



高等院校
通信与信息专业规划教材

光纤通信系统

李履信 沈建华 编著

29.11
5

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书是根据高等院校通信与信息专业教学需要而编写的,对光纤通信系统的基本组成、光纤的传输理论和传输特性、光路无源器件、光端机的组成和原理、同步数字体系(SDH)、光纤通信系统性能指标、光纤通信的新技术(光纤放大器、光波分复用、时分复用技术、光纤色散补偿技术、相干光通信、光孤子通信、光交换技术等以及光纤接入网、单波长SDH传送网、多波长WDM光网络等光纤通信网络)等内容作了全面的介绍。全书强调基本概念和基本分析方法,便于教学和自学。

本书可作为通信专业本科的教学用书,也可作为从事光纤通信工作的科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统/李履信,沈建华编著. —北京:机械工业出版社, 2003.7

高等院校通信与信息专业规划教材

ISBN 7-111-12293-3

I.光... II.①李...②沈... III.光导纤维通信系统—高等学院—教材 IV.TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第041882号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:周艳娟 版式设计:霍永明

责任校对:韩晶 责任印制:付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003年7月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·17.5印张·434千字

0001—5000册

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面防伪标均为盗版

高等院校通信与信息专业规划教材

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

编委会主任	乐光新			
编委会副主任	张文军	张思东	杨海平	徐澄圻
编委会委员	王金龙	冯正和	刘增基	李少洪
	邹家禄	吴镇扬	赵尔沅	南利平
	徐惠民	彭启琮	解月珍	
秘书长	胡毓坚			
副秘书长	许晔峰			

出版说明

为了培养 21 世纪国家和社会急需的通信与信息领域的高级科技人才，为了配合高等院校通信与信息专业的教学改革和教材建设，机械工业出版社会同全国在通信与信息领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校，组成阵容强大的编委会，组织长期从事教学的骨干教师编写了这套面向普通高等院校的通信与信息专业系列教材，并且将陆续出版。

这套教材将力求做到：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，不仅体现相关领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套教材的选题是开放式的。随着现代通信与信息技术日新月异地发展，我们将不断更新和补充选题，使这套教材及时反映通信与信息领域的新发展和新技术。我们也欢迎在教学第一线有丰富教学经验的教师及通信与信息领域的科技人员积极参与这项工作。

由于通信与信息技术发展迅速，而且涉及领域非常宽，这套教材的选题和编审中难免有缺点和不足之处，诚恳希望各位老师和同学提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

机械工业出版社
高等院校通信与信息专业规划教材编委会

前 言

20 世纪 90 年代以来光纤通信得到了迅速的发展, 新技术不断涌现并开始进入全光传输、全光通信的阶段。

本教材在系统介绍光纤通信系统的基本原理、基本概念的基础上, 尽可能多地介绍了一些光纤通信的新技术和新发展。

本书在 1~5 章中对光纤的传输理论, 光端机的光源和光发送机、光检测和光接收机, 光路无源器件等光纤通信的基本原理和基本概念作了系统、深入的讲述; 第 6 章介绍了同步数字体系(SDH); 第 7 章讲述了光波分复用技术; 第 8 章介绍了光纤通信系统的性能要求; 第 9 章讲述了光纤通信网络, 包括单波长的 SDH 传送网、多波长的 WDM 光网络、光纤接入网; 第 10 章介绍了近年来发展起来的光纤通信新技术: 光纤放大器技术、相干光通信、光孤子通信、光纤色散补偿技术、光交换技术等。

本书的第 1~5、7、8 章及第 9 章的部分内容和第 10 章的部分内容由李履信编写。第 6 章及第 9 章的部分内容和第 10 章的部分内容由沈建华编写。

本书的编写大纲承蒙西安电子科技大学刘增基教授审阅, 在此表示诚挚的感谢。

在本书的编写过程中得到了南京邮电学院徐澄圻教授的指教, 研究生周聪和毛涵月为本书的打印和校对书稿做了许多工作, 在此一并表示感谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在缺点和错误, 恳请广大读者批评指正。

作 者

目 录

出版说明	2.6.3 光纤的带宽和冲激响应	47
前言	2.6.4 单模光纤性能指标	49
第1章 概述	2.7 习题	51
1.1 光纤通信的发展概况	第3章 光源和光发送机	53
1.2 光纤通信的优点和应用	3.1 半导体激光器和发光二极管	53
1.2.1 光纤通信的优点	3.1.1 半导体激光器	53
1.2.2 光纤通信的应用	3.1.2 半导体发光二极管	67
1.3 光纤传输系统的基本组成	3.2 光源调制	69
1.3.1 光纤通信系统原理框图	3.2.1 光源的调制方式	69
1.3.2 光纤通信系统的构成	3.2.2 光源的直接调制原理	69
1.4 习题	3.3 光发送机	70
第2章 光纤传输理论及传输特性	3.3.1 光端机框图	70
2.1 光纤、光缆的结构和类型	3.3.2 光发送机	72
2.1.1 光纤结构	3.4 习题	85
2.1.2 光纤型号	第4章 光检测器和光接收机	87
2.1.3 光缆结构	4.1 半导体光检测器件	87
2.2 基本波导方程	4.1.1 光电二极管的工作原理	87
2.2.1 麦克斯韦方程组和波动方程	4.1.2 PIN 光电二极管	88
2.2.2 亥姆霍兹(Helmholtz)方程 和波参数	4.1.3 雪崩光电二极管(APD)	92
2.2.3 基本波导方程	4.2 光接收机	95
2.2.4 柱面坐标中的波动方程	4.2.1 光接收电路	96
2.3 阶跃折射率光纤模式分析	4.2.2 输出电路	100
2.3.1 矢量分析法	4.2.3 其他电路	100
2.3.2 弱导光纤和线性极化模	4.3 光接收机噪声分析	102
2.4 单模传输	4.3.1 光接收机的主要噪声	102
2.4.1 截止波长	4.3.2 光检测器的噪声分析	103
2.4.2 模场直径	4.3.3 光检测器-放大器信噪比	105
2.5 射线光学理论	4.3.4 接收机噪声	108
2.5.1 射线方程	4.4 光接收机的误码率	109
2.5.2 光纤的传光原理	4.5 接收机灵敏度	111
2.6 光纤传输特性	4.5.1 定义和表示方法	111
2.6.1 损耗特性	4.5.2 灵敏度计算	111
2.6.2 色散特性	4.5.3 影响灵敏度的因素	113
	4.6 光中继机	114

4.7 习题	115	第 7 章 光波分复用系统	165
第 5 章 光路无源器件	117	7.1 光波分复用的基本概念	165
5.1 光纤连接器	117	7.1.1 光波分复用的基本概念	165
5.1.1 光纤连接损耗及影响因素	117	7.1.2 WDM 系统的基本形式	166
5.1.2 光纤连接器的结构	119	7.2 WDM 系统的基本结构与工作原理	167
5.2 光纤耦合器	121	7.2.1 WDM 系统的基本结构	167
5.2.1 光纤耦合器的类型	121	7.2.2 WDM 系统的分类方法	168
5.2.2 光纤耦合器的结构和基本原理	122	7.2.3 光波长区的分配	170
5.2.3 光纤耦合器的主要特性	123	7.3 光波分复用系统的关键技术	171
5.2.4 其他类型耦合器	123	7.3.1 WDM 系统的几个技术问题	171
5.3 光衰减器	124	7.3.2 光源技术	173
5.4 光隔离器与光环行器	125	7.3.3 波长可调谐滤光器技术	174
5.5 光调制器和光开关	126	7.3.4 光波分复用/解复用器与光滤波器技术	175
5.5.1 光调制器	126	7.3.5 光转发器(OTU)技术	177
5.5.2 光开关	128	7.3.6 光纤传输技术	179
5.6 习题	128	7.3.7 WDM 系统的监控技术	180
第 6 章 同步数字体系(SDH)	129	7.4 WDM 系统的特点	181
6.1 SDH 基本概念	129	7.5 光时分复用	182
6.1.1 SDH 的产生	129	7.6 习题	182
6.1.2 SDH 的基本概念和特点	130	第 8 章 数字光纤通信系统性能	184
6.2 SDH 的速率等级和帧结构	132	8.1 数字传输模型	184
6.2.1 网络节点接口	132	8.1.1 假设参考连接(HRX)	184
6.2.2 同步数字体系的速率	132	8.1.2 假设参考数字链路(HRDL)	185
6.2.3 帧结构	132	8.1.3 假设参考数字段(HRDS)	185
6.3 SDH 复用和映射过程	133	8.1.4 光缆数字通信系统框图	186
6.3.1 基本复用映射原理和复用单元	133	8.2 误码特性	186
6.3.2 我国采用的复用结构	135	8.2.1 误码和误码率的概念	186
6.4 SDH 网元设备	145	8.2.2 误码发生形态和原因	187
6.4.1 SDH 设备的一般描述	145	8.2.3 误码特性的评定方法	187
6.4.2 SDH 复用设备	146	8.2.4 误码性能的规范	188
6.5 SDH 同步与定时	154	8.3 抖动特性	191
6.5.1 SDH 网同步基本原理	154	8.3.1 抖动的概念	191
6.5.2 SDH 时钟的定时要求	155	8.3.2 抖动的来源	191
6.5.3 SDH 网同步	156	8.3.3 抖动性能的规范	192
6.6 SDH 网络管理	158	8.4 漂移特性	195
6.6.1 SDH 网络管理功能	158	8.4.1 漂移的概念	195
6.6.2 管理协议及标准接口	163	8.4.2 漂移的产生	195
6.7 习题	164	8.4.3 漂移性能的规范	195

8.5 延时特性	196	9.4.4 波长通道和波长变换	244
8.5.1 延时的概念	196	9.4.5 WDM 组网中的若干问题	245
8.5.2 延时的产生	197	9.5 习题	246
8.5.3 延时性能的规范	198	第 10 章 光纤通信新技术	247
8.6 光纤通信系统的可用性	199	10.1 光纤放大器	247
8.6.1 可靠性和可用性表示方法	199	10.1.1 EDFA 的工作原理	247
8.6.2 光纤通信系统可用性计算	199	10.1.2 EDFA 特性	248
8.6.3 光纤通信系统可用性指标要求	201	10.1.3 EDFA 基本结构	249
8.7 光缆线路系统设计	201	10.1.4 EDFA 的应用	250
8.7.1 衰减限制系统最大中继距离的 计算	201	10.2 色散补偿技术	253
8.7.2 色散限制系统最大中继距离的 计算	202	10.2.1 色散补偿光纤	253
8.8 习题	203	10.2.2 预啁啾技术	255
第 9 章 光纤通信网	205	10.2.3 色散均衡器	255
9.1 SDH 传送网	205	10.2.4 光相位共轭色散补偿	256
9.1.1 基本概念	205	10.2.5 色散支持传输	258
9.1.2 传送网的分层与分割	207	10.2.6 光纤自相位调制色散补偿及光 孤子传输	259
9.1.3 SDH 传送网网络拓扑结构	210	10.3 相干光通信	259
9.2 SDH 网络保护和恢复	213	10.3.1 相干检测原理	259
9.2.1 SDH 光纤传送网络故障及自愈	213	10.3.2 调制与解调	261
9.2.2 自动保护倒换 (APS)	214	10.3.3 误码率和接收机灵敏度	263
9.2.3 自愈环	215	10.3.4 相干光纤通信系统的优点和关 键技术	265
9.2.4 分布式故障恢复	219	10.4 光交换技术	265
9.3 接入网	221	10.4.1 空分光交换	266
9.3.1 接入网的概念	221	10.4.2 时分光交换	266
9.3.2 接入网的主要接口与业务支持	225	10.4.3 波分光交换	266
9.3.3 接入网的分类	227	10.5 光孤子通信	268
9.3.4 光纤接入网的结构和基本功能	227	10.5.1 光孤子通信系统的基本组成	268
9.3.5 光纤接入网的分类和实现	234	10.5.2 光纤损耗与光孤子能量补偿 放大	268
9.3.6 光纤同轴混合网 HFC	239	10.5.3 影响光纤孤子通信系统容量的 因素	269
9.4 WDM 光网络	241	10.6 习题	270
9.4.1 WDM 光传送网结构分层	241	参考文献	271
9.4.2 光分插复用器	242		
9.4.3 光交叉连接器	243		

第1章 概述

1.1 光纤通信的发展概况

从广义的角度来说，通信就是彼此之间传递信息。所谓光通信就是发出包含了某种信息的光，将这种光通过媒质——光纤传到对方，然后从这种光中取出所包含的信息，这就是光纤通信。

古代，我们的祖先就已经利用光来传递信息，如建造烽火台，用烟和火花来报警，用旗语来传送信息等。这些都可以看做是原始形式的光通信。

当然，上述这种传递信息的方法极为简单，信息的内容也极为有限。严格来说，上述种种都不能称之为真正的光通信。直到1880年，第一个真正的光学电话才由电话的发明者贝尔研究成功。这是利用弧光作光源，弧光灯发出恒定的光束，投射在送话器的薄膜上，薄膜随声音振动而振动。反射光束的强弱变化，就反映出声音的振动规律。在接收端用一个大型的抛物面反射镜，把发送端送来的随着声音变化的光线反射到硅光电池上，转变成光电流，送给受话器，就完成了发送和接收的过程。但自此之后的几十年内，光通信的进展不大。究其原因，首先是所用的光源是热辐射源，发出的光都是非相干光，调制困难；其次，作为接收机的硅光电池内部噪声很大；另外，没有一个适当的光传输媒质，光在大气中传输损耗很大。

现在我们所说的光通信是利用谱线很窄、方向性极好、频率和相位都一致的相干光——激光作为光源的通信方式。20世纪60年代初，相继发明了红宝石激光器、氦氖激光器、二氧化碳激光器，并利用这些激光器为光源进行了激光大气传输的试验。但因这些固体激光器或气体激光器的体积大、功耗大、不适宜做通信设备中的光源；同时以大气作为传输媒质受气候影响极大。因此，当时光通信的出路是在寻找合适的光源及理想的传光媒质。

1966年，英国标准电信实验室的英籍华人高锟首先提出用玻璃纤维作为光纤通信的媒质。到1970年美国康宁公司用超纯石英为材料，首先拉制出损耗为20dB/km的光纤，这是向使用光纤作为传输媒质迈出的最重要的一步。

就在光纤有了重大突破的同一年，美国贝尔实验室研制成功可在室温下连续振荡的半导体激光器(GaAlAs)，为光纤通信找到了合适的光源。1977年，GaAlAs激光器的寿命可达100万小时，这为光纤通信的商用化奠定了基础。

1973年，贝尔实验室发明用MCVD(改进的化学气相沉积法)制造光纤，使光纤的衰减下降到1dB/km。1974年，日本解决了光缆的现场敷设及接续问题。1975年出现光纤活动连接器。1976年，日本把光纤的衰减降到0.5dB/km，这一年美国首先成功地进行了44.736Mbit/s传输10km的光纤通信系统现场试验，使光纤通信向实用化迈出了第一步。1979年美国和日本均研制出1550nm激光器，日本做出超低损耗光纤(0.2dB/km, 1550nm)，同时进行多模光纤1310nm波长系统的现场试验。到了1980年，多模光纤通信系统已投入商用，单模光纤通信系统也进行了现场试验。在以后的几年内，日本、英国、美国都兴建了单

模光缆长途干线。随着光纤通信技术的日益成熟，光缆线路从陆地敷向海底。美、日、英等国联合建立的太平洋光缆、横跨大西洋的海底光缆都相继开通。

从世界各国光通信技术发展的情况来看，光纤通信的发展大致经过了以下几个阶段：

第一代光纤通信系统 20 世纪 70 年代后期投入使用，工作波长为 $\lambda = 850\text{nm}$ 波长段的多模光纤系统。光纤的衰减为 $2.5 \sim 4.0\text{dB/km}$ ，系统的传输比特率在 $20 \sim 100\text{Mbit/s}$ 之间，实用的系统容量为 PCM 三次群，最高传输速率为 34Mbit/s ，中继距离为 $8 \sim 10\text{km}$ 。接着在 20 世纪 80 年代初，工作波长为 $\lambda = 1310\text{nm}$ 的多模光纤系统投入使用，光纤衰减为 $0.55 \sim 1.0\text{dB/km}$ ，传输速率达 140Mbit/s ，中继距离为 $20 \sim 30\text{km}$ 。

第二代光纤通信系统 20 世纪 80 年代中期投入使用，工作波长为 $\lambda = 1310\text{nm}$ 波长段的单模光纤通信系统。光纤衰减为 $0.3 \sim 0.5\text{dB/km}$ ，可传送准同步数字体系 (PDH) 的各次群信号，最高传输速率可达 1.7Gbit/s ，中继距离约为 50km 。

第三代光纤通信系统 20 世纪 80 年代后期投入使用，工作波长为 $\lambda = 1550\text{nm}$ 波长段的单模光纤系统。光纤衰减为 0.2dB/km ，应用在同步数字体系 (SDH) 光纤传输网，传输速率达 2.5Gbit/s ，中继距离可超过 100km 。

第四代光纤通信系统是采用光放大器来增加中继距离和采用波分复用和频分复用技术来提高传输速率为特征。已完成的有单信道速率为 25Gbit/s ，不采用再生器，光纤损耗用光纤放大器补偿，传输距离达 2223km 的试验。20 世纪 90 年代初光纤放大器的研制成功并投入使用，已经引起了光纤通信的重大变革。

第五代光纤通信系统是基于利用光纤的非线性压缩，抵消由于光纤色散产生的脉冲展宽的新概念产生的光孤子，来实现光脉冲信号的保形传输。20 世纪 90 年代后，各国的试验都取得了重大的进展。例如在日本，已试验分别将 10Gbit/s 和 20Gbit/s 的数据传输了 2500km 和 1000km 。

纵观现代光纤通信技术发展的趋势和特点，光纤通信将会在网络技术、单模光纤的传输技术、复用技术、器件集成化、全光通信等方面获得进一步发展。

主要以点到点传输的 PDH 系统，已经不适应于现代电信网的发展。因此，光纤通信向联网化发展已成必然趋势。SDH 网络是一个将复接、线路传输及交换功能融为一体并由网管系统进行自动化管理的综合信息网，它使光纤通信从点到点传输的概念进入到智能化应用的阶段。

光纤接入网作为电信网的一部分，通过先进的光纤传输，为用户提供各种业务。通过光纤到家、光纤到路边、光纤到大楼等手段，将光纤引入千家万户。保证用户的多媒体信息畅通进入信息高速公路。

采用单模光纤可获得长距离、宽频带的传输。目前，光纤的衰减已不是增加系统容量、延长中继距离的主要制约因素。光纤损耗所限制的最大中继距离，可通过采用光纤放大器得以继续延伸。在大容量、高速率的信号传输时，色散的影响更为严重。为解决这个问题，提出了许多色散补偿的办法。如采用色散补偿光纤、光均衡器、相位共轭器等技术。采用色散补偿光纤的方法，已在试验系统中使用。

采用复用技术是完成大容量和高速化的主要手段。光波分复用技术、频分复用技术、时分复用技术日趋成熟。光波分复用技术已得到了应用。用色散位移光纤 (G.653 光纤) 虽能解决 1550nm 波长色散对单信道高速率系统的限制，但用于波分复用系统又出现了“四波混频”效应。为了解决此问题，又研制了非零色散位移光纤 (G.655 光纤)，它具有色散系数小和非

线性效应低的优点，可用于波分复用技术。

先进的光器件是构成先进的光纤通信系统的基础。光纤通信所用的激光器、光放大器等有源器件，光连接器、光耦合器等无源器件的技术正日益发展并获得应用。目前，光纤通信中应用的器件正向高速率、高性能、多用途、组件化及单片集成化方向发展。

全光通信技术先进，性能卓越。传统的光/电/光中继器将会由光放大器对光直接放大所代替；光孤子传输将光纤的非线性效应与色散效应有机结合，可实现长距离传输而无脉冲展宽；光交换技术的出现将实现光信号的直接交换。

1.2 光纤通信的优点和应用

1.2.1 光纤通信的优点

由于光纤通信是利用光导纤维传输光信号来实现通信的，因此比起其他通信方式有其明显的优越性。光纤具有传输容量大、传输损耗小、重量轻、不怕电磁干扰等一系列优点。

1. 传输容量大

光是频率极高的电磁波，以它来作为信号的载体可传输极宽的信号频谱。在光纤中传输的激光在可见光范围内，属于近红外线范围，波长在 $0.75 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ，频率约为 $3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。若以其 $1/10$ 作为传输频带，则可传约 10^{10} 路电话。因此光纤在单位面积上有极大的信号传输能力，即单位面积上的信息密度极高，传输容量极大。

光纤通信系统的传输容量取决于光纤特性、光源特性和调制特性。目前，光纤通信系统中使用的是 SiO_2 材料的光纤。根据 SiO_2 光纤的损耗-波长特性曲线，单模光纤有着极宽的频带宽度。适用的 $\lambda = 1310 \text{ nm}$ 波长段和 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 波长段两个低损耗区共有约 200 nm 宽的低损耗区，理论上可提供相当于 30000 GHz 的频段宽度。

光纤的色散特性是决定光纤通信系统带宽的因素之一。通过设计，石英单模光纤在 $\lambda = 1310 \text{ nm}$ 或 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处具有零色散特性，因此单模光纤都具有几十 $\text{GHz} \cdot \text{km}$ 的带宽。

在一根光缆中可以容纳几百根乃至几千根光纤的带状光缆早已实现，使线路传输容量成百倍、千倍地增加。就单根光纤而言，采用波分复用技术或频分复用技术，减小光源的谱线宽度，采用外调制方式等都是增加光纤通信系统传输容量的有效办法。

2. 传输损耗小，中继距离长

目前单模光纤在 1310 nm 波长窗口损耗为 0.35 dB/km ， 1550 nm 窗口损耗为 0.2 dB/km 。而且在相当宽的频带内各频率的损耗几乎一样，因此用光纤比用同轴电缆或波导管的中继距离长得多。波长为 1550 nm 的色散位移单模光纤通信系统，若传输速率为 2.5 Gbit/s ，则中继距离可达 150 km ；若传输速率为 10 Gbit/s ，则中继距离可达 100 km ；若采用光纤放大器、色散补偿光纤，中继距离还可增加。

3. 泄漏小，保密性好

光在光纤中传输时，向外泄漏的光能很微弱，难以被窃听。因此比无线、有线通信的保密性较好，信息在光纤中传输非常安全。

4. 节省大量有色金属

制造通常的电缆需要消耗大量的铜和铅等有色金属。以四管中同轴电缆为例， 1 km 四管

中同轴电缆约需 460kg 铜，而制造 1km 光纤，只需几十克石英。而且制造光纤的石英(SiO_2)丰富而便宜，取之不竭。

5. 抗电磁干扰性能好

光纤由 SiO_2 材料制成，它不受各种电磁场的干扰。强电、雷击等也不会影响光纤的传输性能。甚至在核辐射的环境中，光纤通信仍能正常进行，这是通常的电缆通信所不能比拟的。因此，光纤通信在电力输配、电气化铁路、雷击多发地区、核试验等环境中应用更能体现其优越性。

6. 重量轻，可挠性好，敷设方便

在传输同一信息量时，光缆的重量比其他通信电缆重量要轻得多。每根光纤的直径很小，制成光缆后可充分利用地下管道。有二次套塑的光纤，即使以几厘米的曲率半径弯曲也不会断，施工时可以采用与电缆相同的敷设技术进行敷设。

通信设备的重量轻和体积小，对军事、航空和宇宙飞船等方面的应用具有特别重要的意义。

总之，光纤通信不仅在技术上具有很大的优越性，而且在经济上亦具有巨大的竞争能力，因此在通信领域中将发挥越来越重要的作用。

1.2.2 光纤通信的应用

1. 光纤通信系统的类型

(1) 按传输信号的类型分类

- 1) 光纤模拟通信系统。这是用模拟信号直接对光源进行强度调制的系统。
- 2) 光纤数字通信系统。这是用来传输 PCM 数字信号的系统。

(2) 按调制方式分类

1) 直接强度调制光纤通信系统。它用电信号直接对光源进行强度调制，在接收端用光检测器直接检测。

2) 外差光纤通信系统。在发送端电信号对光源发出的光载波进行调制(通常使用外调制)后，经单模光纤传输到接收端，与接收机的本振振荡光波混频，经光检测器检测后获得信号光与本振光之差的中频信号，然后再解调出电信号。

(3) 按光纤的传输特性分类

- 1) 多模光纤通信系统。
- 2) 单模光纤通信系统。

(4) 按光波长分类

1) 短波长光纤通信系统。工作波长为 850nm 的石英多模光纤系统，这类系统的中继距离较短。

2) 长波长光纤通信系统。工作波长为 1310nm 和 1550nm。采用 1310nm 波长可以用多模光纤也可用单模光纤。采用 1550nm 波长只能用单模光纤。这类系统的中继距离较长。

3) 超长波长光纤通信系统。采用卤化物光纤，工作波长大于 2000nm 时，衰减值可为 $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{dB/km}$ ，因此可能实现 1000km 的无中继传输。

2. 光纤通信的应用

光纤可以传输数字信号，也可传输模拟信号。光纤在通信网、广播电视与计算机网，以及其他数据传输系统中都得到了广泛的应用。光纤通信的应用概括如下：

1) 通信网。主要用于遍及全球的电信网中作语音、数据通信。包括全球通信网(国家和国家间的光缆干线)、各国的公共电信网(如我国的国家一级干线、省级干线及县以下的支线和市话中继通信系统)、专用网(如电力、铁道、国防通信等的光缆系统)、特殊的通信网络(如石油、化工、煤矿等易燃易爆环境下使用的光缆通信系统)。

2) 计算机局域网和广域网。如光纤以太网、路由器之间的高速传输链路等。

3) 有线电视网。如有线电视的干线和分配网、工业电视系统的监控、自动控制系统的数据传输等。

4) 综合业务的光纤接入网。可实现电话、数据、视频及多媒体业务的接入核心网。

1.3 光纤传输系统的基本组成

1.3.1 光纤通信系统原理框图

光纤通信系统可以传送数字信号也可传送模拟信号。传送的信息有语音、图像、数据和多媒体业务。

目前实用的光纤通信系统，采用的是数字编码、强度调制、直接检测的通信系统，这种系统的原理框图如图 1-1 所示。

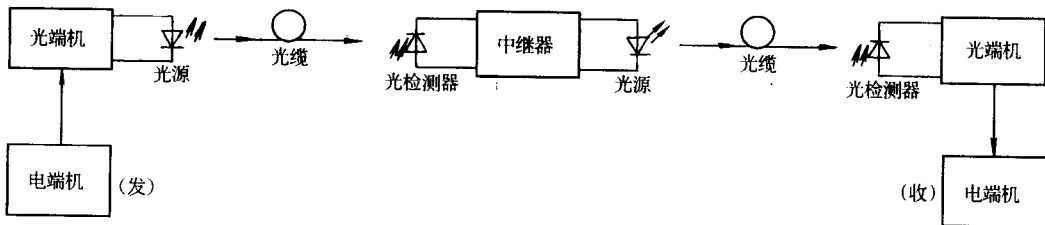


图 1-1 光纤通信系统原理框图(单向传输)

图中所示的是一个方向的传输，反方向传输的结构是相同的。图中电端机即为 PCM 复用设备(准同步复用或同步复用)。其作用是对来自信源的信号进行处理，例如模/数变换，多路复用等。光端机的发送端是将电信号变换成光信号的光发送机，内有光源，通常采用的是半导体激光器(LD)。光发送端机把电信号变为光信号并把已调制的光波送入光纤传送。为保证长距离传输，中间有光中继机，将经光纤长距离传送后受到较大衰减和色散畸变的光脉冲信号转换成电信号，进行放大、整形、再生，再变成一定强度的光信号继续传输。光端机的接收端是将光信号变换成电信号的光接收机。光信号经过光检测器(光电二极管 PIN 或雪崩光电二极管 APD)，检波为电脉冲信号，经放大、均衡、判决恢复为原来送入发送端时的电信号，再送至接收端电端机。

1.3.2 光纤通信系统的构成

从图 1-1 可以看到，光纤通信系统由电端机、光发送机、光纤线路、光接收机、光中继机组成。

1. 光发送机

光发送机的作用是把输入的电信号转换成光信号并将光信号最大限度地注入光纤线路。

光发送机由光源、驱动器和调制器组成，发送机的核心是光源。对光源的要求是输出功率足够大，调制速率高，光谱线宽度和光束发散角小，输出光功率和光波长要稳定，器件寿命长。目前最广泛使用的光源有半导体激光器(或称激光二极管,LD)和半导体发光二极管(LED)。普通的激光器谱线宽度较宽，是多纵模激光器，在高速率调制下，激光器输出频谱较宽，从而限制了传输的码速和中继距离。一种谱线宽度很窄的单纵模分布反馈(DFB)激光器已经逐渐被广泛应用。

光发送机把电信号转换成光信号的过程是通过电信号对光源进行调制而实现的。光调制有直接调制和间接调制(也称外调制)两种。直接调制是利用电信号注入半导体激光器或发光二极管从而获得相应的光信号。其输出功率的大小随信号电流的大小而变，这种方式较简单，容易实现，但调制速率受激光器特性所限制。外调制是把激光的产生和调制分开，是在激光形成后再加载调制信号，是用独立的调制器对激光器输出的激光进行调制。外调制方法在相干光通信中得到应用。

2. 光纤线路

光纤线路是光信号的传输介质。把来自发送机的光信号以尽可能小的衰减和脉冲展宽传送到接收机。对光纤的要求是光纤的基本传输参数衰减和色散要尽可能小。光纤要有一定的机械特性和环境特性。工程中使用的是由许多根光纤绞合在一起组成的光缆。整个光纤线路由光纤、光纤接头、光纤连接器组成。

目前使用的光纤均为石英光纤。石英光纤的损耗-波长特性中有三个低损耗的波长区，即波长为850nm、1310nm、1550nm三个低损耗区。为此光纤通信系统的工作波长只能选择在这850nm、1310nm、1550nm三个波长窗口。激光器的发射波长、光检测器的响应波长都与其一致。在这三个低损耗窗口的损耗分别小于2dB/km、0.4dB/km和0.2dB/km。石英光纤在 $\lambda = 1310\text{nm}$ 附近有一个零色散区，其色散值可以做到最小，约为 $3\text{ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$ ，其带宽可达几十 $\text{GHz}\cdot\text{km}$ 。通过光纤的设计，可以使零色散波长移到1550nm处，做成可以在 $\lambda = 1550\text{nm}$ 处实现损耗和色散都最小的色散位移光纤。为适合光纤通信系统中的波分复用技术的应用，又制成了非零色散位移光纤。

目前使用的石英光纤有多模光纤和单模光纤。单模光纤的传输性能比多模光纤好，在大容量、长距离的光纤传输系统中都采用单模光纤。

为适合于不同要求的光纤通信系统，使用的光纤类型有G.651光纤(多模光纤)、G.652光纤(常规单模光纤)、G.653光纤(色散位移光纤)、G.654光纤(低损耗光纤)和G.655光纤(非零色散位移光纤)等。

3. 光接收机

光接收机的功能是把由发送机发送的，经光纤线路传输后输出的已产生畸变和衰减的微弱光信号转换为电信号，并经放大、再生恢复为原来的电信号。

光接收机由光检测器、放大器和相关电路组成。对光检测器的要求是响应度高、噪声低、响应速度快。目前广泛使用的光检测器有光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)。

光接收机把光信号转换为电信号的过程是通过光检测器实现的。光检测器检测的方式有直接检测和外差检测两种。直接检测是由光检测器直接把光信号转换为电信号。外差检测是在接收机中设置一个本地振荡器和一个混频器，使本地振荡光和光纤输出的光进行混频产生差拍而输出中频信号，再经光检测器把中频信号转换成电信号。在这种外差检测方式中，对

本地激光器的要求很高，要求光源是频率非常稳定，谱线宽度很窄，相位和偏振方向可控制的单模激光器。其优点是接收灵敏度很高。目前实用的光纤通信系统中普遍采用直接调制-直接检测方式。外差检测用在相干光纤通信，虽然外调制-外差检测的方式技术复杂，但有着传输速率高，接收灵敏度高等优点，所以是一种有应用前途的通信方式。

衡量接收机质量的主要指标是接收机灵敏度。它表示在一定的误码率条件下，接收机调整到最佳状态时接收微弱信号的能力。接收机的噪声是影响接收机灵敏度的主要因素。

4. 电端机

系统中的电端机即为 PCM 数字信号复用设备。PCM 数字信号的复用方式准同步数字体系 PDH 正逐步被同步数字体系 SDH 代替。准同步数字体系 PDH 中，传输速率为基群 2.048Mbit/s，二次群 8.448Mbit/s，三次群 34.368Mbit/s，四次群 139.264Mbit/s，五次群 564.992Mbit/s。同步数字体系 SDH 中，传输速率为 STM-1 155.520Mbit/s，STM-4 622.080Mbit/s，STM-16 2488.320Mbit/s 和 STM-64 9953.280Mbit/s。

5. 光中继

目前光纤通信系统中采用的光中继机都是采用光/电/光的形式，而不是直接把光放大。但随着光放大器的开发、成熟、使用，可进行光的直接放大，实现全光通信。

1.4 习题

1. 光纤通信有哪些优点？
2. 比较五代光纤通信系统的主要特点与差别。
3. 为什么在使用石英光纤的光纤通信系统中，工作波长只能选择 850nm、1310nm、1550nm 三种。

第 2 章 光纤传输理论及传输特性

在光纤通信系统中，光纤是光波的传输介质。光纤的传输特性对光纤通信系统的传输质量起着决定性的作用。

本章在简要介绍光纤、光缆的结构和类型的基础上，用波动理论和射线光学理论对光纤中的模式和传光原理进行了分析，并对光纤的损耗和色散特性进行了详细介绍。

2.1 光纤、光缆的结构和类型

2.1.1 光纤结构

光纤的基本结构由以下几部分组成：折射率(n_1)较高的纤芯部分、折射率(n_2)较低的包层部分以及表面涂覆层。光纤的基本结构如图 2-1 所示。为保护光纤，在涂覆层外有二次涂覆层(又称塑料套管)。

纤芯的直径为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ (单模光纤)或 $50 \sim 80 \mu\text{m}$ (多模光纤)，包层直径均为 $125 \mu\text{m}$ 。

光纤可以按照纤芯、包层和二次涂覆层构造的不同进行分类。

1) 按光纤芯部折射率分布分为阶跃折射率光纤(简称 SI 型光纤)和渐变折射率光纤(简称 GI 型光纤)。

阶跃折射率光纤即在纤芯内折射率处处相等，结构如图 2-2 所示。

渐变折射率光纤即在纤芯内折射率分布符合抛物线的指数分布规律如下式所示，结构如图 2-3 所示。

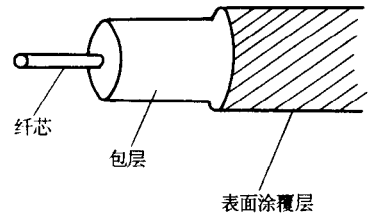


图 2-1 光纤的基本结构

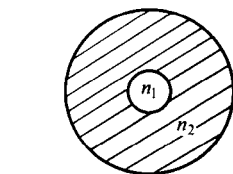
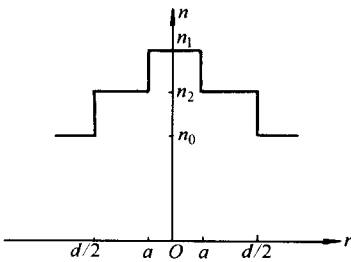


图 2-2 阶跃折射率光纤结构

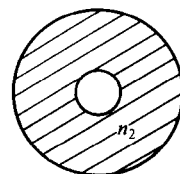
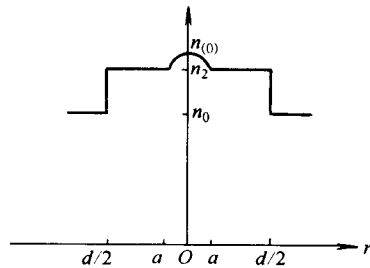


图 2-3 渐变折射率光纤结构

$$n(r) = n(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中 $n(r)$ ——距纤芯轴线为 r 处的折射率；

$n(0)$ ——纤芯轴线处的折射率；

a ——纤芯半径；

r ——变化点离光纤轴线的距离；

$\Delta = \frac{n(0) - n_2}{n(0)}$ 为相对折射率差。

2) 按光纤的二次涂覆层(塑料套管)分为紧套光纤和松套光纤。

紧套光纤：光纤不能在塑料套管内松动，结构如图 2-4 所示。

松套光纤：光纤能在塑料套管内松动，结构如图 2-5 所示。

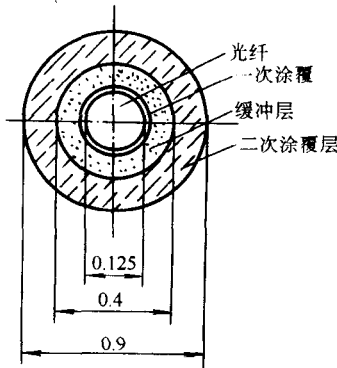


图 2-4 紧套光纤结构

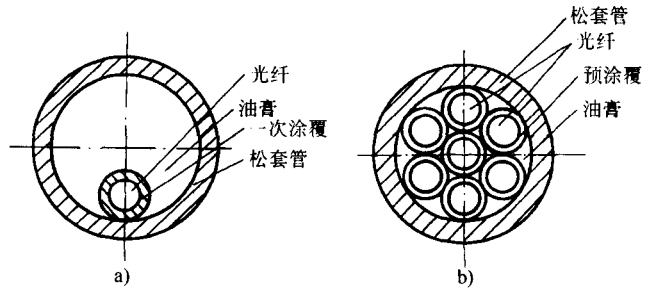


图 2-5 松套光纤结构

a) 松套光纤 b) 松套光纤束

3) 按材料分为石英(SiO_2)光纤、塑料光纤、氟化物光纤等。

4) 按光纤中传导模式分为多模光纤和单模光纤。

多模光纤：能传输多种模式的光纤，结构如图 2-6 所示。

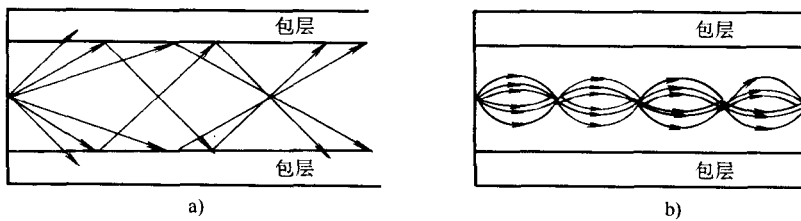


图 2-6 多模光纤结构

a) 阶跃折射率多模 b) 渐变折射率多模

单模光纤：只能传输一种模式的光纤，结构如图 2-7 所示。

2.1.2 光纤型号

目前ITU规定的光纤代号有G.651 光纤(多模光纤)、G.652 光纤(常规单模光纤)G.653 光