



新一代高职教育信息通信规划教材

光纤通信技术


GUANGXIAN TONGXIN JISHU

GUANGXIAN TONGXIN JISHU

顾生华 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

 信息通信规划教材

光纤通信技术

顾生华 主编

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书全面介绍了光纤通信系统的基本组成;光纤的结构与分类、光纤的传输原理及传输特性、光缆的结构与分类以及光纤主要参数的测量方法;有源光器件和无源光器件的工作原理、种类和主要特性;光端机的组成、各部分的作用以及线路码型的要求和常用码型;SDH传输网的基本知识、网元设备、网络结构、网同步和网络管理;光波分复用系统的基本概念、系统结构、工作原理以及WDM系统规范;光纤通信系统的光接口技术要求、系统性能指标和系统初步设计;光接口参数、电接口参数和系统指标的测试方法;全光网络的基本概念、网络结构、光复用、光交换和网络管理技术。

本书的编写力求反映高职教育的特点,由浅入深、循序渐进、通俗易懂,基本概念和基本原理讲解准确清晰,论证简明扼要,避免繁琐的数学推导,着重论述结论的物理含义,注重将基本原理和实际应用有机地结合起来,以帮助读者抓住技术关键并全面理解本书内容。

本书可适应不同层次的读者选用,既可作为高等院校通信、电子信息类相关专业的教材,也可作为各类光纤通信技术培训班的用书,还可供工程技术人员参考、阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术/顾生华主编. —北京:北京邮电大学出版社,2004

ISBN 7-5635-0872-4

I.光... II.顾... III.光纤通信 IV.TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第138439号

书 名: 光纤通信技术

主 编: 顾生华

责任编辑: 王琴秋

出 版 者: 北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路10号) 邮编:100876

发行部电话:(010)62282185 62283578(传真)

电子信箱: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 18.5

字 数: 454千字

印 数: 1—5 000册

版 次: 2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

ISBN 7-5635-0872-4/TN·355

定价: 28.00元

·如有印装质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系·

新一代高职教育信息通信规划教材

编委会

主任：肖传统

副主任：张孝强 张干生 严潮斌

委员：(以姓氏笔画为序)

王立平 王巧明 王晓军 王颖 宁帆

刘翠霞 李飞 李文海 苏开荣 吴正书

李转年 迟学芬 吴瑞萍 张一鸣 张敏华

张献居 张新瑛 杨泉 顾生华 孟祥真

徐淳宁 曹晓川 蒋青泉 傅德月

秘书：王琴秋

编委会的话

随着我国高等教育规模的扩大和信息通信产业的迅速发展,通信院校专业课程教学面临着新的标准和新的要求。作为普通高等教育组成部分的高等职业教育在新的教学理念和信息化手段影响下,对教材这一重要的教学要素提出了新的需求。

教材已经成为传授规范知识和方法、完成教学大纲的主要载体。教材的编写质量和使用状况亦体现了任课教师的教学水准,成为课程建设和学科发展水平的重要标志,成为学校的强势学科和特色专业走向成熟的主要表现。所以,各级学校领导和教师历来十分重视教材建设。

近年来,高等职业教育发展迅猛,其宏观规模发生了历史性变化。为适应社会的需求,高等职业教育的教学模式、教学方法都应不断进行改革。与此相适应,需对高职教材进行重新调整与定位,突出自身的特色。

20世纪,原邮电高等函授教学指导委员会讨论审批、推荐出版了一大批教材。现在,它们的成员单位和部分成员重新组织在一起,成立了“新一代高职教育信息通信规划教材”编委会,开始酝酿教材建设的规划和思路。在这个编委会里,有通信职业技术学院的领导和教师,也有原邮电院校成人教育的专家教授。大家纷纷响应,且群策群力,就是为了一个共同的愿望:通过信息交流,统一规划,共同编写、出版和使用一批优秀教材。这样的优秀教材应体现现代教育观念,反映信息通信技术发展的最新成果,具有先进性、科学性和教学的适用性,充分体现高职教育的特征和本质要求,充分运用现代教育技术、手段与方法。该套教材将以立体化形式和配套教学资源完整地呈现出来。

编委会汇集了长沙通信职业技术学院、广东邮电职业技术学院、四川邮电职业技术学院、南京邮电学院吴江职业技术学院、石家庄邮电职业技术学院、黑龙江信息技术职业学院、河北省通信职业技术学院、北京邮电大学网络教育学院、南京邮电学院继续教育学院、重庆邮电学院成人教育学院、西安邮电学院继续教育学院、吉林大学通信学院的领导及教学一线的教师。大家在一起对高职

教育中的教学及教材建设进行了认真的研讨,一致认为:目前,通信行业的高职院校大部分是在原中专学校的基础上发展起来的,各校在教学中遇到的一个带有共性的问题,就是缺少适合于高职教育的教材,大部分院校都在借用本科甚至中专的教材,这种状况亟待改变。因而高职教材成为各院校教材建设的重中之重。高职教材的建设应从两方面齐头并进:一方面针对专业课和基础课教材以适用性为特征,强调简便易行;另一方面是着手进行实训课程教材的编写。各院校,尤其是各邮电职业技术学院将携手推出“新一代高职教育信息通信规划教材”。

“新一代高职教育信息通信规划教材”将陆续与广大教师和学生见面,它凝聚着编委会成员及所在院校领导和专家的辛勤努力,凝聚着一批优秀教师和作者的智慧结晶,也许其中有些内容因时间仓促而略显瑕疵,但我们相信,有各个院校教师的关爱和斧正,有广大读者的建议和支持,我们所付出的努力必将得到越来越多的人们的赞赏和承认。

“新一代高职教育信息通信规划教材”编委会

2003年12月

前 言

自从1966年英籍华人高锟提出光纤通信的概念以来,光纤通信的发展速度之快实为通信史上所罕见。特别是经历近30多年的研究开发,光纤光缆、光器件、光系统的品种更新和性能完善,已使光纤通信成为信息高速公路的传输平台。目前,光纤通信正在向着大容量、高速率、长距离方向迅猛发展,其技术的主要发展趋势充分体现在系统高速化、网络化,光纤长波长化,光缆纤芯高密度化和光器件高度集成化等方面。为了让读者能全面、系统地了解现代光纤通信系统的特点、基本原理、应用技术以及光纤通信在21世纪的发展趋势,根据目前通信类高等院校已开设光纤通信技术课程的要求,我们编写了本书。根据高职教育的特点,本书的编写力求由浅入深,循序渐进,通俗易懂,基本概念和基本原理讲解准确清晰,论证简明扼要,避免繁琐的数学推导,着重论述结论的物理含义,注重将基本原理和实际应用有机地结合起来,并且特别注意以形象、直观的图表形式来配合文字的叙述,以帮助读者抓住技术关键并全面理解本书内容。

本教材内容共分9章:第1章主要介绍光纤通信的基本概念。第2章主要介绍光纤的结构与分类、光纤的传输原理、光纤的传输特性、光缆的结构与分类以及光纤主要参数的测量方法。第3章主要介绍有源光器件和无源光器件的工作原理、种类和主要特性。第4章主要介绍光端机的组成、各部分的作用以及线路码型的要求和常用码型。第5章较系统地介绍了SDH传输网的基本知识、网元设备、网络结构、网同步和网络管理。第6章系统介绍了光波分复用系统的基本概念、系统结构、工作原理以及WDM系统规范。第7章主要介绍了光纤通信系统的光接口技术要求、系统性能指标和系统初步设计。第8章主要介绍了光接口参数、电接口参数和系统指标的测试方法。第9章介绍了全光网络的基本概念、网络结构、光复用、光交换和网络管理技术。

本书由顾生华组织编写,其中第2章由陈昌海编写,第3章由张喜元编写,

第4章由乔桂红编写,第5章由李志娟编写,第7章由林瑞云编写,第8章由顾生华、林瑞云共同完成,其余各章由顾生华编写。

由于作者的水平有限,书中难免有错误或不足之处,敬请广大读者批评、指正。

编 者

2004年12月

目 录

第 1 章 概 论

1.1 光纤通信发展的历史和现状	1
1.1.1 光纤通信发展的历史	1
1.1.2 光纤通信发展的现状	2
1.2 光纤通信的特点与应用	2
1.2.1 光纤通信的特点	2
1.2.2 光纤通信的应用	3
1.3 光纤通信系统的基本组成	3
1.4 光纤通信的发展趋势	4
复习思考题	6

第 2 章 光纤和光缆

2.1 光纤结构和分类	7
2.1.1 光纤的结构	7
2.1.2 光纤的分类	7
2.2 光纤传输原理	10
2.2.1 光射线分析法	10
2.2.2 波动理论分析法	14
2.3 单模光纤	17
2.3.1 单模传输条件	17
2.3.2 单模光纤的特征参数	18
2.3.3 单模光纤的双折射	19
2.4 光纤的传输特性	20
2.4.1 光纤的损耗特性	20
2.4.2 光纤的色散特性	22
2.4.3 光纤的非线性效应	24
2.4.4 光纤的标准和应用	26
2.5 光缆	28
2.5.1 光缆的种类和结构	28
2.5.2 光缆的机械性能和环境性能	33
2.6 光纤测量	35
2.6.1 光纤损耗特性测量	35
2.6.2 多模光纤带宽的测量	39
2.6.3 单模光纤色散的测量	40

2.6.4 单模光纤截止波长的测量	40
复习思考题	42

第 3 章 通信用光器件

3.1 光源	43
3.1.1 基础知识	43
3.1.2 激光器的工作原理	45
3.1.3 激光器的特性	47
3.1.4 分布反馈激光器	48
3.1.5 发光二极管	48
3.2 光电检测器	50
3.2.1 光电检测器的工作原理	50
3.2.2 PIN 光电二极管	50
3.2.3 APD 光电二极管	51
3.2.4 光电检测器的特性	52
3.3 光纤连接器	54
3.3.1 光纤连接器的基本结构和种类	54
3.3.2 光纤连接器的特性	55
3.4 光耦合器	56
3.4.1 光耦合器的结构与原理	56
3.4.2 光耦合器的特性	57
3.5 光隔离器	57
3.6 光衰减器	58
3.7 光开关	59
3.7.1 光开关的种类	59
3.7.2 光开关的特性参数	61
3.8 光波分复用器	62
3.8.1 光波分复用器的种类和工作原理	62
3.8.2 光波分复用器的主要特征参数	64
3.8.3 几种常用波分复用器件的比较	65
3.9 光波长转换器	65
3.9.1 光波长转换器的工作原理	65
3.9.2 光波长转换器的应用	67
3.10 光放大器	67
3.10.1 光放大器的分类	67

3.10.2 掺铒光纤放大器的工作原理 ... 68
3.10.3 掺铒光纤放大器的特性 70
3.10.4 掺铒光纤放大器的应用 71
复习思考题 72

第4章 光端机

4.1 光发送机 73
4.1.1 光发送机的基本组成 73
4.1.2 光功率控制和温度控制 81
4.2 光接收机 82
4.2.1 光接收机的基本组成 82
4.2.2 光接收机的特性 91
4.3 线路码型 95
4.3.1 线路码型的主要要求 95
4.3.2 常用线路码型 96
复习思考题 105

第5章 SDH 传输网

5.1 概述 106
5.1.1 SDH 的产生 106
5.1.2 SDH 的基本概念和特点 107
5.2 速率与帧结构 109
5.2.1 速率等级 109
5.2.2 帧结构 110
5.2.3 开销功能 111
5.3 映射与同步复用 117
5.3.1 基本复用映射结构 117
5.3.2 复用单元 118
5.3.3 映射方法 121
5.3.4 指针 123
5.3.5 复用方法 129
5.4 SDH 网元设备 137
5.4.1 SDH 设备的功能块描述 137
5.4.2 SDH 复用设备 145
5.4.3 SDH 再生器 145
5.4.4 数字交叉连接设备 146
5.5 SDH 传送网 146
5.5.1 SDH 传送网的分层与分割 146
5.5.2 传送网的物理拓扑 149
5.5.3 SDH 自愈网与网络保护 151
5.6 SDH 网同步 154
5.6.1 网同步的基本原理 154
5.6.2 SDH 网同步结构和方式 157
5.6.3 SDH 设备的定时工作方式 162

5.7 SDH 网络管理 163
5.7.1 SDH 网管基本概念 163
5.7.2 SDH 网管的管理功能 168
5.7.3 SDH 网管的管理接口 169
复习思考题 170

第6章 光波分复用系统

6.1 概述 171
6.1.1 光波分复用的基本概念 171
6.1.2 光波分复用的主要特点 173
6.2 WDM 系统结构 174
6.2.1 WDM 系统的基本结构与工作
原理 174
6.2.2 WDM 系统的基本形式 175
6.2.3 WDM 系统的分层结构 176
6.2.4 WDM 系统的应用类型 178
6.2.5 WDM 系统的关键技术 180
6.3 WDM 系统规范 194
6.3.1 WDM 系统的建议 194
6.3.2 WDM 波长分配 194
6.3.3 WDM 系统技术规范 196
复习思考题 219

第7章 光纤通信系统

7.1 光接口 220
7.1.1 光接口分类 220
7.1.2 光接口参数的规范 221
7.2 系统的性能指标 227
7.2.1 参考模型 227
7.2.2 误码性能 228
7.2.3 抖动性能 230
7.2.4 漂移性能 232
7.2.5 可用性指标 232
7.3 系统的设计 233
7.3.1 损耗受限系统 234
7.3.2 色散受限系统 235
7.3.3 中继距离和传输速率 237
复习思考题 238

第8章 光纤通信系统测试

8.1 概述 239
8.1.1 PDH 接口的测试信号 239
8.1.2 SDH 接口的测试信号结构 239
8.2 光接口测试 241

8.2.1 光发送机参数测试	241	9.2.1 光通道层	260
8.2.2 光接收机参数测试	243	9.2.2 光复用段层	261
8.3 电接口测试	244	9.2.3 光传输段层	261
8.3.1 一般指标与测试	244	9.3 全光网的光复用	261
8.3.2 输入参数测试	246	9.3.1 光时分复用	262
8.3.3 输出参数测试	248	9.3.2 光码分复用	264
8.4 误码测试	253	9.4 全光网的光交换	266
8.4.1 系统误码测试	253	9.4.1 概述	266
8.4.2 设备误码测试	254	9.4.2 空分光交换	269
8.5 抖动测试	255	9.4.3 时分光交换	270
8.5.1 PDH系统抖动测试	255	9.4.4 波分光交换	271
8.5.2 SDH系统抖动测试	256	9.4.5 复合光交换	272
复习思考题	258	9.5 全光网的网络结构	273
第9章 全光网络		9.5.1 全光网的拓扑结构	273
9.1 概述	259	9.5.2 WDM环形网络	275
9.1.1 全光网的基本概念	259	9.5.3 全光网的保护	277
9.1.2 全光网的特点	259	复习思考题	280
9.2 全光网的分层结构	260	参考文献	281

1.1 光纤通信发展的历史和现状

1.1.1 光纤通信发展的历史

伴随社会的进步与发展,以及人们日益增长的物质与文化需求,通信向大容量、长距离的方向发展已经是必然趋势。由于光波具有极高的频率(大约 3 亿兆赫兹),也就是说是具有极高的宽带从而可以容纳巨大的通信信息,所以用光波作为载体来进行通信是人们几百年来追求的目标。

1966 年,英籍华裔学者高锟博士(K. C. Kao)在 *PIEE* 杂志上发表了一篇十分著名的文章——《用于光频的光纤表面波导》,该文从理论上分析和证明了用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性,并设计了通信用光纤的波导结(即阶跃光纤)。更重要的是他科学地预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性,即加强原材料提纯,加入适当的掺杂剂,可以把光纤的衰耗系数降低到 20 dB/km 以下。而当时世界上只能制造用于工业、医学方面的光纤,其衰耗在 1 000 dB/km 以上。制造衰耗在 20 dB/km 以下的光纤,被认为是可望不可及的。以后的事实发展雄辩地证明了高锟博士文章的理论性和科学大胆预言的正确性,所以这篇文章被誉为光纤通信的里程碑。

1970 年,美国康宁玻璃公司根据高锟文章的设想,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,成为使光纤通信爆炸性竞相发展的导火索。虽然当时康宁玻璃公司制造出的光纤只有几米长,衰耗约 20 dB/km,而且几个小时之后便损坏了。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的超低损耗光纤是完全有可能的,也就是说找到了实现低衰耗传输光波的理想传输媒体,是光通信研究的重大实质性突破。

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与物力,其来势之凶、规模之大、速度之快远远超出了人们的意料,使光纤通信技术取得了极其惊人的进展。

从光纤的衰耗看,1970 年是 20 dB/km,1972 年是 4 dB/km,1974 年是 1.1 dB/km,1976 年是 0.5 dB/km,1979 年是 0.2 dB/km,1990 年是 0.14 dB/km,已经接近石英光纤的理论衰耗极限值 0.1 dB/km。

从光器件看,1970年,美国贝尔实验室研制出世界上第一只在室温下连续波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 PIN 光二极管发展到量子效率达 90% 的 III-V 族雪崩光二极管 APD。

从光纤通信系统看,正是光纤制造技术和光电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机技术的发展,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、从低水平到高水平、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,码率为 45 Mbit/s,中继距离为 10 km。1980年,多模光纤通信系统商用化(140 Mbit/s),并着手单模光纤通信系统的现场试验工作。1990年,单模光纤通信系统进入商用化阶段(565 Mbit/s),并开始进行零色散移位光纤和波分复用及相干通信的现场试验,而且陆续制定出数字同步体系(SDH)的技术标准。1993年,SDH产品开始商用化(622 Mbit/s 以下)。1995年,2.5 Gbit/s 的 SDH 产品进入商用化阶段。1996年,10 Gbit/s 的 SDH 产品进入商用化阶段。1997年,采用波分复用技术(WDM)的 20 Gbit/s 和 40 Gbit/s 的 SDH 产品试验取得重大突破。此外,在光孤子通信、超长波长通信和相干光通信方面也正在取得巨大进展。

1.1.2 光纤通信发展的现状

1976年美国在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 $1.55\mu\text{m}$,传输速率从几十兆比特每秒发展到几十吉比特每秒。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和利用。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 光纤通信的特点与应用

1.2.1 光纤通信的特点

光纤通信之所以受到人们的极大重视,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 1 000 亿个话路。虽然目前远

远未达到如此高的传输容量,但用一根光纤同时传输 24 万个话路的试验已经取得成功,它比传统的明线、同轴电缆、微波等要高出几十乃至上千倍。

2. 中继距离长

光纤具有极低的衰耗系数(目前商用化石英光纤已达 0.19 dB/km 以下),这是传统的电缆(1.5 km)、微波(50 km)等根本无法与之相比拟的。因此光纤通信特别适用于长途一、二级干线通信,在不久的将来实现全球无中继的光纤通信也是完全可能的。

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,其保密性能极好。

4. 抗电磁干扰能力强

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场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. 体积小、重量轻、便于施工维护

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。

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,而砂子在大自然中几乎是取之不尽、用之不竭的。因此其潜在价格是十分低廉的。

1.2.2 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。光纤在通信网、广播电视网与计算机网,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、开发及应用的主要目标。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(如我国的国家一级干线、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、路由器间光纤高速传输链路。

(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,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。

1.3 光纤通信系统的基本组成

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,因此目前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比较严重,所以对光器件的线性度要求比较低的数字光纤通信在光纤通信中占据主要位置。

典型的数字光纤通信系统如图 1-1 所示。

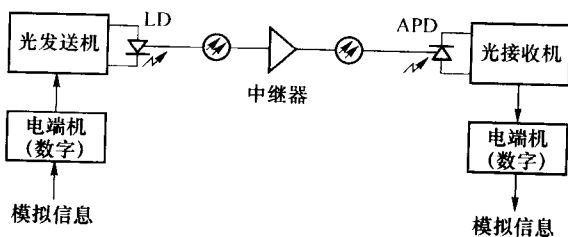


图 1-1 数字光纤通信系统

从图中可以看出,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,光源是光发射机的核心。发送端的电端机把信息(如话音)进行模/数转换,用转换后的数字信号去调制发送机中的光源器件(LD),则 LD 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)。

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,就这样完成了一次通信的全过程。

1.4 光纤通信的发展趋势

光纤通信从 1970 年真正起步,迄今为止虽然仅有 30 多年的时间,但光纤通信的技术无论是光纤制造技术还是光电器件的制造技术,以及光纤通信系统的水平都取得了极其惊人的进展,它已成为现代通信最主要的传输手段。光纤的衰耗从刚开始的 20 dB/km,到现在低至 0.14 dB/km,它已经十分接近石英光纤的理论衰耗极限 0.1 dB/km;光纤的带宽也从刚开始的 10 MHz·km 发展到现在的 1 000 GHz·km 以上。光源器件从刚开始的结构十分简单、发光功率只有几十微瓦、寿命仅几小时的 GaAs 激光器发展到现在的发光功率在 1 毫瓦以上、寿命达几十万小时的分布反馈式和多量子阱的单纵模激光器。光纤通信系统的水平也在不断提高,从 1976 年的 45 Mbit/s 发展到现在的 10 Gbit/s。1985 年多模光纤通信商用化,1990 年单模光纤通信又迅速商用化,而现在技术更加先进的 SDH 光纤通信已经席卷世界各地。

但是,光纤通信的潜力是巨大的,目前的光纤通信应用水平据分析仅仅是其能力的 1%~2% 左右。光纤通信作为现代通信的主要支柱之一,在现代通信网中起着重要的作用。

光纤通信具有以下几个发展趋势:

1. 波分复用技术(WDM)

所谓波分复用,就是用一根光纤同时传输几种不同波长的光波,以达到扩大通信容量的目的。在系统的发送端,由各个分系统分别发出不同波长的光波,如 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 ,并由合波器合成一束光波进入光纤进行传输,而在接收端用分波器把几种光波分离开,分别输入到各个分系统的光接收机。

可以看出,波分复用的关键技术是光波的合波器与分波器。近几年已经出现几种形式的合波器与分波器,如半透镜与滤光片、自聚焦棒与滤光片以及平面光栅与偏振光栅等。

2. 相干光通信

迄今为止,已应用的光纤通信都是采用强度调制与直接检波的工作方式,它只相当于原始的无线通信所使用的调制与解调技术。在此方式下,光源器件的调制速率、光接收机的灵敏度受到局限而难以再提高,适应不了超大容量、超长距离通信的要求。

所谓相干光通信,就是在发端由激光器发出谱线极窄、频率稳定、相位恒定的相干光,并用先进的调制方法(如FSK、ASK和PSK)对之进行调制。在收端,把由光纤传输来的相干光载波与本振光源发出的相干光,经光耦合器后加到光混频器上进行混频与差频,然后把差频后的中频光信号进行放大、检波。

相干光通信技术一则可以增大光纤的传输容量,二则可以大大提高光接收机的灵敏度(可提高10~20 dB),其关键技术是光源器件、光波的匹配。

由发送端的光源和接收端的本振光源所发出的光,必须谱线十分狭窄(接近单频)、频率十分稳定、相位也非常恒定,否则无法进行混频与差频。此外,本振光和从光纤传输来的光载波必须具有良好的匹配,这就要求光纤应该是偏振保持光纤。

3. 超长波长光纤通信

为了实现越来越大的信息容量和超长距离传输,必须使用低损耗和低色散的单模光纤。目前石英光纤的损耗已接近理论极限值,再无多大潜力可挖。

研究发现,氟化物光纤在波长 $3.4\ \mu\text{m}$ 处的损耗理论极限,可低至 $10^{-3}\ \text{dB/km}$;而金属卤化物光纤的损耗理论极限可低至 $10^{-2}\sim 10^{-5}\ \text{dB/km}$,若真的实现光纤损耗小于 $10^{-3}\ \text{dB/km}$,中继距离可达3万多千米,那么实现全球无中继的光纤通信就会成为现实。

4. 光集成技术

它和电子技术中的集成电路相类似,是把许多微型光学元件,如光源器件、光检测器件、光透镜、光滤波器、光栅等集成在一块很小的芯片上,构成具有复杂性能的光器件;还可以和集成电路等电子元件集成在一起形成功能更复杂的光电部件,如光发送机与光接收机等。采用光集成技术,不仅使设备的体积、重量大大减少,而且提高了稳定性与可靠性。

5. 光孤子通信

通信容量越大,要求光脉冲越窄,如2.5 Gbit/s系统的光脉冲宽度约为400 ps。窄光脉冲经光纤传输后,因光纤的色散作用出现脉冲展宽现象而引起码间干扰,因此脉冲展宽一直是制约大容量、长距离传输的关键因素。

经研究发现,当注入光强密度足够大时,会引起光脉冲变窄的奇特现象,其光脉冲宽度可低达几个皮秒,即所谓光孤子脉冲。因此用孤子脉冲可以实现超大容量的光纤通信。

6. 实现超大容量通信的近期趋势

社会的不断进步和发展对通信提出了越来越高的需求,光纤通信的容量在不断地扩大、再扩大,而技术难题也在不断地出现。

(1) 时分复用(TDM)

TDM方式是提高光纤容量的有效手段。据测算,速率每提高一个等级,TDM的每比特的成本会下降30%~40%。但码速率越高,光纤色散的影响也越严重,因此必须采用色散补偿技术。目前,国际上TDM实验室水平已达到40 Gbit/s。

(2) 波分复用(WDM)

WDM方式因配置灵活、扩容方便,又可以节省光纤,所以其发展前景看好。但是国际上在以2.5 Gbit/s还是以10 Gbit/s作为WDM的基群的问题上出现了分歧。此外,由于G.653光纤在开放WDM应用时会出现四波混频效应(FWM),所以最适合于WDM方式的光纤是G.655光纤。目前国际上WDM最高实验室水平为2 640 Gbit/s。

(3) 光时分复用(OTDM)

OTDM方式和传统的TDM的区别是:光/电和电/光转换在系统中的位置不同。

现在采用的TDM方式,是把光/电和电/光转换放在高速率信道上。如先对线路信号进行光/电转换,然后对电信号进行解复用。而OTDM则是直接对高速率光信号进行复用和解复用,然后再对分支光路信号进行光/电和电/光转换。目前,OTDM最高实验室水平为200 Gbit/s。

(4) 光放大技术

对光信号直接进行放大,一直是人们追求的目标。光纤放大器,尤其是EDFA(掺铒光纤放大器)已经成熟并商品化,其工作波长为1 550 nm。它具有高增益(最高50 dB)、高速率(10 Gbit/s)、低噪声和失真小等优点。此外,还有Ndfa(掺铷)和PDFa(掺镨),其工作波长为1 310 nm,但性能不如半导体激光放大器(SOA)。SOA的工作波长为1 310 nm,它具有体积小、易驱动、高增益(20 dB)等优点,发展前景十分乐观。

(5) 色散补偿技术

当码速率极高,出现色散受限的情况下,如10 Gbit/s应用在G.652光纤时,色散补偿技术是必不可少的。目前色散补偿光纤(DCF)已经达到商用化水平,其色散补偿范围可达-50~-800 ps/km·nm。此外,光纤光栅补偿技术也日益受到人们的重视。

总之,光纤通信技术虽然已经成熟并成为现代通信的主要传输手段,但它并没有停滞不前,而是向更高水平、更深层次的方向发展,并引发了许多新课题,形成了许多新学科,从而促进了其他科学分支的发展。

复习思考题

1. 简述光纤通信的优点。
2. 简述光纤通信系统基本组成中各部分的主要作用。