它为信源的熵—单位为比特/符号。

【例3】设某一离散信息源由 0,1,2,3 四个符号组成,它们出现的概率分别为 $3/8, 1/4, 1/4, 1/8$,且每个符号的出现都是独立的。试求出下面的消息所含的信息量为多少比特?

该消息为: 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210。

解:

用信息相加性概念来计算。该消息中 0 出现 23 次,1 出现 14 次,2 出现 13 次,3 出现 7 次,共 57 个符号,则该消息所含的信息量为

$$I = - \sum_{i=1}^4 n_i \log_2 P(x_i) = -23 \log_2 \left(\frac{3}{8} \right) - 14 \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) - 13 \log_2 \left(\frac{1}{4} \right) - 7 \log_2 \left(\frac{1}{8} \right)$$