



普通高等教育“十三五”规划教材  
电子信息科学与工程类专业规划教材

# 光纤通信原理与应用 (第3版)

◎ 方志豪 朱秋萍 方锐 编著



 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

工程类专业规划教材

# 光纤通信原理与应用

## (第3版)

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、实现方式及光模块;WDM 光纤通信系统的实现、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、三网融合、与光纤互联网相关的热门技术;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. —3 版. —北京:电子工业出版社,2019.3  
电子信息科学与工程类专业规划教材  
ISBN 978-7-121-36042-8

I. ①光… II. ①方… ②朱… ③方… III. ①光纤通信—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 025793 号

责任编辑:竺南直

印 刷:北京捷迅佳彩印刷有限公司

装 订:北京捷迅佳彩印刷有限公司

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:20.25 字数:518 千字

版 次:2008 年 7 月第 1 版

2019 年 3 月第 3 版

印 次:2019 年 3 月第 1 次印刷

定 价:49.80 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)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: [davidzhu@phei.com.cn](mailto:davidzhu@phei.com.cn)。

# 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（Internet）的巨大规模，现代信息社会的发展也就不可能这样快速。

本书第1版和第2版（分别于2008年7月和2013年2月，电子工业出版社）是在作者多年从事光纤通信教学和科研实践经验的基础上编著出版的。几年来，本书被国内许多高等院校选用作为教材，承蒙这些院校同行教师们支持和肯定，给本书再版的修订注入了动力，使修订的方向进一步明确。

本书第3版修订的主要内容是：补充新的技术内容和新的技术指标；合理调整部分章节的结构；对文句进行精益求精的修改。其中，新增完整章节的有：4.3节、7.5节、7.6节；在原章节中新增大段内容的有：1.1.2节、2.2.3节、2.5.1节、5.2.6节、7.2.6节（修改后整体移到7.5.4节）；局部修改的有：1.2.2节、3.2.1节、4.1.3节、4.1.7节、7.1.2节等。

本书在修订过程中注重反映光纤通信领域的新成果，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。本书此次修订后，除继续保持前两版所具有的特色外，在内容准确性、论述精练性和文句可读性方面有望跨上一个新台阶，使本书更臻完美。

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、光端机（光发送设备和光接收设备）、WDM（波分复用）和SDH（同步数字系列）。缺少这四个内容中的任何一个，就谈不上是真实的光纤通信。所以，本书用6章的篇幅来阐述这四个主干内容，力求讲清楚、讲透彻。这是本书不同于一些同类书籍的最主要特点。

## 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；在光纤和传输规范等内容中较多介绍了ITU-T等标准，以增进读者的标准化意识；对重要而复杂的数学推导舍弃了繁难的推导过程，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** 本书对光纤通信四个主干内容相互之间的关联，以及对每一个主干内容自身的机理都做了详细的阐述，真实地反映了现代光纤通信系统的特点，使读者能够掌握光纤通信完整的知识。
- **先进性** 本书注重介绍新型光纤和光器件技术的发展成果，同时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/L S 交换技术等, 这些新技术有很好的开发应用前景。读者从本书深入浅出的介绍中容易了解这些新技术, 体验到光纤通信的飞速发展。

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明晰的认识, 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, 使读者掌握光纤的基本理论和各种实用知识。其中, 光纤导波模式的理论分析, 论述有序, 概念清晰, 具有新意。

第 3 章和第 4 章系统地介绍光端机的基本构成及其实现方式, 使读者从原理上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。同时, 第 4 章还详细地介绍实际工程中使用的光模块, 使读者从应用角度了解光收发设备的实际结构。

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 章介绍光纤接入网、光纤局域网、光纤城域网、光纤广域网、三网融合、与光纤互联网相关的热门技术——移动通信、物联网、云计算。读者从中可以清楚了解到光纤通信的许多新技术, 了解移动通信、物联网、云计算与光纤互联网的紧密依存关系, 如果没有光纤互联网, 这些技术难得发展。

第 8 章介绍全光网络和光传送网。读者从中可以了解到全光网和光传送网的基本技术。

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.hxedu.com.cn>) 注册下载或发送电子邮件至 [davidzhu@phei.com.cn](mailto:davidzhu@phei.com.cn) 索取, 欢迎任课教师及时反馈授课心得和建议。**

本书第 3 版由方志豪和朱秋萍统稿。在修订过程中, 作者参阅了许多新的文献资料, 得到了武汉大学的大力支持, 同时得助于电子工业出版社竺南直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, 敬请读者不吝指正。联系方式: [qpzhu@whu.edu.cn](mailto:qpzhu@whu.edu.cn)。

作者

2019 年 1 月

# 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	3
1.2 光纤通信系统的构成及分类	4
1.2.1 光纤通信系统的基本构成	4
1.2.2 光纤通信系统分类	4
1.3 数字话路基础知识	6
1.3.1 语音信号的 PCM 数字化	6
1.3.2 话路的时分复用 (TDM)	8
1.3.3 数字复接系列	10
习题 1	12
第 2 章 光纤	14
2.1 光纤的基本概念	14
2.1.1 光纤基本结构	14
2.1.2 光纤分类	14
2.1.3 光纤制造简述	15
2.1.4 光缆结构及类型	16
2.1.5 光缆 (光纤) 型号命名方法	18
2.2 光纤传光原理	22
2.2.1 光的射线理论及光纤传光分析	22
2.2.2 光纤导波模式的粗糙解 (射线分析方法)	26
2.2.3 光纤导波模式的精确解 (电磁场分析方法)	30
2.3 光纤特性参数	38
2.3.1 数值孔径	38
2.3.2 衰减特性	40
2.3.3 截止波长	42
2.3.4 带宽与色散	44
2.3.5 模场直径	53
2.4 光纤连接方式	54
2.5 光纤在通信领域中的应用	56
2.5.1 通信中使用的光纤及光波段划分	56
2.5.2 光纤 (光缆) 应用概况	59
习题 2	61

<b>第3章 光发送设备</b> .....	64
3.1 光端机的基本概念 .....	64
3.1.1 光端机的功能 .....	64
3.1.2 光端机基本框图 .....	64
3.2 光发送电路 .....	66
3.2.1 基本组成和主要性能指标 .....	66
3.2.2 激光二极管 (LD) .....	67
3.2.3 发光二极管 (LED) .....	80
3.2.4 驱动电路 .....	82
3.2.5 自动功率控制 (APC) 电路 .....	85
3.2.6 自动温度控制 (ATC) 电路 .....	87
3.2.7 光源 (LD 和 LED) 与光纤的耦合 .....	88
3.3 输入电路 .....	90
3.3.1 基本概念 .....	90
3.3.2 光纤通信的码型 .....	91
3.3.3 HDB3 码输入电路 .....	102
3.3.4 CMI 码输入电路 .....	110
习题 3 .....	112
<b>第4章 光接收设备</b> .....	114
4.1 光接收电路 .....	114
4.1.1 基本构成和主要性能指标 .....	114
4.1.2 光检测器件 (PIN 和 APD) .....	115
4.1.3 前置放大器 .....	118
4.1.4 主放大器 .....	119
4.1.5 均衡器 .....	122
4.1.6 基线恢复 .....	126
4.1.7 幅度判决 .....	128
4.1.8 非线性处理 .....	131
4.1.9 时钟提取 .....	133
4.1.10 限幅移相 .....	134
4.1.11 定时判决 .....	136
4.2 输出电路 .....	137
4.2.1 基本概念 .....	137
4.2.2 码型反变换电路 .....	137
4.2.3 输出接口电路 .....	140
4.3 光模块 .....	143
4.3.1 基本概念 .....	143
4.3.2 光模块型号命名方法 .....	144
习题 4 .....	147

<b>第 5 章 波分复用光纤通信系统</b> .....	148
5.1 光纤通信系统新技术简述.....	148
5.2 波分复用 (WDM) 技术.....	150
5.2.1 基本概念.....	150
5.2.2 波分复用系统的组成.....	152
5.2.3 光纤耦合型波分复用器件.....	154
5.2.4 角度色散型波分复用器件.....	156
5.2.5 干涉型波分复用器件.....	157
5.2.6 波分复用系统对光纤的新要求.....	159
5.3 光中继器.....	162
5.3.1 光电转换型中继器.....	163
5.3.2 全光型中继器概述.....	164
5.3.3 掺铒光纤放大器 (EDFA).....	165
5.3.4 光纤拉曼放大器 (FRA).....	168
5.3.5 光纤布里渊放大器 (FBA).....	170
5.3.6 半导体光放大器 (SOA).....	171
习题 5.....	172
<b>第 6 章 光纤数字通信系统的传输规范</b> .....	174
6.1 光纤数字通信系统的两种主要传输制式.....	174
6.1.1 准同步数字系列 (PDH).....	174
6.1.2 同步数字系列 (SDH).....	176
6.1.3 SDH 承载 PDH 的方式.....	178
6.1.4 SDH 承载 PDH 之应用.....	190
6.1.5 SDH 复用及交换的主要设备.....	197
6.1.6 SDH 传送网.....	199
6.2 光纤数字通信系统的基本质量指标.....	200
6.2.1 评价误码性能的方法.....	200
6.2.2 数字话路通道的误码特性.....	201
6.2.3 基群及其以上速率通道的误码特性.....	204
6.2.4 抖动特性.....	208
6.2.5 可靠性.....	209
6.3 光纤数字通信系统的基本设计.....	212
6.3.1 系统设计的一般步骤.....	212
6.3.2 中继距离估算.....	213
6.3.3 误码率估算.....	216
6.4 光纤数字通信系统的测量.....	217
6.4.1 电性能的主要指标测量.....	217
6.4.2 光性能的主要指标测量.....	220
习题 6.....	222



<b>第7章 现代光纤网络</b> .....	224
7.1 光纤通信在现代信息网络中的重要地位.....	224
7.1.1 现代信息网络的基本特点.....	224
7.1.2 光纤通信在现代信息网络中的应用概况.....	225
7.2 光纤接入网.....	227
7.2.1 基本概念.....	227
7.2.2 FTTx 接入网.....	229
7.2.3 FTTH 的基本拓扑结构.....	231
7.2.4 FTTH 的实现技术: xPON 接入技术.....	232
7.2.5 各类 PON 接入技术的比较.....	243
7.3 光纤局域网.....	244
7.3.1 局域网 (LAN) 的基本概念.....	244
7.3.2 光纤总线形/星形局域网.....	246
7.3.3 光纤令牌环局域网.....	248
7.3.4 光纤 ATM 局域网.....	250
7.4 光纤城域网和广域网.....	252
7.4.1 光纤城域网 (MAN).....	252
7.4.2 基于 SDH 的多业务传送平台 (MSTP).....	253
7.4.3 光纤广域网 (WAN).....	254
7.5 三网融合.....	257
7.5.1 基本概念.....	257
7.5.2 电信运营商的 IPTV.....	258
7.5.3 互联网公司的 OTT TV.....	259
7.5.4 广电行业的 DTV.....	261
7.6 与光纤互联网相关的热门技术.....	263
7.6.1 移动通信技术.....	263
7.6.2 物联网 (IoT) 技术.....	269
7.6.3 云计算技术.....	274
习题 7.....	277
<b>第8章 未来的全光网络</b> .....	279
8.1 全光网络 (AON) 的基本概念.....	279
8.1.1 通信网发展过程.....	279
8.1.2 全光通信网的基本特点.....	279
8.1.3 全光通信网关键技术概述.....	280
8.2 光交叉连接器 (OXC).....	283
8.2.1 光交叉连接器的基本概念.....	283
8.2.2 光交换技术.....	285
8.2.3 波长变换技术.....	289
8.3 光分插复用器 (OADM).....	291
8.3.1 光分插复用器基本概念.....	291
8.3.2 分波/合波器+光开关组合.....	292

8.3.3	多层介质膜滤波器+光开关+光环行器组合	293
8.3.4	光纤光栅+光环行器+分波/合波器组合	293
8.4	光传送网 (OTN) 的基本形式	294
8.4.1	光传送网的分层体系结构	295
8.4.2	光层的基本拓扑结构	296
8.4.3	光传送网的应用——IP 光网	297
8.5	全光网络的进展	300
	习题 8	302
<b>附录 A 英汉对照名词索引</b>		<b>304</b>
<b>参考文献</b>		<b>313</b>

# 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。

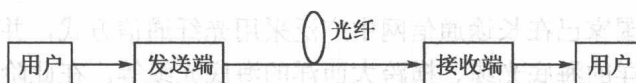


图 1-1 光纤通信的简单示意图

### 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。

大体来说，光纤通信的发展经历了以下四个阶段。

#### 1. 20 世纪 60 年代的研究探索阶段

1966 年英籍华人科学家高锟（Charles Kao）发表了名为“用于光频率的介质纤维表面波导”的论文，提出了用石英光纤做光波导进行光纤通信的新概念。该论文对石英光纤的损耗机理进行了理论分析，指出消除石英玻璃中的杂质才能做出低损耗光纤，并通过实验预言了只有当光纤中的光损耗小于  $20 \text{ dB/km}$  时，光纤在通信中的实际使用才有可能开始。该论文实验中的石英玻璃的光损耗为  $1000 \text{ dB/km}$ ，这是当时石英玻璃的损耗水平。该论文是打开现代光纤通信技术大门的钥匙，具有重要的指向性意义。鉴于高锟理论对于光纤通信的里程碑意义，2009 年高锟获得了诺贝尔物理学奖。

#### 2. 20 世纪 70 年代的技术起步阶段

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)公司依据高锟理论率先制成 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  $\mu\text{m}$  波长窗口)和 0.2 dB/km (1.55  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  波长、速率为几十 Mb/s 的多模光纤通信系统的现场试验。

## 3. 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  $\mu\text{m}$ ,传输速率达到几百 Mb/s。1985年,康宁制成 0.35 dB/km (1.31  $\mu\text{m}$  波长窗口)和 0.19 dB/km (1.55  $\mu\text{m}$  波长窗口)的低损耗常规单模光纤。

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。

## 4. 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。

## 5. 21世纪进入扩展应用阶段

进入 21 世纪后,光纤的宽带宽、低衰减等诸多优势使得光纤通信技术在全球范围内取得

了飞速的发展，也带动了移动通信、物联网、大数据、云计算、互联网+、三网融合的发展。据报道，2014~2019 年全球 IP 流量年均增长约 23%，其中视频占全网流量的比例从 2015 年的 37.4% 将增长到 2019 年的 52%。

数据流量的快速激增促使光传输网络不断升级，从几年前的 40 Gb/s 到目前正在使用的 100 Gb/s，再到面向未来的 400 Gb/s、1 Tb/s 等更高速率。光传输网络性能的持续提升促使业界突破现有光纤的性能瓶颈，研发适用于超 100 Gb/s 时代的新型光纤技术。

2009 年，康宁推出 SMF-28ULL 型超低损耗光纤，其衰减值达到 0.16 dB/km (1.55  $\mu\text{m}$  波长窗口)；2015 年康宁推出 Vascade Ex3000 型超低损耗-大有效面积光纤，其衰减低至 0.1460 dB/km (有效面积 150  $\mu\text{m}^2$ ，接近常规单模光纤的 2 倍)。

与全球发展同步，我国“宽带中国”在提速，三大运营商都加大了宽带建设的力度。2016 年 1~6 月全国新建光缆线路 275.4 万千米，总长达到 2762.7 万千米，同比增长 22.9%。

近年来，在我国大规模通信建设需求的带动下，我国的光纤光缆产业发展迅速，已经形成了从光纤预制棒—光纤—光缆—光网络产品完整的产业链。中国已成为全球最主要的光纤光缆市场和全球最大的光纤光缆制造国。光纤光缆行业的发展壮大夯实了我国通信领域的基础，成为我国 FTTH (光纤到户)、FTTB (光纤到大楼) 系统的采用、三网融合以及大规模 4G 建设、5G 探索的重要支撑。

从企业发展来看，中国光纤光缆企业经过 30 年的发展壮大，已有多家中国光纤光缆企业产能跻身全球前十。行业内优秀企业正处于海外扩张的关键时期，不仅大力拓展海外销售，而且积极进行海外投资建厂，东南亚、非洲、拉美是中国企业的重点目标。

### 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宽，研究指出单模光纤可利用的带宽已达到 30 THz (1 THz =  $10^{12}$  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

光纤传输损耗已低于 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 ( $\text{SiO}_2$ ) 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℃ 以上。光纤接头处不产生放电，没有电火花。

#### 5. 重量轻、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重量为电缆重量的 1/30~1/10（注：根据国际和我国有关标准规定，基本物理量中没有重量、只有质量，在工商经贸和日常生活中重量只是质量的习惯用语）。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成为光信号，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成为电信号，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（即模拟调制）。

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（即数字调制）。

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 $\mu\text{m}$ )多模光纤通信系统

传输速率低于 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 $\mu\text{m}$ 多模光纤通信系统

传输速率为 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，通信容量为 480 路。

#### ② 1.31 $\mu\text{m}$ 单模光纤通信系统

传输速率可达 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，通信容量为 1920 路。

#### ③ 1.55 $\mu\text{m}$ 单模光纤通信系统

传输速率可达 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 0.39~0.76  $\mu\text{m}$ ；紫外光的波长范围为 0.006~0.39  $\mu\text{m}$ ，比可见光的波长要短；红外光的波长范围为 0.76~300  $\mu\text{m}$ ，比可见光的波长要长；红外光又分为近红外光 (0.76~2.5  $\mu\text{m}$ )、中红外光 (2.5~25  $\mu\text{m}$ ) 和远红外光 (25~300  $\mu\text{m}$ )。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，所以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，对进一步提高传输速率有影响。目前实用的光纤通信系统均采用这类调制方式，其最高传输速率已超过 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，适合很高传输速率的通信，目前采用外调制的实验系统其传输速率可超过 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振性要求都很高,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  $\geq 565$  Mb/s。

##### (4) 超高速光纤通信系统

传输速率  $\geq 100$  Gb/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,其单波长传输速率可达 2.5 Gb/s, 10 Gb/s, 40 Gb/s 和 100 Gb/s 等。有关 PDH 和 SDH 的具体介绍见 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; 码型变换用来将合路输出的单极性二进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进码序列; 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进码序列, 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。

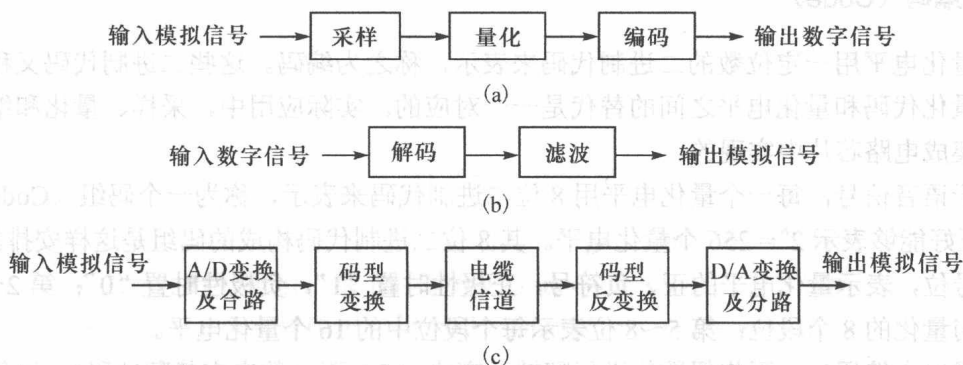


图 1-3 语音信号的 PCM 数字化框图

下面简要说明采样、量化和编码的基本特点。

## 1. 采样 (Sample)

一个连续信号可以用间隔时间为  $\Delta t$  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;  $\Delta t$  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  $3400 \text{ Hz} \times 2 = 6800 \text{ Hz}$  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为  $\Delta t = 1/f_s = 125 \mu\text{s}$ 。

## 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