



教育部高等职业教育示范专业规划教材
(通信类专业)

光纤通信技术与设备

GUANGXIAN TONGXIN JISHU YU SHEBEI



段智文 主编



赠电子课件等



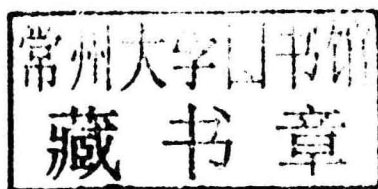
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



教育部高等职业教育示范专业规划教材
(通信类专业)

光纤通信技术与设备

主 编 段智文
副主编 宋燕辉 曾庆珠 许万里 王艳莉
参 编 孙小霞 文杰斌 张树凯 唐彦儒
陈 惠
主 审 贺明华



机械工业出版社

本教材是为适应当前高职高专教学改革的需要,在总结多年教学、科研和生产实践经验的基础上编写而成的。

本教材系统地介绍了光纤通信的基础知识,详细地阐述了光纤与光缆、通信光器件、光端机、SDH 传输网、光纤通信系统、中兴 ZXMP S320 光端机及其例行维护操作、光纤通信新技术及光纤通信实训等。

本教材理论紧密结合实际,通俗易懂。教材编写以“会用、管用”为目标,理论以“必需、够用”为原则,在此基础上对传统教材的内容进行精选、整合、优化,突出创新性,力争紧跟科学发展前沿,同时设置了较多实训内容,能够更好地适应高职教育的需要。

本教材是以通信专业的需要为基础编写的,内容全面,能为教师和学生提供较大的信息量,选择性强。各院校可根据具体情况灵活安排教学内容。

本教材充分体现了高职教育教材的特色,具有较强的针对性、实用性,既可作为高职高专院校通信类、电子信息类相关专业的教材,也可作为光纤通信技术的培训用书,也可供光纤通信行业的工程人员参考。

为方便教学,本书配有免费电子课件、习题解答等,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电或邮件索取,咨询电话:010-88379564 或邮箱:cmpqu@163.com。有任何技术问题也可通过以上方式联系。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术与设备/段智文主编. —北京:机械工业出版社,2010.11

教育部高等职业教育示范专业规划教材. 通信类专业
ISBN 978-7-111-31400-4

I. ①光… II. ①段… III. ①光纤通信—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 144020 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:曲世海 责任编辑:王 琪 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:陈 沛 责任印制:乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 16.25 印张·401 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-31400-4

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

现代社会已进入信息时代，信息技术日趋改变着人们的生活。通信是人类传递信息、交流思想、传播知识的重要手段。光纤通信、卫星通信和无线电通信是现代通信网的三大支柱，其中光纤通信是主体。

高职高专教学改革的要求：注重素质教育，注重应用型人才能力的培养，把立足点放在工程技术应用上，课程内容应删繁就简，突出主线，突出重点。本教材的编者都是从事高职教育的教师，在结构、内容安排等方面，总结了编者多年来在教研改革、教材建设等方面取得的经验，力求全面体现高等职业教育的特点，满足当前教学的需要。

本教材的特点有：

- 1) 比较系统地介绍了光纤通信的基础知识，有利于学生全面掌握光纤通信这门学科。
- 2) 体现了实用性，教材编写以“会用、管用”为目标，理论以“必需、够用”为原则，在此基础上对教材内容进行精选。
- 3) 体现了高职教育特点，重视技能培训，教材中设置了较多的实训内容，着力于培养学生的实践能力。
- 4) 体现了前瞻性，在详细介绍光纤通信基本概念、基本原理的基础上，还介绍了光纤通信领域已有技术以及未来的新技术。
- 5) 力求内容深入浅出，通俗易懂，图文并茂。

本教材由段智文担任主编，并编写了第5章。第1章和第4章由王艳莉编写，第2章由宋燕辉编写，第3章由许万里编写，第6章由孙小霞编写，第7章由曾庆珠编写，第8章由文杰斌编写，陈惠、张树凯、唐彦儒也参与了本教材的编写工作，对教材大纲的制定、内容的取舍等提出了许多宝贵的意见。本教材由贺明华主审，他认真仔细地审阅了全书，并提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚谢意。

为方便教学，本书配有免费电子课件、习题解答等，凡选用本书作为授课教材的学校，均可来电或邮件索取，咨询电话：010-88379564 或邮箱：cmpqu@163.com。有任何技术问题也可通过以上方式联系。

由于编者水平有限，书中难免有缺点、疏漏及其他不足之处，恳请使用本书的教师、读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 概论 1

1.1 光纤通信技术简介 1

1.1.1 光纤通信发展史与现代光纤通信的应用 1

1.1.2 光纤通信系统的基本构成与分类 5

1.2 现代光纤通信的主要特点与发展趋势 7

1.2.1 现代光纤通信的主要特点 7

1.2.2 现代光纤通信的发展趋势 8

思考题 10

第2章 光纤与光缆 11

2.1 光纤 11

2.1.1 光纤的结构与分类 11

2.1.2 光纤的导光原理 13

2.2 光纤的特性 17

2.2.1 光纤的损耗特性 17

2.2.2 光纤的色散特性 18

2.2.3 光纤的几何特性和光学特性 22

2.2.4 光纤的非线性效应 23

2.2.5 光纤的机械特性与温度特性 24

2.3 单模光纤与多模光纤 25

2.3.1 单模光纤 25

2.3.2 单模光纤的标准与应用 26

2.3.3 多模光纤 33

2.3.4 多模光纤的标准与应用 33

2.4 光缆 34

2.4.1 光缆的结构与种类 34

2.4.2 光缆的型号、色谱与端别 36

思考题 41

实训1 光时域反射仪的使用与测试 41

实训2 光纤接续和光纤熔接机的使用 44

实训3 光缆接续与光缆接头盒的制作 47

实训4 光缆管道敷设 50

第3章 通信光器件 52

3.1 光源 52

3.1.1 与激光器相关的几个物理概念 52

3.1.2 激光器的原理 54

3.1.3 激光器的特性 56

3.1.4 分布反馈激光器 58

3.1.5 发光二极管 58

3.2 光电检测器 60

3.2.1 光电检测器的原理 61

3.2.2 光电检测器的特性 61

3.2.3 PIN 光敏二极管 64

3.2.4 APD(雪崩光敏二极管) 65

3.3 光放大器 66

3.3.1 光放大器的分类 66

3.3.2 掺铒光纤放大器的工作原理 66

3.3.3 掺铒光纤放大器的特性与应用 71

3.4 无源光器件 72

3.4.1 光纤连接器 72

3.4.2 光衰减器 74

3.4.3 光耦合器 74

3.4.4 光隔离器与光环行器 75

3.4.5 波长转换器 76

3.4.6 光开关 77

3.4.7 光滤波器 78

3.4.8 光纤光栅 79

思考题 79

第4章 光端机 81

4.1 光发送机 81

4.1.1 光发送机的基本组成 81

4.1.2 光源的要求 82

4.1.3 光源的调制 82

4.1.4 光发送机的主要指标 84

4.1.5 光功率控制和温度控制 85

4.2 光接收机	87	6.1 系统的性能指标	158
4.2.1 光接收机的基本组成	87	6.1.1 系统参考模型	158
4.2.2 光接收机的特性	88	6.1.2 误码性能	159
思考题	92	6.1.3 抖动性能	161
实训5 光端机指标(收、发)测试	93	6.1.4 漂移性能	164
实训6 数字配线架简介	96	6.1.5 可靠性指标	164
实训7 2M 塞绳的制作	101	6.2 系统的设计	165
第5章 SDH 传输网	103	6.2.1 损耗受限系统	165
5.1 SDH 概述	103	6.2.2 色散受限系统	166
5.1.1 SDH 产生的技术背景	103	6.2.3 中继距离和传输速率	168
5.1.2 PDH 与 SDH 的比较	106	思考题	170
5.2 SDH 信号的帧结构和复用步骤	107	实训8 光纤通信系统误码性能的测试	170
5.2.1 SDH 信号的 STM-N 帧结构	107	第7章 中兴 ZXMP S320 光端机及其	
5.2.2 SDH 的复用结构和步骤	109	例行维护操作	173
5.2.3 映射、定位和复用的概念	117	7.1 设备结构	173
5.3 开销	118	7.1.1 中兴 SDH 系列设备简介及	
5.3.1 段开销	119	特点	173
5.3.2 通道开销	122	7.1.2 硬件结构	177
5.4 指针	125	7.2 系统总体结构	180
5.4.1 管理单元指针	125	7.2.1 硬件系统	180
5.4.2 支路单元指针	127	7.2.2 系统信号流程	182
5.5 SDH 设备	128	7.2.3 系统工作原理	182
5.5.1 SDH 网络的常见网元	128	7.2.4 ZXMP S320 设备单板	184
5.5.2 SDH 设备的逻辑功能块	130	7.3 SDH 例行维护	185
5.6 SDH 网络结构和网络保护机理	139	7.3.1 维护操作	185
5.6.1 基本的网络拓扑结构	139	7.3.2 故障处理	196
5.6.2 SDH 网络保护	140	思考题	211
5.7 SDH 的网同步	148	实训9 SDH 传输设备结构认识	211
5.7.1 同步方式	148	实训10 SDH 传输设备开局	
5.7.2 主从同步网中从时钟的工作		配置	212
模式	148	实训11 传统 SDH 业务组网配置	214
5.7.3 SDH 网的同步方式	149	实训12 NCP 数据管理	218
5.7.4 S1 字节和 SDH 网时钟保		第8章 光纤通信新技术	220
护倒换原理	150	8.1 MSTP 技术	220
5.8 SDH 管理网	153	8.1.1 MSTP 概述	220
5.8.1 SDH 网元管理层的管理功能	153	8.1.2 MSTP 的功能模型	221
5.8.2 本地维护终端技术要求	155	8.1.3 MSTP 的以太网功能	222
思考题	156	8.1.4 MSTP 的网络定位	225
第6章 光纤通信系统	158	8.2 DWDM 技术	225

8.2.1 概述	225	8.4.1 概述	244
8.2.2 DWDM 系统的基本结构	228	8.4.2 ASON 层面结构	245
8.2.3 DWDM 系统的组网方式	230	8.4.3 ASON 组网方案	246
8.2.4 DWDM 系统的关键技术	233	8.5 全光通信网络	247
8.3 光纤接入技术	237	8.5.1 全光通信网络的基本概念	247
8.3.1 概述	237	8.5.2 全光通信网络的分层结构	247
8.3.2 FTTx 光纤接入	238	8.5.3 全光通信网络的关键技术	249
8.3.3 EPON 技术	240	思考题	251
8.3.4 FTTx(EPON)接入典型应用	243	参考文献	253
8.4 ASON 技术	244		

第1章 概 论

目标：通过本章的学习，应掌握和了解以下内容：

- 了解光纤通信发展史。
- 掌握光纤通信系统的组成。
- 掌握现代光纤通信的主要特点。
- 了解现代光纤通信的发展趋势。

1.1 光纤通信技术简介

光通信，顾名思义就是利用光进行信息传输的一种通信方式。光通信技术是当代通信技术发展的最新成就，已经成为现代通信的基石。目前广泛使用的光通信方式是利用光导纤维传输光波信号，这种通信方式称为光纤通信。光纤通信、卫星通信和无线电通信是现代通信网的三大支柱，而其中光纤通信是主体，这是因为光纤通信本身具有许多突出的发展优势。

1.1.1 光纤通信发展史与现代光纤通信的应用

1. 光纤通信发展史

利用光进行通信并不是一个全新的概念，我国古代使用烽火台报警就是目视光通信的最好例子，欧洲人用旗语传递信息等，都可以看做是原始形式的光通信。

现代光通信的雏形可追溯到 1880 年贝尔(Bell)发明的光电话，他用太阳光作为光源，通过透镜把光束聚焦在送话器前的振动镜片上，使光强度随语音的变化而变化，实现话音对光强度的调制。在接收端，抛物面反射镜把大气传来的光束反射到电池上，硒晶体作为光接收检测器件，使光信号变换为电流，这样就通过大气空间成功地传送了语音信号。由于当时没有理想的光源和传输介质，这种光电话的传输距离很短，并没有实际应用价值，因而发展很慢。然而，光电话仍是一项伟大的发明，它证明了用光波作为载波传送信息的可行性。因此，可以说贝尔光电话是现代光通信的雏形。

灯的发明使人们可能构造简单的光通信系统，并以此作为光源，如船只与船只之间及船只与陆地之间的通信、汽车转向信号、交通指示信号灯等。事实上，任何类型的指示灯都是一个基本的光通信系统。在许多情况下，使用宽谱的荧光发光二极管是可以作为光源的。1960 年，美国人梅曼(Maiman)发明了第一台红宝石激光器，在某种意义上解决了光源的问题，给光通信带来新的希望。与普通光相比，激光具有波谱宽度窄、方向性极好、亮度极高，以及频率和相位较一致的良好特性。激光是一种高度相干光，它的特性和无线电波相似，是一种理想的光载波。继红宝石激光器之后，氦-氖(He-Ne)激光器、二氧化碳(CO₂)激光器先后出现，并投入实际应用。激光器的发明和应用，使沉睡了 80 年的光通信进入一个崭新的阶段。

固体激光器的发明大大提高了发射光功率，延长了传输距离，使大气激光通信可以在江

河两岸、海岛之间和某些特定场合使用。但是大气激光通信的稳定性和可靠性仍然没有解决。用承载信息的光波,通过大气的传播,实现点对点的通信是可行的,但是通信能力和质量受气候影响十分严重。由于雨、雾、雪和大气灰尘的吸收和散射,光波能量衰减很大;另外,大气的密度和温度不均匀,会造成折射率的变化,使光束位置发生偏移。因此,大气激光通信的距离和稳定性都受到极大的限制,不能实现“全天候”通信。

1966年,英籍华裔学者高锟(C. K. Kao)和霍克哈姆(C. A. Hockham)发表了关于传输介质新概念的论文,指出了利用光纤(Optical Fiber)进行信息传输的可能性和技术途径,奠定了现代光通信——光纤通信的基础。当时石英纤维的损耗高达1000dB/km以上,高锟等人指出:这样大的损耗不是石英纤维本身固有的特性,而是由于材料中的杂质,因此有可能通过原材料的提纯制造出适合于长距离通信使用的低损耗光纤。在光纤通信的历史上,高锟博士被誉为“光纤通信之父”。

1970年是光纤通信史上闪光的一年。美国康宁(Corning)公司成功研制出损耗为20dB/km的石英光纤,使光纤通信可以和同轴电缆通信竞争,从而展现了光纤通信美好的前景,促进了世界各国相继投入大量人力物力,把光纤通信的研究开发推向一个新阶段。1972年,康宁公司研制出高纯石英多模光纤,使损耗降低到4dB/km。1973年,美国贝尔(Bell)实验室取得了更大成绩,使光纤损耗降低到2.5dB/km,1974年进一步降低到1.1dB/km。1976年,日本电报电话(NTT)等公司将光纤损耗降低到0.47dB/km(波长为1.2 μm)。

1970年,光纤通信用的光源也取得了实质性的进展。当年,美国贝尔实验室、日本电气公司(NEC)和前苏联先后突破了半导体激光器在低温(-200°C)或脉冲激励条件下工作的限制,研制成功了可在室温下连续振荡的镓铝砷(GaAlAs)双异质结半导体激光器(短波),这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 $7 \times 10^3\text{h}$ 。1977年,贝尔实验室研制的半导体激光器寿命达到10万h(约11.4年),外推寿命达到100万h,完全满足实用化的要求。1976年日本电报电话公司研制成功发射波长为1.3 μm 的铟镓砷磷(InGaAsP)激光器,1979年美国电报电话(AT&T)公司和日本电报电话公司研制成功发射波长为1.55 μm 的连续振荡半导体激光器。

1976年,美国在亚特兰大(Atlanta)进行了世界上第一个实用光纤通信系统的现场试验,系统采用GaAlAs激光器作光源,多模光纤作传输介质,速率为44.7Mbit/s,传输距离约10km。1980年,美国标准化FT-3光纤通信系统投入商业应用,系统采用渐变型多模光纤,速率为44.7Mbit/s。随后美国很快敷设了东西干线和南北干线,穿越22个州,光缆总长达 $5 \times 10^4\text{km}$ 。1976年和1978年,日本先后进行了速率为34Mbit/s、传输距离为64km的突变型多模光纤通信系统,以及速率为100Mbit/s的渐变型多模光纤通信系统的试验,并于1983年敷设了纵贯日本南北的光缆长途干线,全长3400km,初期传输速率为400Mbit/s,后来扩容到1.6Gbit/s。随后,由美、日、英、法发起的第一条横跨大西洋的TAT-8海底光缆通信系统于1988年建成,全长 $6.4 \times 10^3\text{km}$;第一条横跨太平洋的TPC-3/HAW-4海底光缆通信系统于1989年建成,全长 $1.32 \times 10^5\text{km}$ 。从此,海底光缆通信系统的建设得到了全面展开,促进了全球通信网的发展。

自从1966年高锟提出光纤作为传输介质的概念以来,光纤通信从研究到应用,发展非常迅速,技术上不断更新换代,通信能力(传输速率和中继距离)不断提高,应用范围不断扩大。光纤通信的发展可以粗略地分为以下五个阶段:

第一阶段是从基础研究到商业应用的开发时期。从1976年开始,紧随研究与发展的步伐,经过许多现场试验后,1978年,工作于 $0.8\mu\text{m}$ 波长的第一代光波系统正式投入商业应用,实现了短波长($0.85\mu\text{m}$)、低速率(45Mbit/s 或 34Mbit/s)多模光纤通信系统,损耗为 2dB/km 的光纤问世,无中继传输距离约 10km ,最大通信容量约为 $500\text{Mbit}/(\text{s}\cdot\text{km})$ 。与同轴电缆系统相比,光纤通信的中继距离延长,投资和维护费用降低,符合工程和商业运营的追求目标,光纤通信变为现实。

第二阶段是以提高传输速率和增加传输距离为研究目标和大力推广应用的实用化时期。在这个时期,光纤从多模发展到单模,工作波长从短波长($0.85\mu\text{m}$)发展到长波长($1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$),实现了工作波长为 $1.31\mu\text{m}$ 、传输速率为 $140\sim 565\text{Mbit/s}$ 的单模光纤通信,光纤损耗进一步降至 0.5dB/km ($1.31\mu\text{m}$)和 0.2dB/km ($1.55\mu\text{m}$)的水平,无中继传输距离为 $50\sim 100\text{km}$ 。

第三阶段是以超大容量、超长距离为目标,全面深入开展新技术研究的时期。在这个时期,实现了 $1.55\mu\text{m}$ 色散位移单模光纤通信。这种光纤通信系统采用外调制技术,传输速率可达 $2.5\sim 10\text{Gbit/s}$,无中继传输距离可达 $100\sim 150\text{km}$ 。实验室可以达到更高水平。

第四阶段的光纤通信系统是以采用光放大器增加中继距离,并采用波分复用技术来增加比特率和中继距离为特征,由于这种系统有时采用零差或外差方案,故又称为相干光波通信系统。这一阶段的光纤通信系统中,光纤损耗用光纤放大器(EDFA)补偿,补偿后可传输数千千米。在一次试验中利用星形耦合器实现100路 622Gbit/s 数据复用,传输距离为 50km ,其信道间串音可以忽略;在另一试验中,单信道速率为 2.5Gbit/s ,不用再生器,光纤损耗用EDFA补偿,放大器间距为 80km ,传输距离达 2223km 。光波系统采用相干检测技术并不是使用EDFA的先决条件。有的实验室曾使用循环回路实现了 2.4Gbit/s 、 $2.1\times 10^4\text{km}$ 和 5Gbit/s 、 $1.4\times 10^4\text{km}$ 数据传输。光纤放大器的问世,引起了光纤通信领域的重大变革。

第五阶段,光纤通信系统基于非线性压缩抵消光纤色散展宽,实现光脉冲信号的保形传输,即所谓的光孤子通信。这一阶段经历了20多年,已取得了突破性进展。虽然这种基本思想1973年就已经提出,但直到1988年才由贝尔实验室采用受激拉曼散射损耗补偿光纤损耗,将数据传输了 $4\times 10^3\text{km}$,次年又将传输距离延长到 $6\times 10^3\text{km}$ 。EDFA用于光孤子放大始于1989年,它在工程实际中有更大的优点,自此,国际上一些著名实验室纷纷开始验证光孤子通信作为高速长距离通信的巨大潜力。1990~1992年,美国与英国的实验室采用循环回路曾将 2.5Gbit/s 与 5Gbit/s 的数据传输了 $1\times 10^4\text{km}$ 以上;日本的实验室将 10Gbit/s 的数据传输了 $1\times 10^6\text{km}$ 。1995年,法国的实验室则将 20Gbit/s 的数据传输了 $1\times 10^6\text{km}$,中继距离达到 140km 。1995年英国的实验室则将 20Gbit/s 的数据传输了 8100km , 40Gbit/s 的数据传输了 5000km 。线性光孤子系统的现场试验也在日本东京周围的城域网中进行,分别将 10Gbit/s 与 20Gbit/s 的数据传输了 $2.5\times 10^3\text{km}$ 与 $1\times 10^3\text{km}$ 。1994年和1995年将 80Gbit/s 和 160Gbit/s 的高速数据也分别传输了 500km 和 200km 。

2. 现代光纤通信的应用

光纤可以传输数字信号,也可以传输模拟信号。现在世界通信业务的90%需要经光纤传输。随着光纤通信技术的发展,世界上许多国家都将光纤通信系统引入了公用电信网、中继网和接入网中。

光纤宽带干线传送网和接入网发展迅速,是当前研究开发应用的主要目标。光纤通信的

各种应用可概括如下:

(1) 通信网 光纤通信在通信网中应用广泛,已成为现代通信中的主流方式。

1) 全球通信网。由于光纤通信系统的中继距离可以很长,所以能够设计跨越海洋的水下光纤线路,如横跨大西洋和太平洋的海底光缆、跨越欧亚大陆的洲际光缆干线。第一个横跨大西洋的光纤通信系统(TAT-8)于1988年底开通运行,这是在第一个同轴铜线电缆电话系统(TAT-1)开通32年以后实现的。TAT-8光纤通信系统跨越了美国东海岸和欧洲之间约 6×10^3 km的距离,可以提供的总体容量接近40000个话音信道,显现出光纤通信在容量上的优越性。与同轴线相比,光缆的重量轻得多,便于运输和敷设。而且,如果采用更低损耗的光纤和光放大器可以减少或消除对中继器的需求。目前,所有的大洋和世界上绝大部分的海洋中都有光缆,形成了高速的通信桥梁。

2) 各国的公共电信网。光缆具有尺寸小和信息容量大的优点,因此成为现阶段传统铜绞线电缆的最佳替代品。我国的国家一级干线、各省二级干线和县以下的支线都基本光纤化。

3) 各种专用通信网。电力、铁道、国防等部门用于通信、指挥、调度、监控的光纤系统主要是应用光纤抗电磁干扰,实时传输和接收视频信号。

4) 特殊通信。光纤具有极强的抗腐蚀能力,在石油、化工、煤矿等部门的易燃易爆环境下使用光缆,具有更高的安全性。

5) 飞机、军舰、潜艇、导弹和宇宙飞船内部使用光纤通信系统,是利用了光纤重量轻、体积小、抗电磁干扰和无信号辐射的特性。

(2) 构成因特网的计算机局域网和广域网 光纤通信系统特别适合于传输数字形态的数据,中央处理器(CPU)和外围设备之间、CPU与存储器之间及多个CPU之间的互联都可以用光纤实现。局域网和广域网光纤的传输速率已经增加到了100Mbit/s和1Gbit/s,并且可以提供局域网之间的高速连接。对于各种不同网络拓扑的局域网和广域网都可以使用光纤传输。

(3) 有线电视网的干线和分配网、工业电视系统 卫星地球站、微波线路、天线接收的电视广播和自制电视节目等这些信号都可以通过光纤与分配中心相连,光纤可以直接接到用户末端线路的视频分配网络中。可以用光缆中互相隔离的多根光纤实现或者通过频分复用方式在一根光纤中实现多个电视频道同时传送。光纤通信网络还可以应用到工厂、银行、商场、交通和公安部门的监控、自动控制系统的数据传输中。

(4) 综合业务光纤接入网 光纤接入网分为有源接入网和无源接入网,可实现电话、数据、视频(会议电视、可视电话等)及多媒体业务综合接入核心网,提供各种各样的社区服务。

(5) 光纤传感器 严格地讲,光纤传感器不属于通信范畴。但是,光纤传感器是光纤光学一个极为重要的应用领域。光纤传感器已经成功地应用于温度测量、压力测量、旋转及平动位置测量,以及液体深度测量等领域。对于一些传感器,光纤具有双重功能:一是传感器本身取决于光纤的一些敏感特性;二是收集信息并通过光纤传送到信息输出端。

光纤这种奇特媒质的真正应用还仅仅是在现有电信网络内用光纤代替铜线,使通信网的性能得到了某种改善,减低了成本,而网络的拓扑基本上还是光纤通信出现之前的模式,光纤通信的潜能尚未完全发挥,在目前的通信网中光纤通信技术应用尚属于一种经典应用。在

全世界范围内掀起全光通信网的潮流下, 光纤系统不仅仅用于传输信号, 交换、复用、控制与路由选择等也全部在光域完成, 由此构建真正的光纤通信网。

1.1.2 光纤通信系统的基本构成与分类

1. 光纤通信系统的基本构成

光纤通信系统的基本组成如图 1-1 所示, 主要包括发射、接收和作为广义信道的基本光纤传输系统三大部分。

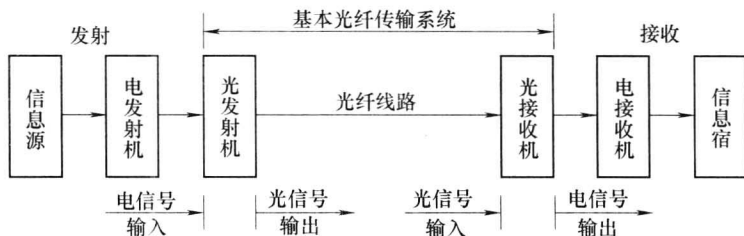


图 1-1 光纤通信系统的基本组成

(1) 发射部分 此部分中, 信息源把用户信息转换为原始电信号, 这种信号称为基带信号。电发射机把基带信号转换为适合信道传输的信号, 这个转换如果需要调制, 则其输出信号称为已调信号。为提高传输质量, 通常把这种模拟基带信号转换为频率调制(FM)、脉冲频率调制(PFM)或脉冲宽度调制(PWM)信号, 最后把这种已调信号输入光发射机。

不管是数字系统还是模拟系统, 输入到光发射机带有信息的电信号, 都通过调制转换为光信号。

(2) 接收部分 光载波经过光纤线路传输到接收端, 再由光接收机把光信号转换为电信号。电接收机的功能和电发射机的功能相反, 它把接收的电信号转换为基带信号, 最后由信息宿恢复用户信息。

在整个通信系统中, 在光发射机之前和光接收机之后的电信号段, 光纤通信所用的技术和设备与电缆通信相同, 不同的只是由光发射机、光纤线路和光接收机所组成的基本光纤传输系统代替了电缆传输。

(3) 基本光纤传输系统 基本光纤传输系统根据图 1-1 可以细分为 3 个部分, 即光发射机部分、光纤线路部分和光接收机部分。

光发射机的功能是把发射部分输入的电信号转换为光信号, 并用耦合技术把光信号最大限度地注入光纤线路。光发射机的核心设备是光源, 还有驱动器和调制器。光发射机的性能基本上取决于光源的特性, 对光源的要求是输出光功率足够大、调制频率足够高、谱线宽度和光束发散角尽可能小、输出功率和波长稳定、器件寿命长。目前广泛使用的光源有半导体发光二极管(LED)和半导体激光二极管(或称激光器, LD), 以及谱线宽度很小的动态单纵模分布反馈(DFB)激光器, 有些场合也使用固体激光器。

光纤线路的功能是把来自光发射机的光信号, 以尽可能小的畸变(失真)和衰减传输到光接收机。光纤线路由光纤、光纤接头和光纤连接器组成。光纤是光纤线路的主体, 接头和连接器是不可缺少的器件。实际工程中使用的是容纳许多根光纤的光缆。

光纤通信系统波长在近红外波长, 光纤通信的传输媒质材料是石英, 它属于介质波导,

是一个圆柱体,由光纤和包层组成。光纤折射率为 n_1 ,包层的折射率为 n_2 ,且 $n_1 > n_2$ 。当满足全反射条件时,就可将光限制在纤芯中传播。光纤的主要特性是损耗和色散。损耗用衰减系数表示,其单位为 dB/km。光纤有三个低损耗窗口,波长为

$$\lambda_0 = 0.85 \mu\text{m} \text{ (短波波段)}$$

$$\lambda_0 = 1.31 \mu\text{m} \text{ (长波波段)}$$

$$\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m} \text{ (长波波段)}$$

光纤的色散是指由于在光纤中不同频率成分和不同模式成分的光信号的传输速率不同而使光脉冲展宽的现象。色散用色散系数表示,其单位为 ps/(km · nm)。信号的散开,即色散的存在影响传输带宽,进而影响光纤的传输容量和传输距离。

光接收机的功能是把从光纤线路输出、产生畸变和衰减的微弱光信号转换为电信号,并经放大和处理后恢复成发射前的电信号。光接收机由光检测器、放大器和相关电路组成,光检测器是光接收机的核心。对光检测器的要求是响应度高、噪声低和响应速度快。目前广泛使用的光检测器有两种类型:在半导体 PN 结中加入本征层的 PIN 光敏二极管(PIN-PD)和雪崩光敏二极管(APD)。

光接收机最重要的特性参数是灵敏度。灵敏度是衡量光接收机质量的综合指标,它反映接收机调整到最佳状态时,接收微弱光信号的能力。灵敏度主要取决于组成光接收机的光敏二极管和放大器的噪声,并受传输速率、光发射机的参数和光纤线路的色散的影响,还与系统要求的误码率或信噪比有密切关系。所以灵敏度也是反映光纤通信系统质量的重要指标。

2. 光纤通信系统的分类

光纤通信系统的分类有多种,一般情况下常按照以下几种方式进行分类:

(1) 按照所传输信号的类型划分 可以分为光纤模拟通信系统和光纤数字通信系统。

光纤数字通信系统比光纤模拟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。光纤数字通信系统的优点如下:

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放大,不能改善因传输而劣化的信噪比。光纤数字通信系统采用二进制信号,信息不包含在脉冲波形中,而由脉冲的“有”和“无”表示。因此,一般噪声不影响传输质量,只有在抽样和判决过程中,当噪声超过一定阈值时,才会产生误码。

2) 可以用再生中继,传输距离长。光纤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积累,恢复原信号,延长传输距离。

3) 适用各种业务的传输,灵活性大。光纤数字通信系统中,话音、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。

4) 容易实现高强度的保密通信。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。只要精心设计加密方案和密钥序列并经常更换密钥,便可达到很高的保密度。

5) 光纤数字通信系统大量采用数字电路,易于集成,从而容易实现小型化、微型化,增强设备可靠性,有利于降低成本。

光纤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,设备复杂,成本相对较高。

光纤模拟通信系统除占用带宽较窄外,还有电路简单,无需 A/D、D/A 转换,价格便宜等优点。光纤模拟通信系统主要应用于短距离通信,光纤数字通信系统主要应用于长距离

通信。

(2) 按照光波长和光纤类型划分 可以分为短波多模光纤通信系统和长波长光纤通信系统。

短波长多模光纤通信系统的工作波长一般在 $0.85\mu\text{m}$ 左右, 通信速率为 34Mbit/s 以下, 中继距离为 10km 以内。

长波长光纤通信系统又可以细分为以下三种类型:

1) $1.31\mu\text{m}$ 多模光纤通信系统: 工作波长在 $1.31\mu\text{m}$ 左右, 通信速率为 34Mbit/s 及 140Mbit/s , 中继距离为 20km 左右。

2) $1.31\mu\text{m}$ 单模光纤通信系统: 工作波长在 $1.31\mu\text{m}$ 左右, 通信速率为 140Mbit/s 及 565Mbit/s , 中继距离为 $30 \sim 50\text{km}$ (140Mbit/s)。

3) $1.55\mu\text{m}$ 单模光纤通信系统: 工作波长在 $1.55\mu\text{m}$ 左右, 通信速率为 565Mbit/s 以上, 中继距离为 70km 左右。

(3) 按照数字复用方式划分 可以分为准同步数字序列(PDH)系统和同步数字序列(SDH)系统。

光纤大容量数字传输目前都采用同步时分复用(TDM)技术, 复用又分为若干等级, 因而先后有两种传输体制: 准同步数字序列(PDH)系统和同步数字序列(SDH)系统。

PDH 系统各次群比特率相对于其标准值有一个规定的容差, 而且是异源的, 通常采用正码速调整方法实现准同步复用。传输速率一般在 565Mbit/s 以下。

SDH 系统不仅适合于点对点传输, 而且适合于多点之间的网络传输。目前实用的 SDH 系列系统其单波长通信速率可达 2.5Gbit/s 和 10Gbit/s 。

(4) 按照传输速率划分 可以分为以下三种:

1) 低速光纤通信系统: 该类型的光纤通信系统的传输速率为 2Mbit/s 、 8Mbit/s 。

2) 中速光纤通信系统: 该类型的光纤通信系统的传输速率为 34Mbit/s 、 140Mbit/s 。

3) 高速光纤通信系统: 该类型的光纤通信系统的传输速率高于 565Mbit/s 。

(5) 按照调制方式划分 可分为以下两种:

1) 直接强度调制光纤通信系统: 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, 又称为内调制光纤通信系统。这种系统的设备较简单、价格较低、调制效率较高。但会使光谱有所增宽, 影响速率的提高。

2) 间接调制光纤通信系统: 在光源发出光之后, 在光的输出通路上加调制器进行调制, 又称为外调制光纤通信系统。这种系统对光源谱线影响小, 适合高速率的通信。

1.2 现代光纤通信的主要特点与发展趋势

1.2.1 现代光纤通信的主要特点

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, 光纤通信具有许多特点:

1) 容许频带很宽、传输容量很大。目前使用的光波频率比微波高 $10^3 \sim 10^4$ 倍, 通信容

量可增加 $10^3 \sim 10^4$ 倍。理论上,两根光纤可传送上百万个电话和上百套电视节目。

2) 损耗很小、中继距离很长且误码率很小。石英光纤在 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长的传输损耗分别为 0.50dB/km 和 0.20dB/km ,甚至更低。因此,光纤比同轴电缆或波导管的中继距离长得多。波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的色散位移单模光纤通信系统,若其传输速率为 2.5Gbit/s ,则中继距离可达 150km ;若其传输速率为 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,传输的误码率极低(10^{-9} ,甚至更小)。传输容量大、传输误码率低、中继距离长的优点,使光纤通信系统不仅适合于长途干线网而且适合于接入网的使用,这也是光纤通信系统每公里话路的系统造价较低的主要原因。

3) 重量轻、体积小。光纤重量很轻、直径很小,即使做成光缆,在芯数相同的条件下,其重量还是比电缆轻得多,体积也小得多。

4) 抗电磁干扰性能好,无“串话”。光纤是非金属的光导纤维,即使工作在强电磁场附近或处于核爆炸后强大的电磁干扰的环境中,光纤也不会产生感应电压、电流,有利于传递动态图像(如可视电话和电视节目);靠近高压输电线和与电气化铁道并行铺设,通信也不受干扰,适于工厂内部的自动控制和监视系统应用,也有利于在多雷地区、飞机上以及保密性要求高的军政单位使用。由于光纤通信限制在光纤内传输,不会溢出光纤,所以光缆的光纤之间不会“串话”,即没有纤间串扰,不易被窃听。

5) 资源丰富、节约有色金属和资源、经济效益好。光纤的纤芯和包层的主要原料是二氧化硅,在自然界中资源丰富且价格便宜,取之不尽。而电缆所需的铜、铝矿产资源则是有限的,采用光纤后可节省大量的铜材。制造 $1 \times 10^4\text{km}$ 单管同轴铜线约消耗能源 $2.64 \times 10^{11}\text{J}$,折合标准煤为 $9 \times 10^5\text{kg}$ 。由于光纤通信的容量大、中继距离长、节约有色金属和铺设方便等优点,因此其经济效益十分显著。

6) 抗腐蚀、不怕潮湿。即使光纤的外保护层有小孔、裂缝而进水或受潮,也不会影响光的传递,但进水和受潮对金属导线意味着接地和短路。光纤通信系统也不存在产生火花的危险,安全性好。

1.2.2 现代光纤通信的发展趋势

近年来,光纤通信技术发展迅速,已经成为通信领域一个耀眼的亮点。光纤通信以频带宽、容量大、不受电磁干扰、成本低等独特的优点迅速成为各种通信网络的主要传输方式。光纤通信未来的发展仍具有巨大的潜能。

1. 网络化、大容量与高速化

我国光纤通信主要干线已经建成,光纤通信容量达到 $\text{Tbit}/(\text{s} \cdot \text{km})$ 的水平,几乎用不完。在 20 世纪 80 年代中期,数字光纤通信的速率已达到 144Mbit/s ,可传送 1980 路电话,超过同轴电缆载波。于是,光纤通信作为主流被大量采用,在传输干线上全面取代电缆。随着波分复用技术的发展,目前的实用水平已达 $40 \times 10\text{Gbit/s}$ 。实验室水平远远超出这一水平,已经完成 $80 \times 40\text{Gbit/s}$ 的传输实验。WDM(波分复用)技术的发展方兴未艾,据估计 $160 \times 40\text{Gbit/s}$ 的商用技术在不久的将来也将成为现实。

2. 长波化

石英光纤的最低损耗值已经接近理论值,要实现长距离通信,就需要寻求新的光纤材料。通常,把 $2\mu\text{m}$ 以上具有极低损耗的光纤称为超长波长光纤(或红外光纤),这种光纤构

成的系统称为超长波长光纤通信系统。

3. 传递业务的 IP 化

近年来,随着因特网的迅猛发展,IP 业务呈现爆炸式增长。有预测表明,IP 将承载包括语音、图像、数据等在内的多种业务,构成未来信息网络的基础。同时以 WDM 为核心、以智能化光网络(ION)为目标的光传送网进一步将控制信令引入光层,满足了未来网络对多粒度信息交换的需求,提高了资源利用率和组网应用的灵活性,因此如何构建能够有效支持 IP 业务的下一代光网络已成为人们广泛关注的热点之一。

与传统的业务相比,IP 业务具有显著的自相似性、收发数据不对称性和服务器拥塞等特点,因此对承载的光网络而言,下一步面临的主要问题不仅仅是要求超大容量和宽带接入等明显需求,还需要光层能够提供更高的智能性和在光节点上实现光交换,其目的是通过光层和 IP 层的适配与融合,建立一个经济高效、灵活扩展和支持业务 QoS 等的光网络,满足 IP 业务对信息传输与交换系统的要求。

智能化光网络吸取了 IP 网络的智能化特点,在现有的光传送网上增加了一层控制平面,这层控制平面不仅能用来为用户建立连接、提供服务和对底层网络进行控制,而且具有高可靠性、可扩展性和高有效性等突出特点,并支持不同的技术方案和不同的业务需求,代表了下一代光网络建设的发展方向。

因此,在 IP 业务高速增长产生的带宽需求和 WDM 传输技术提供超大容量带宽资源的双重刺激下,传统光网络朝着适合于传输 IP 业务的新一代光网络演进已势在必行。不仅如此,由于在全球范围内通信产业及其相关领域都正面临着全方位的残酷竞争,各大电信巨头和通信设备厂商无不把面向互联网业务的更灵活、更可靠和成本更低的下一代光网络的研究和创新提升到战略发展的高度,国内外著名大学和科研机构对光通信的研究也集中在下一代光网络及其关键支撑技术的研究上,传统光通信网络向下一代光网络演进的步伐正在加速,期望能为 IP 互联网提供更加高速、宽带、灵活、高效和智能的新一代光网络。

4. 全光化

传统的光网络实现了节点间的全光化,但在网络节点处仍用电子元器件,限制了目前通信网干线总容量的提高,因此真正的全光网络成为非常重要的课题。全光网络以光节点代替电节点,节点之间也是全光化,信息始终以光的形式进行传输与交换,交换机对用户信息的处理不再按比特进行,而是根据其波长来决定路由。全光网络具有良好的透明性、开放性、兼容性、可靠性、可扩展性,并能提供巨大的带宽、超大容量、极高的处理速度、较低的误码率,网络结构简单,组网非常灵活,可以随时增加新节点而不必安装信号的交换和处理设备。当然,全光网络的发展并不可能独立于众多通信技术,它必须要与因特网、ATM(自动柜员机)网络、移动通信网等相融合。目前全光网络的发展仍处于初期阶段,但已显示出良好的发展前景。从发展趋势上看,形成一个真正的、以 WDM 技术与光交换技术为主的光网络层,建立纯粹的全光网络,消除电光瓶颈已成未来光通信发展的必然趋势,更是未来信息网络的核心,也是通信技术发展的最高级别,更是理想级别。

5. 器件集成化

光电子器件和集成光电子器件需要大力发展,因为光纤通信技术的发展,依赖光电子器件的进步。

由于网络的速率不断提高,目前单波长电子速率为 40Gbit/s 的光通信系统已经商用,

速率为 160Gbit/s 的电子系统在实验室开发。因此,光电子器件要与之相适应,包括高速调制激光器等都需要开发。实现 ROADM(可重构型光分插复用设备)需要发展波长可调的光滤波器、波长可调的激光器和光开关等,其中有许多可创新的空间。

把许多分立的光电子器件集成在一起就成为集成光电子器件,其优点是功能丰富、体积小、速度高、可靠性高。目前已经有小规模集成光电子器件,需要开发更大规模的集成光电子器件。集成光电子器件的工艺有单片集成和混合集成两种。混合集成可降低难度,提高成品率。混合集成的关键技术是平面光波导线路 Planar Lightwave Circuit, PLC, 它是一块具有光波导的印制电路板,可把分立的光电子器件安装在上面。目前商用的集成光电子器件有 8 波长激光器模块、100 波长以上的 AWG 光滤波器、AWG + 光衰减器和 32×32 光开关等。目前集成光电子器件的发展处于初级阶段,我国应加强这一个领域的探索和研究。

小 结

1) 本章回顾了光纤通信发展的历史,并介绍了光纤通信的 6 大特点及主要应用的领域。光纤通信正向着网络化、大容量与高速化、长波化、传递业务的 IP 化、全光化、器件集成化方向发展。

2) 光纤通信系统主要由发射、接收和基本光纤传输系统三大部分组成,其中最主要的设备是光源、光检测器。光源是光发射机的核心,它将电信号转化为光信号;光检测器是光接收机的主要设备,它将光信号转化为电信号,完成与光源相反的功能。光纤线路是光信号进行传输的通道。

3) 根据光纤通信系统的特点,可以将光纤通信系统按照传输信号类型、光波长和光纤类型、数字复用方式、传输速率和调制方式进行分类。

思 考 题

- 1) 光纤通信发展的过程中,有哪些起到重要作用的人物和产生深远影响的技术理论?
- 2) 光纤通信系统由哪些部分组成?
- 3) 光纤通信的特点有哪些?