



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光纤通信

GUANGQIAN TONGXIN

邱 昆 王 晟 邱 琪 张崇富 编著



电子科技大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光纤通信

邱 昆 王 晟 邱 琪 张崇富 编著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信 / 邱昆等编著 — 成都: 电子科技大学出版社, 2008 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-81114-938-8

I 光… II 邱… 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 (2008) 第 129111 号

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材, 全书共分八章, 内容包括光纤通信基础、光放大器、光纤传输系统、光交换技术、光网络技术、光纤接入网、光纤以太网。

该书可作为相关专业的本科生和研究生的教材, 也可供从事光纤通信系统和技术研究和开发的科技人员参考。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光 纤 通 信

邱 昆 王 晟 邱 琪 张崇富 编著

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: 吴艳玲

责任编辑: 吴艳玲

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川省地质矿产局测绘队印刷厂

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 19 25 字数 470 千字

版 次: 2008 年 8 月第一版

印 次: 2008 年 8 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-81114-938-8

定 价: 33 90 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83208003。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。

前 言

近十年随着互联网业务的发展, 光纤通信技术取得了突飞猛进的进步, 成为推动信息社会进步的重要技术力量。目前单根光纤上复用的波长数已超过 1000 个, 传输容量超过 10Tbps。在光纤通信领域出现了许多引起变革的概念和技术, 例如: 波分复用、光放大器、光交换、智能光网络、光以太网等等。我们在光纤通信的教学和研究中感觉到迫切需要一本除光纤通信基础之外, 系统总结和介绍光纤通信系统这些新技术的好书。本书试图成为这样一本教材。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材, 全书共分八章, 内容包括光纤通信基础、光放大器、SDH 和 WDM 光纤传输系统、光交换技术、光网络技术、光纤接入网、光纤以太网等。

本书第 1~3 章由邱昆编写, 第 4 章由张崇富编写, 第 5~6 章由王晟编写, 第 7~8 章由邱琪编写。全书由邱昆审阅统稿。

该书可以作为相关专业的本科生和研究生的教材, 也可以供从事光纤通信系统和技术研究与开发的科技人员参考。

编著者

2008 年 6 月于电子科技大学

目 录

第 1 章 绪论	1
§1.1 光纤通信发展简史	1
§1.2 光纤通信系统	3
§1.2.1 概述	3
§1.2.2 光纤通信系统的基本构成	3
§1.3 几个基本概念	5
§1.3.1 模拟信号与数字信号	5
§1.3.2 信道复用	7
§1.3.3 调制方式	8
§1.3.4 信道容量	9
习题一	10
第 2 章 光纤通信基础	11
§2.1 光纤和光缆	11
§2.1.1 光纤的几何光学分析	11
§2.1.2 阶跃折射率光纤的波动光学分析	14
§2.1.3 光纤的基本特性	20
§2.1.4 光缆	28
§2.1.5 光纤和光缆的连接	29
§2.2 光源和光检测器	31
§2.2.1 光电器件的一般工作原理	31
§2.2.2 发光二极管 (LED)	37
§2.2.3 半导体激光器 (LD)	39
§2.2.4 光电二极管	52
§2.3 光发射机与光接收机	58
§2.3.1 光发射机	58
§2.3.2 光接收机	66
习题二	70
第 3 章 光放大器	71
§3.1 光放大器基础	71
§3.1.1 光纤通信中的光电中继器	71
§3.1.2 光放大器种类	72
§3.1.3 光放大器的基本性能	72
§3.1.4 光放大器在光纤通信中的应用形式	75

§3.1.5 放大器级联.....	76
§3.2 半导体激光放大器.....	77
§3.2.1 放大器的结构.....	77
§3.2.2 放大器的性能.....	78
§3.2.3 多信道放大.....	80
§3.2.4 脉冲放大.....	81
§3.2.5 系统应用.....	85
§3.3 掺铒光纤放大器.....	86
§3.3.1 EDFA 中 Er^{3+} 的能级结构和泵浦.....	86
§3.3.2 增益特性.....	87
§3.3.3 放大器的噪声系数.....	89
§3.3.4 EDFA 实验.....	90
§3.3.5 EDFA 设计.....	91
§3.3.6 多信道放大和脉冲放大.....	91
§3.4 光纤喇曼放大器.....	92
§3.4.1 光纤喇曼放大器引论.....	92
§3.4.2 光纤喇曼放大器的基本原理.....	94
§3.4.3 宽带光纤喇曼放大器设计.....	98
§3.4.4 宽带混合光纤放大器.....	99
习题三.....	101
第 4 章 SDH 和 WDM 光纤传输系统.....	102
§4.1 SDH 概述.....	102
§4.1.1 SDH 的产生背景.....	102
§4.1.2 SDH 的特点.....	103
§4.2 SDH 帧结构、复用和映射.....	106
§4.2.1 SDH 的帧结构.....	106
§4.2.2 SDH 的基本单元.....	107
§4.2.3 SDH 的复用.....	108
§4.2.4 SDH 的映射.....	111
§4.3 SDH 的开销和指针.....	114
§4.3.1 段开销.....	114
§4.3.2 通道开销.....	117
§4.3.3 管理单元指针.....	119
§4.3.4 支路单元指针.....	121
§4.4 SDH 设备与同步.....	124
§4.4.1 SDH 网络单元.....	124
§4.4.2 SDH 网络同步.....	125
§4.5 波分复用技术.....	130
§4.5.1 光信道的复用.....	130
§4.5.2 波分复用传输系统.....	131
§4.5.3 波分复用系统关键技术.....	135

习题四	140
第 5 章 光交换技术	141
§5.1 光交换技术概述	141
§5.1.1 光波长路由交换技术 (OCS)	141
§5.1.2 光分组交换技术 (OPS)	142
§5.1.3 光突发交换技术 (OBS)	143
§5.1.4 几种光交换技术的比较	143
§5.2 光交换器件及设备	144
§5.2.1 光开关技术	144
§5.2.2 波长变换技术	147
§5.2.3 光分插复用器 (Optical Add-Drop Multiplexers, OADM)	150
§5.2.4 光交叉连接器 (Optical Cross-Connect, OXC)	151
§5.3 光突发交换	154
§5.3.1 光突发交换概述	155
§5.3.2 光突发交换网络	156
§5.3.3 光突发交换协议	158
§5.3.4 光突发交换网络的性能	160
§5.4 光分组交换	161
§5.4.1 光分组交换技术分类	162
§5.4.2 节点结构与同步技术	163
§5.4.3 冲突解决方法	165
§5.4.4 光分组格式	171
习题五	172
第 6 章 光网络技术	174
§6.1 光网络的发展概述	174
§6.2 路由与波长分配	180
§6.2.1 基本概念	180
§6.2.2 路由子问题	181
§6.2.3 波长分配子问题	183
§6.3 光网络的生存性	190
§6.3.1 基本概念	190
§6.3.2 SONET/SDH 网络中的保护技术	191
§6.3.3 WDM 网状网络中的保护与修复技术	195
§6.3.4 网状网中基于环的保护方法	197
§6.3.5 生存性路由与波长分配问题	199
§6.3.6 动态修复技术	201
§6.4 光网络的控制与管理	202
§6.4.1 基本功能	203
§6.4.2 信令和资源预约	203
习题六	205

第 7 章 光纤接入网	208
§7.1 光纤接入网的基本概念	208
§7.1.1 接入网的定义与定界	208
§7.1.2 光纤接入网的定义及参数配置	211
§7.1.3 接入网的特点	214
§7.1.4 光纤接入网的应用类型	214
§7.2 光纤同轴电缆混合 (HFC) 接入网	217
§7.2.1 HFC 双向传输系统原理	217
§7.2.2 SDV 全业务光纤接入网	232
§7.2.3 HFC 与 DVB-C 接入网	233
§7.2.4 HFC 网络管理	234
§7.3 无源光网络 (PON) 接入网	236
§7.3.1 PON 的基本组成	236
§7.3.2 PON 的协议和发展	237
§7.3.3 EPON	239
§7.3.4 GPON	244
§7.3.5 PON 光纤传输系统设计要点	249
习题七	252
第 8 章 光纤以太网	254
§8.1 计算机局域网的体系结构与标准概述	254
§8.1.1 计算机局域网的体系结构	254
§8.1.2 计算机局域网系列标准	255
§8.1.3 IEEE 802.3 以太系列协议	255
§8.2 10Mbps 光纤以太网	256
§8.2.1 10Mbps 以太网标准	256
§8.2.2 10Mbps 光纤以太网	263
§8.3 100Mbps 光纤以太网	267
§8.3.1 100Mbps 以太网标准和 10Mbps 以太网标准的比较	267
§8.3.2 100Mbps 光纤以太网	275
§8.4 1000Mbps 光纤以太网	278
§8.4.1 1000Mbps 以太网标准和 100Mbps 以太网标准的比较	279
§8.4.2 1000Mbps 光纤以太网	288
§8.5 10Gbps 光纤以太网	289
§8.5.1 10Gbps 以太网进展	289
§8.5.2 10Gbps 以太网技术特点	290
§8.5.3 10Gbps 以太网内部协议层次结构	291
习题八	296
参考标准	297
参考文献	299

第1章 绪 论

通信泛指将信息从一处传到另一处，传输距离可以是几米直到跨洋传输。传输的信息通常被调制到一个载波上，光通信采用较高的载波频率（约 100THz），载波位于电磁波谱的近红外区域，它们通常被称为光波系统以区别于微波系统（微波系统的载波频率要比光波系统低五个数量级，约为几吉赫兹（GHz））。光纤通信系统是指那些使用了光纤来传送信息的光波系统。20 世纪 80 年代和 90 年代，光纤通信系统在全球范围内得到了很大的发展，并引起了通信领域的一场变革。

§ 1.1 光纤通信发展简史

以光来传递信息可以追溯到古代，当时以中国为代表的很多国家都使用了火烟信号来传递信息，类似的方法如信号灯、信号旗一直沿用到 18 世纪末。1792 年在 C.Chappe 的建议下，通过采用中继站的方法长距离地传送机械码信息，这个概念才得到扩展。19 世纪 30 年代发明了电报，用电代替光，通过采用莫尔斯码等新的编码技术，比特率 B 可以增加到约 10bps，在中继站的支持下，可以达到很长的传输距离（约 1000km）。1866 年世界上开通了第一条电报电缆，1876 年发明了电话，电话采用连续变化的电流来“模拟”地传递声音信息，此后，模拟电通信技术在通信系统中占统治地位长达一个世纪之久。

在 20 世纪里，全球范围电话网络的发展，导致了电通信系统里不断出现新的设计，用同轴电缆代替双绞线，使系统的容量大大增加。由于通信系统的带宽受限于其载波频率的高低，导致了微波系统的产生，1948 年第一个微波系统投入使用，此后同轴电缆系统和微波系统都得到了较大的发展，到 1970 年，通信系统的容量 BL （速率与距离乘积）达到约 100 (Mbps) · km，之后电通信系统的容量就基本上被限制在这个水平上。

20 世纪后半期，人们意识到如果采用光波作为载波，通信容量可望有几个数量级的提高，但直到 20 世纪 50 年代末仍然找不到相干光源和合适的传输介质。1960 年发明了激光器，解决了第一个问题；1966 年高琨博士提出光纤可以作为光波系统的最佳传输介质，但当时光纤具有 1000dB/km 的巨大损耗。1970 年光纤损耗得到突破，被降低到 20dB/km，与此同时，实现了室温连续工作的 GaAs 半导体激光器，由于小型光源和低损耗光纤的同时实现，导致了光纤通信系统的大力发展。图 1.1 给出了自 1970 年以来，光纤通信系统的发展情况。

光纤通信系统的商业应用紧随研究与开发的步伐，工作在 0.8μm 波段的第一代光波系统于 1978 年投入使用，这种系统的速率范围在 50~100Mbps，中继距离为 10km。与同轴

电缆相比,较大的中继距离对系统设计者来说是一个很大的鼓舞,可以减小对中继站的安装和维护费用。

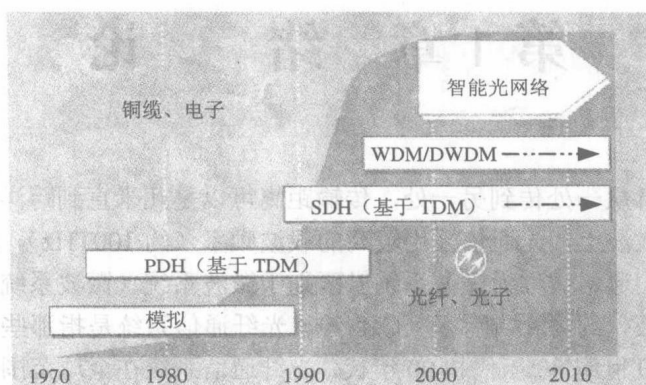


图 1.1 五代光纤通信的发展情况

如果光波系统的工作波长在光纤损耗小于 1dB/km 的 $1.3\mu\text{m}$ 波段上,则中继距离可以进一步提高,而且在这个波段上,光纤具有最小的色散,于是人们对工作在 $1.3\mu\text{m}$ 波长附近的 InGaAsP 半导体激光器和探测器下功夫,1977 年研制出这样的激光器。第二代光纤通信系统出现在 20 世纪 80 年代早期,中继距离超过 20km ,但由于受多模光纤中模式色散的影响,速率仍然被限制在 100Mbps 以下。1981 年在实验室验证了传输距离为 44km 、速率为 4Gbps 的单模光纤系统,1987 年实现了中继距离为 50km 、速率为 1.7Gbps 的 $1.3\mu\text{m}$ 波长的第二代商用化光纤传输系统。

第二代光纤传输系统的中继距离受限于光纤在 $1.3\mu\text{m}$ 波长上的损耗(典型值为 0.4dB/km)。光纤的最小损耗位于 $1.55\mu\text{m}$ 波长附近,1979 年实现了在该波长位置上 0.2dB/km 损耗的光纤,但由于在 $1.55\mu\text{m}$ 波长上光纤具有较大的色散,使得第三代光纤通信系统迟迟实现不了。色散问题可以通过使用在 $1.55\mu\text{m}$ 波长附近具有最小色散的色散位移光纤或控制激光器光谱,使其单纵模工作而获得解决。20 世纪 80 年代里人们按照这两条途径不断地探索着,1985 年在实验室里实现了速率为 4Gbps ,传输距离超过了 100km 的结果;1990 年,工作在 $1.55\mu\text{m}$ 波长、速率为 2.4Gbps 的第三代光纤通信系统实现商用化。

第四代光纤通信系统以密集波分复用增加速率和使用光放大器增加中继距离为标志,至 2001 年,最高复用信道数已达到 4000 个,最高速率达到 $256 \times 40\text{Gbps} = 10\text{Tbps}$,已实现了 3Tbps 速率的信号沿光纤传输 7300km 。20 世纪 90 年代初发明、中期成功商用化的光放大器引起了光纤通信领域的一场变革。

目前人们正涉足第五代光纤通信系统的研究和开发,第五代光纤通信系统至少应该具有以下基本特征:

- 超宽带——单根光纤传输容量 Tbps 以上;
- 超长距离——光放大距离达到数千公里;
- 光交换——克服电交换瓶颈;
- 智能化——智能光网络技术。

§ 1.2 光纤通信系统

§ 1.2.1 概述

光纤通信系统与其他通信系统的区别从原理上讲只是载波频率的不同,光载波的频率在 100THz 的数量级,而微波载频的范围在 $1\sim 10\text{GHz}$,由于光载波频率与微波频率之间的差别,光通信的信息容量可以比微波系统高出 $10\,000$ 倍,可以达到 10Tbps 的量级,正是由于光通信系统具有如此巨大的带宽潜力,才使得人们不断地研究和开发光通信系统。

图 1.2 给出了光通信系统的示意图,它由光发射机、通信信道和光接收机三个部分组成,这三个部分也是所有通信系统的必要组成部分。光纤通信系统采用光纤作为通信信道。从原理上讲,在任何需要传递信息的两地之间都可以使用光纤通信,但促进光纤通信发展的主要原因是其在电讯领域的应用。光纤通信的电讯应用大致可以分为两类,即长途和短途通信。在长途通信系统中,干线上要求具有很高的容量,光纤通信系统正好满足这个要求,事实上,光纤通信的发展,也得益于长途通信应用的促进。与同轴电缆系统相比,中继距离和码速成量级的提高使得光纤通信在长途应用方面具有特别的吸引力,尤其是采用光放大器后,可以使无光电转换的中继距离大大增加。

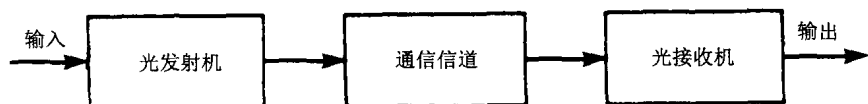


图 1.2 光通信的结构

短途通信应用包括城域网络和局域网络系统,这类系统通常具有较低的速度,传输距离小于 10km 。在这种应用中,采用单信道光波系统的形式是不经济的,应该采用多信道和多种服务的结构。

§ 1.2.2 光纤通信系统的基本构成

由图 1.2 可知,光纤通信系统由光发射机、光纤和光接收机三个部分组成。本小节对这三个部分进行简要的描述,目的是使读者得到一般的认识,详细的内容将在第二章中作具体介绍。

1. 光纤

在光纤通信系统中,利用光纤作为通信信道,它的作用是将光信号从发射机不失真地传送到接收机。光纤的两个重要参数是损耗和色散,它们都影响光纤通信系统的传输距离和传输容量。光纤的损耗直接决定着长途光纤通信系统的中继距离;而光纤的色散使得光脉冲在光纤中传输时发生展宽,如果脉冲展宽严重,就会对邻近码产生影响,形成码间干扰。在多模光纤的情况下,色散尤其严重,因为多模光纤中不同模式具有不同的速率,所

以脉冲展宽很快（典型值约为 10ns/km），因此大多数光纤系统采用单模光纤传输，但即使在单模光纤中，由于材料色散，仍然会有脉冲展宽存在（典型值 < 0.1ns/km），但对大多数应用来说，这个展宽可以被接受，并且通过控制光源的光谱，可以进一步减小这种展宽效应的影响。尽管这样，材料色散仍然是光纤通信系统中限制码速和传输距离的因素。

2. 光发射机

光发射机的作用就是将电信号转变成光信号，并将光信号耦合进入传输光纤中。图 1.3 是发射机的示意图，它主要由光源、调制器和信道耦合器等组成，其中光源是光发射机的“心脏”，在光纤通信中，普遍采用半导体激光器或发光二极管作为光源。光信号通过对光载波的调制而获得，在大多数情况下采用直接对半导体光源的注入电流进行调制的方法，也可以使用外调制器。在直接调制下，输入信号直接被加到光源的驱动电路上，与使用外调制器相比，直接调制能使系统结构简化，成本降低。信道耦合器通常是一个微透镜，它最大可能地将光信号耦合进入光纤中。

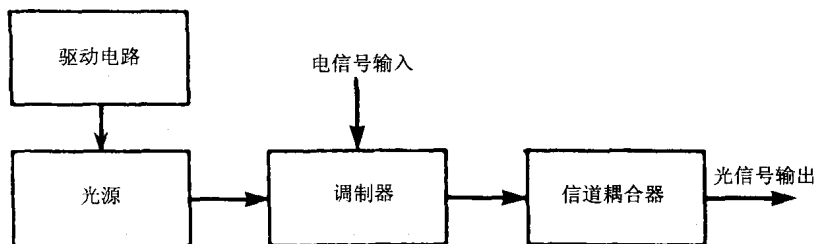


图 1.3 光发射机结构

光发射机的一个重要参数是发射光功率，它意味着在传输过程中可以容忍的传输损耗。发射光功率通常以 1mW 为基准，用 dBm 来表示，它定义为

$$\text{功率(dBm)} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{功率(mW)}}{1\text{mW}} \right) \quad (1.2-1)$$

发光二极管的发射功率较低（一般 < -10dBm），而半导体激光器的发射功率可以达到 0~10dBm，并且由于发光二极管的调制能力有限，所以大多数高性能的光纤通信系统都采用半导体激光器作为光源。光发射机的速率一般是受限于电子电路而不是半导体激光器本身，如果设计得好的话，光发射机的速率一般可以达到 10~15Gbps，最高达到 40Gbps。

3. 光接收机

光接收机在光纤的末端将接收到的光信号恢复成原来的电信号，图 1.4 给出了光接收机的示意图。它主要由耦合器、光电二极管和解调电路构成。耦合器的作用是将光信号耦合到光电二极管上，光电二极管是光接收机的主要部件，它能将光纤传来的已调光信号转变成相应的电信号，经放大后送入解调电路进行处理。解调器的设计依赖于系统的调制方式，它的作用就是将光电二极管送来的信号进行判决，恢复出原来的电信号信息。

数字光纤传输系统的性能由误码率来表征，它定义为在接收机上出现误码的几率，这样 10^{-6} 的误码率就相当于 10^6 个码中平均说来会有一个误码。许多系统都将 $\leq 10^{-9}$ 的误码率作为对系统的要求，有些系统要求误码率小至 10^{-14} 。

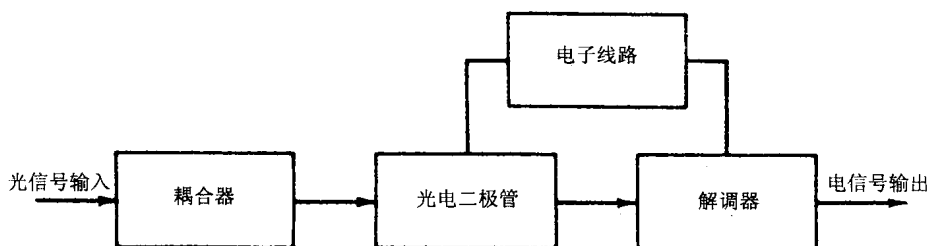


图 1.4 光接收机结构

接收灵敏度是光接收机的一个重要参数，定义为在一定误码率下的最小平均接收光功率，它与系统的信噪比有关，而信噪比又与使接收信号劣化的各种噪声源的大小有关，噪声包括由接收机内部产生的噪声（如热噪声和放大器噪声）、光发射机的噪声（如相对强度噪声）以及光信号在光纤内传输过程中引入的噪声等等。接收灵敏度由在判决电路上引起信噪比降低的所有可能的噪声的累加效应决定，它一般与码速有关，因为某些噪声（如点噪声）是与信号的带宽有关的。

§ 1.3 几个基本概念

本节介绍通信系统中普遍使用的几个基本概念，从描述模拟和数字信号开始，给出将模拟信号转换成数字信号的方法，然后讨论信号的复用，最后描述各种调制方式和信道容量。

§ 1.3.1 模拟信号与数字信号

在通信系统中，要传送的信号为模拟或者数字形式的电信号。对模拟信号来说，其信号电流随时间作连续的变化，最熟知的例子就是通过麦克风和摄像机将声音和图像信息转变成连续变化的电信号的音频和视频信号；相反，数字信号只取一些分离值，在二进制情况下，只存在两种可能的值，在电流开启或关闭下分别对应两种状态，称为“1”码或“0”码，每一个码有一定的持续时间 T_B ，叫做比特时间。描述数字信号的另一个量叫比特率 B ，它被定义为每秒钟的比特数，即 $B=1/T_B$ 。最熟知的数字信号就是计算机的数据信号。无论是模拟信号还是数字信号，都具有一定的信号带宽，信号带宽表征了信号在傅立叶变换下所包含的频率范围。

模拟信号可以以一定的时间间隔进行取样后转变成数字信号，图 1.5 表示出了这种变换方法。取样速率由模拟信号的带宽 Δf 决定，根据取样原理，带宽受限的信号可以完全由一系列分离取样值来表示而不丢失任何信息，只要取样频率 f_s 满足耐奎斯特准则： $f_s \geq 2\Delta f$ 。取样后，需要对取样值进行量化，从原理上讲，量化的结果可以是 $0 \leq A \leq A_{\max}$ 范围内的任何值，这里 $A_{\max}$ 是给定模拟信号的最大幅值。如果 $A_{\max}$ 划分成 M 个分离值（并不一定要等分），则每个取样值就会被量化到某一个分离值上，当然这种量化过程会增加噪声，叫做量化噪声，它会叠加在模拟信号的其他噪声上。

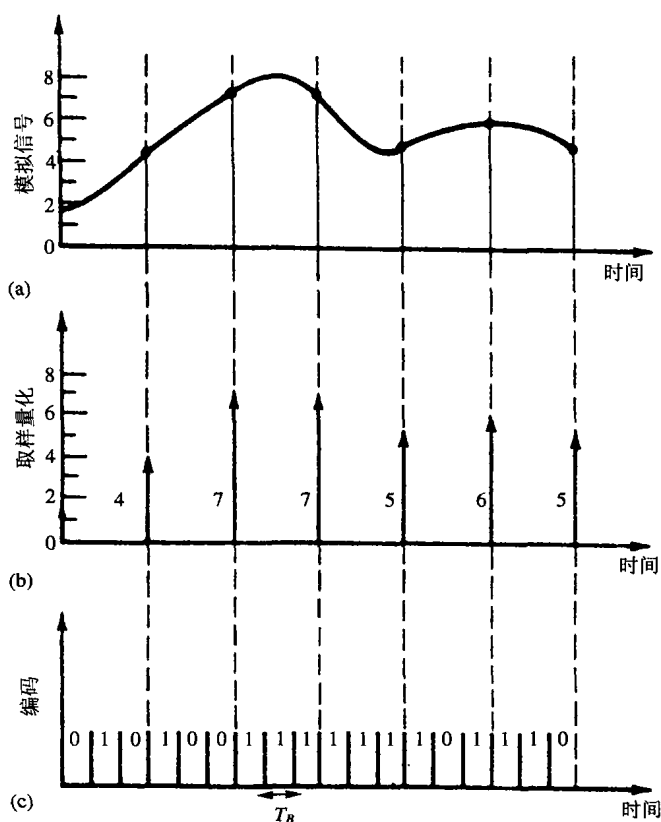


图 1.5 模拟信号转变成数字信号

量化噪声可以通过选择划分数目, 使其满足 $M > A_{\max}/A_N$ 来降低到最小值, 这里 A_N 是模拟信号的均方根噪声幅度, 比值 $A_{\max}/A_N$ 叫做动态范围, 它与信噪比 SNR 具有下述关系:

$$\text{SNR} = 20 \log(A_{\max} / A_N) \quad (1.3-1)$$

其中, SNR 的单位是 dB。

量化的取样值通过脉冲编码调制 (PCM) 方法转换成数字信号。用脉冲的有无来表示信息, 量化值的大小通过一系列的“1”或“0”二进制码来表示, 所需的二进制码的位数 m 与量化信号值 M 有关, 即

$$M = 2^m \quad \text{或} \quad m = \log_2 M \quad (1.3-2)$$

这样, 采用 PCM 的数字信号的比特率就表示成为

$$B = mf_s \geq (2\Delta f) \log_2 M \quad (1.3-3)$$

这里已利用了耐奎斯特准则 $f_s > 2\Delta f$ 。注意到 $M > A_{\max}/A_N$, 由式 (1.3-1), 有

$$B > (\Delta f)(\text{SNR})/3 \quad (1.3-4)$$

式 (1.3-4) 表明了带宽为 Δf 、信噪比为 SNR 的模拟信号进行数字化所需的最小比特

率。若 $\text{SNR} > 30\text{dB}$ ，则要求 $B > 10\Delta f$ ，表明数字信号对带宽的要求大大提高，尽管如此，大多数光纤通信系统仍然采用数字方式，因为数字传输系统具有更为优越的性能，而光纤通信系统本身具有巨大的带宽潜力，带宽不成为常需要考虑的问题。

一个由电话产生的音频信号的频谱范围是 $0.3 \sim 3.4\text{kHz}$ ，带宽 $\Delta f \approx 3.1\text{kHz}$ ，信噪比 SNR 约为 30dB ，由式 (1.3-4) 可得 $B > 31\text{Kbps}$ 。实际上一个数字音频信号的比特率为 64Kbps ，它对模拟信号以 $1.25\mu\text{s}$ 的间隔进行取样（取样速率 $f_s = 8\text{kHz}$ ）。而每一个取样值用八位二进制码来表示，则 $B = 8f_s = 64\text{Kbps}$ 。

§ 1.3.2 信道复用

如前所述，一个数字音频信道的比特率为 64Kbps ，大多数光纤通信系统能够传送 100Mbps 以上的信号，光纤信道的传输容量甚至高达 10Tbps 以上，为了充分利用光纤信道的容量，有必要采用复用的方法同时传输多路信号。主要有两种复用方法，即时分复用（TDM）和频分复用（FDM）。在时分复用中，不同信道的数据交叉形成一个复合数据，例如， 64Kbps 的单信道音频信号的比特时间为 $15\mu\text{s}$ ，采用 TDM 方法可以将 5 个这样的信道复合起来，相邻码之间仍有 $3\mu\text{s}$ 的延迟。在频分复用中，信道在频域上分隔开来，每一信道采用不同的载波频率，载波频率的间隔应大于信道的带宽以避免信道频谱的交叠。FDM 对模拟和数字信号都适用，而 TDM 只适用于数字信号，几组 TDM 信号可以采用 FDM 方法复用起来以增加系统的容量。

FDM 在光域内称为波分复用（WDM），即复用的载波为光波，WDM 技术在 20 世纪 90 年代中后期取得了巨大成功，并迅速商用化，是目前主流的光传输和复用技术。习惯上将光载波频率间隔较小（数十吉赫兹至数百吉赫兹）的 WDM 系统称为密集波分复用（DWDM）系统。

采用 TDM 概念，形成了不同的数字系列。在北美洲和日本，将 24 路音频信号复合在一起，成为 1.544Mbps 的一次群，而在欧洲则采用 30 路复用，成为 2.048Mbps ，注意到复用后的信号速率不是简单的复用信道数乘以 64Kbps ，而是稍高一些，这是因为在复用时，加进了一些勤务信号以及系统监控的控制脉冲信号。二次群信号通过将 4 个一次群信号复接而获得，对北美洲和日本来说，速率为 6.312Mbps ，欧洲为 8.44Mbps ，采用同样的方法可以获得更高次群的信号。表 1.1 给出了北美洲、欧洲和日本采用的 5 种不同次群数字系列的码率。

表 1.1 北美洲、欧洲和日本采用的 5 种数字系列码率

群 次	码率 (Mbps)		
	北美洲	欧洲	日本
1	1.544	2.048	1.544
2	6.312	8.448	6.312
3	44.736	34.386	32.064
4	274.176	139.264	97.728
5		565.148	396.200

在电讯工业发展的早期, 缺乏统一的国际标准, 不利于设备的互联互通, 后来在国际电联 (ITU-T) 的努力下, 逐渐制订了一系列国际标准, 定义了 TDM 数字信号的结构。

ITU-T G.702 标准定义了准同步数字系列 (PDH), ITU-T G.707 标准定义了同步数字系列 (SDH), ITU-T G.703 标准进一步规定了诸如接口码型、比特率容差、插入损耗、抖动容限、接口反射损耗等接口要求。表 1.2 给出了不同系列等级的 PDH 和 SDH 的码率。

表 1.2 PDH/SDH 的码率

准同步数字系列 (PDH)		同步数字系列 (SDH)	
系列等级	比特率	系列等级	比特率
1	2048 Kbps	1	155 520 Kbps
2	8448 Kbps	4	622 080 Kbps
3	34 368 Kbps	16	2 488 320 Kbps
4	139 264 Kbps	64	10Gbps
		256	40Gbps

PDH 系统具有以下特点:

- 上下电路采用逐级分接、复接的方式实现, 系统设备繁多, 维护量大, 对网络性能有不良影响;
- 各等级信号帧结构中预留的插入比特中, 不能满足网络维护管理的要求, 也不适应电信管理网的需求;
- 光传输系统不具备光路上的横向兼容性, 不同厂家的设备在光路上无法互通, 网络复杂、不灵活;
- 更高群次如继续采用 PDH 的方式将难以实现。

SDH 系统具有以下特点:

- 可以将不同体制的 PDH 信号采用复接、映射的方法在 STM-1 等级上进行兼容, 实现高速率数字传输的统一;
- 上下电路方便;
- 网管能力强大;
- 光接口标准;
- 系统构成简化, 便于安装维护;
- 可实现 PDH-SDH-PDH 以及 SDH-PDH-SDH 的互通, 还能支持 ATM 和 IP。

§ 1.3.3 调制方式

在光纤通信系统的设计中, 首先要考虑的就是如何将电信号转变成光信号, 通常是通过直接将电信号加载到光源或采用外调制器的方法来获得调制光输出。对于数字信号, 有两种不同的码型, 如图 1.6 所示, 分别叫做归零码 (RZ) 和非归零码 (NRZ)。在 RZ 码中, 表示“1”的光脉冲时间小于比特时间, 所以在比特时间结束前, 脉冲幅度将回复到零; 而在 NRZ 码中, 光脉冲将在整个比特时间内保持, 所以在两个连续“1”码之间, 光脉冲幅度并不成为零, 这样, 在 NRZ 中, 脉冲的宽度随信号而变, 而在 RZ 码中脉冲宽度始终不

变。NRZ 码的一个优点是其带宽要求比 RZ 码小，然而 NRZ 码的应用要求较好的脉宽控制技术，如果在传输过程中脉冲发生了展宽，则可能产生误码。

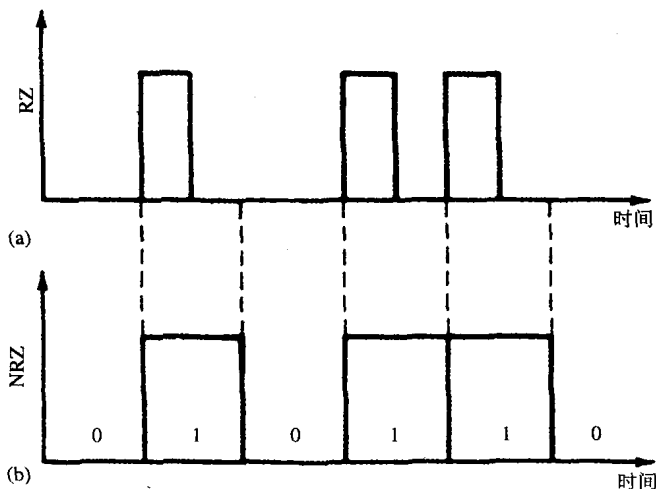


图 1.6 归零码与非归零码

选择光载波的哪一个物理量被调制是一个重要问题，调制前的光载波可以表示为

$$E = eA\cos(\omega_0 t + \phi) \quad (1.3-5)$$

这里， E 为电场矢量， e 为光偏振方向单位矢量， A 为幅度， ω_0 为载波角频率， ϕ 为相位。为简便起见，没有考虑 E 随空间的变化。光载波的幅度 A ，角频率 ω_0 或相位 ϕ 都可以被调制，在模拟调制中，这三个过程分别叫做调幅 (AM)、调频 (FM) 和调相 (PM)。在数字通信中，可以采取类似的调制方法，视载波的幅度、频率或相位在两个值之间的改变而叫做移幅键控 (ASK)、移频键控 (FSK) 和移相键控 (PSK)。最简单的一种 ASK 叫做开关调制 (OOK)，它以光信号的有无来表示“1”或“0”。大多数数字光纤通信系统都采用 PCM 与 OOK 相结合的方法。

§ 1.3.4 信道容量

任何通信系统的性能最终都受限于接收信号的 SNR。根据信息论，在高斯噪声存在下，如果在传输过程中不再引入其他噪声，可得到二进制数字信号系统的最大可能码率。这个码率就叫信道容量，可表示为

$$C = \Delta f_{ch} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.3-6)$$

式中， Δf_{ch} 为信道的带宽， S 是平均信号功率， N 是平均的噪声功率。

由式 (1.3-6) 可知，信道的容量不能靠无限地增大带宽 Δf_{ch} 来增加，考查一下即使是很完善的系统都会存在的点噪声就会更清楚这一点，点噪声是随 Δf_{ch} 而线性增加的，即 $N = N_0 \Delta f_{ch}$ ，这里 N_0 为点噪声频谱密度。将 N 代入式 (1.3-6) 并对 Δf_{ch} 取极限，得到

$$C \leq C_{\max} = \left(\frac{S}{N} \right) \log_2 e \quad (1.3-7)$$