



高职高专通信专业规划教材

光传输技术与实训

GUANGCHUANSHU
JISHU YU SHIXUN

曹若云 主 编



化学工业出版社

高职高专通信专业规划教材

光传输技术与实训

曹若云 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书首先简要介绍光纤通信系统的组成、特点等基础知识,然后重点介绍 SDH 传输技术,包括 SDH 的基本概念、速率与帧结构、SDH 映射原理与同步复用、SDH 传送网、SDH 自愈网、SDH 网同步以及 SDH 网络传输性能等内容。在此基础上介绍了典型的 SDH 设备[华为 Optix 155/622 (H)]的硬件结构及其功能,并介绍了常用的 SDH 设备管理软件,包括 T2000 和 Ebridge 软件。

全书的关键一章实训环节设计了 7 个实训项目,包括光接口参数测试、HDB3 波形观察、点对点组网配置、链形组网配置、环形组网配置、环带链组网配置、以太网 ET1 组网配置和 T2000 网络管理等,各校可根据自身的实训条件选做或全做其中的内容。

本书适合作为高职高专通信专业学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

光传输技术与实训 / 曹若云主编. —北京:化学工业出版社, 2010.8

高职高专通信专业规划教材

ISBN 978-7-122-08898-7

I. 光… II. 曹… III. 光通信-高等学校:技术学院-教材 IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 116590 号

责任编辑:刘 哲

装帧设计:王晓宇

责任校对:宋 夏

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 11 字数 270 千字 2010 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:22.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

光纤通信作为现代通信的一种主要传输方式,已成为信息高速公路建设的基础,对于现代信息社会具有至关重要的作用。为适应现代通信网向数字化、综合化、智能化和个人化方向的发展,基于时分多路复用的同步数字体系(SDH)已逐步取代了准同步数字体系(PDH),成为目前传送网的主流传送平台。随着近年来 SDH 光纤通信系统的广泛应用,需要大批懂得 SDH 传输设备维护、管理和设计的专业技术人员。

为适应社会对光传输技术人才的需求,并结合高职高专的教学要求和学生的学习特点,本书除了介绍相关的理论知识外,更注重实训技能操作。全书通俗易懂,深入浅出,循序渐进,并特别注意以直观形象的图表形式来配合文字的叙述,力求做到图文并茂。

本书共 6 章,内容安排如下:第 1 章介绍光纤通信的发展历程、特点与应用,以及光纤通信系统的基本组成;第 2 章介绍 SDH 的基本概念、速率和帧结构、映射原理与同步复用以及开销;第 3 章介绍 SDH 网络技术,包括 SDH 网元、传送网的基本概念、自愈网、网同步和网络传输性能;第 4 章介绍华为 Optix 155/622H 和 Optix 155/622 两种典型 SDH 传输设备的性能特点和硬件结构;第 5 章简单介绍了 T2000 网络管理软件的特点,侧重于介绍 Ebridge 软件的使用方法以及命令行的书写格式;第 6 章是光传输设备实训,包括光接口参数测试、HDB3 码波形观察、点对点组网配置、链形组网配置、环形组网配置、以太网 ET1 配置和 T2000 网络管理等 7 个实训项目。

本书由曹若云任主编,并编写第 5 章和第 6 章;李继祥编写第 2 章和第 4 章;伍杰明编写第 1 章和第 3 章。广州大学唐冬教授(中国电子学会高级会员、硕士生导师)在百忙中抽出时间审阅了全书。另外本书在编写过程中还得到了深圳市讯方通信技术有限公司多位工程师的指导和帮助。在此一并表示最诚挚的谢意!

由于通信技术发展很快,编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2010 年 4 月于顺德

目 录

CONTENTS

第 1 章 光纤通信系统	1
1.1 光纤通信的概念	1
1.2 光纤通信的发展历程	1
1.2.1 光纤通信的发展简史	1
1.2.2 光纤通信的发展现状	2
1.2.3 光纤通信的发展趋势	2
1.3 光纤通信的特点与应用	4
1.3.1 光纤通信的特点	4
1.3.2 光纤通信的应用	5
1.4 光纤通信系统的基本组成	5
1.4.1 概述	5
1.4.2 光纤和光缆	6
1.4.3 通信用光器件	17
1.4.4 光发射机	27
1.4.5 光接收机	27
思考与练习题	28
第 2 章 SDH 传输技术	29
2.1 SDH 的基本概念和特点	29
2.1.1 SDH 产生的技术背景	29
2.1.2 SDH 的基本概念	30
2.1.3 SDH 的优势和缺陷	31
2.2 映射原理与同步复用	32
2.2.1 SDH 的速率	32
2.2.2 SDH 的帧结构	32
2.2.3 基本映射复用结构	33
2.2.4 基本映射复用方式	36
2.2.5 映射复用步骤	37
2.3 开销	42
2.3.1 段开销	42
2.3.2 通道开销	44
2.4 指针	47
2.4.1 AU-4 指针	47
2.4.2 TU-12 指针	49
思考与练习题	49

第3章 SDH 网络技术	51
3.1 SDH 网元	51
3.2 SDH 传送网	53
3.2.1 传送网的基本概念	53
3.2.2 分层和分割	53
3.2.3 基本拓扑结构	55
3.3 SDH 自愈网	56
3.3.1 自愈网的概念	56
3.3.2 线路保护倒换	56
3.3.3 自愈环保护	58
3.4 SDH 网同步	65
3.4.1 网同步的工作方式	65
3.4.2 SDH 网同步原则和同步方式	66
3.5 SDH 网络传输性能	70
3.5.1 误码性能	70
3.5.2 抖动性能	72
3.5.3 漂移性能	73
思考与练习题	73
第4章 典型 SDH 设备硬件结构	74
4.1 OptiX 155/622H 设备	74
4.1.1 性能特点	75
4.1.2 设备结构	77
4.1.3 单板	78
4.2 OptiX 155/622 设备	89
4.2.1 性能特点	89
4.2.2 设备结构	91
4.2.3 单板	93
思考与练习题	111
第5章 SDH 设备管理软件简介	112
5.1 T2000 管理软件	112
5.1.1 T2000 管理软件的特点	112
5.1.2 T2000 网管软件的不足	113
5.2 Ebridge 软件和命令行	114
5.2.1 Ebridge 软件简介	114
5.2.2 命令行格式	119
5.2.3 OptiX 155/622H 系统配置用命令行书写规范	120
5.2.4 OptiX 155/622 系统配置用命令行书写规范	123
第6章 SDH 设备实训	126
6.1 光接口参数测试	127
6.1.1 实训要求	127

6.1.2	实训目的	127
6.1.3	实训器材	128
6.1.4	实训指导	128
6.2	HDB3 码波形观察	129
6.2.1	实训要求	129
6.2.2	实训目的	129
6.2.3	实训器材	129
6.2.4	实训指导	129
6.3	点对点组网配置	130
6.3.1	实训要求	130
6.3.2	实训目的	130
6.3.3	实训器材	130
6.3.4	实训指导	130
6.4	链形组网配置	133
6.4.1	实训要求	133
6.4.2	实训目的	133
6.4.3	实训器材	133
6.4.4	实训指导	133
6.5	环形组网配置	136
6.5.1	实训要求	136
6.5.2	实训目的	136
6.5.3	实训器材	136
6.5.4	实训指导	136
6.6	以太网 ET1 配置	139
6.6.1	预备知识	139
6.6.2	实训要求	143
6.6.3	实训目的	143
6.6.4	实训器材	143
6.6.5	实训指导	143
6.7	T2000 网络管理 (选做)	149
6.7.1	实训要求	149
6.7.2	实训目的	149
6.7.3	实训器材	149
6.7.4	实训指导	149
附录 中英文缩略语		166
参考文献		169

第1章

光纤通信系统

[学习目标]

1. 掌握光纤通信的概念。
2. 了解光纤通信的发展历程、特点与应用现状。
3. 掌握光纤通信系统的基本组成, 以及各组成部分的功能和特征。

1.1 光纤通信的概念

光纤通信是以光波为信息载体, 以光纤为传输媒质的一种通信方式。光纤通信作为现代通信的一种主要传输方式, 在现代电信网中起着举足轻重的作用。

1.2 光纤通信的发展历程

1.2.1 光纤通信的发展简史

随着社会的不断进步, 通信向大容量、长距离方向发展成为必然的趋势。光波具有极高的频率 (大约 10^{14}Hz), 也就是说具有极高的带宽, 从而可以承载容量巨大的信息, 因此用光波作为载体来进行通信是人们几百年来一直追求的目标。

(1) 光纤通信的里程碑

1966 年 7 月, 英籍华裔学者高锟博士在 Proc. IEE 杂志上发表了一篇十分著名的论文《用于光频的光纤表面波导》。这篇论文从理论上证明了用光纤作为传输媒质以实现光通信的可能性, 设计了通信用光纤的波导结构, 更重要的是科学地预言了制造通信用低损耗光纤的可能性, 即通过加强原材料提纯、加入适当的掺杂剂, 可把光纤的衰减系数降低到 20dB/km 以下。而当时世界上只能制造用于工业、医学方面的光纤, 其衰减系数在 1000dB/km 以上。制造衰减系数在 20dB/km 以下的光纤, 在当时被认为是一件可望而不可及的事情。

后来的事实发展雄辩地证明了高锟博士论文的理论和大胆预言的正确性, 所以该文被誉为光纤通信的里程碑。高锟博士亦因此被称为“光纤之父”, 并荣获 2009 年诺贝尔物理学奖。

(2) 导火线

1970 年美国康宁公司根据高锟论文的设想, 用改进型化学汽相沉积法 (MCVD 法) 制造出当时世界上第一根超低损耗光纤, 成为光纤通信爆炸性发展的导火线。

虽然当时康宁公司制造出的光纤只有几米长, 衰减系数约 20dB/km , 但它毕竟证明了用当时的科学技术与工艺方法制造通信用超低损耗光纤的可能性, 也就是说找到了实现低损耗传输光波的理想媒体, 这是光纤通信的重大实质性突破。

(3) 爆炸性发展

自 1970 年以后,世界各发达国家对光纤通信的研究倾注了大量的人力和物力,从而使光纤通信技术取得了极其惊人的进展。

① 光纤损耗 1970 年: 20dB/km; 1972 年: 4dB/km; 1974 年: 1.1dB/km; 1976 年: 0.5dB/km; 1979 年: 0.2dB/km; 1990 年: 0.14dB/km, 它已经接近石英光纤的理论损耗极限值 0.1dB/km。

② 光器件 1970 年,美国贝尔实验室研制出世界上第一只在室温下连续工作的砷化镓铝半导体激光器,为光纤通信找到了合适的光源器件。后来逐渐发展到性能更好、寿命达几万小时的异质结条形激光器和现在的寿命达几十万小时的分布反馈式单纵模激光器(DFB)以及多量子阱激光器(MQW)。光接收器件也从简单的硅光电二极管发展到量子效率达 90% 以上的 III-V 族雪崩光电二极管 APD。

③ 光纤通信系统 正是光纤制造技术和光器件制造技术的飞速发展,以及大规模、超大规模集成电路技术和微处理器技术的发展,带动了光纤通信系统从小容量到大容量、从短距离到长距离、从旧体制(PDH)到新体制(SDH)的迅猛发展。

1976 年,美国在亚特兰大开通了世界上第一个实用化光纤通信系统,码速率仅为 45Mbit/s,中继距离为 10km。1985 年,140Mbit/s 多模光纤通信系统实现商用化,并开始单模光纤通信系统的现场试验工作。1990 年,565Mbit/s 单模光纤通信系统迅速进入商用化阶段,开始进行零色散移位光纤、波分复用及相干光通信的现场试验,并陆续制订了同步数字体系(SDH)的技术标准。1993 年,622Mbit/s 的 SDH 产品进入商用化。1995 年,2.5Gbit/s 的 SDH 产品进入商用化。1998 年,10Gbit/s 的 SDH 产品进入商用化,同年,以 2.5Gbit/s 为基群、总容量为 20Gbit/s 和 40Gbit/s 的密集波分复用系统 DWDM 进入商用化。2000 年,以 10Gbit/s 为基群、总容量为 320Gbit/s 的 DWDM 系统进入商用化。

此外,在智能光网络、光分插复用器、光交叉连接设备等方面也正在取得巨大进展。

1.2.2 光纤通信的发展现状

1976 年在美国亚特兰大进行的现场试验,标志着光纤通信从基础研究发展到了商业应用的新阶段。此后,光纤通信技术不断创新: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 $1.55\mu\text{m}$,传输速率从几十 Mbit/s 发展到几十 Gbit/s。另一方面,随着技术的进步和大规模产业的形成,光纤价格不断下降,应用范围不断扩大:从初期的市话局间中继到长途干线,进一步延伸到用户接入网,从数字电话到有线电视(CATV),从单一类型信息的传输到多种业务的传输。目前光纤已成为信息宽带传输的主要媒质,光纤通信系统将成为未来国家信息基础设施的支柱。总之,从 1970 年到现在虽然只有短短 30 多年的时间,但光纤通信技术却取得了极其惊人的进展。用带宽极宽的光波作为传送信息的载体以实现通信,这一几百年来人们梦寐以求的幻想在今天已成为活生生的现实。然而就目前的光纤通信而言,其实际应用仅是其潜在能力的 2% 左右,尚有巨大的潜力等待人们去开发利用。因此,光纤通信技术并未停滞不前,而是向更高水平、更高阶段方向发展。

1.2.3 光纤通信的发展趋势

光纤通信以它独特的优点被认为是通信史上一次革命性的变革,促进了信息的流通和交换。光纤通信作为一门新学科来讲,其发展的速度与潜力在通信史上很少有其他技术可与之相比。光纤通信网将在长途通信网和市话通信网中代替现用的电缆通信网,这已为世界各国

所公认。在未来的信息社会中, 交换大量信息的信息网络也将由光纤通信网来构成。但是, 从目前光纤通信的整体水平来看, 尚处于初级阶段, 其巨大的潜力还有待开发。当前各种新技术层出不穷, 纷纷登台, 并已开始应用领域崭露头角, 它们构成了现代光纤通信技术的基础。纵观现代光纤通信技术的主要特点, 它必将向以下几个方面发展。

(1) 网络化

电信网络从模拟网、数模并存网到数字网的变革与发展, 对光纤通信提出了更高的要求。以往的光纤通信主要是以点到点传输的 PDH 系统为主, 已不能适应现代电信网的发展。因此光纤通信向网络化发展已成为必然的趋势, 其中尤以 SDH 传送网和光纤接入网为典型代表。

SDH 是一种以联网为基本特征的新型传输体系, SDH 网络是一个将复接、线路传输及交换功能融为一体并由统一网管系统进行自动化管理的综合信息网。它的出现使光纤通信告别了点到点传输的概念而进入智能化应用的传送网阶段, 使传输设备第一次有了自己的网络平台。SDH 网络以其优良的性能目前正得到广泛的应用。

光纤接入网作为电信网的一部分, 直接面向用户, 通过光纤到家庭、光纤到路边、光纤到大楼等手段, 将光纤引入千家万户, 为用户提供各种业务, 保证亿万用户的多媒体信息畅通无阻地进入信息高速公路。

(2) 大容量与高速化

大容量与高速化是光纤通信固有的优势, 也是现代电信网的要求。实现大容量与高速化的主要手段是采用复用技术, 包括时分复用、波分复用和频分复用。

时分复用是指各路信号在同一信道上占有不同时间间隙进行通信的传输方式。目前广泛采用的是电信号的时分复用, 最高速率已达 2.5Gbit/s。若继续往前发展 (如 10Gbit/s), 将达到电子器件的性能极限, 而且价格也十分昂贵, 因此电复用向光复用转移已成定论。

OTDM 称为光时分复用, 它是指时分复用在光学领域内完成, 即将多路光信号合并在一起, 实现超高速的传输速率。它是提高通信容量的有效途径之一。但 OTDM 需采用较复杂的光器件, 离实用化尚有一段距离。

OFDM 称为光频分复用, 它是将光频彼此靠得很近的光信号组合起来, 其中每一个光频均载有信息, 因而可实现大容量传输, 尤其是与相干光通信技术相结合, 可大大提高复用信道数。

OWDM 称为光波分复用, 它是目前所有光波复用技术中最为成熟、应用前景最广的一项技术。其原理是将载有信息的各波长光信号复用传输, 以实现大容量、多用途的目标, 目前已得到了应用。

(3) 长波长化

对于光纤传输的三个低损耗窗口 (850nm、1310nm 和 1550nm), 人们已达成共识, 即逐渐由以往的 850nm 到现行的 1310nm, 最终向 1550nm 发展。根据波长向长波长方向发展的趋势, 考虑到损耗和色散这两项传输性能指标, 目前已出现了多种类型的光纤。

常规单模光纤 (G.652) 是现在广泛应用的光纤, 它在 1310nm 处理论色散值为零, 1550nm 处损耗最低。其工作波长定为 1310nm。

色散位移光纤 (G.653) 将零色散点从常规的 1310nm 移至 1550nm, 从而将光纤的最低损耗窗口和零色散窗口均统一在 1550nm 波长上, 其工作波长定为 1550nm。

G.654 光纤是指 1550nm 波长处损耗最小, 它的设计重点也是放在如何尽可能降低该波

长上的衰减值,而零色散点仍然位于 1310nm,其工作波长定为 1550nm。

色散平坦光纤是指在光纤通信的长波段(1300~1600nm),不仅具有低损耗,而且具有低色散。色散补偿光纤是指采用专门技术生产的具有较大的色散、而极性与普通光纤色散值相反的光纤,补偿或抵消原有色散,延长传输距离。

非零色散光纤是指 1550nm 处既有很小的损耗,又有很小的色散(使其不为零),可减小光纤非线性效应的影响。

(4) 传送业务的多媒体化

随着信息社会的到来,人们已不满足于传统、单一的电话服务,对各种多媒体业务的渴求越来越强烈,因此信息共享、有线电视、视频点播、电视会议、异地办公、计算机互联网等应运而生,而光纤传输的宽带特性又与此十分吻合。

在传输视频、音频等信号方面,副载波复用光纤通信技术具有很强的竞争力。它是以射频波或微波作为副载波,将待传信号调制在相应的副载波上后,再用合并的副载波信号去调制光波,可实现数模混传、性能价格比高的传输系统。

(5) 全光化

全光通信技术先进、性能卓越,可消除电光转换这一瓶颈,开辟出一个崭新的信息世界。

光放大技术实现对光信号的直接放大,取代传统的光/电/光中继器结构。

光孤子传输将光纤的非线性效应与色散效应有机结合,实现无脉冲展宽的长距离传输。

光交换技术直接对光信号的输入、输出进行控制,实现全光信号的直接交换。

综上所述,光纤通信技术对现代信息社会至关重要,已成为信息高速公路建设的基础,同时也在改变着人们的生活、工作和相互交往的方式,并进一步推动国民经济的高速发展。

1.3 光纤通信的特点与应用

1.3.1 光纤通信的特点

光纤通信之所以受到人们的极大重视,这是因为和其他通信手段相比,它具有无与伦比的优越性。

(1) 通信容量大

从理论上讲,一根仅有头发丝粗细的光纤可以同时传输 100 亿个话路。虽然目前远未达到如此高的传输容量,但用一根光纤同时传输 50 万个话路(40Gbit/s)的试验已经取得成功,它的容量比传统的同轴电缆、微波等要高出几千乃至几十万倍以上。

一根光纤的传输容量如此巨大,而一根光缆中可以包括几十根直至上千根光纤,如果再加上波分复用技术把一根光纤当作几十根、几百根光纤使用,其通信容量之大就更加惊人了。

(2) 中继距离长

由于光纤具有极低的衰减系数(目前已达 0.25dB/km 以下),若配以适当的光发射、光接收设备以及光放大器,可使其中继距离达数百千米以上甚至数千千米。这是传统的电缆(1.5km)、微波(50km)等根本无法与之相比拟的。

(3) 保密性能好

光波在光纤中传输时只在其芯区进行,基本上没有光“泄漏”出去,因此其保密性能极好。

(4) 适应能力强

适应能力强是指它不怕外界强电磁场的干扰、耐腐蚀、可弯曲性好(弯曲半径大于 250mm 时其性能不受影响)等。

(5) 体积小、重量轻、便于施工和维护

光缆的敷设方式方便灵活,既可以直埋、管道敷设,又可以水底或架空敷设。

(6) 原材料来源丰富,潜在价格低廉

制造石英光纤的最基本原材料是二氧化硅即砂子,而砂子在自然界中几乎是取之不尽、用之不竭的,因此其潜在价格十分低廉。

1.3.2 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,在通信网、广播电视网、计算机网以及其他数据传输系统中都得到了广泛应用。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。包括全球通信网(如横跨大西洋和太平洋的海底光缆和跨越欧亚大陆的洲际光缆干线)、各国的公共电信网(如中国的国家一级干线、各省二级干线和县以下的支线)、各种专用通信网(如电力、铁道、国防等部门通信、指挥、调度、监控的光缆系统)、特殊通信手段(如石油、化工、煤矿等部门易燃易爆环境下使用的光缆,以及飞机、军舰、潜艇、导弹和宇宙飞船内部的光缆系统)。

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;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(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。

1.4 光纤通信系统的基本组成

1.4.1 概述

所谓光纤通信,就是利用光纤来传输携带信息的光波以达到通信之目的。

要使光波成为携带信息的载体,必须对之进行调制,在接收端再把信息从光波中检测出来。然而,由于目前技术水平所限,对光波进行频率调制与相位调制等仍局限在实验室内,尚未达到实用化水平,因此应用中大都采用强度调制与直接检波方式(IM-DD)。又因为目前的光源器件与光接收器件的非线性效应比较严重,所以在光纤通信中占据主要位置的是对光器件线性度要求比较低的数字光纤通信。

典型的数字光纤通信系统方框图如图 1-1 所示。

从图 1-1 中可以看出,数字光纤通信系统基本上由光发送机、光纤与光接收机组成。

光发送机的功能是把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。光发送机由光源、驱动器和调制器组成,其中光源是光发送机的核心。发送端

的电端机把信息(如语音)进行模/数转换,用转换后的数字信号去调制光发送机中的光源器件,则光源器件就会发出携带信息的光波。即当数字信号为“1”时,光源器件发送一个“传号”光脉冲;当数字信号为“0”时,光源器件发送一个“空号”(不发光)。

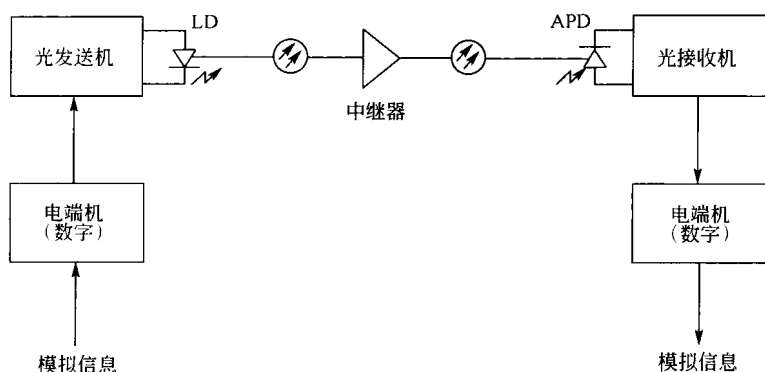


图 1-1 数字光纤通信系统方框图

光纤线路的功能是把来自光发送机的光信号,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。在接收端,光接收机把数字信号从光波中检测出来送给电端机,而电端机再进行数/模转换,恢复成原来的信息。这样就完成了一次通信的全过程。

下面,将分别介绍数字光纤通信系统的各个重要组成部分:光纤和光缆、通信用光器件、光发射机和光接收机。

1.4.2 光纤和光缆

(1) 光纤的结构与折射率分布

① 光纤的结构 光纤呈圆柱形,它由纤芯、包层与涂敷层三大部分组成,如图 1-2 所示。

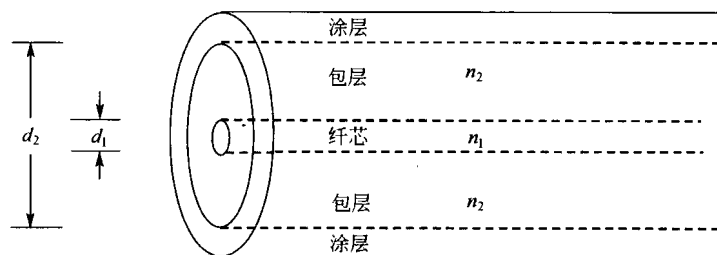


图 1-2 光纤的结构

- 纤芯。纤芯位于光纤的中心部位(直径 $d_1=5\sim 50\mu\text{m}$),其主要成分是高纯度的二氧化硅。此外还掺有极少量的掺杂剂(如二氧化锗、五氧化二磷等),其作用是适当提高纤芯对光的折射率(n_1)。

• 包层。包层位于纤芯的周围（直径 $d_2 = 125\mu\text{m}$ ），其成分也是含有极少量掺杂剂的高纯度二氧化硅。而其掺杂剂（如三氧化二硼）的作用则是适当降低包层对光的折射率（ n_2 ），使之略低于纤芯的折射率。

• 涂敷层。光纤的最外层是由丙烯酸酯、硅橡胶和尼龙组成的涂敷层，其作用是增加光纤的机械强度与可弯曲性。涂敷后的光纤外径约 1.5mm 。

纤芯的粗细、纤芯材料和包层材料的折射率，对光纤的特性起着决定性的影响。

② 光纤的折射率分布 图 1-3 所示为光纤的两种典型折射率分布情况。从图中可看出，在纤芯和包层的横截面上，折射率剖面有两种典型的分布。一种是纤芯和包层折射率沿光纤半径方向分布都是均匀的，而在纤芯和包层的交界面上，折射率呈阶梯形突变，这种光纤称为阶跃折射率光纤，见图 1-3 (a)。另一种是纤芯的折射率不是均匀常数，而是随纤芯半径的增大而逐渐减小，一直渐变到等于包层折射率值，因而将这种光纤称为渐变折射率光纤，见图 1-3 (b)。这两种光纤剖面的共同特点是纤芯的折射率 n_1 大于包层折射率 n_2 ，这也是光信号在光纤中传输的必要条件。

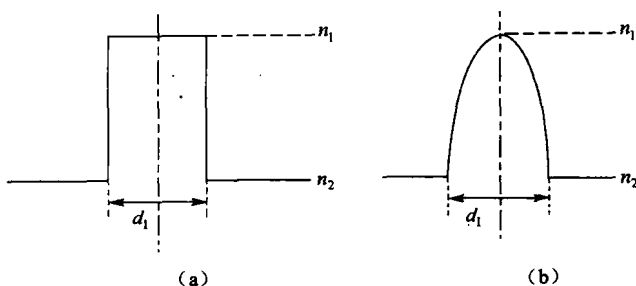


图 1-3 光纤的折射率分布

对阶跃折射率光纤而言，它可以使光波在纤芯和包层的交界面形成全反射，引导光波沿纤芯向前传播；对于渐变折射率光纤而言，它可以使光波在纤芯中产生连续折射，形成穿过光纤轴线的类似于正弦波的光射线，引导光波沿纤芯向前传播。

(2) 光纤的模式

① 传播模式的概念 光是一种频率极高的电磁波，根据波动光学和电磁场理论，通过求解复杂的麦克斯韦方程组之后就会发现：当光在光纤中传播时，如果光纤纤芯的几何尺寸远大于光波波长，那么光在光纤中会以几十种乃至几百种传播模式进行传播。

事实上，光在光纤中只能以一组独立的光线传播。换句话说，如果能够看到光纤的内部的话，就会发现一组光束以不同的角度传播，传播的角度范围从零到临界角 α_c 。传播的角度大于临界角 α_c 的光线穿过纤芯进入包层（不满足全反射的条件），最终能量被涂敷层吸收，如图 1-4 所示。这些不同的光束称为模式。通俗地讲，模式的传播角度越小，模式的级越低。所以，严格按光纤中心轴线传播的模式称为零级模式，或基模；其他与光纤中心轴线成一定角度传播的光束皆称为高次模。

随着纤芯直径的粗细不同，光纤中传输模式的数量多少也不同，因此，阶跃折射率光纤或渐变折射率光纤又都可以按照传输模式的数量多少，分为单模光纤和多模光纤。

② 多模光纤 当光纤的几何尺寸（主要是芯径 d_1 ）远大于光波波长（约 $1\mu\text{m}$ ）时，光在光纤中的传输会存在几十种乃至几百种传播模式，这样的光纤称为多模光纤。光在多模光纤中的传播轨迹如图 1-5 和图 1-6 所示。

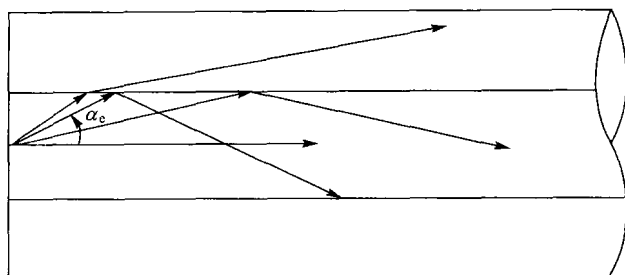


图 1-4 光在阶跃折射率光纤中的传播

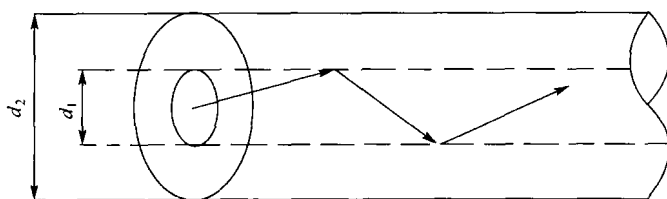


图 1-5 光在阶跃折射率多模光纤中的传播

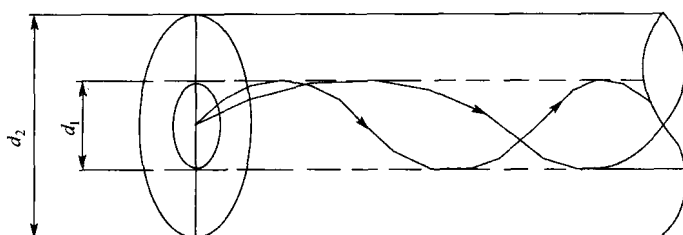


图 1-6 光在渐变折射率多模光纤中的传播

由于不同的传播模式具有不同的传播速度与相位，因此经过长距离传输之后会产生时延差，导致光脉冲变宽，这种现象称为模式色散。模式色散会使多模光纤的带宽变窄，降低了其传输容量，因此多模光纤仅适用于低速率、短距离的光纤通信。

③ 单模光纤 当光纤的几何尺寸（主要是芯径 d_1 ）较小，与光波长在同一数量级，如芯径 d_1 在 $5\sim 10\mu\text{m}$ 范围，这时，光纤只允许一种模式（基模）在其中传播，其余的高次模全部截止，这样的光纤称为单模光纤。光在单模光纤中的传播轨迹，简单地讲是以平行于光纤中心轴线的形式以直线方式传播，如图 1-7 所示。

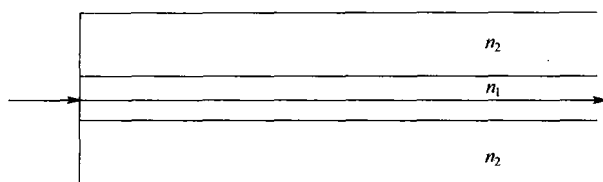


图 1-7 光在单模光纤中的传播轨迹

因为光在单模光纤中仅以一种模式(基模)进行传播,其余的高次模全部截止,从而避免了模式色散的问题,故单模光纤特别适用于大容量长距离传输。

ITU-T 的建议规范了 4 种单模光纤,即 G.652、G.653、G.654、G.655。后面将详细介绍这 4 种光纤的特点。

(3) 光纤的损耗

光信号在光纤内传播,随着距离的增大,能量会越来越弱,其中一部分能量在光纤内部被吸收,另一部分可能突破光纤纤芯的束缚,辐射到了光纤外部,这叫做光纤的传输损耗(或传输衰减)。

光纤传输总损耗(或总衰减)定义为

$$A(\lambda) = -10 \lg \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)} \quad (\text{dB}) \quad (1-1)$$

$P_1(\lambda)$ 和 $P_2(\lambda)$ 分别为入射光功率和出射光功率(mW 或 W)。总损耗与光纤长度 L 的比值定义为光纤的损耗(衰减)系数,即

$$\alpha_f(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} = -\frac{10}{L} \lg \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)} \quad (\text{dB/km}) \quad (1-2)$$

损耗系数是光纤的一个很重要的传输参量,是光纤传输系统中限制光信号中继传输距离的重要因素之一。

光纤损耗的大小与波长有密切的关系。损耗与波长的关系曲线叫做光纤的损耗谱(或衰减谱),在谱线上,损耗值比较高的地方叫做光纤的吸收峰;较低的损耗所对应的波长,叫做光纤的工作波长(或工作窗口)。石英光纤的衰减谱如图 1-8 所示。根据图 1-8 可知,光纤通经常用的工作窗口主要有 3 个波长,即: $\lambda_1=0.850\mu\text{m}$ (850nm); $\lambda_2=1.310\mu\text{m}$ (1310nm); $\lambda_3=1.550\mu\text{m}$ (1550nm)。

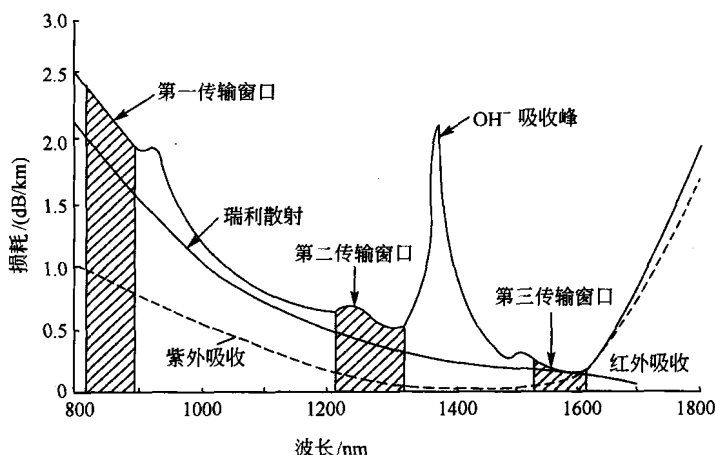


图 1-8 光纤总损耗谱

光纤损耗特性产生的原因有很多,主要有吸收损耗、散射损耗和辐射损耗。其中吸收损耗与光纤本身的材料组分有关,散射损耗与光纤的结构缺陷、非线性效应等有关。吸收损耗和散射损耗都属于光纤的本征损耗。辐射损耗则与光纤的几何形状波动有关系。

① 吸收损耗 光纤的吸收损耗主要由紫外吸收、红外吸收和杂质吸收等构成。由于这些损耗都是由光纤材料本身的特征引起的，故称为光纤的本征损耗。另外本征损耗还包括瑞利散射损耗等因素。

- 紫外吸收损耗。对于石英系光纤，当波长处于紫外区域时，石英材料对光能量产生强烈的吸收，一直将吸收峰拖到 $0.8\sim 1.6\mu\text{m}$ 的通信波段内。在组成光纤的原子中，一部分处于低能级的电子会吸收光能量而跃迁到高能级状态，从而造成了信号能量的损失。

- 红外吸收损耗。在红外波段内，石英材料的 Si—O 键因为振动而吸收能量，造成光纤的分子键振动损耗。这种损耗值在 $9\mu\text{m}$ 附近变得非常大，达到 1010dB/km ，构成了光纤通信波长的上限。红外吸收峰也拖到了通信波段内，不过比紫外吸收损耗的影响要小，可以忽略不计。

- 杂质吸收损耗。杂质吸收损耗是由于光纤材料的不纯造成的。主要有 OH 离子吸收损耗、金属离子吸收损耗等。在石英材料系的光纤中，O—H 键的基本谐振波长为 $2.73\mu\text{m}$ ，与 Si—O 键的谐振波长互相影响，形成了一系列吸收峰，其中受影响比较大的波长主要有 $1.39\mu\text{m}$ 、 $1.24\mu\text{m}$ 和 $0.95\mu\text{m}$ 等。正是这些吸收峰之间的低损耗区域形成了光纤通信的低损耗窗口。金属离子吸收损耗是由于某些金属离子的电子结构而产生边带吸收峰。随着光纤制造工艺的改进，这些金属离子的含量已经降到其吸收损耗可以忽略不计的水平。

② 散射损耗

- 波导散射损耗。波导散射损耗是由于光纤的不圆度过大造成的，若光纤制成后沿轴线方向结构不均匀，就会产生波导散射损耗。目前这项损耗已经降低到可以忽略的程度。

- 瑞利散射损耗。任何材料的内部组分结构都不可能是完全均匀的。由于光纤材料的内部组分不均匀，产生了瑞利散射，造成了光能量的损耗，它属于光纤的本征损耗。在光纤的制造过程中，光纤材料在加热时，材料的分子结构受到热骚动，致使材料的密度出现起伏，进而造成了折射率不均匀。光在不均匀的媒质中传播时，将由于上述因素产生散射。如果材料结构的不均匀级别达到了分子级别的大小，这种由于媒质材料不均匀而产生的散射就称为瑞利散射。瑞利散射损耗与光波长的四次方成反比，瑞利散射对短波长比较敏感，随着波长的变短，散射系数将很快增大。研究表明在 $1.3\mu\text{m}$ 附近，这项损耗可达 0.3dB/km ，这构成了光纤通信系统工作时最重要的光纤本征损耗之一。

③ 辐射损耗 光纤在使用过程中，不可避免地会产生弯曲。若弯曲部分的曲率半径小到一定程度时，就会产生辐射损耗。原因是当光线进入到弯曲部分时，原来的入射光线在弯曲部位的入射角增大，可能会破坏光纤的纤芯与包层界面处的全反射条件，造成传输光线的折射或者泄漏，形成损耗。这里光纤的弯曲主要有两种情况：一种是光纤的弯曲半径远远超出光纤的直径，可以叫做宏弯；另一种情况是光纤在制作成光缆的过程中或者在使用的过程中，沿轴向产生的微观弯曲，可以叫做微弯。定量地分析宏弯或者微弯产生的损耗是十分困难的，一般可以认为光纤弯曲的时候，曲率半径越小，损耗越大。

(4) 光纤的色散

色散是光纤的一个重要传输特性，指的是光信号沿着光纤传输过程中，由于不同成分的光的时间延迟不同而产生的一种物理效应。由于光源发出的光不是单色光，不同波长的光脉冲在光纤中具有不同的传播速度，因此，色散反映了光脉冲沿光纤传播时的展宽。光纤的色散现象对光纤通信极为不利。数字光纤通信传输的是一系列脉冲码，光纤在传输中的脉冲展宽导致了脉冲与脉冲相重叠的现象，即产生了码间干扰，从而形成传输码的失误，造成差错。