

上海市教育委员会高校重点教材建设项目

高等学校通信教材

gaodeng xuexiao tongxin jiaocai

◎ 上海市教育委员会组编

◎ 马军山 主编

GUANGXIAN TONGXIN
YUANLI YU JISHU

光纤通信 原理与技术



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

上海市教育委员会高校重点教材建设项目

高等学校通信教材

光纤通信原理与技术

上海市教育委员会 组编

马军山 主编

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理与技术/马军山主编;上海市教育委员会组编. —北京:人民邮电出版社,2004. 8
高等学校通信教材. 上海市教育委员会高校重点教材建设项目
ISBN 7-115-12380-2

I. 光... II. ①马... ②上... 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(2004)第 074082 号

内 容 提 要

本书系统地介绍光纤通信系统基本组成单元的相关基础知识和技术,包括光纤传输理论和特性、光纤的制作和光缆的结构,各种光无源器件,光通信用光源和光发送机,光检测器和光接收机,以及电时分复用、波分复用、光时分复用、光码分复用以及副载波复用等多信道复用系统及相关技术;介绍几种主要的光放大器的原理和相关技术,包括半导体激光放大器、掺铒光纤放大器及喇曼光纤放大器;介绍相干光通信、光孤子通信、全光交换、全光波长转换和 MOEMS 光开关等光纤通信新技术和新器件。

本书可作为通信专业、电子信息专业本科的教学用书,也可供从事光纤通信工程的科技人员参考。

上海市教育委员会高校重点教材建设项目
高等学校通信教材
光纤通信原理与技术

◆ 组 编 上海市教育委员会

主 编 马军山

责任编辑 滑 玉

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线:010-67129259

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:787×1092 1/16

印张:14.5

字数:348 千字

2004 年 8 月第 1 版

印数:1-5000 册

2004 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-12380-2/TN·2297

定价:19.80 元

本书如有印装质量问题,请与本社联系 电话:(010)67129223

编者的话

本教材是上海市教育委员会组编的“十五”高校重点教材。

自 1966 年英籍华裔科学家高锟和 Hockham 发表了关于传输介质新概念的论文以来,光纤通信技术得到了迅猛的发展,已成为通信的主要途径之一。尤其在最近十几年,发展速度之快令人惊叹。对于发展速度如此之快的实用型技术,我们在教学中应向学生传授什么呢?编者的看法是,应尽可能使学生了解在光纤通信领域中,人们过去做了什么,目前正在做什么,将来要做什么。

基于上述观点,在本教材的编写中注重内容的系统性、实用性和前瞻性。教材既系统地介绍了光纤传输理论、光纤通信系统的基本组成单元以及成熟的复用技术;又介绍了一些发展中的实用技术,如色散补偿(尤其是偏振模色散补偿)、DWDM 系统中非线性效应影响的解决方案、Interleaver 滤波器、EDFA 的自动增益控制和平坦化、全光波长转换器以及 MOEMS 光开关等关键技术;同时对一些具有应用前景的新技术,如对光时分复用、光码分复用、相干光通信、光孤子通信、全光交换等也进行了介绍。

本教材在第 1 章介绍光纤通信技术的发展历程和现状;第 2~5 章介绍光纤通信系统的基本组成单元,其中第 2 章介绍光纤传输理论和特性、光纤的制作和光缆的结构,第 3 章主要介绍各种光无源器件,第 4 章介绍光通信光源和光发送机,第 5 章介绍光检测器和光接收机、系统的设计;第 6 章介绍包括电时分复用、波分复用、光时分复用、光码分复用以及副载波复用在内的多信道复用系统及相关技术;在第 7 章介绍几种主要的光放大器的原理和相关技术,包括半导体激光放大器、掺铒光纤放大器及喇曼光纤放大器;在最后一章,介绍相干光通信、光孤子通信、全光交换、全光波长转换和 MOEMS 光开关等光纤通信新技术和新器件。需要说明的是,光时分复用和光码分复用还是处于发展中的新技术,但考虑到教材的系统性,还是放在第 6 章介绍;而相干光通信虽然方法提出较早,但早期由于光源的限制和波分复用技术的发展,并没有获得重大发展和应用,只是近几年才又受到重视,因此,将其作为新技术在第 8 章介绍。

本教材由袁一方教授编写 7.1 节、7.2 节、7.4 节和第 8 章的 8.1 节、8.2 节,其余部分由马军山教授编写。

最后编者感谢庄松林院士为本教材写了序,感谢上海市教育委员会对本教材的资助。

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。

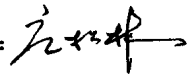
编者
2004 年 7 月

序

通信是国家信息基础设施的重要组成部分,是一个国家的国民经济和综合国力的命脉所系。通信技术的发展表明,综合通信网络主要由光纤通信、卫星通信和移动通信系统构成。其中光纤通信组成固定通信系统,包括高速干线网、接入网和数据专用网。光纤通信技术问世近30年来取得了惊人的成功,在今后的一二十年中,发展将更加迅速,这是 Internet 等的普及所带来的信息业务量的迅速增长所决定的。目前人类正在向太比特(Terabit)时代迈进。单根光纤的传输容量每10年增加100倍,这一速度正好与IC的集成度发展速度的 Moore 定律一样。目前,2.5~10Gbit/s 通信容量的系统已经商品化,Tbit/s 传输速率的实验也已经成功。我国于1999年底在全国范围内建成了“八横八纵”的光缆网,通信已成为国家的支柱产业之一。

光纤通信技术涉及的学科较多,专业技术人才的培养非常重要。目前包括从国外引进的教材在内,光纤通信方面的教材已经很多了。但正如编者在前言中所说的,这本教材的特色在于内容的系统性、实用性和前瞻性。教材既系统地介绍了光纤传输理论、光纤通信系统的基本组成单元以及成熟的复用技术,又介绍了一些发展中的实用技术,如光纤光栅外腔窄线宽激光器、偏振模色散补偿、DWDM 系统中非线性效应影响的解决方案、Interleaver 滤波器、EDFA 的自动增益控制和平坦化、全光波长转换器以及 MOEMS 光开关等关键技术,这些技术基本上都是首次出现在教材中;而像光时分复用、光码分复用等一些具有应用前景的新技术,也是首次在教材类书籍中进行了比较系统的介绍。相信本教材的出版,将有益于高校实用型和研究型人才的培养。

作为我校的一名青年科研骨干教师,马军山教授能参考大量的书籍,并从各类期刊收集大量的第一手材料,静下心来主编出版了这本教材,我感到非常欣慰。这样的青年教师目前似乎已不多见。我也希望他能坚持下去,不断对教材进行修订、完善。

中国工程院院士: 

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤通信技术的发展概况	1
1.2 光纤通信的特点和应用	3
1.3 光纤通信系统的分类	5
1.4 光纤通信系统的基本组成	6
习题	7
第 2 章 光纤传输理论及特性	8
2.1 光纤的射线理论分析	8
2.1.1 阶跃折射率分布光纤	8
2.1.2 渐变折射率分布光纤	9
2.2 光纤的波动光学理论	10
2.2.1 麦克斯韦方程组	10
2.2.2 波动方程	11
2.2.3 阶跃光纤的波动方程	12
2.2.4 模式方程	13
2.2.5 线偏振模	15
2.2.6 阶跃折射率光纤中的功率流	16
2.2.7 单模光纤	18
2.3 光纤的色散	19
2.3.1 色散的定义及对通信容量的限制	19
2.3.2 材料色散	20
2.3.3 波导色散	20
2.3.4 单模光纤的波导色散	22
2.3.5 偏振模色散	22
2.3.6 高阶色散	23
2.4 光纤的损耗	23
2.4.1 光纤的衰减系数	23
2.4.2 衰减机理	24
2.5 光纤、光缆的制造	25
2.5.1 光纤制造工艺	25

2.5.2 光缆的结构	28
习题	30
第3章 光通信用无源器件	31
3.1 光纤连接器	31
3.1.1 连接器的技术指标及改进方法	31
3.1.2 连接器的结构	34
3.2 光纤耦合器	35
3.2.1 光纤耦合器的技术参数	36
3.2.2 光纤耦合器的工作原理	36
3.3 复用器/解复用器	40
3.3.1 波分复用器/解复用器的性能指标	40
3.3.2 波分复用器/解复用器	41
3.3.3 光分插复用器(OADM)	51
3.4 偏振控制器	52
3.5 光隔离器与环行器	54
3.5.1 原理及结构	54
3.5.2 光隔离器的性能	57
3.5.3 光环行器	60
习题	60
第4章 光发送机	62
4.1 半导体光源的物理基础	62
4.2 发光二极管	64
4.2.1 工作原理	64
4.2.2 基本结构	64
4.2.3 LED 的特性	65
4.3 半导体激光器	66
4.3.1 光学谐振腔与激光器的阈值条件	66
4.3.2 半导体激光器的结构	68
4.3.3 半导体激光器的特性	69
4.4 单纵模激光器	70
4.4.1 分布反馈激光器	71
4.4.2 分布 Bragg 反射激光器(DBR-LD)	73
4.4.3 光纤光栅外腔半导体激光器	74
4.5 光发送机	77
4.5.1 调制方法	78
4.5.2 控制电路	82
4.5.3 光源与光纤的耦合及组件	84
4.5.4 线路编码	85
习题	89

第 5 章 光接收机	90
5.1 光电检测器	90
5.1.1 半导体光电检测器的物理基础	90
5.1.2 PN 光电二极管	91
5.1.3 PIN 光电二极管	92
5.1.4 雪崩光电二极管 (APD)	93
5.2 光接收机的电路	95
5.2.1 前置放大器	95
5.2.2 线性通道	96
5.2.3 数据重建电路	96
5.2.4 自动增益控制	96
5.3 光接收机的噪声	97
5.3.1 光接收机的噪声源	97
5.3.2 光接收机的信噪比 (SNR)	99
5.4 数字光接收机的灵敏度	100
5.4.1 误码率	100
5.4.2 最小接收光功率	102
5.4.3 量子限	102
5.4.4 光接收机灵敏度的恶化	103
5.5 数字光纤通信系统的设计	104
5.5.1 功率预算	105
5.5.2 上升时间预算	105
5.5.3 色散预算	106
习题	107
第 6 章 多信道光通信系统	108
6.1 时分复用系统	108
6.1.1 时分复用的概念	108
6.1.2 色散补偿技术	111
6.2 波分复用系统	116
6.2.1 波分复用 (WDM) 原理与结构	116
6.2.2 WDM 系统光纤选型	120
6.2.3 光纤中的非线性效应及解决方案	121
6.2.4 光交叉波分复用器 (Interleaver)	125
6.3 光码分复用 (OCDM)	134
6.3.1 光正交码	135
6.3.2 光编/解码器	137
6.3.3 OCDM 其他技术	140
6.3.4 OCDM 在光纤局域网中的应用	140
6.3.5 OCDM 的特点	141

6.4 光时分复用(OTDM)技术	141
6.4.1 光时分复用(OTDM)的概念	141
6.4.2 全光时分复用	142
6.4.3 全光时分分解复用	144
6.4.4 超短光脉冲源	145
6.4.5 全光时钟提取	146
6.4.6 OTDM 的应用前景	146
6.5 副载波复用光波系统	147
6.5.1 副载波复用光波系统的基本原理	147
6.5.2 副载波调制光波系统的性能分析	148
习题	150
第7章 光放大器	151
7.1 光放大器的原理与一般特性	151
7.1.1 光放大器的原理	151
7.1.2 光增益谱宽与带宽	152
7.1.3 增益饱和	153
7.1.4 放大器噪声	153
7.2 半导体光放大器	154
7.2.1 放大器原理	154
7.2.2 放大器特性	156
7.3 掺铒光纤放大器(EDFA)	158
7.3.1 EDFA 原理与特性	158
7.3.2 EDFA 的小信号增益与饱和特性	160
7.3.3 EDFA 的实现	162
7.3.4 EDFA 的应用	163
7.3.5 自动增益控制技术	164
7.3.6 增益平坦技术	168
7.4 光纤喇曼放大器(RFA)	171
7.4.1 喇曼增益谱	171
7.4.2 喇曼阈值	172
7.4.3 光纤喇曼放大器的结构与理论分析	173
7.4.4 光纤喇曼放大器的特点及应用	176
习题	177
第8章 光纤通信新技术	178
8.1 相干光通信技术	178
8.1.1 相干光通信的概念	178
8.1.2 相干光通信技术的基本原理	178
8.1.3 光发射机	180
8.1.4 光接收机	181

8.1.5 误码率和接收机灵敏度	183
8.1.6 相干光通信系统中的几个技术问题	184
8.2 光孤子通信	188
8.2.1 光孤子的物理概念	188
8.2.2 光孤子通信原理	191
8.2.3 光孤子通信的一些典型系统	194
8.3 光交换与光交叉连接技术	196
8.3.1 光交换技术	196
8.3.2 光交叉连接技术	198
8.4 全光波长转换技术	199
8.4.1 波长转换技术在全光网络中的作用	200
8.4.2 波长转换技术	201
8.4.3 全光波长转换技术	202
8.5 MOEMS 光开关	208
8.5.1 传统光开关	208
8.5.2 MOEMS 器件特点	209
8.5.3 MOEMS 光开关的基本原理及特点	210
8.5.4 典型的 MOEMS 光开关的基本原理及特点	211
8.5.5 MOEMS 材料、工艺、组装技术	214
习题	216
附录 英文缩写对照表	217
参考文献	221

第 1 章 绪 论

光通信是以光为载体的通信方式。与电通信分为有线通信（电缆通信）和无线通信（微波通信）一样，光通信也分为有线通信和无线通信两种方式，有线通信即是本书要介绍的以光纤为传输介质的光纤通信，无线通信是以大气为传输介质的大气光通信。虽然电通信的普及应用早于光通信，但实际上人类对光通信的认识和探讨要远早于电通信。如众所周知的中国古代的烽火台，就是原始的光通信。

1.1 光纤通信技术的发展概况

1880 年，贝尔发明了一种光学电话，使用光波实现了语音信号的传输，这是最早的大气光通信实验。但由于没有合适的光源，大气光通信并没有取得实质性的进展。直到激光器出现之后，人们又开始进行大气光通信的探讨。

1960 年，美国人梅曼（T. H. Maiman）发明了红宝石激光器，产生了方向性好、亮度高的单色相干光。之后，又出现了 He-Ne 激光器、CO₂ 激光器。美国林肯实验室利用 He-Ne 激光器通过大气传输了一路彩色电视信号。随后，相继出现了各种大气传输系统实验。虽然实验上点到点大气激光通信是可行的，但是通信能力和质量受气候影响十分严重。雨、雾和灰尘的吸收和散射使光波能量衰减很大，尤其是大雾可以造成高达 120dB/km 的衰减，造成长时间通信中断。此外，由于大气气温不均匀，使它的密度或折射率不均匀，加之大气湍流的影响，使光线发生漂移和抖动，通信的信噪比变差，传输不稳定。另一方面，大气传输设备要求架设在高处，收发两地无障碍物，这种使用条件使大气激光通信的应用有局限性*。另外，成群家鸽等也会造成通信的暂时中断。

但是，光波理论上巨大的传输容量激励着人们不断探索光通信的可行性。为了克服气候对激光通信的影响，有人在一条很长的管子内进行光传输。为了防止光束发散和引导光转弯，在一定距离的管道内放置聚焦透镜，称为透镜光波导。虽然实验基本是成功的，但这种方法太复杂，安装精度极高，轻微的振动和温度变化均会引起光束偏移，难以实用。

1966 年英籍华裔科学家高锟（C. K. Kao）和 Hockham 发表了关于传输介质新概念的论文，指出了利用光纤进行信息传输的可能性和技术途径，奠定了光纤通信的基础。光纤是一

* 大气激光通信虽然没有成为光通信的主流方式，但相应的研究并未因此而中断。实际上，在发生灾变或临时需要通信等场合，大气激光通信有其灵活性。一些发达国家甚至在探索卫星光通信，建立天基网。

种玻璃丝，可以引导光波转弯，实现光通信。当时世界上最优良的光学玻璃衰减达 1000dB/km。高锟指出，这样大的损耗并不是石英本身固有的特性，而是由于材料中的杂质，如过渡金属杂质离子的吸收产生的，因此，有可能通过材料的提纯制造出适合于长距离通信使用的低损耗光纤，并预测如果把金属离子的含量降低到 10^{-6} 以下，并通过改进热处理工艺提高材料的均匀性，可以将衰减降低到几 dB/km。但是，当时多数人还并不相信这些预测，只有少数有远见的科学家对光纤通信十分重视。

1970 年，光纤研制取得了重大突破。当时十分重视光纤通信的贝尔实验室和英国电信研究所求助美国康宁玻璃公司，开展合作研究，于 1970 年首先研制出衰减为 20dB/km 的石英光纤。之后，世界各发达国家纷纷开展光纤通信的研究。1972 年，美国康宁玻璃公司研制成功高纯石英多模光纤，衰减降低到 4dB/km。1973 年，美国贝尔实验室取得更大进展，光纤衰减降低到 2.5dB/km。1974 年降低到 1dB/km。1976 年，日本电报电话公司等单位将光纤衰减降低到 0.47dB/km（波长为 $1.2\mu\text{m}$ ）。1979 年，光纤衰减在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处为 0.20dB/km，接近了理论极限。

要实现大容量的通信，要求光纤有很高的带宽。单模光纤的带宽最宽，是理想的传输介质。因此，最早考虑的是单模光纤，但是它的芯径很细，仅几个微米，工艺要求极高，在当时的技术条件下难以做到，所以当时采用芯径很粗的多模光纤。由于光能在多模光纤中传输，各模式之间有光程差，造成光纤输出的光信号有脉冲展宽现象，即光纤带宽不很宽。1976 年日本研制出渐变型多模光纤，大大改善了光纤的带宽。在 20 世纪 80 年代，由于光纤制作工艺的进步，单模光纤也研制成功，使超大容量光纤通信成为可能。80 年代中期，零色散波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的光纤，即色散位移光纤也研制成功，使超大容量长距离光纤通信成为可能。

要实现光纤通信需要有合适的光源。20 世纪 70 年代，光纤的低损耗窗口在波长为 $0.85\mu\text{m}$ 处的近红外区，所以，当时主要发展 GaAlAs（镓铝砷）注入式半导体激光器。由于制造半导体激光器的工艺极为复杂，当时的激光器尚不能在室温下使用，寿命很短，这些问题长期未得到解决。经过艰苦的工作，1970 年美国贝尔实验室、日本电气公司和前苏联先后突破半导体激光器在低温或脉冲激励条件下工作的限制，研制成功室温下连续振荡的 GaAlAs 双异质结短波长半导体激光器。虽然寿命只有几小时，但为半导体激光器的发展奠定了基础。1973 年，半导体激光器寿命达到 7000 小时。1977 年，贝尔实验室研制的半导体激光器寿命达到 10 万小时，外推寿命达到 100 万小时，完全满足实用化的要求。1976 年日本电报电话公司研制成功波长为 $1.31\mu\text{m}$ 的 InGaAsP（铟镓砷磷）激光器，1979 年美国电报电话公司研制成功波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的连续振荡半导体激光器。80 年代，又研制出动态单纵模激光器，如分布反馈（DFB）激光器和分布布喇格反射（DBR）激光器，之后又出现性能更优良的量子阱激光器，使 Gbit/s、100km 以上的无中继光纤通信成为可能。

光检测器是光接收机的主要器件，其功能是将接收到的光信号转换为电信号。随着光纤通信的需要，及时地研制出适用于短波长的 Si-PIN 光电二极管和 Si-APD 雪崩光电二极管，以及适用于长波长的 InGaAs/INP-PIN 光电二极管、APD 光电二极管以及 Ge-APD 管。

光纤通信技术的发展，总的进程是从短波长向长波长发展，从单模光纤向多模光纤发展，同时各种复用技术相继出现。

1966~1976 年期间，通信系统使用多模光纤，利用第一窗口（ $0.85\mu\text{m}$ ）传输，这是由

当时光纤和光源所决定的。实现了低速率 (45 或 34Mbit/s)、10km 无中继传输。

人们认识到,在第二窗口 ($1.31\mu\text{m}$),损耗低,而且色散为零,70 年代中期开始研究长波长光纤通信。实现了工作波长为 $1.31\mu\text{m}$ 、传输速率为 140~565Mbit/s 的单模光纤通信系统,无中继传输距离为 100~50km。

在第三窗口 ($1.55\mu\text{m}$),光纤具有更低的衰减系数,因此,进一步开发 $1.55\mu\text{m}$ 系统。但 $1.55\mu\text{m}$ 波长处,光纤具有 $17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 左右的色散。因此,必须有单纵模窄线宽激光器与之适应,80 年代研制出分布反馈 (DFB) 激光器,这一问题得以解决。同时人们也从光纤的设计着手,到 80 年代中期,研制出零色散波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的色散位移光纤,使通信容量进一步提高。采用外调制技术,传输速率可达 2.5~10Gbit/s,无中继传输距离可超过 100km。

进入 90 年代,波分复用 (WDM) 技术成为干线大容量传输的主要方案。早在从 $1.31\mu\text{m}$ 向 $1.55\mu\text{m}$ 过渡时期,就已采用波分复用技术实现 $1.31\mu\text{m}$ 与 $1.55\mu\text{m}$ 复用。以后随着波分复用/解复用器件,尤其是光放大技术的发展,密集波分复用 (DWDM) 技术逐渐发展起来。以 EDFA 为代表的光放大技术发挥了重要作用,它不但可以实现光信号的全光中继,而且可对多波长信道同时进行增益均匀的放大,这对 DWDM 系统是至关重要的。

目前,密集波分复用技术在干线上已必不可少,主要致力于单信道速率的提高上。色散补偿技术是对已敷设的 G.652 光纤提高速率的最佳方法,已经提出了各种色散补偿技术。光时分复用技术主要解决电子器件对频带的限制。而光孤子技术则利用光纤色散与自相位调制实现保形传输,以解决色散限制,实现超长距离传输。同时,密集波分复用技术也在不断发展,非零色散位移光纤、大有效面积光纤可以降低四波混频效应的影响,窄线宽激光器以及解复用器都取得显著进展,可大大减小信道间隔,增加信道数量,进而提高传输容量。

1.2 光纤通信的特点和应用

在光纤通信系统中,作为载波的光波频率比电波频率高得多,而作为传输介质的光纤又比同轴电缆或波导管的损耗低得多,因此,相对于电缆通信或微波通信,光纤通信具有许多独特的优点。

1. 频带宽、传输容量大

光纤通信系统的带宽取决于光源的调制特性、调制方式和光纤的色散特性。石英单模光纤在 $1.31\mu\text{m}$ 波长具有零色散特性,通过光纤结构的设计,还可以把零色散波长移到 $1.55\mu\text{m}$,即色散位移光纤。在零色散波长窗口,单模光纤具有几十 $\text{GHz}\cdot\text{km}$ 的带宽。另一方面,可以采用多种复用技术来增加传输容量。最简单的是空分复用,因为光纤很细,一根光缆可以容纳多达几百根光纤。就单根光纤而言,采用波分复用技术是增加光纤通信系统传输容量最有效的方法。另一方面,减小光源谱线宽度和采用外调制技术,也是增加传输容量的有效方法。

目前,单波长光纤通信系统的传输速率一般为 2.5Gbit/s 和 10Gbit/s。采用外调制技术传输速率可以达到 40Gbit/s。波分复用和光时分复用技术更是极大地增加了传输容量,波

分复用系统已实现了 132 信道、传输速率为 20 Gbit/s 的大容量传输。

2. 损耗小、中继距离长

石英单模光纤在 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长, 传输损耗分别为 0.5dB/km 和 0.2dB/km , 甚至更小。因此, 用光纤比用同轴电缆的中继距离长得多。目前, 采用外调制技术, 波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的色散位移光纤通信系统, 若其传输速率为 2.5Gbit/s , 则中继距离可达 150km ; 若传输速率为 10Gbit/s , 则中继距离可达 100km 。采用光纤放大器、色散补偿光纤, 中继距离还可增加。

3. 重量轻、体积小

光纤重量很轻, 直径很小。在芯数相同的情况下, 光缆重量比电缆轻得多, 体积也小得多。传输介质的重量和体积对许多领域特别是军事、航空和航天等方面的应用, 具有非常重要的意义。如在飞机上用光纤代替电缆, 可以减轻负荷, 可以降低飞机的制造成本。此外, 利用光缆体积小特点, 在市话中继线中成功地解决了地下管道拥挤的问题。

4. 抗电磁干扰性能好

光纤由电绝缘的石英材料制成, 光纤通信线路不受各种电磁场的干扰和闪电雷击的损坏。无金属光缆非常适合于存在强电磁干扰的高压电力线路周围和油田、煤矿等易燃易爆环境中使用。

5. 泄漏小、保密性好

在光纤中传输的光泄漏非常微弱, 即使在弯曲地段也无法窃听。没有专用的特殊工具, 光纤不能分接, 因此, 信息在光纤中传输非常安全, 这对军事、政治和经济都有重要的意义。

6. 节约金属材料

制造同轴电缆和波导管的铜、铝等金属材料, 在地球上的存储量是有限的, 而制造光纤的主要材料石英在地球上取之不尽的, 而且由于光纤很细, 制造 8km 光纤只需 320g 石英, 而制造管中同轴电缆, 1km 就需要 120kg 铜和 500kg 铝。可见, 推广光纤通信, 有利于地球资源的合理利用。

光纤通信不仅在技术上具有很大的优越性, 而且在经济上也具有巨大的竞争能力, 因此, 它在信息时代将发挥越来越重要的作用。光纤通信在通信网、广播电视网、计算机网以及其他数据传输中都获得了广泛的应用。光纤宽带干线传送网和接入网发展迅速, 成为当前研究开发的主要目标。光纤通信的主要应用如下。

(1) 通信网, 包括全球通信网 (如横跨大西洋和太平洋的海底通信和跨越欧亚大陆的洲际干线系统)、各国的公共电信网 (如我国的国家一级干线、各省二级干线以及县以下的支线)、各种专用通信网 (如电力、铁道、国防部门通信、指挥、调度及监控的光纤系统), 以及特殊通信网络 (如石油、化工、煤矿等易燃易爆环境下使用的光纤通信系统);

(2) 构成因特网的计算机局域网和广域网, 如光纤以太网、路由器之间的光纤高速传输链路;

(3) 有线电视网的干线和分配网, 工业电视系统, 如工厂、银行、商场、交通和公安部门的监控系统, 自动控制系统的数据传输;

(4) 综合业务光纤接入网, 可实现电话、数据、视频及多媒体业务综合接入核心网。

1.3 光纤通信系统的分类

光纤通信系统按传输信号的类型、信号的调制方式、使用波段等多种分类方法。

1. 按传输信号的类型分类

(1) 模拟光纤通信系统

模拟光纤通信系统是用模拟信号直接对光源进行强度调制的系统。模拟通信系统与下面介绍的数字通信系统相比,具有占用频带较窄、电路简单、价格便宜等优点。因此,目前的电视传输,广泛采用模拟通信系统。另一方面,由于电视的数字化传输,要求较复杂的技术,特别是当今社会对电视频道数目的要求日益增多,要传输几十甚至上百路电视,需要极复杂的编码和解码技术,设备价格昂贵,因此,目前还不能普遍使用。在这种情况下,副载波复用(SCM)模拟光纤通信系统得到很大重视和发展。在SCM系统中,视频基带信号对射频副载波的调制,可以采用调频(FM)和调幅(AM)。目前,在卫星模拟电视传输中,视频基带信号对微波的调制采用调频方式,所以连接卫星地面站的干线光纤传输系统要采用FM/SCM方式。但是,世界各国模拟电视信号对无线广播载波的调制,采用的都是单边带调幅(VSB-AM),所以用于电视分配网的光纤传输系统要采用VSB-AM/SCM方式,以便和传输到家用电视机的同轴电缆相兼容,组成光纤/同轴电缆混合(HFC)系统。模拟光纤通信系统要求传输信号与信息之间具有良好的线性关系,因此,需要输出功率与驱动电流之间具有极好线性关系的激光器。目前,这种激光器在发达国家已投入商业应用,可以传输60~120路质量良好的彩色电视信号。

(2) 数字光纤通信系统

数字光纤通信系统比模拟光纤通信系统具有更多的优点,也更能适应社会对通信能力和通信质量越来越高的要求。数字光纤通信系统用参数取值离散的信号(脉冲的有和无)代表信息,强调的是信号与信息之间的一一对应关系;而模拟光纤通信系统则用参数取值连续的信号代表信息,强调的是变换过程中信号与信息之间的线性关系。这种基本特征决定了两种通信方式的特点和不同时期的发展趋势。20世纪70年代光纤通信的应用和80年代计算机的普及,为数字通信的发展创造了极其有利的条件。数字通信系统有以下优点。

① 抗干扰能力强,传输质量好。在模拟通信系统中,噪声叠加在信号上,两者很难分开,放大时噪声和信号一起被放大,不能改变因传输而劣化的信噪比。数字光纤通信系统采用二进制信号,信息不包含在脉冲的波形中,而由脉冲的有和无表示。因此,一般噪声不影响传输质量,只有在取样和判决过程中,当噪声超过一定阈值时,才产生误码。

② 可以用再生中继,传输距离长。数字通信系统可以用不同方式再生传输信号,消除传输过程中的噪声累积,恢复原信号,延长传输距离。

③ 适用于各种业务的传输,灵活性高。在数字通信系统中,语音、图像等各种信息都变换为二进制数字信号,可以把传输技术和交换技术结合起来,有利于实现综合业务传输。

④ 容易实现保密通信。只需要将明文与密钥序列逐位模2相加,就可以实现保密通信。通过精心设计加密方案和密钥序列并经常更换密钥,可以达到很高的保密强度。

⑤ 数字通信系统大量采用数字电路,易于集成,从而实现小型化、微型化,增强设备

的可靠性，有利于降低成本。

数字通信系统的缺点是占用频带较宽，系统的频带利用率不高。数字通信系统的许多优点是以牺牲频带为代价得到的，然而光纤通信的频带很宽，完全能够克服数字通信的缺点。目前，除电视信号传输以外，已出现了数字通信几乎完全取代模拟通信的趋势。

2. 按调制方式分类

(1) 强度调制—直接检测光纤通信系统

用电信号对光源进行强度调制，在接收端用光探测器直接检测，系统结构简单。

(2) 相干检测光纤通信系统

在发送端用电信号对光源发出的光载波进行调制（调幅、调频及调相），经单模光纤传输到接收端，与接收机的本地振荡光混频，经光检测器检测后得到中频信号或基带信号，再解调出电信号。特点是接收机灵敏度高，但系统较复杂，技术难度高。

3. 按光波长分类

(1) 短波长光纤通信系统

工作波长为 850nm，采用多模光纤作为传输介质，色散较大，中继距离较短，目前已较少使用。

(2) 长波长光纤通信系统

工作波长为 1310nm 和 1550nm，由于单模石英光纤在 1550nm 处的损耗系数和色散系数均较低，已成为目前通信系统的首选传输介质。

1.4 光纤通信系统的基本组成

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，图 1.1 给出了这种通信系统的原理框图。

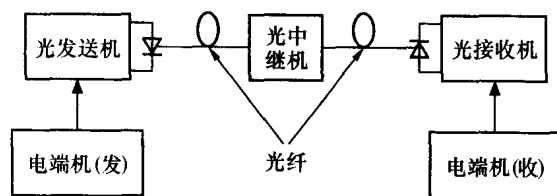


图 1.1 光纤通信系统的基本组成原理图

图 1.1 中所示的是一个方向的传输，反方向传输的结构是相同的。系统由电端机、光发送机、光纤线路、光中继机及光接收机组成。电端机是对来自信源的信号进行处理，如模/数转换、多路复用等。光发送机是将电信号转换成光信号，并输入到传输光纤。为保证长距离传输，光纤线路中间有光中继机，将经光纤长距离传输后受到较大衰减和畸变的光脉冲信号转换成电信号，进行放大、整形、再生，最后变成一定强度的光信号继续在光纤中传输。光接收机将光信号转换成电信号，光信号首先由光检测器检测，再经放大、均衡、判决再生恢复为原来送入光发送机的电信号，最后送至接收端电端机。下面分别扼要介绍各组成部分。

1. 光发送机

光发送机的功能是将输入的电信号转换成光信号，并将光信号最大效率地耦合到光纤中。光发送机由光源、驱动电路和调制器组成，其核心是光源。对光源的要求是输出功率足够大并且稳定，光波长稳定且线宽窄，调制速率高，器件寿命长。目前广泛使用的是半导体激光器。

光发送机把电信号转换成光信号是通过电信号对光源进行调制实现的。光调制有直接调制和间接调制（外调制）两种方式。直接调制是利用电信号直接改变半导体激光器的注入电流，来获得与电信号相对应的光强信号。直接调制会导致激光产生频率啁啾，使调制速率受到限制，一般只用于低速率系统。外调制是把激光的产生与调制分开，是用调制器对直流驱动的激光器产生的功率恒定的光波进行调制。高速率系统一般采用外调制方式。

2. 光纤线路

光纤线路是光信号的传输介质。把来自光发送机的光信号以尽可能小的衰减和畸变传送到接收机。对光纤的要求是衰减和色散要尽可能小。工程中使用的是有许多根光纤绞合在一起并采取保护措施的光缆，整个光纤线路由光纤、光纤接头及连接器组成。

石英光纤有三个低损耗窗口，即波长为 850nm, 1310nm, 1550nm 三个低损耗区，目前衰减系数分别小于 2dB/km, 0.4dB/km, 0.2dB/km。在 1310nm 附近有一个零色散区，色散系数小于 3ps/km·nm。色散位移光纤将零色散波长从 1310nm 移到 1550nm，其衰减和色散都最小，可用于大容量高速率系统。但色散系数越小，非线性效应越强，如四波混频效应可导致 DWDM 系统信道间的串扰。因此，在 DWDM 系统中，可采用非零色散位移光纤，其零色散波长低于或高于 1550nm，使 1550nm 附近有一定大小的色散，以大大减轻 FWM 影响，而 1550nm 附近的色散又不是很大，以免限制 10Gbit/s 信号的传输。第 6 章将详细介绍各种光纤的传输特性。

3. 光接收机

光接收机的功能是把由光发送机发送的、经光纤线路传输后输出的已衰减和畸变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、均衡、判决、再生等相关电路组成。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 PIN 光电二极管和雪崩光电二极管（APD）。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，接收机所要求的最小光功率。接收机的噪声是影响灵敏度的主要因素。

4. 光中继机

目前光纤通信系统中采用的光中继机主要是背靠背的光/电/光方式。随着光放大技术的成熟，在光纤通信系统中，尤其是波分复用系统已开始采用全光中继方式。

习 题

1. 比较光纤通信各发展阶段的特点。
2. 简述光纤通信的优点和应用。
3. 比较模拟通信和数字通信方式的优缺点。
4. 光纤通信系统由哪几部分组成？简述各部分的功能。
5. 可通过哪些途径来提高光纤通信系统的通信容量？