



“十三五”普通高等教育本科规划教材
“互联网+”创新规划教材

光纤通信

(第2版)

主编 | 冯进玫 郭忠义



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

高等教育本科规划教材

高等院校电子信息类专业“互联网+”创新规划教材

光纤通信

(第2版)

主 编 冯进玫 郭忠义

副主编 隋晓红 王艳营 马鸣霄

主 审 石 磊



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书按照创新型教材的思想和目标编写,力求体系结构新颖,内容符合实用性教材的需要。本书坚持以学生为根本,从当前的教学实际出发,由浅入深、循序渐进地阐述了光纤通信的基础理论和先进技术;在理论介绍的过程中,通过例题、案例、典型应用突出重点内容,加深对理论的理解,锻炼学生的思维能力及运用概念解决问题的能力;通过综合实例,全面提升学生解决实际应用问题的能力。

本书的主要内容包括:绪论,光纤和光缆,无源光器件,光放大器,光源与光发送机,光检测器与光接收机,系统设计,光纤通信网。

本书适用面较广,可作为通信工程专业、电子信息专业和相关专业本科生以及其他工科类专业的教材,还可供相关技术人员自学和参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/冯进玫,郭忠义主编. —2版. —北京:北京大学出版社,2018.3

(高等院校电气信息类专业“互联网+”创新规划教材)

ISBN 978-7-301-29106-1

I. ①光… II. ①冯…②郭… III. ①光纤通信—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第328516号

书 名	光纤通信(第2版) Guangxian Tongxin
著作责任者	冯进玫 郭忠义 主编
策划编辑	程志强
责任编辑	程志强
数字编辑	刘 蓉
标准书号	ISBN 978-7-301-29106-1
出版发行	北京大学出版社
地 址	北京市海淀区成府路205号 100871
网 址	http://www.pup.cn 新浪微博:@北京大学出版社
电子信箱	pup_6@163.com
电 话	邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667
印 刷 者	北京大学印刷厂
经 销 者	新华书店
	787毫米×1092毫米 16开本 16.25印张 375千字
	2010年3月第1版
	2018年3月第2版 2018年3月第1次印刷
定 价	39.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

第2版前言

光纤及其在通信领域的不断发展,促进了信息技术产业的革新;作为通信领域的重要分支,光纤通信在通信领域起到了举足轻重的作用。因而,掌握光纤通信技术及系统方面的知识就显得尤为重要。光纤通信是高等院校工科专业学生必修的一门专业基础课程,本课程内容丰富、知识面广、实用性强,不仅要使学生掌握光纤通信的基本原理,还要求学生了解对光纤通信系统有一定了解;既要使学生学习足够的理论知识,又注重对学生技术应用能力的培养。按照创新型教材“编写体例要新颖活泼,注重人文知识与科技知识的结合,注重拓展学生的知识面,以学生为本”的思想和目标,我们编写了本书。本书结构新颖,内容符合实用性教材的需要,主要具有以下特点。

1. 体系创新

本书力求改变工科教材艰深古板的固有面貌,提高学生的全面素养。每章开始的知识框架,使读者对本章内容一目了然。同时,注重拓展学生的知识面,坚持科技知识与人文知识的结合。学习和借鉴人文学科教材的写作模式,风格清新活泼,增强教材的可读性,把一些与课程相关的材料(历史、最新成果、技术发展等)充实到每章中。

2. 内容更新

(1) 理论讲解简单实用,服务于光纤通信的实际应用。本书摒弃传统工科教材知识点设置按部就班、理论讲解枯燥无味的弊端,结合作者长期的教学实践和光纤通信实训基地的实际应用,简明阐述了光纤通信的工作原理;并根据工科类专业本科生的培养目标,侧重于在光纤通信各组成部分及光纤通信系统的设计、开发和应用能力等方面加强对学生的培养。

(2) 强化案例式教学,重视实践环节。通过相关的应用实例来介绍光纤通信各组成部分的基本原理和工作方式,并可通过习题练习、实验环节和课程综合设计项目的实践教学等手段使学生具有一定的光纤系统的设计能力和应用能力。

(3) 内容的介绍符合当前的现状和教学规律。本书不以内容全、知识点深取胜,而是坚持以学生为根本,从当前的实际出发,努力站在学生的角度思考问题,考虑学生看到教材时的感受,由浅入深、循序渐进地阐述了光纤通信的工作原理和光纤通信的应用。例如,在理论介绍的过程中以例题、案例加深对理论的理解;通过知识点的提醒和有关问题的思考以锻炼学生的思维能力以及运用概念解决问题的能力;通过综合实例,全面提升学生解决实际问题能力。

全书共分8章,第1章绪论,介绍了光纤通信的发展,光纤通信的定义、光纤通信的基本组成和优缺点,以及全光网络的定义和特点;第2章光纤和光缆,简要介绍了光纤和光缆的结构、分类、特性及型号,重点分析了光传输理论,介绍了光纤的特性及测量技术;第3章无源光器件,介绍了7种常用的无源光器件的结构、分类、工作原理及性能;第4章



光放大器,介绍了几种常用的光放大器的放大原理、性能和应用;第5章光源与光发送机,介绍了光发射机的组成、技术指标,几种常用光源的工作原理、工作特性及光源的调制技术;第6章光检测器与光接收机,介绍了两种比较常用的光检测器及其工作特点,光接收机的基本组成、各部分功能以及光接收机的重要特性;第7章系统设计,介绍了光纤通信系统的基本设计方法以及设计中应注意的问题;第8章光纤通信网,介绍了现阶段比较成熟的光传输系统 SDH 光传送网、WDM 光传送网以及未来的全光网络,并介绍了光纤接入网的基本知识。

本书由黑龙江科技大学的冯进玫、合肥工业大学的郭忠义担任主编并负责全书的统稿;黑龙江科技大学的隋晓红、王艳营、马鸣霄担任副主编,协助主编完成统稿工作。其中,第1章由王艳营编写,第2章由马鸣霄编写,第3、4、8章由冯进玫编写,第5、6章由郭忠义编写,第7章由隋晓红编写。本书由黑龙江科技大学的石磊主审。此外,本书参考了一些老师的部分材料以及其他单位、同行所公开的有关文献(已在参考文献中列出),在此一并致以衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不当之处,欢迎广大读者和同行不吝指教。

编 者

2017年9月

目 录

第 1 章 绪论.....	1	2.6 光纤的损耗.....	39
引言.....	2	2.6.1 损耗系数.....	39
1.1 光通信的发展史.....	3	2.6.2 产生损耗的原因.....	39
1.1.1 早期的光通信.....	3	2.6.3 损耗谱.....	41
1.1.2 光通信的历史.....	4	2.7 光纤特性的测量技术.....	42
1.2 光纤通信的基本概念.....	6	2.7.1 光纤损耗特性的测量方法.....	42
1.3 光波的电磁频谱.....	6	2.7.2 带宽的测量方法.....	44
1.4 光纤通信的优点和缺点.....	7	2.7.3 光纤色散特性的测量方法.....	45
1.5 光纤通信的系统组成.....	8	本章小结.....	45
1.6 全光网络简介.....	9	习题.....	46
本章小结.....	14	第 3 章 无源光器件.....	48
习题.....	14	引言.....	49
第 2 章 光纤和光缆.....	16	3.1 光纤连接.....	50
引言.....	17	3.1.1 光纤熔接法.....	50
2.1 光缆.....	18	3.1.2 光纤连接器简介.....	51
2.1.1 光缆的结构.....	18	3.2 光纤耦合器.....	55
2.1.2 光缆的分类.....	19	3.2.1 光耦合器的分类.....	55
2.1.3 光缆的特性.....	20	3.2.2 光纤耦合器的工作原理.....	55
2.1.4 光缆的型号.....	21	3.2.3 性能参数.....	57
2.2 光纤的分类.....	23	3.3 光开关.....	59
2.3 光纤的传输特性.....	26	3.3.1 光开关的分类.....	59
2.3.1 几何光学分析法.....	26	3.3.2 工作原理.....	59
2.3.2 光纤的数值孔径.....	29	3.4 光隔离器与光环行器.....	64
2.3.3 波动理论分析法.....	30	3.4.1 光隔离器.....	64
2.4 光纤模式.....	32	3.4.2 光环行器.....	65
2.4.1 波的类型和模的概念.....	32	3.4.3 主要性能.....	66
2.4.2 多模光纤中的模式数目.....	32	3.5 光滤波器.....	66
2.4.3 单模光纤的传播模.....	33	3.5.1 M-Z 干涉滤波器.....	67
2.5 光纤的色散.....	33	3.5.2 F-P 腔光纤滤波器.....	68
2.5.1 模式色散.....	34	3.5.3 光纤光栅滤波器.....	69
2.5.2 色度色散.....	35	3.6 光衰减器.....	70
2.5.3 偏振模色散.....	35	本章小结.....	72
2.5.4 色散补偿.....	36	习题.....	73



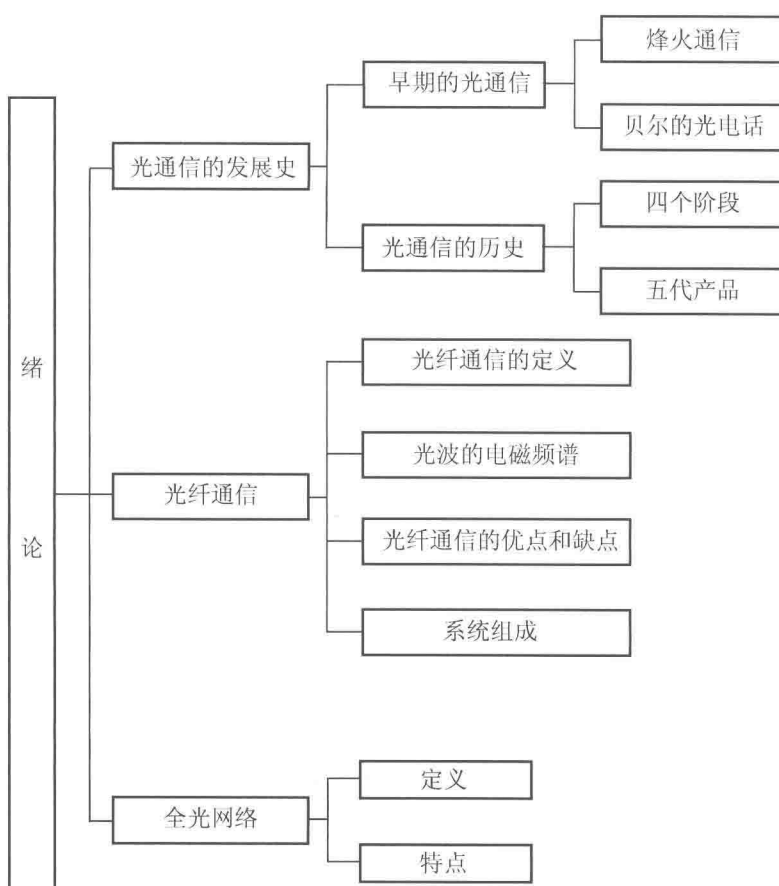
第4章 光放大器	74
引言	75
4.1 光放大器的分类	76
4.2 掺铒光纤放大器	76
4.2.1 光与物质相互作用的 3个过程	76
4.2.2 EDFA的放大原理	78
4.2.3 EDFA的泵浦方式	79
4.2.4 EDFA的工作特性	81
4.2.5 EDFA的优点	83
4.3 掺镨光纤放大器	85
4.4 受激拉曼光纤放大器	85
4.4.1 SRA的放大原理	85
4.4.2 SRA的结构	86
4.4.3 SRA的性能	87
4.4.4 SRA的典型应用	89
4.4.5 SRA的优点和缺点	90
4.5 受激布里渊光纤放大器	93
4.6 半导体型光放大器	93
4.6.1 半导体型光放大器的 工作原理	93
4.6.2 SOA的分类	94
4.6.3 SOA的主要特性	94
4.6.4 SOA的应用	94
4.6.5 波长转换器	95
4.7 光放大器的应用	97
本章小结	99
习题	100
第5章 光源与光发送机	101
引言	102
5.1 光发送机	103
5.1.1 光发送机的组成	103
5.1.2 光发送机的主要技术指标	106
5.2 线路编码	107
5.2.1 编码原则	107
5.2.2 扰码	108
5.2.3 字变换码	108
5.2.4 插入码	111
5.2.5 线路码的主要性能参数	114
5.3 激光器及激光器组件的组成	114
5.4 半导体激光器	115
5.4.1 F-P腔激光器	115
5.4.2 DFB和DBR激光器	116
5.4.3 LD的工作特性	117
5.4.4 LD的自动温度控制	119
5.4.5 LD的自动功率控制	120
5.5 半导体LED	122
5.5.1 结构和分类	122
5.5.2 LED的特性	123
5.6 其他类型激光器	124
5.6.1 量子阱激光器	124
5.6.2 垂直腔面发光激光器	125
5.7 光源与光纤的耦合	126
5.8 光调制	127
5.8.1 直接调制	127
5.8.2 间接调制	129
本章小结	131
习题	132
第6章 光检测器与光接收机	133
引言	134
6.1 光检测器	135
6.1.1 光检测器的工作原理	136
6.1.2 PIN光电二极管	136
6.1.3 雪崩光电二极管	137
6.2 光检测器的工作特性	138
6.3 光接收机	142
6.4 光接收机的噪声	148
6.4.1 光接收机中的噪声源	148
6.4.2 接收机等效电路及放大器电路 噪声	149
6.4.3 光检测器的噪声	150
6.5 光接收机的误码率和接收灵敏度	151
6.5.1 接收机的误码率	151

6.5.2 接收机的灵敏度	154	8.1 光纤通信网概述	189
6.6 光接收机的动态范围	156	8.1.1 光纤通信网络结构	189
6.7 相干接收	158	8.1.2 光传送网的发展过程	190
6.7.1 相干光通信的基本概念及 特点	158	8.2 SDH 光同步数字传送网	194
6.7.2 相干检测原理	159	8.2.1 SDH 传送网概述	194
6.7.3 相干解调方式	161	8.2.2 SDH 速率等级和帧结构	196
本章小结	163	8.2.3 复用映射结构	197
习题	164	8.2.4 SDH 网元设备	201
第 7 章 系统设计	166	8.2.5 典型设备简介	207
引言	167	8.3 WDM 光传送网	222
7.1 总体设计考虑	168	8.3.1 WDM 传送网的概念	222
7.2 数字光纤通信系统的体制	170	8.3.2 WDM 光传送网的 分层结构	225
7.2.1 脉冲编码调制原理	170	8.3.3 WDM 网络基本形式和 基本结构	227
7.2.2 光纤传输系统的基本速率	171	8.3.4 WDM 系统的关键技术	229
7.3 光缆线路传输距离的估算	173	8.3.5 WDM 系统工程设计	233
7.4 光纤工作波长的选择	175	8.4 全光网络	235
7.5 光线路码的合理选用	176	8.4.1 全光网概述	235
7.5.1 光线路码及特点	176	8.4.2 全光网分层结构	236
7.5.2 mBnB 码	177	8.4.3 全光网的性能	237
7.5.3 插入比特码	178	8.5 光纤接入网	238
7.6 光接口分类及应用代码	180	8.5.1 光纤接入网的基本组成	239
7.7 工程设计中考虑的其他问题	182	8.5.2 光纤接入网的分类	239
7.7.1 选择通信路由	182	8.5.3 光纤接入网的拓扑结构	241
7.7.2 光通信网络承载业务类型和 容量	183	8.5.4 光纤接入网的形式	242
本章小结	186	8.5.5 HFC 接入网	243
习题	186	8.5.6 光纤接入网的优势与劣势	245
第 8 章 光纤通信网	188	本章小结	245
引言	189	习题	246
		参考文献	247

第1章 绪论



本章知识结构





本章教学目的与要求

- 了解光通信的发展史
- 了解光纤通信系统在当今通信领域的重要地位和作用
- 掌握光纤通信的定义
- 掌握光纤通信的基本组成及各组成部分的功能
- 了解光纤通信的优点和缺点
- 了解光纤通信发展的四个阶段、五代产品
- 了解全光网络的定义及特点

引 言

2009 年获得诺贝尔奖的高锟博士被誉为世界光纤之父。自从 1966 年高锟博士提出光纤通信的概念以来,光纤通信的发展远远超出了人们的想象,以其独特的优势掀起了通信领域的革命性变革。光纤的发明改变了世界的通信模式,为信息高速公路奠定了基石。中国工程院院士、武汉光谷的首席科学家赵梓森被誉为中国光纤之父,他是我国最早提出光通信研究的,完成了我国首个实用光通信系统,并起草了我国光纤通信发展规划。目前,光纤通信已经遍及世界各地,成为现代通信网的主要支柱,并且与人们的日常生活息息相关。每当人们打电话、看电视、用传真机发送文件、在商场里刷卡购物、用提款机取钱、在网上冲浪、在淘宝购物、用 QQ 聊天及用手机微信聊天等,都是在使用光纤通信技术,也就是说,人们每次通过电子设备进行远距离通信,就是在使用光纤通信技术。从光纤通信系统的链路图可以看出光纤是光发送机和光接收机之间的强大链路,具有强大的运载信息能力,目前除了光纤通信系统,没有其他途径能够满足人们对带宽日益增长的需求。光纤为电信行业带来了巨大的收益,并引发了很多革命性的变化。光纤通信技术决定了接入、传输、信令、交换和联网等技术,在现代电信系统中的每个方面都起着关键性的作用,可以说没有光纤就没有现代电信。光纤通信在未来的主要发展趋势是向着超大容量、超长距离、超高速系统及全光网络发展。目前,光纤通信的发展势头方兴未艾,各种新兴的技术和新型光器件层出不穷,“掺铒光纤放大器(EDFA)+波分复用(WDM)+非零色散位移光纤(NZ-DSF)+光电集成(OEIC)”正成为国际上光纤通信的主要发展方向。

【案例 1.1】

光纤通信系统可以传输数字信号也可以传输模拟信号,传输的信息有语音、图像、数据和多媒体业务。光纤通信系统由光发送设备、光纤传输线路、光接收设备和各种耦合器器件等构成。光纤通信系统如图 1.1 所示,这是单向传输的,反方向传输的结构是相同的。光纤通信已被广泛应用于通信网、构成因特网的计算机局域网和广域网、有线电视网的干线和分配网、综合业务光纤接入网等领域。

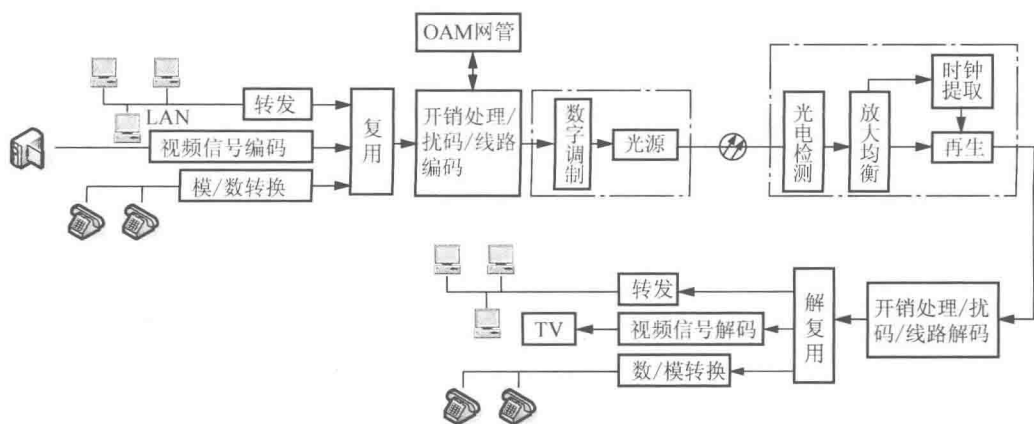


图 1.1 光纤通信系统示意图(单向)

1.1 光通信的发展史

1.1.1 早期的光通信

1. 烽火通信

光通信是利用光波来传送信息的。三千多年前人们就开始利用光进行通信，中国古代的烽火通信是利用火光来传递军事情报，使用的设施是烽火台，其中著名的有周朝的骊山烽火台、秦汉的长城烽火台。烽火通信虽然设施简陋，却包含了现代光通信的基本要素。

现代光通信的基本要素是：

- (1) 光源；
- (2) 接收器，也就是要有能感受火光的装置；
- (3) 对光波进行调制，把要传送的信息加在光波上；
- (4) 良好的光通道。

烽火通信的光源就是烽火；接收器就是人的眼睛；在烽火通信中，被调制的火光信号只有两种状态，即有火光和无火光，有火光表示有敌人入侵，无火光表示没有军事情况；烽火通信的光通道就是地球表面的大气。

2. 贝尔的光电话

1980年，贝尔发明了第一个光电话，利用光束来传送话音，这一大胆尝试可以说是现代光通信的开端。1881年，贝尔发表了著名的《关于利用光线实现声音的产生与复制》论文。贝尔的光电话是以弧光灯为光源，通过透镜将弧光灯发出的光聚焦在送话器的音膜上，音膜随着说话人声音的强弱及音调不同而作相应的振动时，从音膜上反射出来的光的强弱也随之变化。这种被声音信号调制的光通过大气传播一段距离后，被一个大型抛物面镜接收，在抛物面镜的焦点上放着一个硅光电池，硅光电池就是一个光探测器，能将射在其上面的光转变成电信号，这个电信号的强弱及变化频率，恰好能反映原来用于调制光信号的



声音的强弱及频率。这个电信号被送进受话器，还原成原来的声音，从而完成了整个通信过程。遗憾的是贝尔的光电话没有真正的使用价值，因为贝尔的光电话装置在晴天时通话距离可达数千米至十几千米；但当气候不好，如大雾天气、下雨或下雪时，光电话常常不能通话。

1.1.2 光通信的历史

光电话问世后，由于存在两个限制光通信发展的瓶颈，一个是光源，另一个是传输介质，所以光通信的发展很慢，这种情况一直延续到 20 世纪 60 年代。

1960 年 7 月 8 日，美国科学家梅曼(Meiman)发明了世界上第一台红宝石激光器。激光器发出的激光与普通光源发出的光相比，其光束的强度极高，方向性极好，光谱的范围小，相位和频率一致性好，其特性与无线电磁波类似，是一种理想的通信载波，可用来携带信息进行长距离传输。因此激光器的出现使得光通信进入了一个崭新的阶段。

激光由于频率很高，可极大地提高通信容量，因此很快在通信领域得到应用。继红宝石激光器问世后，各种不同材料的激光器相继出现。1965 年，发明了硅雪崩光电二极管；1976 年，日本电报电话公司成功研制出发射波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 的铟镓砷磷(InGaAsP)激光器；1977 年，贝尔实验室研制的半导体激光器寿命长达 10 万小时(约 11.4 年)，外推寿命可达 100 万小时；1979 年，美国电报电话(AT&T)公司和日本电报电话公司成功研制出发射波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的连续振荡半导体激光器。

1966 年，英籍华裔学者高锟(K. C. Kao)和霍克哈姆(G.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。1970 年，在高锟理论的指导下，美国的康宁公司研制出第一根 20 dB/km 的低损耗光纤。自 1970 年以后，光纤技术以指数规律快速向前发展。1974 年，贝尔实验室发明了制造低损耗光纤的化学汽相沉积法(MCVD)，并成功研制出了损耗为 1 dB/km 的光纤。1976 年日本电报电话公司研制出更低损耗的光纤，损耗下降为 0.471 dB/km。20 世纪 80 年代后期，光纤损耗降到了 0.154 dB/km。

由于有了理想的光源和传输介质，从此光纤通信便进入了迅猛发展的阶段。

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 激光器作为光源，多模光纤作为传输介质，速率为 44.7 Mb/s，传输距离约为 10 km。

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 44.7 Mb/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 34 Mb/s，传输距离为 64 km 的阶跃型多模光纤通信系统，以及速率为 100 Mb/s 的渐变型多模光纤通信系统的试验。

1983 年敷设了纵贯日本南北的光缆长途干线，全长 3 400 km，初期传输速率为 400 Mb/s，后来扩容到 1.6 Gb/s。

1988 年，由美、日、英、法建成了第一条横跨大西洋 TAT-8 海底光缆通信系统，全长 6 400 km。



1989年建成了第一条横跨太平洋 TPC-3/HAW-4 海底光缆通信系统,全长 13 200 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。

1999 年中国生产的 8×2.5 Gbit/s WDM 系统首次在青岛至大连开通,随后沈阳至大连的 32×2.5 Gbit/s WDM 光纤通信系统开通。

2005 年 3.2 Tbit/s 超大容量的光纤通信系统在上海至杭州开通,是当时世界容量最大的实用线路。

2008 年 10 月 8 日,连接亚洲和美洲大陆的首个太级(Tb/s)海底光缆通信系统——跨太平洋直达光缆系统(Trans-Pacific Express Cable Network, TPE)正式开通。该光缆通信系统由中国电信牵头发起,亚太地区多家主要电信运营商共同参与建设。TPE 连接中国、韩国和美国,分别在中国上海、青岛、台湾淡水,韩国巨济和美国俄勒冈州 Nedonna 登陆,网络总线路长度约 26 000 km,该系统的初始容量为 1.28 Tbit/s,设计容量为 5.12 Tbit/s, TPE 一期工程投资约 5 亿美元。能容纳 1 920 万人同时通话,或者相当于同时传递 16 万路高清电视信号。由于采用了当前最先进的多种通信技术,TPE 将是首条可为客户提供中美间直连的光缆系统,不必中转日本,从而实现真正意义上的跨太平洋直达。

光纤通信技术的问世与发展给世界通信业带来了革命性的变化。光纤通信在 40 年里飞速发展,技术不断更新换代,通信能力不断提高,应用范围不断扩大。

光纤通信的发展可分为四个阶段、五代产品。四个阶段为:

第一阶段(1966—1976 年),实现了短波长($0.85 \mu\text{m}$)、低速(45 Mbit/s 或 34 Mbit/s)多模光纤通信系统,无中继传输距离约 10 km。

第二阶段(1976—1986 年),光纤以多模发展到单模,工作波长以短波($0.85 \mu\text{m}$)发展到长波长,实现了波长为 $1.31 \mu\text{m}$ 、传输速率为 140~165 Mbit/s 的单模光纤通信系统,无中继传输距离为 50~100 km。

第三阶段(1986—1996 年),实现了 $1.55 \mu\text{m}$ 色散位移单模光纤通信系统。采用外调制技术,传输速率可达 2.5~10 Gbit/s,无中继传输距离可达 100~150 km。

第四阶段(1996—2006 年),主要研究的是光纤通信新技术,例如,超大容量的波分复用技术和超长距离的光孤子通信技术等。

五代产品是这样划分的:

第一代工作于 $0.85 \mu\text{m}$ 波段,最大通信容量约为 500 Mbit/(s · km);

第二代工作于 $1.31 \mu\text{m}$ 波段,最大通信容量约为 85 Gbit/(s · km);

第三代工作于 $1.55 \mu\text{m}$ 波段,最大通信容量约为 1 000 Gbit/(s · km);

第四代采用光放大器增加中继距离,采用频分和波长复用技术增加比特率,最大通信容量约为 2 000 Gbit/(s · km);

第五代光孤子脉冲为通信载体,以光时分复用技术和波分复用技术联合复用为通信手段,以超大容量、超高速率为特征。

进入 20 世纪 90 年代以后,随着光纤通信与光波电子技术的发展,在全世界范围内掀起了第三代通信网——全光通信网研究的潮流。光纤通信技术的最高发展阶段就是实现全光网络,这是光纤技术的最理想化实现形式。全光网络是光纤通信系统技术进步和革新的终极发展目标,未来的通信网络将会进入全光的阶段。



1.2 光纤通信的基本概念



【光纤通信】

光纤是现代通信网络传输信息的最佳媒质, 光纤通信迅速发展, 取代了电通信的地位, 已成为现代通信技术的主要支柱之一。

利用光导纤维传输光波信号的通信方式称为光纤通信, 即以光波为载频, 以光纤为传输介质的通信方式称为光纤通信。光导纤维简称光纤。

光纤是光发射机与光接收机之间的强大链路, 其链路能力可由香农定理算出

$$C=BW \times \log_2(1+SNR) \quad (1-1)$$



【光导纤维】

式中, C 为运载信息能力, 单位为比特/秒(bit/s); BW 为链路带宽(1 Hz=1 周期/秒); SNR 为信噪比。

香农公式说明运载信息能力与信道带宽成正比, 其中带宽就是信号进行传输且没有明显衰减的频率范围。信号载体的频率限制了带宽, 因为载体的频率越高, 信道的带宽就越大, 系统的信息传输能力就越强。

系统的带宽用载频的百分比即带宽利用系数来表示。对带宽进行估算的经验规则是: 带宽大概是载波信号频率的 10%。通信系统的通信容量与系统的带宽成正比。光波的频率比电通信使用的频率高得多, 因而其通信容量也大得多。

1.3 光波的电磁频谱

光波实际上是一种高频的电磁波。在讨论高频电磁波时, 习惯采用波长来代替频率描述。波长与频率的关系为

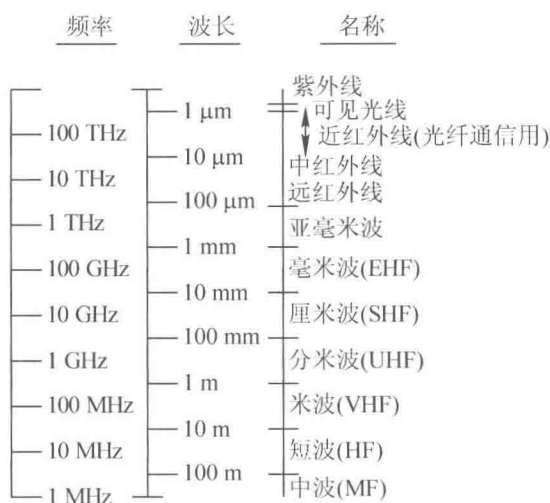
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-2)$$

式中, λ 为电磁波的波长, 波长是一个波的两个连续周期中具有相同相位的点之间的距离; c 为光波在自由空间中传播的速度, 其值为 3×10^8 m/s; f 为电磁波的频率, 其物理含义是交变电磁波在单位时间(每秒)变化的周期数。

对于光波来说, 波长常用的单位有微米($1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m)、纳米($1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m)、埃($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m)。

光波在电磁波频谱中的大体位置分布, 如图 1.2 所示, 光波的频率一般可达到 $10^{13} \sim 10^{14}$ Hz, 对应的波长为 $10 \sim 100\,000$ nm。可进一步将光波细分为红外线、可见光和紫外线。

红外线的波长为 $0.76 \sim 300 \mu\text{m}$, 这一波段的波长比人眼实际可见的光的波长要长得多, 可细分为波长为 $0.76 \sim 15 \mu\text{m}$ 的近红外、波长为 $15 \sim 25 \mu\text{m}$ 的中红外和波长为 $25 \sim 300 \mu\text{m}$ 的远红外。这一波段的信号主要用于光波通信、红外制导、电子摄像及天文学。目前光纤通信所使用的光波波长为 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.31 \mu\text{m}$ 及 $1.55 \mu\text{m}$, 主要位于近红外波段。通常将小于 $1 \mu\text{m}$ 的红外波长称为短波长, 将大于 $1 \mu\text{m}$ 的红外波长称为长波长。



【光在电磁波谱中的位置】

图 1.2 电磁波频谱图

可见光的波长为 $0.39\sim 0.76\mu\text{m}$ ，这一波段就是人眼实际可见的波长，像自然光源(如太阳光)和白炽灯、荧光灯以及许多激光源(如 He-Ne 激光器)等装饰性的人造光源，发出的光都是人眼可见的可见光。

紫外线的波长小于 $0.39\mu\text{m}$ ，这一波段的波长比人眼实际可见的光的波长要短得多，这一波段的信号很少应用于通信。

1.4 光纤通信的优点和缺点

曾经阻碍光纤通信向实用化方向发展的两大障碍，即没有良好的光源和理想的传输介质，目前都得到了圆满的解决。自 1982 年以后，光纤通信迅速发展，促进了光纤的应用和产业化，光纤的需求量呈指数规律上升。无论是在陆地，还是在海底都敷设了光纤，光纤甚至已经延伸到了办公桌和家中。光纤之所以在世界各国的各个领域都得到广泛的应用，成为高质量信息传输的主要手段，是因为光纤与传统的金属同轴电缆相比，具有如下的优点：

(1) 传输频带宽，通信容量大。光纤通信是以光纤为传输媒介，光波为载波的通信系统，其载波具有很高的频率(约 10^{14}Hz)，因此光纤具有很大的通信容量。目前电缆通信的工作频率为 $10^5\sim 10^8\text{Hz}$ ，微波通信的工作频率为 10^9Hz 左右，光纤通信的带宽与通信容量比微波通信提高了 10 万倍，比同轴电缆通信提高了 100 万倍。

(2) 传输距离长。光缆的传输损耗比电缆低，因而可传输更长的距离。光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 的低损耗窗口衰减系数可以小于 0.2dB/km ，工作带宽可达 100GHz 以上，无中继距离达 100km 以上。而工作在 100MHz 的同轴电缆通信的最佳衰减系数高达 75dB/km ，无中继距离仅在 5km 左右。

(3) 抗电磁干扰能力强，无串音。光纤通信系统避免了电缆间由于相互靠近而引起的



电磁干扰。金属电缆发生干扰的主要原因就是金属导体向外泄漏电磁波。由于光纤的材料是玻璃或塑料,都不导电,因而不会产生电磁波的泄漏,也就不存在相互之间的电磁干扰。

(4) 抗腐蚀、耐酸碱。光缆可直埋地下,特别适合化工企业的内部及恶劣环境下的通信。

(5) 质量轻,安全,易敷设。光纤的质量很轻,安装于飞机、火箭、导弹、潜艇内,可以减轻负载,从而减少燃料,提高速度和性能,军用的特制轻质光缆,每公里仅 5 kg 左右,用直升飞机空投临时紧急光缆线路,可以应付敌方突然袭击时采用的强烈电磁干扰。

(6) 保密性强。由于光纤不向外辐射能量,很难用金属感应器对光缆进行窃听,因此比铜缆保密性强。

(7) 原料资源丰富。光纤的主要材料是石英砂(主要成分为 SiO_2 , 纯度可达 99% 以上),石英砂在地球上资源十分丰富。1 kg 极纯的石英砂可拉制 100 km 以上的光纤。

事情都是一分为二的,光纤通信有许多优点,因而发展迅速,但光纤通信也有一些缺点,其缺点可归纳为:

(1) 抗拉强度低。光纤的理论抗拉强度要大于钢的抗拉强度。但是,由于光纤在生产过程中表面存在或产生微裂痕,光纤受拉时应力全都加于此,从而使光纤的实际抗拉强度非常低,这就是裸光纤很容易折断的原因。为了保护光纤,在光纤制造过程中可以采用一系列保护措施,如在光纤的生产过程中,增加涂覆层;在光缆的制作过程中,增加特殊的抗拉元件;在光缆的施工过程中,绝大部分拉力应加在抗拉元件上,使光纤基本不受拉力。

(2) 光纤连接困难。要使光纤的连接损耗小,两根光纤的纤芯必须严格对准。由于光纤的纤芯很细(只有几个微米),加之石英的熔点很高,因此连接很困难,需要有昂贵的专门工具。

1.5 光纤通信的系统组成

在光纤通信系统中,最基本的 3 个组成部分是光发送机、光接收机和光纤链路。图 1.3 所示是光纤通信系统的链路构成,将要发送的信息如音频、视频或数据信号等,送入电子发送器,电子发送器将音频、视频或数据转换成电信号,电信号送至光发送机,光发送机将电信号转换为光信号,并将生成的光信号注入光纤。光信号在光纤链路中传输,光接收机将接收的光信号转换回电信号,最后由电子接收器对这些电信号进行处理,还原成原来的音频、视频或数据信号。

光发送机由电接口、驱动电路和光源组件组成。其作用是将电信号转换为光信号,并将生成的光信号注入光纤。

光接收机是由光检测器组件、放大电路和电接口组成。其作用是将光纤送来的光信号还原成原始的电信号。

光纤链路由光纤光缆、光纤连接器、光缆终端盒、光缆线路(接续)盒及中继器等构成。光缆可以架空敷设,也可以敷设在管道内,或埋于地下,或敷设于海底。由于制造、敷设等原因,光缆生产厂家生产的光缆一般为每盘 2 km,因而如果光发送与光接收之间的距离



超过 2 km 时,每隔 2 km 将需要用光缆线路盒将光缆连接起来。光缆线路盒一般置于户外,因而要注意防潮、防腐等措施。光缆终端盒主要用于将光缆从户外引入到室内,将光缆中的光纤从光缆中分离出来,一般放置在光设备机房内。光纤连接器主要用于将光发送机或光接收机与光缆终端盒分出的光纤连接起来,即连接光纤跳线与光缆中的光纤。

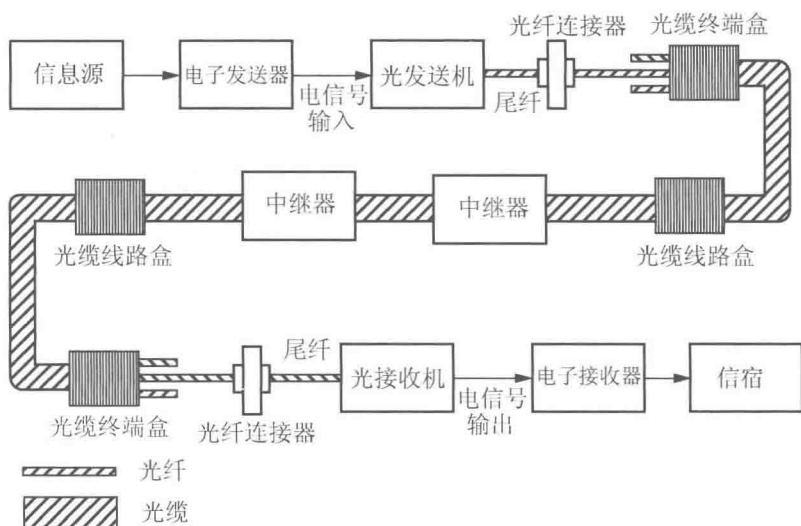


图 1.3 光纤通信系统的链路构成

中继器主要用于补偿光信号由于长距离传送所损失的能量。由于光纤的损耗和带宽限制了光波的传输距离,因此当光纤通信线路很长时,则要每隔一定的距离加入一个中继器。由于光纤损耗很低,因此光纤通信的中继距离要比电缆通信、微波通信大得多。目前,2.5 Gbit/s 单模光纤长波长通信系统的中继距离可达 153 km,已超过微波中继距离的几倍,这就可以减少光纤通信线路中中继器的数目,从而提高光纤通信的可靠性和经济效益。中继器分为电中继器和光中继器(光放大器)两种。电中继器由光接收机、电放大器和光发送机组成,光接收机首先接收从光纤中传来的被衰减的光信号,并将其转换为电信号,然后对电信号进行放大,再用电信号直接调制发送机中的光源产生已调光波,最后耦合进光纤,达到光信号放大的目的。此种中继器设备比较复杂,而且反复的光/电、电/光变换会增加信号的失真。光中继器也叫光放大器,通过光纤传输后被衰减的光信号可用光放大器直接放大并继续向前传输,以达到长距离通信的目的。目前,光放大器尤其是掺铒光纤放大器(EDFA)已在光纤通信系统中被广泛使用。

1.6 全光网络简介

随着 Internet 业务和多媒体应用的快速发展,网络的业务量正在以指数级的速度迅速膨胀,这就要求增强网络整体资源能力,包括传输能力、处理能力和存储能力。光纤通信技术出现以后,光技术开始渗透于整个通信网,光纤通信有向全光网推进的趋势。

全光通信的概念是 20 世纪 90 年代提出的,目的是解决电子瓶颈限制交换和信息处理