

 电子信息与电气学科规划教材

光纤通信

原理与应用

方志豪 朱秋萍 方锐 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电子信息与电气学科规划教材

光纤通信原理与应用

方志豪 朱秋萍 方锐 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书共 8 章,系统地阐述了光纤通信的原理、特性、组成及应用。主要内容包括:光纤的基本结构、传光原理、特性参数和连接方式;光发送设备和光接收设备的基本组成及实现方式;WDM 光纤数字通信系统的实现、光纤数字通信系统的 SDH 制式;光纤接入网、光纤局域网、光纤城域网、光纤广域网、光传送网和全光网。每章结尾均提供了丰富的习题,便于读者自学并掌握各章的要点。本书还配有免费电子教学课件。

本书概念准确,内容新颖,图文并茂,深入浅出,突出实用性、系统性和先进性,可作为普通高等院校通信工程、电子信息、光电技术等专业本科生的教材,也可供其他相关专业的大学生和工程技术人员学习与参考。

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

光纤通信原理与应用/方志豪,朱秋萍,方锐编著.北京:电子工业出版社,2008.7
电子信息与电气学科规划教材
ISBN 978-7-121-07002-0

I. 光… II. ①方…②朱…③方… 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(2007)第 095543 号

责任编辑:段丹辉

印 刷:北京季峰印刷有限公司

装 订:三河市万和装订厂

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

开 本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:452.6 千字

印 次:2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:27.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

光纤通信以其独特的优越性，已经成为现代通信发展的主流方向，现在世界上绝大部分的通信业务都是采用光纤通信方式传送的。特别是，以光纤作为主要传输介质的互联网已遍布全球各地，没有光纤通信，就没有今天因特网的巨大规模，现代信息社会的发展也就不可能这样快速。

本书是在作者多年从事光纤通信教学实践经验的基础上，总结几年前编著出版的《光纤通信——原理、设备和网络应用》教材的教学使用情况后对其修订而成的。本书在修订的过程中尽可能多地反映光纤通信领域的最新成果，以满足光纤通信课程的教学需要，使教学内容尽可能贴近实际、贴近新技术、贴近新应用。

本书的主要特色如下：

(1) 一个抓住，即抓住主干内容

光纤通信的主干内容是光纤和光端机，以及 WDM（波分复用）和 SDH（同步数字系列），一本合适的光纤通信教材不能缺少这四个内容中的任何一个，否则那样的教材是脱离实际的。所以，本书用 5 章的篇幅来阐述这四个主干内容，力求讲清楚、讲透彻。

(2) 三个突出，即突出实用性、系统性和先进性

- **实用性** 本书中光端机以国内主流产品为依据来进行阐述，使读者掌握实用的知识与技术，从而在面对实际问题时不会生疏无策；在相关内容中较多介绍了 ITU-T（CCITT）等标准，以培养读者的标准化观念；对重要而复杂的数学推导则舍弃了推导过程，但给出清晰的推导步骤，让读者掌握重要的物理概念和有用的结论。
- **系统性** 本书对光纤通信系统中的光纤、光端机、WDM 和 SDH 四个主干内容都做了详细的阐述，真实地反映了现代光纤通信系统的特点，所以本书的内容具有很强的系统性，这也是不同于其他许多同类书籍的主要特色。
- **先进性** 本书较详细地介绍了近几年推出的光纤通信的热门新技术，如 A/BPON、EPON 和 GPON 接入技术、MSTP 传送技术、MPLS 和 MP λ /LS 交换技术等，这些新技术有很好的开发应用前景。

本书共 8 章，系统地阐述了光纤通信的原理、特性、组成及应用。

第 1 章简要阐述光纤通信的基本概念，使读者从阅读本书一开始就对光纤通信系统有一个清楚的认识，为学习后面各章节奠定基础。

第 2 章清晰地介绍光纤的基本结构、传光原理和特性参数，使读者掌握光纤的各种实用知识。

第 3 章和第 4 章系统地介绍光端机（光发送设备和光接收设备）的基本构成及其实现方式，使读者掌握端到端信息传输的过程及码元的具体形式，熟悉光端机与电端机和光纤之间的连接特点，从而对光纤通信形成一个有机的、整体性的认识，而不是零散的、局部的认识。这两章不同于大多数同类书籍。

第 5 章和第 6 章介绍 WDM 光纤数字通信系统的实现、光纤数字通信系统的 SDH 制式

等。本书 SDH 内容精练但不失完整性，而且分析与举例结合，易读易懂，读者从中容易学到从一般资料中难于得到的有用知识。

第 7 章和第 8 章介绍光纤接入网、光纤局域网、光纤城域网、光纤广域网、光传送网和全光网。读者从中可以清楚了解到光纤通信的许多新技术。这两章的基础知识是通信网的基本概念，在本书内有一定的介绍。

以上 8 章构成本书的统一体，但各章又有一定的独立性，读者可以根据需要选学或调换顺序学习。

本教材的建议授课学时数为 54~72 学时。为方便教学，**本教材为任课教师提供免费电子教学课件，可登录华信教育资源网 (<http://www.huaxin.edu.cn>) 注册下载或发送电子邮件至 duandh@phei.com.cn 索取**，欢迎任课教师及时反馈授课心得和建议。

本书由方志豪和朱秋萍统稿。在写作过程中，作者参阅了国内外大量的著作和资料，得到了武汉大学教务部和电子信息学院的大力支持，同时得助于电子工业出版社的段丹辉编辑认真高效和耐心细致的工作，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，本书若有不妥之处，敬请读者批评指正。联系方式：qpzhu@whu.edu.cn。

内容主编 方志豪、朱秋萍

2008 年 4 月

于武汉大学

- 本书由方志豪和朱秋萍统稿。在写作过程中，作者参阅了国内外大量的著作和资料，得到了武汉大学教务部和电子信息学院的大力支持，同时得助于电子工业出版社的段丹辉编辑认真高效和耐心细致的工作，在此一并表示衷心的感谢！
- 由于作者水平有限，本书若有不妥之处，敬请读者批评指正。联系方式：qpzhu@whu.edu.cn。

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 光纤通信的基本概念	(1)
1.1.1 光纤通信的定义	(1)
1.1.2 光纤通信发展过程	(1)
1.1.3 光纤通信的优点	(2)
1.2 光纤通信系统的构成及分类	(3)
1.2.1 光纤通信系统的基本构成	(3)
1.2.2 光纤通信系统分类	(3)
1.3 数字话路基础知识	(5)
1.3.1 语音信号的 PCM 数字化	(5)
1.3.2 话路的时分复用 (TDM)	(7)
1.3.3 数字复接系列	(8)
习题	(10)
第 2 章 光纤	(12)
2.1 光纤的基本概念	(12)
2.1.1 光纤基本结构	(12)
2.1.2 光纤分类	(12)
2.1.3 光纤制造简述	(13)
2.1.4 光缆结构及类型	(14)
2.1.5 光缆 (光纤) 型号命名方法	(15)
2.2 光纤传光原理	(19)
2.2.1 光的射线理论及光纤传光分析	(19)
2.2.2 光纤导波模式的粗糙解 (射线分析方法)	(23)
2.2.3 光纤导波模式的精确解 (电磁场分析方法)	(26)
2.3 光纤特性参数	(30)
2.3.1 数值孔径	(30)
2.3.2 衰减特性	(32)
2.3.3 截止波长	(34)
2.3.4 带宽与色散	(36)
2.3.5 模场直径	(44)
2.4 光纤连接方式	(45)
2.5 光纤在通信领域中的应用	(47)
2.5.1 目前通信中常用的光纤	(47)

2.5.2 光纤(光缆)应用概况	(48)
习题	(50)
第3章 光发送设备	(53)
3.1 光端机的基本概念	(53)
3.1.1 光端机的功能	(53)
3.1.2 光端机基本框图	(53)
3.2 光发送电路	(55)
3.2.1 基本组成和主要性能指标	(55)
3.2.2 激光二极管(LD)	(56)
3.2.3 发光二极管(LED)	(67)
3.2.4 驱动电路	(68)
3.2.5 自动功率控制(APC)电路	(72)
3.2.6 自动温度控制(ATC)电路	(73)
3.3 输入电路	(74)
3.3.1 基本概念	(74)
3.3.2 光纤通信的码型	(75)
3.3.3 HDB3码输入电路	(85)
3.3.4 CMI码输入电路	(93)
习题	(95)
第4章 光接收设备	(97)
4.1 光接收电路	(97)
4.1.1 基本构成和主要性能指标	(97)
4.1.2 光检测器件(PIN和APD)	(98)
4.1.3 前置放大器	(101)
4.1.4 主放大器	(102)
4.1.5 均衡器	(104)
4.1.6 基线恢复	(109)
4.1.7 幅度判决	(111)
4.1.8 非线性处理	(114)
4.1.9 时钟提取	(115)
4.1.10 限幅移相	(117)
4.1.11 定时判决	(118)
4.2 输出电路	(119)
4.2.1 基本概念	(119)
4.2.2 码型反变换电路	(119)
4.2.3 输出接口电路	(122)
习题	(125)
第5章 光纤数字通信系统	(126)
5.1 光纤通信系统新技术简述	(126)

5.2	波分复用 (WDM) 光纤数字通信系统	(127)
5.2.1	基本概念	(127)
5.2.2	光纤耦合型波分复用器件	(131)
5.2.3	角度色散型波分复用器件	(132)
5.2.4	干涉型波分复用器件	(133)
5.2.5	波分复用系统对光纤的新要求	(135)
5.3	光中继器	(138)
5.3.1	光电转换型中继器	(138)
5.3.2	全光型中继器概述	(139)
5.3.3	掺铒光纤放大器 (EDFA)	(140)
5.3.4	光纤拉曼放大器 (FRA)	(143)
5.3.5	几类光放大器的特性比较	(145)
	习题	(146)
第 6 章	光纤数字通信系统的传输规范	(148)
6.1	光纤数字通信系统的两种主要传输制式	(148)
6.1.1	准同步数字系列 (PDH)	(148)
6.1.2	同步数字系列 (SDH)	(150)
6.1.3	SDH 承载 PDH 的方式	(152)
6.1.4	SDH 承载 PDH 之应用	(163)
6.1.5	SDH 复用及交换的主要设备	(170)
6.1.6	SDH 传送网	(171)
6.2	光纤数字通信系统的基本质量指标	(172)
6.2.1	评价误码性能的方法	(172)
6.2.2	数字话路通道的误码特性	(173)
6.2.3	基群及其以上速率通道的误码特性	(177)
6.2.4	抖动特性	(180)
6.2.5	可靠性	(181)
6.3	光纤数字通信系统的基本设计	(184)
6.3.1	系统设计的一般步骤	(184)
6.3.2	中继距离估算	(185)
6.3.3	误码率估算	(187)
6.4	光纤数字通信系统的测量	(189)
6.4.1	电性能的主要指标测量	(189)
6.4.2	光性能的主要指标测量	(191)
	习题	(194)
第 7 章	现代光纤网络	(196)
7.1	光纤通信在现代信息网络中的重要地位	(196)
7.1.1	现代信息网络的基本特点	(196)
7.1.2	光纤通信在现代信息网络中的应用概况	(197)

7.2	光纤接入网	(199)
7.2.1	基本概念	(199)
7.2.2	FTTx 接入网	(201)
7.2.3	FTTH 的基本拓扑结构	(203)
7.2.4	FTTH 的实现技术: xPON 接入技术	(204)
7.2.5	各类 PON 接入技术的比较	(214)
7.2.6	HFC 接入网	(215)
7.3	光纤局域网	(217)
7.3.1	局域网 (LAN) 的基本概念	(217)
7.3.2	光纤总线/星形局域网	(219)
7.3.3	光纤令牌环局域网	(221)
7.3.4	光纤 ATM 局域网	(223)
7.4	光纤城域网和广域网	(225)
7.4.1	光纤城域网 (MAN)	(225)
7.4.2	基于 SDH 的多业务传送平台 (MSTP)	(225)
7.4.3	光纤广域网 (WAN)	(227)
	习题	(229)
第 8 章	未来的全光网络	(231)
8.1	全光网络 (AON) 的基本概念	(231)
8.1.1	通信网发展过程	(231)
8.1.2	全光通信网的基本特点	(231)
8.1.3	全光通信网关键技术概述	(232)
8.2	光交叉连接器 (OXC)	(235)
8.2.1	光交叉连接器的基本概念	(235)
8.2.2	光交换技术	(236)
8.2.3	波长变换技术	(240)
8.3	光分插复用器 (OADM)	(243)
8.3.1	光分插复用器基本概念	(243)
8.3.2	分波/合波器+光开关组合	(243)
8.3.3	多层介质膜滤波器+光开关+光环行器组合	(244)
8.3.4	光纤光栅+光环行器+分波/合波器组合	(245)
8.4	光传送网 (OTN) 的基本形式	(245)
8.4.1	光传送网的分层体系结构	(246)
8.4.2	光层的基本拓扑结构	(247)
8.4.3	光传送网的应用——IP 光网	(249)
8.5	全光网络的进展	(250)
	习题	(253)
附录 A	英汉对照名词索引	(254)
参考文献	(263)

第 1 章 概 述

第 1 章 概 述

1.1 光纤通信的基本概念

1.1.1 光纤通信的定义

光纤通信是以光波作为传输信息的载波、以光纤作为传输介质的一种通信。图 1-1 是光纤通信的简单示意图。其中，用户通过电缆或双绞线与发送端和接收端相连，发送端将用户输入的信息（语音、文字、图形、图像等）经过处理后调制在光波上，然后入射到光纤内传送到接收端，接收端对收到的光波进行处理，还原出发送用户的信息并输送给接收用户。

根据光纤通信的以上特点，可以看出光纤通信归属于光通信和有线通信的范畴。

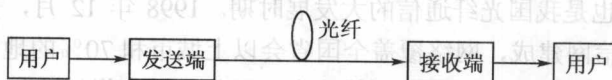


图 1-1 光纤通信的简单示意图

1.1.2 光纤通信发展过程

了解光纤通信的发展过程，可以帮助我们初步了解光纤通信的关键技术及其主要指标，为以后深入学习打下基础。

大体说来，光纤通信的发展经历了以下三个阶段。

1. 20 世纪 70 年代的起步阶段

这个阶段是光纤通信能否问世的决定性阶段。这个阶段的主要工作如下。

(1) 研制出低损耗光纤

1970 年美国康宁 (Corning) 公司率先制成 20 dB/km 损耗的光纤。

1972 年美国康宁公司制成 4 dB/km 损耗的光纤。

1973 年美国贝尔 (Bell) 实验室制成 1 dB/km 损耗的光纤。

1976 年日本电报电话公司 (NTT) 和富士通 (Fujitsu) 公司制成 0.5 dB/km 低损耗的光纤。

1979 年日本 NTT 和富士通公司制成 0.2 dB/km 低损耗的光纤。

现在，光纤损耗已低于 0.4 dB/km (1.31 μm 波长窗口) 和 0.2 dB/km (1.55 μm 波长窗口)。

(2) 研制出小型高效的光源和低噪声的光检测器件

这一时期，各种新型长寿命的半导体激光器件 (LD) 和光检测器件 (PD) 陆续研制成功。

(3) 研制出光纤通信实验系统

1976—1979 年美国、日本相继进行了 0.85 μm 波长、速率为几十 Mb/s 的多模光纤通信系统的现场试验。

2. 20 世纪 80 年代进入商用阶段

这一阶段，发达国家已在长途通信网中广泛采用光纤通信方式，并大力发展洲际海底光缆通信，如横跨太平洋的海底光缆、横跨大西洋的海底光缆等。在此阶段，光纤从多模发展到单模，工作波长从 $0.85\ \mu\text{m}$ 发展到 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ ，通信速率达到几百 Mb/s。

我国于 1987 年前在市话中继线路上应用光纤通信，1987 年开始在长途干线上应用光纤通信，铺设了多条省内二级光缆干线，连通省内一些城市。从 1988 年起，我国的光纤通信系统由多模向单模发展。

3. 20 世纪 90 年代进入提高阶段

这一阶段，许多国家为满足迅速增长的带宽需求，一方面继续铺设更多的光缆，如 1994 年 10 月世界最长的海底光缆（全长 1.89 万千米，连接东南亚、中东和西欧的 13 个国家）在新加坡正式启用。另一方面，一些国家还不断努力研制新器件和开发新技术，用来提高光纤的信息运载量。1993 年和 1995 年先后实现了 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s 的单波长光纤通信系统，随后推出的密集波分复用技术可使光纤传输速率提高到几百 Gb/s。

20 世纪 90 年代也是我国光纤通信的大发展时期。1998 年 12 月，贯穿全国的“八纵八横”光纤干线骨干通信网建成，网络覆盖全国省会以上城市和 70% 的地市，全国长途光缆达到 20 万千米。至此，我国初步形成以光缆为主、卫星和数字微波为辅的长途骨干网络，我国电信网的技术装备水平已进入世界先进行列，综合通信能力发生了质的飞跃，为国家的信息化建设提供了坚实的网络基础。

1.1.3 光纤通信的优点

1. 速率高，传输信息量大

光纤自身的频带宽度很大，研究指出单模光纤可利用的带宽已达到 30 THz ($1\ \text{THz} = 10^{12}\ \text{Hz}$)。按照粗略的估计，一对单模光纤应能传送几亿路数字电话（若按码率的一半简单折算，一路数字电话的带宽为 32 kHz）或几十亿路模拟电话（一路模拟电话的带宽为 4 kHz）。目前的实用水平已达到几百万路数字电话。

2. 损耗低，传输距离远

光纤传输损耗已低至 0.2 dB/km（单模 $1.55\ \mu\text{m}$ ）和 0.35 dB/km（单模 $1.31\ \mu\text{m}$ ），而且在相当宽的频带范围内损耗不变化。中继距离可达 50~100 km。而市话电缆的损耗为 20 dB/km（4 MHz），同轴电缆的损耗为 19 dB/km（60 MHz），中继距离仅几千米。可见，光纤比同轴电缆的中继距离要大十几到几十倍。

3. 抗干扰能力强，保密性能好

构成光纤的石英（ SiO_2 ）玻璃是绝缘介质材料，不怕电磁场（强电、雷电、核辐射）干扰，也没有地回路干扰，并且外泄光能很少，光纤之间不串话。

4. 耐腐蚀、耐高温、防爆，可在恶劣环境中工作

石英玻璃耐腐蚀，且熔点在 $2000\ ^\circ\text{C}$ 以上。光纤接头处不产生放电，没有电火花。

5. 质量轻、体积小，便于线路施工

石英玻璃的主要成分硅(Si)的比重为2.2, 小于铜的比重8.9。所以, 相同话路容量的光缆质量为电缆质量的1/30~1/10。此外, 一根光纤外径约为0.1 mm, 6~18芯光缆外径约为12~20 mm, 是相同话路容量的电缆外径的1/4~1/3。

1.2 光纤通信系统的构成及分类

1.2.1 光纤通信系统的基本构成

图1-2是光纤通信系统的基本构成框图, 其主要组成部分包括光纤、光发送器、光接收器、光中继器和适当的接口设备等。其中, 光发送器的功能是将来自用户端的电信号转换为光信号, 然后入射到光纤内传输。光接收器的功能是将光纤传送过来的光信号转换为电信号, 然后送往用户端。光中继器用来增大光的传输距离, 它将经过光纤传输后有较大衰减和畸变的光信号变成没有衰减和畸变的光信号, 再继续输入光纤内传输。实际中, 光发送器和光接收器安放在同一机架中, 合称为光纤传输终端设备, 简称光端机。

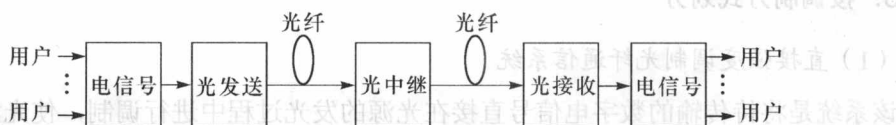


图1-2 光纤通信系统的基本构成框图

1.2.2 光纤通信系统分类

1. 按传输信号划分

(1) 光纤模拟通信系统

特征: 用模拟电信号对光源强度进行调制。

优点: 设备简单, 不需要模/数(A/D)、数/模(D/A)转换部件。

缺点: 光电变换时噪声大, 使用光中继器时噪声积累多。

适用范围: 短距离通信, 如传输广播电视节目、工业和交通监控电视等。

(2) 光纤数字通信系统

特征: 用脉冲编码调制(PCM)电信号对光源强度进行调制。

优点: 抗干扰性强, 噪声积累少, 与计算机连用方便。

缺点: 设备较复杂。

适用范围: 长距离通信, 是目前广泛采用的光纤通信系统。

2. 按光波长和光纤类型划分

(1) 短波长(0.85 μm左右)多模光纤通信系统

通信速率低于34 Mb/s, 中继间距在10 km以内。

(2) 长波长光纤通信系统

① 1.31 μm多模光纤通信系统

通信速率为 34 Mb/s 和 140 Mb/s, 中继间距为 20 km 左右。

例如, 建于 1987 年的武汉—荆州 34 Mb/s ($1.31 \mu\text{m}$) 多模光纤通信系统, 全长 240 km, 设 9 个中继站, 通信容量 480 路。

② $1.31 \mu\text{m}$ 单模光纤通信系统

通信速率可达 140 Mb/s 和 565 Mb/s, 中继间距为 30~50 km (140 Mb/s)。

例如, 建于 1991 年的合肥—芜湖 140 Mb/s ($1.31 \mu\text{m}$) 单模光纤通信系统, 全长 146 km, 设 4 个中继站, 通信容量 1920 路。

③ $1.55 \mu\text{m}$ 单模光纤通信系统

通信速率可达 565 Mb/s 以上, 中继间距更长, 可达 70 km 左右。

注: 光包括可见光和不可见光, 不可见光又分为紫外光和红外光。其中, 可见光的波长范围为 $0.39\sim 0.76 \mu\text{m}$; 紫外光的波长范围为 $0.006\sim 0.39 \mu\text{m}$, 比可见光的波长要短; 红外光的波长范围为 $0.76\sim 300 \mu\text{m}$, 比可见光的波长要长, 红外光又分为近红外光 ($0.76\sim 2.5 \mu\text{m}$)、中红外光 ($2.5\sim 25 \mu\text{m}$) 和远红外光 ($25\sim 300 \mu\text{m}$)。光纤通信使用的波长 $0.85 \mu\text{m}$, $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 属于近红外光。

3. 按调制方式划分

(1) 直接强度调制光纤通信系统

该系统是将待传输的数字电信号直接在光源的发光过程中进行调制, 使光源发出的光本身就是已调制光, 又称为内调制光纤通信系统或直接调制光纤通信系统。该系统的优点是设备简便、价廉, 调制效率较高, 缺点是这类调制会使光谱有所增宽, 对进一步提高速率有影响。目前实用的光纤通信系统均采用这类调制方式, 其最高速率已达 10 Gb/s。

(2) 外调制光纤通信系统

该系统是在光源发出光之后, 在光的输出通路上加调制器 (如电光晶体等) 进行调制, 又称为间接调制光纤通信系统。这类调制对光源谱线影响小, 适合很高速率的通信, 目前采用外调制的实验系统其速率可达 20 Gb/s。

(3) 外差光纤通信系统

该系统又称为相干光通信系统。其原理是: 发送端的本地光频振荡信号被电信号所调制 (调幅、调频、调相等), 然后输入到单模光纤内传输, 光束传到接收端后再与接收端的本地光频振荡信号进行混频、解调, 还原出电信号。

该系统的优点是接收灵敏度高, 信道选择性好。但其外差系统的设备复杂, 对激光光源的频率稳定性和单色性以及单模光纤的保偏性要求都很高, 技术难度很大, 正在研制中。

4. 按传输速率划分

(1) 低速光纤通信系统

传输速率为 2 Mb/s, 8 Mb/s。

(2) 中速光纤通信系统

传输速率为 34 Mb/s, 140 Mb/s。

(3) 高速光纤通信系统

传输速率 ≥ 565 Mb/s。



5. 按应用范围划分

(1) 公用光纤通信系统

如光纤市话中继通信系统、光纤长途通信系统和光纤用户接入系统等。

(2) 专用光纤通信系统

主要指非邮电部门经营的光纤通信系统，如光纤局域网等。

6. 按数字复接类型（即速率转换制式）划分

(1) 准同步数字系列（PDH）光纤通信系统

目前 565 Mb/s 以下速率的光纤通信系统多属此类。

(2) 同步数字系列（SDH）光纤通信系统

该系统优点甚多，正在发展之中。目前，已经实用的 SDH 系统其单波长通信速率可达 2.5 Gb/s, 10 Gb/s 和 40 Gb/s。有关 PDH 和 SDH 的具体介绍参见 6.1 节。

1.3 数字话路基础知识

1.3.1 语音信号的 PCM 数字化

语音信号数字化方法目前有两种方式：脉冲编码调制（PCM）和增量调制（ ΔM ）。下面介绍最常用的 PCM 方式。

图 1-3 所示为语音信号的 PCM 数字化框图。其中，图 1-3(a)表示发送端的 PCM 数字化过程，它由三个步骤来实现，即采样、量化和编码。其功能是用来将语音模拟信号变换成为 PCM 数字信号。所以，采样、量化和编码又合称为 A/D 变换（模/数变换）。图 1-3(b)表示接收端的 PCM 数字化逆过程，它由两个步骤来实现，即解码（译码）和滤波。其功能是用来将 PCM 数字信号还原成为原始的语音模拟信号。解码和滤波合称为 D/A 变换（数/模变换）。图 1-3(c)表示发送和接收的全过程，其中 A/D 变换和 D/A 变换分别为图 1-3(a)和图 1-3(b)的整个过程，合路（又称为复接）用来将多路（即各支路）数字信号合为一路，码型变换用来将合路输出的单极性二代码序列转换为适合电缆信道传输的码型，码型反变换用来将电缆信道传输过来的码型还原成为单极性二代码序列，分路（又称为分接）用来将合路信号分离成为各个支路信号。

PCM 方式下语音数字通信的基本过程可以归纳为：语音模拟信号在发送端经过采样、量化、编码及合路后变成单极性二代码序列，再经过码型变换变成适合电缆信道传输的码型；该码型脉冲序列经过电缆信道传输后，在接收端通过放大再生处理，然后进行码型反变换，再经过解码、滤波及分路，就可以将数字信号还原成为语音模拟信号。

实际中，发、收两端的上述过程是由 PCM 终端设备来实现的。

下面简要说明采样、量化和编码的基本特点。

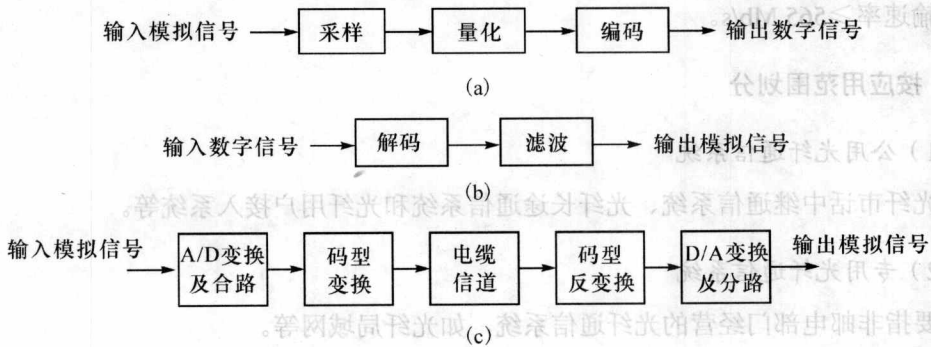


图 1-3 语音信号的 PCM 数字化框图

1. 采样 (Sample)

一个连续信号可以用间隔时间为 Δt 的一系列离散瞬时值来代替，称之为采样。条件是

$$\Delta t \leq 1/(2f_{\max})$$

式中， f_{\max} 为连续信号的最高频率成分； Δt 称为采样周期。此即奈奎斯特 (Nyquist) 采样定理， $f_s = 2f_{\max}$ 的采样频率称为奈奎斯特频率。

对语音信号而言，其频率在 300~3400 Hz 之间。按照采样定理， f_s 取 3400 Hz $\times 2 = 6800$ Hz 就可以了。实际应用时，为了降低接收端低通滤波器的实现难度，往往将采样频率取得更高些。在 ITU-T (国际电信联盟电信标准部，原为 CCITT 即国际电话电报咨询委员会) 建议中，规定语音信号的采样频率 f_s 统一取为 8000 Hz，即语音信号采样周期 $\Delta t = 1/f_s = 125 \mu\text{s}$ 。

2. 量化 (Quantization)

在最大采样幅值范围内用一组有间距的电平 (称为量化电平) 来分层，各个采样幅值的真实值就用最靠近的量化电平来近似表示，称之为量化。

量化中的近似处理所引起的误差称为量化噪声。研究得知，量化后小信号引入的量化噪声要比大信号的更大些。因此，在量化过程中可设法增多小信号的量化等级而减少大信号的量化等级。这就是非均匀量化法的基本原理。采用非均匀量化法，可以使总的量化噪声减小，而总的量化等级数目却保持不变。

在实用化设备中，为实现非均匀量化，实际上是首先对输入信号进行非线性处理，然后再进行均匀量化，而保持总的效果与非均匀量化相同。具体而言，就是首先在发送端对输入信号用对数函数进行幅度的非线性压缩，然后再进行均匀量化；在接收端，信号经译码处理后，再用指数函数对信号进行非线性扩张，从而恢复出原信号。

对于语音信号，国际标准中规定了两种非均匀量化标准，通常称为 μ 律 (用于 PCM 24 路制式) 和 A 律 (用于 PCM 30 路制式)，国际通信时以 A 律制式为标准， μ 律制式应转换为 A 律制式。我国采用的是 A 律标准。语音信号的 A 律量化等级即量化电平数为 256。

3. 编码 (Code)

将量化电平用一定位数的二进制代码来表示，称之为编码。这些二进制代码又称为量化

代码。量化代码和量化电平之间的替代是一一对应的。实际应用中,采样、量化和编码是在同一块集成电路芯片中实现的。

对于语音信号,每一个量化电平用8位二进制代码来表示,称为一个码组(Code Block, CB),正好能够表示 $2^8 = 256$ 个量化电平。其8位二进制构成的码组是这样安排的:第1位为符号位,表示量化电平的正、负符号,正极性时置“1”,负极性时置“0”;第2~4位表示非均匀量化的8个段位;第5~8位表示每个段位中的16个量化电平。

完成以上编码后,再将偶数位进行翻转,变成ADI码(数字交替翻转码),以便减少长连“0”。

1.3.2 话路的时分复用(TDM)

时分复用的目的是,在一条信道上串行传输多路信号,用以扩大数字通信系统的传输容量。其原理方法是:将传输时间按照采样周期 Δt 进行分割,每一个分割段称为一帧(Frame);将每一帧再等分成若干互不重叠的时隙(Time Slot, TS),每路信号在一帧时间内只能占用一个时隙。在发送端,多路信号顺序地占用各自的时隙,合路(复接)构成复用信号,然后送到一条信道中传输。在接收端,将收到的复用信号按照与发送端同样的时间顺序分开每一路信号,实现分路(分接)。

语音信号的TDM过程如下:将30路模拟语音信号分别进行PCM数字化后,按照一定的时间格式进行合路复用,在一个信道中传输。该合路复用信号称为PCM基群或一次群。在接收端,依据相同的时间格式,从收到的基群信号中分接出30路PCM数字语音信号,然后分别对各路语音信号进行PCM解码,还原出30路模拟语音信号。实现以上过程的设备,称为PCM基群终端设备,或简称PCM基群设备。

由于复用后的编码数字信号是一个无头无尾的数字码流,尽管其中含有大量的信息,提高了信道使用效率,但若不能分辨出各个采样码组,仍将无法实现通信。因此,在TDM复用过程中,还要插入一定的开销比特作为同步识别信号,以保证发端的正确插入和收端各路信号的正确分离。这就要求合路的复用信号按一定的帧格式组成码流,我国采用的PCM基群的帧结构如图1-4所示。

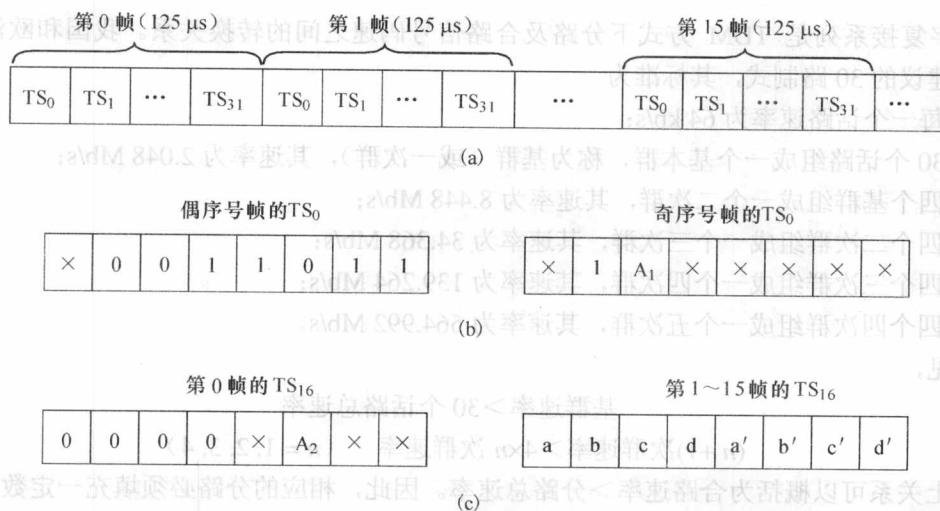


图1-4 PCM基群的帧结构图

在上述 PCM 基群的帧结构中，一帧的周期为 $125 \mu\text{s}$ ($1/8000 \text{ Hz}$)。每帧内含 32 个时隙，以 TS_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 31$) 表示。每个时隙约为 $125 \mu\text{s} / 32 = 3.9 \mu\text{s}$ ，占 8 比特 (8 个码元)，称为 1 个码字，正好放入 1 个采样码组。每个码元的时宽约为 $3.9 \mu\text{s} / 8 = 0.488 \mu\text{s}$ 。

PCM 基群对一帧中的 32 个时隙做了如下规定。

(1) 每路语音在一帧中只占用 1 个时隙

使用 $\text{TS}_1 \sim \text{TS}_{15}$, $\text{TS}_{17} \sim \text{TS}_{31}$ 共 30 个时隙分别依次传输 30 路 PCM 语音信号。具体言之，第 0 帧的 $\text{TS}_1 \sim \text{TS}_{15}$, $\text{TS}_{17} \sim \text{TS}_{31}$ 分别放入第 1~30 路语音在各自第 1 时刻的采样码组，第 1 帧的 $\text{TS}_1 \sim \text{TS}_{15}$, $\text{TS}_{17} \sim \text{TS}_{31}$ 分别放入第 1~30 路语音在各自第 2 时刻的采样码组，其余类推。所以，每一路的传输速率为 1 个码组/ $125 \mu\text{s} = 8 \text{ b} / 125 \mu\text{s} = 64 \text{ kb/s}$ 。基群 (32 路) 传输速率为 $64 \text{ kb/s} \times 32 = 2.048 \text{ Mb/s}$ 。

(2) TS_0 是同步时隙

偶序号帧的 TS_0 的第 2~8 比特为帧同步码“0011011”；第 1 比特 (x) 供国际通信使用，不用时置“1”。奇序号帧的 TS_0 的第 3 比特 (A_1) 是帧失步告警码 (向对端告警)，同步为“0”，失步为“1”；第 2 比特固定为“1”，以避免奇序号帧的 TS_0 出现假同步码；第 1 比特 (x) 供国际通信使用，不用时置“1”。

(3) TS_{16} 是信令时隙

第 0 帧的 TS_{16} 的第 1~4 比特为复帧同步码“0000”；第 6 比特 (A_2) 是复帧失步告警码，同步为“0”，失步为“1”；第 5, 7, 8 比特 (x) 备用，不用时置“1”。第 1~15 帧的 TS_{16} 的前 4 比特 (abcd) 传送第 1~15 路的信令信息 (如拨号、挂机、占用等)，后 4 比特 (a'b'c'd') 传送第 16~30 路的信令信息，即每帧内的 TS_{16} 时隙只能传送两条话路的信令。

在 PCM 基群中，每 16 帧称为一个复帧，正好完成 30 个话路信令的传输 (由第 1~15 帧的 TS_{16} 实现) 与同步分离 (由第 0 帧的 TS_{16} 实现)。复帧比特数为 $256 \text{ b} \times 16 = 4.096 \text{ kb}$ ，复帧周期为 $125 \mu\text{s} \times 16 = 2 \text{ ms}$ 。

1.3.3 数字复接系列

数字复接系列是 TDM 方式下分路及合路信号码速之间的转换关系。我国和欧洲采用 CCITT 建议的 30 路制式，其标准为

- 每一个话路速率为 64 kb/s ;
- 30 个话路组成一个基本群，称为基群 (或一次群)，其速率为 2.048 Mb/s ;
- 四个基群组成一个二次群，其速率为 8.448 Mb/s ;
- 四个二次群组成一个三次群，其速率为 34.368 Mb/s ;
- 四个三次群组成一个四次群，其速率为 139.264 Mb/s ;
- 四个四次群组成一个五次群，其速率为 564.992 Mb/s 。

可见，

基群速率 > 30 个话路总速率

$$(n+1)\text{次群速率} > 4 \times n \text{次群速率} \quad (n = 1, 2, 3, 4)$$

以上关系可以概括为合路速率 > 分路总速率。因此，相应的分路必须填充一定数量的码元，才能使合路速率等于分路总速率。这些填充码元正好用于同步、监控等。