



21 世纪高等院校计算机网络与通信教材

现代光纤通信系统

北京希望电子出版社 总策划

穆道生 主 编

徐素妍 计 国 高丽娟 编 著



科学出版社

www.sciencep.com



21 世纪高等院校计算机网络与通信教材

现代光纤通信系统

北京希望电子出版社 总策划
穆道生 主 编
徐素妍 计 国 高丽娟 编 著



 科学出版社
www.sciencep.com

内容简介

为了适应计算机科学与技术学科的发展和现代计算机教学的需要,作者在多年大专生、本科生和研究生的计算机网络教学、实践的基础上,编写了本书。

全书共分9章,基本内容包括光纤通信的基本概念及发展、光纤和光缆、光源和光检测器、光无源器件、光发送机与光接收机、几种典型的光纤通信系统、光纤接入网、光同步数字传输网以及光纤通信网。

本书从我国通信事业的实际出发,密切结合当前光纤通信的状况和未来的发展趋势,力求理论性、实用性、系统性和方向性相结合,着重把概念和原理应用到实际,论证简明扼要,避免了繁琐的数学推导。本书可以作为高等院校光纤通信专业的教材,也可供从事光纤通信专业的工程技术人员参考。

需要本书或需要得到技术支持的读者,请与北京中关村 083 信箱(邮编 100080)发行部联系,电话:010-82702660 010-82702658 010-62978181 转 103 或 238 传真:010-82702698 E-mail: tbd@bhp.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

现代光纤通信系统/穆道生主编. —北京:科学出版社,
2005.9

21 世纪高等院校计算机网络与通信教材

ISBN 7-03-015806-7

I. 现... II. 穆... III. 现代光纤—通信系统—高等学校
—教材 IV. TP929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 071010 号

责任编辑:曾 华 / 责任校对:马 君
责任印刷:媛 明 / 封面设计:梁运丽

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市媛明印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2005 年 9 月第一次印刷 印张:16 1/4
印数:1-3 000 册 字数:367536

定价:24.00 元

序

目前,中国固定和移动两大网络的规模都已位居世界第2位,上网用户2004年总数达9400万,中国的信息通信制造业也得到很大的发展。今后5年中国信息产业预计将仍会以高于20%的速度增长。中国将加快建设新一代信息通信网络,全面振兴信息通信产品制造业和软件业,建立能够支撑信息通信业发展的技术、生产体系。在向数字化、集成化、网络化转变的过程中,简单服务要向个性化服务发展,低带宽要向高带宽发展,电路交换要向分组交换发展。无线网络、网络多媒体、多媒体计算、人机自然语音通信是网络与通信专业重点建设的四大方向。

面对潜力巨大的中国市场,我国大学的相关专业需要培养具有知识创新能力的高素质人才,在通信高新技术的研究上争创国际先进水平,为我国在信息领域达到国际一流的目标作出贡献。

科技的发展使得教育要跟上时代发展的步伐,但是目前市面上还没有一套系统、完整的关于计算机网络与通信方面的教材。现有的教材有些偏重理论,有些则偏重实用,不太适合于课堂教学。而对于学习网络与通信的学生来说,不仅要懂得原理,还必须学会技术,这样才能符合“培养人才、创造知识、转化成果、服务社会”的教学宗旨,在人才培养、科学研究和技术应用等方面有所成就,为我国通信与信息领域的发展做出贡献。

为了获得与国际接轨的教学内容,达到提高整体教学水平的目的,北京希望电子出版社组织国内各大高校相关专业的教授、专家、学者,共同编选本套丛书。本套丛书强化学生实践能力和创新意识的培养,定位准确、内容创新、结构合理。在选材上主要采用了成熟的理论,并通过对目前研究现状的跟踪,补充了最新的研究成果;充分考虑了内容组织的系统性和完整性,从学生的认知规律出发,力求做到简明和便于教学的特色;以培养学生分析问题和解决问题的能力为目标,着重基本概念、基本原理和基本分析方法的论述。本套丛书特别突出了各项技术的实用性,可作为计算机网络和通信专业或相近专业本科生、研究生的教科书,同时,还可以作为从事网络系统开发的科研人员和相关行业技术人员、管理人员有用的参考资料。

在撰写过程中参阅了大量的参考书、论文和资料,这里谨向所有的作者致以崇高的敬意!

我们欢迎更多的优秀教师参与到教材建设中来,真诚希望广大教师、学生与读者朋友在使用本丛书过程中提出宝贵的意见和建议。若有投稿或建议,请发至本丛书出版者电子邮件: textbook@bhp.com.cn

21世纪高等院校计算机网络与通信教材编委会

前 言

在电信技术革命的浪潮中,光纤通信已经成为当今信息社会不可缺少的通信系统,它的发展速度远远超过了人们的预想。目前,国内光纤数字通信技术发展迅猛,实用化的系统已越来越多。通信工程技术人员应该尽快系统地掌握光纤通信原理、特点及实际应用情况,了解光纤通信中的器件在光纤通信系统中的应用,从而有能力解决工程中的实际问题。

本书把握当今光纤通信发展的方向,结合光纤通信工程实际,参考有关光纤通信教材,系统、全面地概述了光纤通信主要光电器件的基本工作原理、器件结构、组装结构、器件特性参数以及光纤通信设备和光纤通信传输网络的现状和发展。

本书从我国通信事业实际出发,密切结合当前光纤通信的未来发展趋势,力求理论性、实用性、系统性和方向性相结合,着重把概念和原理应用到实际。本书的论证简明扼要,避免了繁琐的数学推导。全书共分9章,基本内容包括光纤通信的基本概念及发展、光纤和光缆、光源和光检测器、光无源器件、光发送机与光接收机、几种典型的光纤通信系统、光纤接入网、光同步数字传输网以及光纤通信网。本书可以作为高等工科院校光纤通信专业的教材,也可作为从事光纤通信专业的工程技术人员参考。

本书由穆道生、徐素妍、计国和高丽娟共同编著。在编写该书的过程中得到了装备指挥技术学院科研部孙陆青工程师的热情支持,以及军事通信学专业研究生夏惊涛、秦艺力和胡海的大力帮助。在此谨对他们表示衷心感谢。

限于我们的经验和水平,本书的编写难免有不足之处,敬请读者批评并提出宝贵意见。

编 者

目 录

第1章 绪论.....1	2.7 光纤及光缆的接续.....32
1.1 光纤通信发展简史.....1	2.7.1 光纤的接续方法.....32
1.2 光纤通信的特点.....3	2.7.2 光纤端面处理技术.....33
1.2.1 光纤通信的优点.....3	2.7.3 光纤接续部位的保护.....33
1.2.2 光纤通信的缺点.....4	2.7.4 产生光纤接续损耗的原因.....34
1.3 光纤通信系统概述.....5	第3章 光源和光检测器.....35
1.4 光纤通信的发展趋势.....6	3.1 光纤通信系统中的光源.....35
第2章 光纤和光缆.....8	3.1.1 物质的发光机理.....35
2.1 光纤的结构和种类.....8	3.1.2 激光器的工作原理.....36
2.1.1 光纤的结构.....8	3.1.3 半导体激光器.....37
2.1.2 光纤的分类.....8	3.1.4 半导体发光二极管.....42
2.1.3 单模光纤.....10	3.1.5 光源与光纤的耦合.....44
2.1.4 多模光纤.....11	3.2 半导体光电检测器.....45
2.2 光纤的导光原理.....12	3.2.1 最简单的半导体光电检测器.....46
2.2.1 波动理论.....13	3.2.2 PIN 光电二极管.....46
2.2.2 射线光学的基本定律.....15	3.2.3 雪崩光电二极管 (APD).....46
2.2.3 阶跃型光纤光射线的理论分析.....16	3.2.4 光电检测器的工作特性.....47
2.3 光纤的衰减特性.....18	第4章 光无源器件.....51
2.3.1 衰减.....18	4.1 光纤活动连接器.....51
2.3.2 吸收损耗.....19	4.1.1 概述.....51
2.3.3 散射损耗.....20	4.1.2 光纤活动连接器的重要指标.....51
2.3.4 其他损耗.....21	4.1.3 光纤活动连接器的组成部分.....52
2.3.5 光纤的损耗特性曲线.....21	4.1.4 光纤活动连接器的基本结构.....54
2.4 光纤的色散特性.....22	4.1.5 常用的光纤活动连接器的 品种和型号.....56
2.4.1 光纤色散的概念.....22	4.1.6 发展趋势.....57
2.4.2 光纤色散的表示方法.....22	4.2 固定连接器.....58
2.4.3 光纤色散的种类.....22	4.2.1 基本原理和结构.....58
2.4.4 偏振模色散.....24	4.2.2 光纤熔接机.....59
2.4.5 光纤的传输带宽.....24	4.2.3 套管式固定接头.....61
2.5 光纤制造.....26	4.2.4 毛细管固定接头.....62
2.5.1 概述.....26	4.2.5 V 形槽固定接头.....63
2.5.2 制备方法.....26	4.2.6 固定连接器的发展趋势.....64
2.6 光缆的结构和种类.....28	4.3 光衰减器.....64
2.6.1 光缆的基本结构.....28	
2.6.2 光缆的分类及特点.....30	

4.3.1	光衰减器的工作机理及分类.....	64	5.3.2	判决再生电路.....	123
4.3.2	光衰减器的性能指标.....	65	第 6 章	光纤通信系统.....	127
4.3.3	常用光衰减器举例.....	66	6.1	光纤通信系统的分类与组成.....	127
4.3.4	光衰减器的应用及发展趋势.....	68	6.1.1	光纤通信系统的类型.....	127
4.4	光波分复用器.....	69	6.1.2	IM-DD 数字光纤通信 系统的组成.....	127
4.4.1	光波分复用器的工作原理.....	69	6.1.3	光纤线路编码.....	129
4.4.2	WDM 的技术指标.....	70	6.2	相干光通信系统.....	130
4.4.3	光波分复用器的分类及制造方法....	71	6.2.1	相干光通信的工作原理.....	131
4.4.4	WDM 的应用举例.....	74	6.2.2	主要调制方式.....	131
4.4.5	光波分复用器的发展方向.....	76	6.2.3	关键的技术问题.....	133
4.5	无源光耦合器.....	77	6.2.4	相干光通信的优点.....	133
4.5.1	无源光耦合器的定义及分类.....	77	6.2.5	系统和网络应用.....	134
4.5.2	无源光耦合器的性能指标.....	77	6.2.6	相干光通信系统的现状及 发展前景.....	136
4.5.3	平面波导型光耦合器.....	79	6.3	光复用系统.....	136
4.5.4	熔锥型全光纤耦合器.....	80	6.3.1	光时分复用 (OTDM).....	136
4.5.5	耦合器的发展趋势.....	83	6.3.2	波分复用 (WDM).....	137
4.6	光隔离器.....	83	6.3.3	频分复用.....	139
4.6.1	概述.....	83	6.4	微波副载波复用系统.....	141
4.6.2	光隔离器的性能参数.....	84	6.4.1	微波副载波复用的基本原理 及系统构成.....	141
4.6.3	光隔离器的发展趋势.....	85	6.4.2	SCM 系统的特点.....	142
4.7	光开关.....	86	6.4.3	应用举例.....	142
4.7.1	概述.....	86	6.5	全光通信系统.....	143
4.7.2	光开关的性能参数.....	86	6.5.1	概述.....	143
4.7.3	光开关的应用及发展.....	88	6.5.2	超长波长光纤通信.....	143
第 5 章	光发送机与光接收机.....	89	6.5.3	光纤放大器.....	144
5.1	光发送机.....	89	6.6	光孤子系统.....	149
5.1.1	概述.....	89	6.6.1	概述.....	149
5.1.2	光发送机的基本电路.....	90	6.6.2	光孤子通信系统的基本 组成与要求.....	149
5.1.3	光发送机的光功率控制.....	94	6.6.3	光孤子通信系统的应用及发展....	150
5.1.4	光发送机的温度控制.....	97	第 7 章	光纤接入网.....	152
5.1.5	告警电路与保护电路.....	99	7.1	接入网的基本概念.....	152
5.1.6	外调制技术.....	100	7.2	光纤接入网.....	154
5.2	光接收机.....	105	7.2.1	光纤接入网概述.....	154
5.2.1	概述.....	105			
5.2.2	数字光接收机的基本原理.....	106			
5.2.3	光接收机的性能.....	110			
5.3	光中继器.....	122			
5.3.1	光中继器的构成.....	122			

7.2.2 应用形式	155	8.3.3 SDH 数字交叉连接设备 (SDXC) ...	203
7.2.3 网络拓扑结构	156	8.3.4 再生器	205
7.2.4 复用技术	158	8.4 SDH 的网同步	206
7.3 光纤接入网中的器件	159	8.4.1 网同步的基本概念	207
7.3.1 光有源器件	159	8.4.2 SDH 网的同步结构和工作方式	208
7.3.2 光无源器件	160	8.4.3 SDH 网同步要求	210
7.4 接入网中的光纤和光缆	160	8.4.4 SDH 网元时钟的定时方法 及其应用	210
7.4.1 适用于光纤接入网的光纤类型	160	8.5 SDH 的网络管理	212
7.4.2 适用于光纤接入网的光缆结构	161	8.5.1 电信管理网 (TMN)	213
7.4.3 适用于光纤接入网的连接 技术和连接方式	161	8.5.2 SDH 管理网 SMN	216
7.5 典型的光纤接入网	161	8.5.3 SDH 网络管理的发展方向	219
7.5.1 灵活接入系统	162	8.6 SDH 的应用	219
7.5.2 用户环路载波系统	162	8.6.1 SDH 技术在微波通信中的应用	219
7.5.3 电话无源光网络	163	8.6.2 IP over SDH 技术	222
7.5.4 无源光子网	163	8.6.3 GEOS (Gbit Ethernet over SDH) 技术	224
7.6 光纤接入网的发展方向	164	8.6.4 SDH 的其他应用	227
7.6.1 光纤接入网向宽带接入发展	164	第 9 章 光纤通信网	230
7.6.2 光纤接入网向 B-ISDN 发展	165	9.1 通信网的发展阶段	230
7.6.3 光纤接入网的前景	166	9.2 光纤传输网的结构形式	232
第 8 章 光同步数字传输网	167	9.2.1 物理结构形式	232
8.1 SDH 概述	167	9.2.2 光通道层的波长路由及其特点	235
8.1.1 SDH 的发展历史	167	9.2.3 波长通道与波长变换	237
8.1.2 SDH 的基本概念和特点	168	9.3 光交叉连接设备 (OXC)	238
8.1.3 SDH 的速率和帧结构	173	9.3.1 OXC 的功能和技术要求	239
8.2 SDH 的复用与映射方法	177	9.3.2 OXC 的基本结构	239
8.2.1 复用结构	177	9.3.3 OXC 与 DXC 结构的关系与 性能比较	242
8.2.2 映射	179	9.4 波长变换技术	244
8.2.3 指针调整定位技术	188	9.4.1 光电混合波长变换技术	245
8.2.4 复用	191	9.4.2 全光波长变换技术	245
8.3 SDH 设备	194	9.4.3 四波混频 FWM 波长变换器	248
8.3.1 SDH 设备逻辑功能块描述	194		
8.3.2 SDH 复用设备	199		

第 1 章 绪 论

光纤通信是将要传送的电报、电话、图像和数据等信号调制到光载波上，以光纤作为传输媒介的通信方式。光纤是光导纤维（Optical Fiber）的简称。它的诞生和发展给世界通信技术带来了划时代的革命，光纤通信技术从 20 世纪 60 年代至今得到了迅猛发展。由于光纤的传光性能优异，传输带宽极大，因此光纤通信已成为目前主要通信方式中的一种，而且光纤通信已经进入用户网，逐步取代用户网中的音频电缆，从而走进千家万户。本章将简要介绍光纤通信的发展过程，分析光纤通信的特点及其发展趋势，概要介绍光纤通信系统的组成及各部分的作用。

1.1 光纤通信发展简史

光通信就是利用光波来载送信息，实现通信。现代的光通信是指容量大、传输距离远的光通信。所谓光纤通信是指以光纤为传输媒介而进行的光通信。通常而言的光通信就是指光纤通信，当然，光通信的传输介质不仅仅是用光纤，还可以使用其他介质来进行光通信。

随着社会的发展，信息传输与交换量与日俱增，传统的通信方式已不能满足人们的需要。为了扩大通信容量，通信方式从中波、短波发展到微波、毫米波，这实际上就是通过提高通信载波频率来扩大通信容量的。那么能否继续提高频率，达到光波波段，以收效更大呢？答案是肯定的。因为光波是人们最熟悉的电磁波，其波长在微米级（光波称为微米波），而频率则为 10^{14} Hz 数量级，这比常用的微波频率高 $10^4 \sim 10^5$ 倍。可以预计，用光波作为载波进行通信，通信容量将是现有通信方式的万倍以上，甚至更高。正是由于这一特点，人们不断探索利用光波进行通信的可能性。

其实，光通信的历史可以追溯的 3000 多年前，当时人们利用烽火台传递警讯，就是利用光来进行通信。直到目前仍然使用的信号灯、旗语都是光通信的一种形式。当然，这种光通信方式能够传输的信息量极其有限。

近代历史上，早在 1880 年，美国的贝尔发明了光学电话，他用通常的可见光在数百米距离上传送过语音，从而实现了光通信。贝尔本人认为这是他一生中最伟大的发明。但这种形式的光通信一直未得到发展，其原因有两个：首先没有合适的光源，通常的自然光为非相干光，不具有一般无线电磁波的性质（如频带很窄，方向性很强等），它的方向性不好，不易调制和传输，很难按一般无线电磁波的通信方式进行通信；其次没有合适的传输媒介，以空气作为传输媒介，损耗很大，无法实现远距离传输，易受天气影响，通信极不稳定可靠。为此，人们不断寻找和探索可以用于光通信的光源和传输介质。

1960 年，美国梅曼（T.H.Maiman）发明了红宝石激光器，它可以产生单色相干光，使高速信息的光调制成为可能。

1961~1970 年，人们主要研究利用大气传输光信号。美国林肯实验室首先利用氦氖激光器通过大气传输了一路彩色电视。随后，相继出现了各色各样的大气传输系统实验。后

来发现,大气传输光通信有许多严重的问题:

(1) 气候对通信的影响十分严重。大雾时,通信几乎中断。

(2) 由于大气气温不均匀,它的密度或折射率也不均匀,以及大气湍流的影响,使光线发生漂移和抖动。通信的信噪比很低,传输很不稳定。

(3) 大气传输设备要求设在高处,收、发设备必须直线可见。这种地理条件使大气传输光通信的使用范围具有很大的局限性。

为此,人们又考虑和尝试了各种传输介质。其中包括利用玻璃材料制成光导纤维来传输光信号,但是当时最好的光学玻璃材料的损耗在 1000dB/km 以上,这么高的传输损耗根本就无法用于通信。

1966 年,美籍华人高锟(K.C.Kao)和 George.A.Hockham 根据介质波导理论共同提出了光纤通信的概念。

1970 年,美国康宁(corning)玻璃公司的 Maurer 等人首次研制出阶跃折射率多模光纤,其在波长为 630nm 处的衰减系数小于 20dB/km;同年,美国贝尔实验室的 Hayashi 等人研制出室温下连续工作的镓铝砷(GaAlAs)双异质结注入式激光器(红宝石激光器发出的光束不容易耦合进光纤中传输,其耦合效率是极低的,因此需要研制小型化的激光光源)。正是光纤和激光器这两个科研成果的同时问世,拉开了光纤通信的序幕。(也把 1970 年称为光纤通信的“元年”)

1972 年,随着光纤制备工艺中的原材料提纯、制棒和拉丝技术水平的不断提高,进而将梯度折射率多模光纤的衰减系数降至 4dB/km。

1976 年,在进一步设法降低玻璃中的 OH^- (氢氧根)含量时,发现光纤的衰减在长波长区有 1.31 μm 和 1.55 μm 两个低损耗窗口。

1976 年,美国西屋电气公司在亚特兰大成功地进行了世界上第一个信息传输速率为 44.736Mbit/s、传输距离为 110km 的光纤通信系统的现场试验,使光纤通信向实用化迈出了第一步。

1980 年,原材料提纯和光纤制备工艺得到不断完善,从而加快了光纤的传输窗口由 0.85 μm 移至 1.31 μm 和 1.55 μm 的进程。特别是制出了低衰减光纤,其在 1.55 μm 的衰减系数为 0.20 dB/km,已接近理论值。与此同时,为促进光纤通信系统的实用化,人们又及时地开发出适用于长波长的光源,即激光器、发光管和光检测器。应运而生的光纤成缆、光无源器件、性能测试及工程应用仪表等技术的日趋成熟,都为光纤光缆作为新的通信传输媒介奠定了良好的基础。

1981 年以后,世界各发达国家将光纤通信技术大规模地推入商用。历经 20 余年的突飞猛进的发展,光纤通信速率已由 1978 年的 45Mbit/s 提高到目前的 40Gbit/s (例如美国 MCI 于 1991 年开通了 Chicago 至 St.Louis 全长 275 英里的 4×10Gbit/s 的商用光纤通信系统等)。

回顾光纤通信的发展历史,光纤通信系统已经历了四代变更。第一代光纤通信系统是在 1973~1976 年研制成功的 45Mbit/s、0.85 μm 多模光纤系统。其光纤损耗在 0.85 μm 处为 4dB/km,在 1.06 μm 处为 2dB/km,LD (Laser Diode, 激光二极管) 寿命达 10^6 小时。此外组成系统的其他各个部分在性能上已基本满足要求。1978 年投入使用的第一代光纤通信系统的速率范围在 50~100Mbit/s,中继距离为 10km。

第二代光纤通信系统于1976年~1982年研制成功,它可以传送中等码速的数字信号。其工作波长为 $1.30\mu\text{m}$,损耗为 0.5dB/km ,色散的最小值近似为零。

目前正处在大规模实用化的是第三代光纤通信系统。其工作波长为 $1.31\mu\text{m}$,使用LD可传输 $140\sim 600\text{Mbit/s}$ 的高码速信号,中继距离达 $30\sim 50\text{km}$ 。

第四代光纤通信系统目前还处在实验室研制阶段。其主要思想是将零色散波长移到 $1.55\mu\text{m}$,这样可以使光纤损耗更低,色散为零。

目前,人们已经涉足第五代光纤通信系统的研究和开发,称之为光孤子通信系统。其原理将在第6章作详细介绍。

光纤通信是当今世界上发展最快的通信技术领域之一,也是我国与国际先进水平差距最小的一个领域。

在国外光纤通信的研究起步不久,我国从1974年就开始了光纤通信的基础研究,并在几年之内就取得了阶段性的研究成果。在此基础上,20世纪70年代末进行了光纤通信系统现场试验。80年代主要进行光纤通信系统的实用化攻关,完成了武汉市话中继实用化工程,武汉—荆州多模光缆 34Mbit/s 省内干线工程以及合肥—芜湖 140Mbit/s 单模光缆一级干线工程等,为大规模推广应用打下了基础。90年代初期,我国开始了光纤通信系统的大量建设,光缆逐渐取代电缆,并完成了“八纵八横”国家干线。这些干线主要是采用PDH 140Mbit/s 系统。随着市场需求量的增加以及技术水平的不断提高,逐渐采用了SDH 622Mbit/s 和 2.5Gbit/s 系统。郑州—洛阳—开封的 $16\times 2.5\text{Gbit/s}$ 和上海—南京的 $32\times 10\text{Gbit/s}$ 的波分复用数字光纤通信系统的研究开发与投入商用等工作正在加速进行之中。此外,国产的光器件产品在国际市场也具有较强的竞争力。由此可见,中国已具有大力发展光纤通信的综合实力。

1.2 光纤通信的特点

光纤通信与电缆或微波等电通信方式相比具有一系列的特点,主要表现在以下几个方面。

1.2.1 光纤通信的优点

1. 传输频带宽,通信容量大

光纤传输的光载波比传统电通信频率高 10^4 倍以上,而且通信容量正比于载波频率,因此理论上光纤的通信容量比以往的电通信容量大数万倍以上。在实际应用中,例如传输速率为 2.488Gbit/s 的数字光纤通信系统中,每对光纤可传输30 000多路电话信号,而以前电通信中容量最大的中同轴电缆,通信容量仅同时传输1000多路电话。但是目前只是应用了光纤频带宽度中的一小部分,还有巨大的带宽资源有待开发。因此光纤通信的发展前景非常乐观。

2. 传输损耗低,中继距离长,适用于长途传输

目前使用的石英系光纤在 $0.8\sim 1.8\mu\text{m}$ 波长范围内损耗比所有传统的电传输线低,在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处尤为突出,光纤损耗可低达 0.16dB/km ,工作带宽可达 100GHz 以上。由于光纤传输损耗低,所以最大中继距离能够达到 200km ,而传统的电传输线中继距离仅为几公里。

3. 抗电磁干扰, 不会产生串光, 信号串扰小, 传输质量高, 保密性好

光纤是非金属介质材料, 且光纤通信中使用的光频率很高, 因此它不受电磁干扰, 这是传统的电通信所无法比拟的。因此光纤通信在电力输配、核实验等特殊环境有特殊的优越性。此外, 光纤通信与电通信不同, 由于光信号束缚在纤芯内传播, 因此不会产生光纤间的串光现象, 这不仅提高了同一光缆中不同光纤间光信号的传播质量, 而且保证了光缆中光纤的高密度布放。由于光波是不会泄露的, 从外界很难获得光纤中传输的信息, 因此光纤通信系统的保密性能良好。

4. 光纤体积小, 重量轻, 便于运输和敷设

光纤直径仅 0.1mm 左右, 因而制成光缆后, 直径比电缆细, 重量也轻很多, 特别适用于汽车、飞机、舰船等通信系统。利用光纤通信的这个特点在市话中继线路中成功地解决了地下管道拥挤问题。

5. 耐化学侵蚀, 适用于特殊环境

石英系光纤的化学性质比较稳定, 耐化学腐蚀。因此光缆可直接埋于地下, 特别适合化工企业的内部及恶劣环境下的通信。

6. 原材料资源丰富, 节约有色金属

光纤的主要成分是二氧化硅 (SiO_2), 这是地球组成最主要的成分之一, 因而制作光纤的原材料是非常丰富的。光纤传输媒介在通信中的广泛应用能够节省大量越来越宝贵的金属材料。

总之, 光纤光缆线路代替传统的金属传输线路是必然趋势。

1.2.2 光纤通信的缺点

(1) 光纤弯曲半径不宜过小。

(2) 光纤的端面制备和连接技术要求十分娴熟, 且需要专门的设备。

(3) 分路、耦合操作繁琐。

此外, 光纤的抗拉强度低, 且连接比较困难。但是到目前为止, 光纤通信的这些缺点都已在不同程度上得以克服, 它们不影响光纤通信的实用。表 1.1 列出了光纤与几种电通信传输介质的特性比较, 表 1.2 列出了光纤通信的应用场合。

表 1.1 光纤与其他几种电通信传输介质的特性比较

传输介质	带宽 (MHz)	衰减系数 (dB/km)	中继距离 (km)	敷设安装	接续
对称电缆	6	20 (4MHz)	1~2	方便	方便
同轴电缆	400	19 (60MHz)	1.6	方便	较方便
微波波导	40~120 (MHz)	2	10	特殊	特殊
光纤光缆	>10GHz.km	0.2~3	>50	方便	特殊

表 1.2 光纤的特点及其应用场合

光纤特点	应用场合
低衰减、宽频带	公用通信, 有线电视图像传输
尺寸小、重量轻	公用通信, 计算机, 飞机, 导弹, 船舰内通信控制
抗电磁干扰	电力及铁道通信, 交通控制信号, 核电站通信
耐化学侵蚀	油田、炼油厂、矿井等区域的通信

1.3 光纤通信系统概述

虽然光纤通信系统种类很多(具体分类可参见 6.1 节),但其基本构成原理是相同的,都是由光发送端机、光接收端机、光纤光缆和中继器组成。目前,在实际应用中受技术条件的限制,各种信息尚无法直接转变成光信号,而是先转换成电信号,以电信号的方式进行交换、复用等,然后再将电信号调制到光载波上,在光纤介质中传输,所以光纤通信系统中通常还包括电端机(由电发送端机和电接收端机组成)。光纤通信系统的基本组成框图如图 1.1 所示。

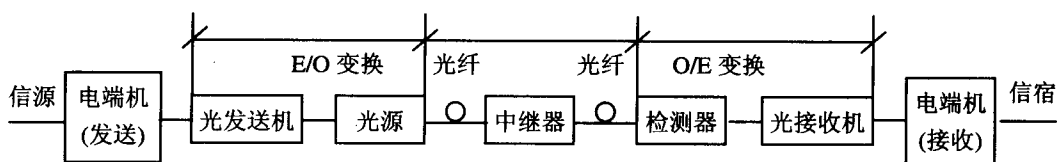


图 1.1 光纤通信系统框图

由此可见,光纤通信系统的基本组成部分包括电端机、光端机(光发送端机和光接收端机)、光中继器和光纤光缆。下面以单方向通信的情况说明各部分作用。

1. 电发送端机

其主要功能是将各种低速率数字信号复接成一个电信号,或将模拟信号进行适当处理后送入光端机发端。送入光端机的可能是数字信号,也可能是模拟信号。因此电端机可以是数字终端设备,如脉冲编码调制(PCM, Pulse Code Modulation)设备;也可以是模拟信号终端设备,如电视图像发送设备和电报电话载波设备等。它们对应的通信系统分别称为数字光纤通信系统和模拟光纤通信系统。由于数字信号抗干扰能力强,目前应用的光纤通信系统几乎都是数字光纤通信系统。

2. 光发送机

其主要任务是将电发送端机送来的电信号直接调制到光载波上,然后送往光纤光缆传输。电光变换(E/O,)主要由光源器件完成。光纤通信中最常用的光源是半导体激光器(LD)和发光二极管(LED, Light Emitting Diode)。关于光源的具体内容将在第3章中介绍。

光发送端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,通常用 dBm 来表示,定义为

$$\text{功率 (dBm)} = 10 \lg [\text{功率(mW)}/1\text{mW}]$$

3. 光纤或光缆

通信用光纤在结构上主要由纤芯和包层组成，其主要功能是传送光信号，完成信号的传输任务。为了保证光信号缚在纤芯中传播，要求纤芯折射率大于包层折射率。

对光纤的基本要求是要具有良好的波导性能、较低的光损耗和较宽的传输带宽。其中光纤的两个重要参数是传输损耗和色散，它们是影响光纤通信中继距离和传输容量的决定性因素。光纤的传输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，容易形成码间干扰。

在实际应用中，通常将若干根光纤以一定方式制成光缆。光缆中的光纤数目根据需要由单芯、二芯、四芯、六芯乃至百余芯到数千芯不等。

4. 光中继器

其主要功能是使传输中衰减了的信号得到补偿，使产生畸变的光信号脉冲波形得到恢复，以实现远距离传输。光中继器将接收到的微弱光信号转换成电信号，然后对电信号进行放大或再生处理，再经过电/光转换为光信号，耦合进光纤光缆继续传输，这种放大再生方式称为光-电-光方式。为了保证远距离通信，在光纤线路上每隔一定距离都要设置光中继器。目前的中继距离一般在几十公里，随着技术的进步，将达到几百公里甚至几千公里。近年来，适合作光中继器的光纤放大器（例如掺铒光纤放大器）已研制成功并已经开始使用，这就使得全光中继及全光网络得以实现。

5. 光接收机

其主要任务是将接收到的光信号转换成原始电信号，经放大、整形、再生恢复原形后，送到电接收端机。它主要由耦合器、光电检测器和解调器组成。其中光电检测器主要完成的是光/电变换（即 O/E）。

光接收机的性能由接收灵敏度来表征，指的是在一定误码率条件下的最小平均接收光功率，它与系统的信噪比有关。

6. 电接收端机

同电发送端机作用相反，其主要功能是频分解复用或时分分解复用，可以是模拟接收设备，也可以是数字接收设备。

1.4 光纤通信的发展趋势

光纤通信技术的问世与发展给世界电信业带来了革命性变化，在这几十年的研究开发中，光纤光缆、器件和系统的品种逐步更新，性能逐渐完善，已使光纤通信成为信息高速公路的传输平台。特别是近几年，随着技术的进步、电信管理体制的改革以及电信市场的逐步开放，光纤通信呈现了蓬勃发展的新局面。当今光纤通信技术的主要发展趋势概括为：

1. 系统传输速率越来越高，容量不断扩大，网络化已成规模

随着信息技术的迅速发展，光纤通信也逐步向高速化、大容量、网络化方向发展，信

息共享、有线电视、电视点播、电视会议、家庭办公和计算机互联网等技术和产品正在逐步实用化。时分复用、波分复用和频分复用等技术应用于光纤通信系统,促使光纤通信由点到点的 PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy, 准同步数字体系) 系统转入 SDH (Synchronous Digital Hierarchy, 同步数字体系) 系统,光纤接入网也已经迅速发展。

2. 工作波长向长波长方向发展

为了避免由于光纤传输速率的高速化和光纤通信系统的大容量化带来的光纤衰减、色散和非线性现象严重影响到光纤系统的质量,光纤的工作波长已经由 $0.85\mu\text{m}$ 向 $1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 的长波长方向发展。已经研制出的常规单模光纤 (ITU-T G.652) 在 $1.31\mu\text{m}$ 的色散为零,在 $1.55\mu\text{m}$ 的损耗最低,其工作波长为 $1.31\mu\text{m}$; 色散位移单模光纤 (ITU-T G.653) 低损耗和零色散均在 $1.55\mu\text{m}$,工作波长为 $1.55\mu\text{m}$; 非零色散位移单模光纤 (ITU-T G.655) 在 $1.55\mu\text{m}$ 损耗小,色散小,非线性效应小。

3. 光缆纤芯向高密度方向发展

随着通信技术的发展,光纤用户网应运而生。光纤用户网的主要传输媒介——用户光缆的含纤数量可高达 2000~4000 芯,完全可以满足用户对可视电话、电视点播、图文检索和高速数据传输等宽带新业务的需求。这种高密化的带状光缆可减少光缆的直径和重量,又可在工程施工中便于分支和提高接续速度。

4. 器件向集成化方向发展

优异的光器件是构成先进的光纤通信系统的基础。当今器件的发展趋势是高速率、高性能、多用途、组件化和单片化。

第2章 光纤和光缆

光纤通信系统用光纤作为通信信道，将光信号从光发送机无失真地传送到光接收机。光纤的基本特性参数是损耗与色散，损耗直接影响通信距离，色散会引起光脉冲信号展宽和码间串扰，从而影响通信距离和容量。

为使光纤能在各种敷设条件下和各种环境中使用，需要把光纤和其他元件组合起来构成光缆，使其具有良好的传输性能和抗拉伸、抗冲击、抗弯曲、抗扭曲等机械性能，以满足实际应用的需要。

本章将对光纤和光缆的有关内容进行比较详细的介绍。

2.1 光纤的结构和种类

2.1.1 光纤的结构

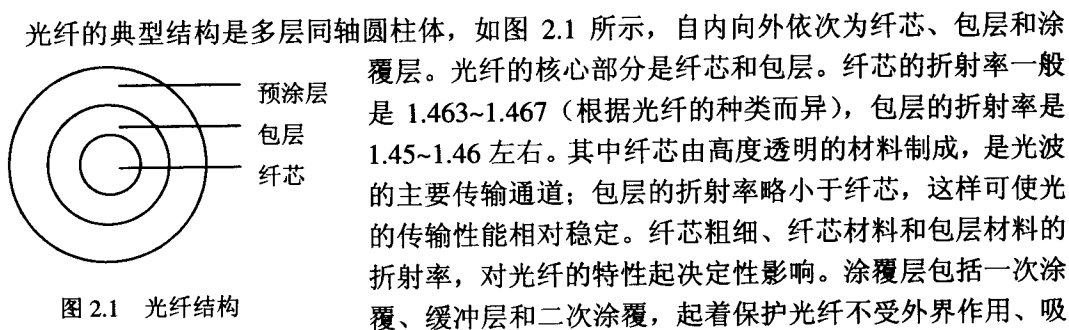


图 2.1 光纤结构

2.1.2 光纤的分类

这里主要从工作波长、折射率分布、传输模式、原材料和制造方法的不同对光纤的种类作以归纳。

(1) 传输模式：单模光纤（含偏振保持光纤、非偏振保持光纤）、多模光纤。

(2) 制造方法：预塑法有汽相轴向沉积（VAD）法和化学汽相沉积（CVD）法等，拉丝法有管律法（Rod intube）和双坩锅法。

(3) 工作波长：紫外光、可见光、近红外光、红外光等。

(4) 原材料：石英玻璃、多成分玻璃、塑料、复合材料（如塑料包层、液体纤芯等）、红外材料等。按被覆材料还可分为无机材料（碳等）、金属材料（铜、镍等）和塑料等。

(5) 折射率分布：阶跃（SI）型、近阶跃型、渐变（GI）型、其他（如三角型、W 型、凹陷型等）。

1. 石英光纤（Silica Fiber）

以二氧化硅（ SiO_2 ）为主要原料，并按不同的掺杂量，来控制纤芯和包层的折射率分

布的光纤。石英光纤与其他原料的光纤相比,还具有从紫外线光到近红外线光的透光光谱,除通信用途之外,还可用于导光和传导图像等领域。石英(玻璃)系列光纤,具有低损耗、频带宽的特点,现在已广泛应用于有线电视和数字通信系统。

2. 红外光纤 (Infrared Optical Fiber)

红外光纤是能在更长的红外波长领域工作的光纤,红外光纤主要用于光能传送。例如温度计量、热图像传输、激光手术刀医疗、热能加工等,但普及率尚低。作为光通信领域所开发的石英系列光纤的工作波长,尽管用在较短的传输距离,也只能用到 $2\mu\text{m}$ 。

3. 复合光纤 (Compound Fiber)

复合光纤主要用在医疗业务的光纤内窥镜。复合光纤是在 SiO_2 原料中,再适当混合诸如氧化硼 (B_2O_3)、氧化钠 (Na_2O)、过氧化钾 (K_2O_2) 等氧化物,其特点是多成分玻璃比石英的软化点低且纤芯与包层的折射率差很大。

4. 氟化物光纤 (Fluoride Fiber)

氟化物光纤是由氟化物玻璃制成的光纤。主要用于工作在 $2\sim 10\mu\text{m}$ 波长的光传输业务。由于这类光纤具有超低损耗光纤的特点,在 $2.5\mu\text{m}$ 波长时的理论最低损耗值可达 10^{-3}dB/km ,比石英光纤的最低损耗低 2~3 个数量级。因此,目前正在进行将其用作长距离通信光纤的可行性研发。这类光纤由于难于降低散射损耗,只能用在 $2.4\sim 2.7\mu\text{m}$ 波长的温敏器和热图像传输,尚未广泛实用。

5. 塑包光纤 (Plastic Clad Fiber)

塑包光纤是将高纯度的石英玻璃作成纤芯,而将折射率比石英稍低的如硅胶等塑料作为包层的阶跃型光纤。其特点是容易与发光二极管 (LED) 光源结合,损耗也较小。所以非常适用于局域网 (LAN) 和近距离通信。

6. 塑料光纤 (Plastic Optical Fiber)

塑料光纤是将纤芯和包层都用塑料(聚合物)做成的光纤。纤芯直径为 $1000\mu\text{m}$,比单模石英光纤的大 100 倍,接续简单,而且易于弯曲,施工容易。

7. 色散位移光纤 (DSF: Dispersion Shifted Fiber)

色散位移光纤利用光纤材料中的石英材料色散与纤芯结构色散的合成抵消特性,可使原在 $1.3\mu\text{m}$ 波段的零色散位移到 $1.55\mu\text{m}$ 波段也构成零色散。在光通信的长距离传输中,为了保证信息的传输质量,光纤色散为零是十分重要的,但却不是惟一的因素。DSF 在设计时综合考虑了各种因素。

8. 色散平坦光纤 (DFF: Dispersion Flattened Fiber)

色散平坦光纤是将 $1.3\mu\text{m}$ 到 $1.55\mu\text{m}$ 较宽波段的色散都能做到很低,几乎达到零色散的光纤。这种光纤对于波分复用 (WDM) 的线路是很适宜的。由于 DFF 光纤要做到 $1.3\mu\text{m}\sim 1.55\mu\text{m}$ 范围的色散都减少,因此它的工艺比较复杂,费用较高。