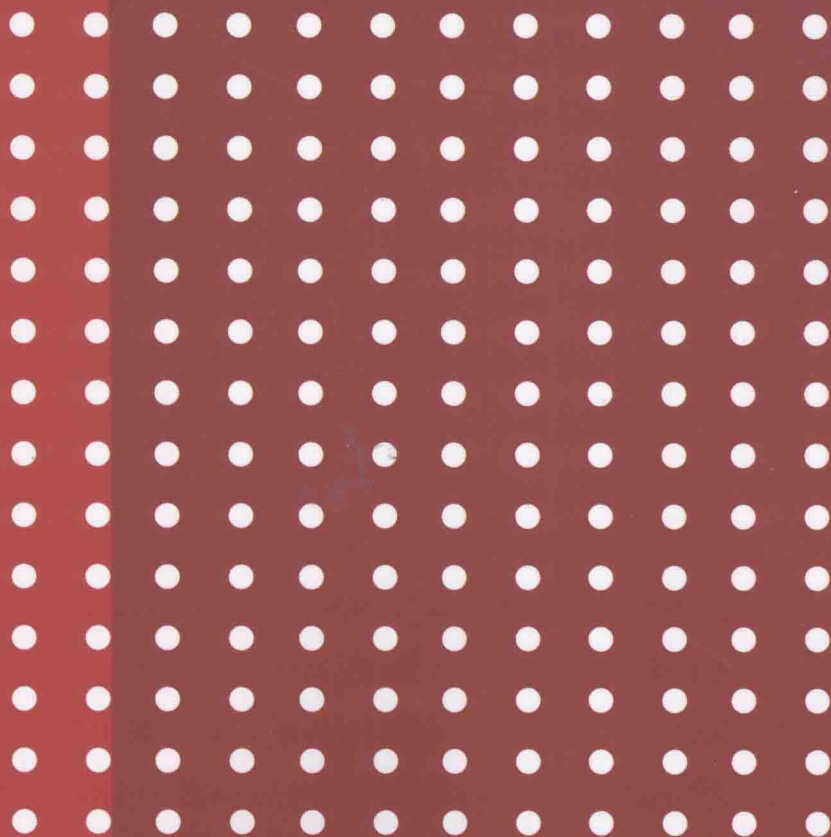


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

光纤通信简明教程 (第2版)

袁国良 主编



清华大学出版社

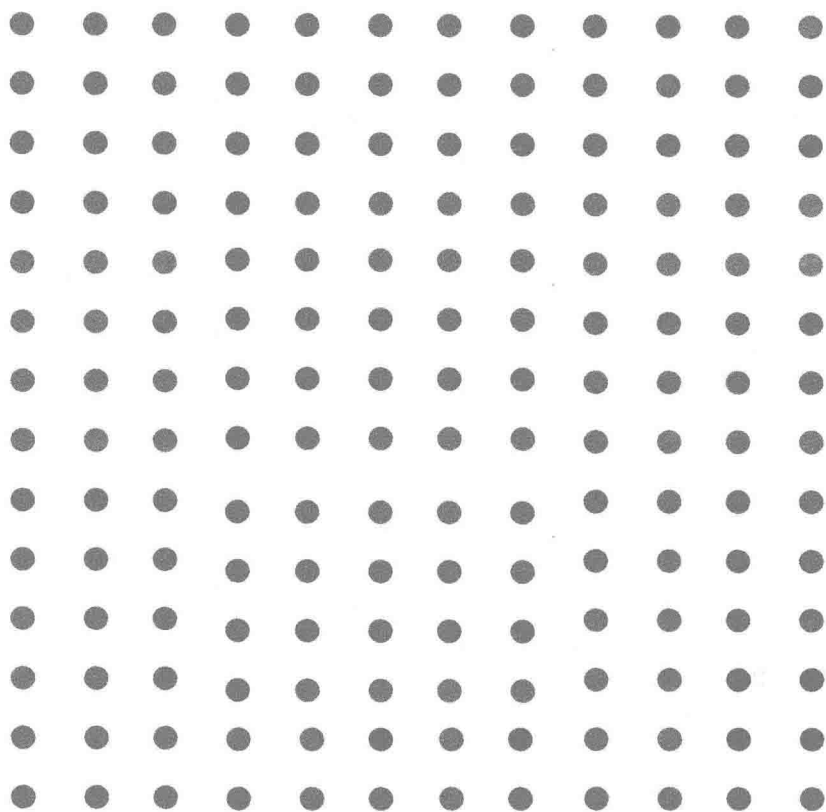


21 世纪高等学校电子信息工程规划教材

光纤通信简明教程

(第2版)

袁国良 主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书阐述了光纤通信的原理及其发展,光纤通信的物理学基础,光纤的传输理论和特性,光源和光发射机,光检测器和光接收机,光纤通信系统的组成、设计和工程,介绍了 SDH 技术、WDM 技术、光放大和色散补偿技术及其他高新技术在光纤通信中的应用。

本书条理清晰,语言流畅,实用性强,可以作为高等学校通信工程、电子信息等专业本科教材;同时本书力求从基础知识出发,深入浅出,循序渐进,读者阅读本书任何内容都不会有太大的跳跃性,可供高专高职院校使用;另外,本书推导思路清楚,贴近实际应用,也可供研究生和相关科研及工程技术人员参阅。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信简明教程/袁国良主编.--2 版.--北京:清华大学出版社,2016

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材

ISBN 978-7-302-41645-6

I. ①光… II. ①袁… 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(2015)第 228418 号

责任编辑:魏江江 薛 阳

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:17

字 数:414 千字

版 次:2006 年 11 月第 1 版

2016 年 1 月第 2 版

印 次:2016 年 1 第 1 次印刷

印 数:19001~21000

定 价:29.50 元

产品编号:064518-01

前 言

自从 1966 年华裔英籍科学家高锟博士提出光纤这种新的传输介质的概念以来,光纤通信的发展远远超乎人们的想象,它以独特的优点掀起通信领域的一次革命性的变革,成为现代通信网的主要支柱。进入 21 世纪,光纤通信发展更加迅速,各种高新技术不断地被研究并取得重大突破,应用于光纤通信中。2005 年我国研制了首个 80×40 Gb/s 的超高速光纤系统,目前 100 Gb/s 的系统已经开始在国内外大规模商用,400 Gb/s 的系统也已在实验室完成研发。全光网络技术不断地应用于光互联网,实现新一代 IP 数据网络。为满足社会的需求,高等学校纷纷开设光纤通信这门课程,但光纤通信既是高新技术,又是实用技术。那么我们在教学中传授什么呢?广大学生和相关工程技术人员要学习什么呢?这些都是十分重要的问题。

本书在采纳多届本科生和研究生的意见和建议的同时也吸收了高职高专院校和成教学员的意见,精心组织编写本书的内容。

本书内容安排如下:

第 1 章介绍光纤通信的概念,并简单介绍光纤通信的器件和设备,第 2 章介绍光纤通信的物理学基础。

第 3~6 章分别介绍光纤、光源和光发送机、光检测器和光接收机、光纤通信系统的结构和工作原理等内容。

第 7~9 章介绍 SDH 技术、光放大和色散补偿技术和 WDM 技术等高新技术。

第 10 章介绍高新技术在光纤通信中的应用,主要包括相干光通信技术、光孤子通信技术、码型技术、前向纠错技术、应用高新技术构建新型光纤通信系统、光互联网、光交换技术、智能光网络、全光通信网等方面的内容。

本书考虑到学生的知识结构和层次的问题,力求从基础知识出发,由浅入深,循序渐进,对光纤通信原理和技术进行全面的介绍。力图做到条理清晰、实用性强,可以作为高等学校通信工程、电子信息等专业本科生的教学用书;同时力求使读者阅读本书任何内容都不会有太大的跳跃性,以便高职高专院校使用;另外本书尽量讲清楚推导思路,贴近实际应用,可供研究生和相关科研及工程技术人员参阅。

本书第 1 版出版以来,得到了广大读者的欢迎,在此表示深深的感谢。在本书第 2 版的编写过程中,力争跟踪光纤通信的最新进展,介绍高新技术在光纤通信中的应用等内容。

由于作者水平有限,书中难免会有一些错误或不足之处,敬请广大读者批评指正。

· 编 者

2015 年 5 月

目 录

第 1 章 光纤通信	1
1.1 光纤通信及系统组成	1
1.2 光纤通信的发展历史	2
1.3 光纤通信的特点和应用	5
1.4 光纤通信的发展趋势	7
1.5 光纤通信认知	9
小结	16
习题	16
第 2 章 光纤通信的物理学基础	17
2.1 光的本质	17
2.2 光的反射、折射和全反射	19
2.3 波动光学	20
2.4 光的吸收、色散和散射	27
2.5 激光原理	30
小结	34
习题	35
第 3 章 光纤	36
3.1 光纤概述	36
3.2 阶跃型光纤的波动光学理论	39
3.3 渐变型光纤的理论分析	43
3.4 单模光纤	44
3.5 光纤的损耗特性	48
3.6 光纤的色散特性	50
3.7 光纤的特性参数	55
小结	63
习题	64
第 4 章 光源和光发射机	66
4.1 半导体的能带理论	66

4.2	发光二极管	69
4.3	半导体激光器	72
4.4	光调制	79
4.5	光发送机	83
	小结	89
	习题	90
第5章 光检测器和光接收机		91
5.1	光检测器	91
5.2	光检测器的工作特性	95
5.3	光接收机	97
5.4	光接收机的噪声	105
5.5	光接收机的误码率和接收灵敏度	108
	小结	112
	习题	113
第6章 光纤通信系统与工程		114
6.1	强度调制-直接检测数字光纤通信系统	114
6.2	光纤通信的线路码型	119
6.3	光纤通信的性能指标	122
6.4	损耗和色散对系统的限制	124
6.5	光纤通信系统的设计	128
6.6	光纤通信工程	136
6.7	光网络概述	141
	小结	147
	习题	148
第7章 SDH 技术		150
7.1	SDH 的产生和基本特点	150
7.2	SDH 的速率和帧结构	151
7.3	同步复用与映射方法	154
7.4	SDH 设备	158
7.5	SDH 传送网结构和自愈保护	160
7.6	SDH 网同步与管理	167
7.7	SDH 管理网	171
7.8	SDH 光网络的传输性能	172
	小结	175
	习题	177

第 8 章 光放大和色散补偿技术	178
8.1 光放大器及其工作性能	178
8.2 掺铒光纤放大器	181
8.3 光纤拉曼放大器	187
8.4 色散补偿技术	193
小结	200
习题	201
第 9 章 波分复用技术	202
9.1 多信道复用技术	202
9.2 光波分复用原理	206
9.3 光波分复用技术	209
9.4 光波分复用器	215
9.5 WDM 光传送网	218
9.6 WDM 系统设计	223
小结	227
习题	228
第 10 章 高新技术在光纤通信中的应用	230
10.1 相干光通信技术	230
10.2 光孤子通信技术	235
10.3 高速光纤通信系统的码型技术	236
10.4 高速光纤通信系统的前向纠错技术	238
10.5 应用高新技术构建新型光纤通信系统	240
10.6 光互联网	246
10.7 光交换技术	248
10.8 智能光网络	250
10.9 全光通信网	253
小结	255
习题	256
附录 A 光纤通信用英文缩写	257
附录 B 常数与换算表	263
参考文献	264

第1章 光纤通信

1.1 光纤通信及系统组成

1. 光纤通信基本概念

通信科学的发展历史悠久,通信系统将信息从一个地方传送到另一个地方,不管这两个地方相隔距离有多远。近代通信技术通常采用频率从几兆赫(MHz)到几百太赫(THz)的电磁波来携带信息,根据使用的电磁波频率范围,可将通信技术分为电通信和光通信两类。电通信使用的电磁波频率较低,通常分为有线通信和无线通信,是两种相当成熟的通信技术;光通信技术则是当代通信技术发展的最新成就,使用较高的光波频率,因而极大地扩展了现代通信的性能。

光纤通信是利用光导纤维传输光波信号的通信方式。

光导纤维简称为光纤,是一种传输光波信号的介质。如图 1-1-1 所示,上面这条很细的玻璃丝是光纤,下面是电话双绞线,可见光纤非常细。

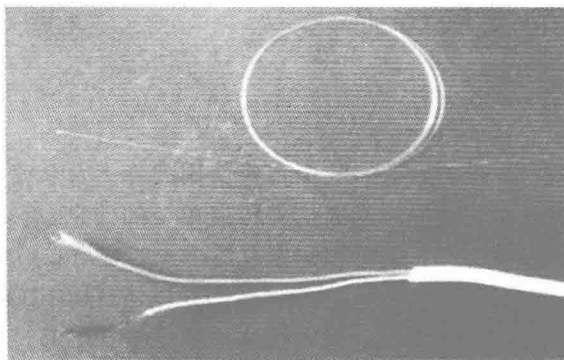


图 1-1-1 光纤与电话双绞线对比图

目前,使用的通信光纤大多数采用基础材料为 SiO_2 的光纤。它工作在近红外区,波长为 $0.8\sim 1.8\ \mu\text{m}$,对应的频率为 $167\sim 375\ \text{THz}$ 。光纤通信技术的发展十分迅速,在通信领域已经起到了举足轻重的作用,发展前景十分广阔。

2. 光纤通信系统的组成

图 1-1-2 所示的是简化的光纤通信系统模型,由图中可以看出一个光纤通信系统通常由电发射机、光发射机、光接收机、电接收机和由光纤构成的光缆组成。

电发射机输出的调制信号送入光发射机,光发射机主要有驱动电路和光源,其作用是用

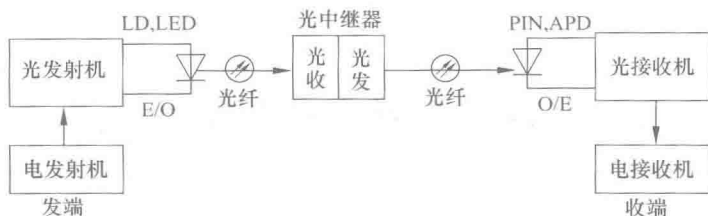


图 1-1-2 光纤数字通信系统示意图

电发射机输入的电信号对光源进行调制,使光源产生出与电信号相对应的光信号进入光纤。由光纤构成的光缆实现光信号的传输。光接收机主要有光电检测器和放大电路,当光信号通过光纤到达光接收机时,光电检测器把光信号转换为相应的电信号,经过放大和信号处理后进入电接收机。

在远距离光纤通信系统中,为了补偿光纤的损耗并消除信号失真与噪声的影响,光缆经过一定距离须加装光中继器。光中继器有两种结构形式:一种是光-电-光中继器,由光检测器、电信号放大器、判决再生电路、驱动器和光源等组成,其作用是将光信号变成电信号,经放大和再生,然后再变换成光信号送入下一段光纤中传输;另一种是用光纤放大器实现在线光信号放大。

实际的光纤通信系统远比上述模型复杂。根据不同的需要,光纤通信系统还包括各种无源光器件。光波分复用系统还包括波分复用器/解复用器等。

1.2 光纤通信的发展历史

1. 早期的光通信

利用光进行通信并不是一个新概念,我国古代使用的烽火台就是大气光通信的最好例子。那时候,大部分文明社会已经使用烟火信号传递单个的信息,后来的旗语、灯光甚至交通红绿灯等均可划入光通信的范畴,但可惜它们所能传递的距离和信息量都十分有限。

近代光通信的雏形可追溯到 1880 年 Bell 发明的光电话,他用阳光作为光源、硒晶体作为光接收检测器件,通过 200 m 的大气空间成功地传送了语音信号。虽然在以后的几十年中,科技工作者对 Bell 的光电话具有浓厚的兴趣,但由于缺乏合适的光源及光在大气中传输的严重衰减性,这种大气通信光电话未能像其他电通信方式那样得到发展。

19 世纪 30 年代电报的出现用电取代了光,开始了电信时代。1876 年电话的发明引起了通信技术本质的变化,电信号通过连续变化电流的模拟方式传送,这种模拟电通信技术支配了通信系统达 100 年之久。

20 世纪电话网的发展导致了电通信系统的许多改进,用同轴电缆代替了双绞线大大提高了通信容量,第一代同轴电缆在 1940 年投入使用。由于需要传送的信息数量急剧增长,对通信的带宽提出了更高的要求,需要使载波频率进一步提高才能满足要求。但是当频率超过 10 MHz,使用同轴电缆的传统方式通信损耗较大,这种限制导致了微波通信系统的发展。在微波通信系统中,利用 1~10 GHz 的电磁波及合适的调制技术传递信号。最早的微

波通信系统于1948年投入运营,从此以后,微波通信系统得到了较大的发展。但是微波通信系统依然存在着成本高、中继距离短、载波频率受限制的缺点。

系统的通信容量用比特率-距离积(BL)表示, B 为比特率, L 为中继间距。至20世纪70年代电通信技术获得的最大 BL 积不超过 $100\text{ Mb/s} \cdot \text{km}$,20世纪后半叶人们开始认识到,如果用光波作载波, BL 积可能增加几个数量级。然而当时发展光通信技术存在两个难以攻克的难题:第一个难题是无法找到适合光通信的低损耗传输介质,第二个难题是无合适的相干光源,使得光通信技术发展停滞不前。

2. 现代光纤通信的发展历程

1966年7月是光纤通信发展历史中的一个里程碑,英籍华人高锟博士在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》,该文从理论上分析证明了用光纤作为传输介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,他科学地预言了制造通信用低损耗光纤,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 20 dB/km 以下。但是20世纪60年代可能制造的光纤损耗超过了 1000 dB/km ,高锟的预言被认为是可望而不可即的。1970年光纤制造技术终于出现了突破,美国康宁公司根据高锟论文的设想,使用改进型化学气相沉淀法,制造出了世界上第一根超低损耗光纤,其在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 附近波长区光纤损耗降低到约 20 dB/km 。虽然康宁公司制造出的光纤只有几米长,但这证明了高锟预言的正确性,这是光纤制造技术的大突破。

20世纪60年代激光技术的发明解决了第二个问题。随后,人们的注意力集中到寻找用激光进行通信的途径。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钾(GaAs)半导体激光器,为光纤通信找到了合适的光源器件。

小型光源和低损耗光纤的同时问世,在全世界范围内掀起了发展光纤通信的高潮。进展确实很快,在不到20年的时间,比特率-距离积增加了几个数量级,在技术上经历了各具特点五个发展阶段(或五代光波通信系统)。

(1) 1978年工作于 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的第一代光波通信系统正式投入商业应用,其比特率在 $20\sim 100\text{ Mb/s}$ 之间,最大中继间距约 10 km ,最大通信容量(BL)约 $500\text{ Mb/s} \cdot \text{km}$ 。与同轴电缆通信系统相比,中继间距长,投资和维护费用低,是工程和商业运营追求的目标。

(2) 但是 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 并非损耗最小的最佳工作波段,早在1970年时人们就认识到,使光波系统工作于 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 时,光纤损耗 $<1.0\text{ dB/km}$,且有最低色散,可大大增加中断距离,但是 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 的半导体激光器尚未研制成功,直到1977年这种激光器才问世。接着在20世纪80年代初,早期的采用多模光纤的第二代光波通信系统问世,其中继距离超过了 20 km ,但由于多模光纤的模间色散,早期的系统的比特率限制在 100 Mb/s 以下。采用单模光纤能克服这种限制,一个实验室于1981年演示了比特率为 2 Gb/s ,传输距离为 44 km 的单模光波实验通信系统,并很快引入商业领域,至1987年 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 单模第二代光波系统开始投入商业运营,其比特率高达 1.7 Gb/s ,中继距离约 50 km 。

(3) 第二代光波系统中继距离受 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 附近光纤损耗(典型值为 0.5 dB/km)限制,理论研究发现,石英光纤最低损耗在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近,实验技术上于1979年就达到了 0.2 dB/km 的低损耗。然而由于 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 处高的光纤色散,而当时多纵模同时振荡的常规InGaAsP半导体激光器的谱展宽问题尚未解决。这两个因素,推迟了第三代光波系统的问世。后来的

研究发现,色散问题可以通过使用设计在 $1.5\ \mu\text{m}$ 附近,具有最小色散的色散位移光纤(DSF)与采用单纵模激光器来克服。在 20 世纪 80 年代这两种技术都得到了发展,1985 年的传输试验显示,其比特率达到 $4\ \text{Gb/s}$,中继距离超过 $100\ \text{km}$ 。至 1990 年,工作于 $2.5\ \text{Gb/s}$, $1.55\ \mu\text{m}$ 的第三代光波系统已能提供通信商业业务。这样的第三代光波系统,通过精心设计激光器和光接收机,其比特率能超过 $10\ \text{Gb/s}$ 。确实后来 $10\ \text{Gb/s}$ 的光波系统在一些国家得到了重点发展。

(4) 第四代光波系统以采用光放大器(OA)增加中继距离和采用频分复用(FDM)与波分复用(WDM)增加比特率为特征。这种系统有时采用零差或外差方案,称为相干光波通信系统。更多的时候是采用波分复用技术,目前已经在商用上实现 64 波的波分复用,实验室技术则远远高于这个水平。20 世纪 90 年代初期光纤放大器的问世已引起了光纤通信领域的重大变革。

(5) 第五代光波通信系统的研究与发展也经历了二十多年历程,已取得突破性进展。它基于光纤非线性压缩抵消光纤色散展宽的新概念产生的光孤子,实现光脉冲信号保形传输,虽然这种基本思想 1973 年就已提出,但直到 1988 年才由贝尔实验室采用受喇曼散射增益补偿光纤损耗,将数据传输了 $4000\ \text{km}$,次年又将传输距离延长到 $6000\ \text{km}$ 。EDFA 用于光孤子放大开始于 1989 年,在工程实际中有更大的优点。自那以后,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 年在美国与英国的实验室,采用循环回路曾将 $2.5\ \text{Gb/s}$ 与 $5\ \text{Gb/s}$ 的数据传输 $10\ 000\ \text{km}$ 以上。日本的实验室则将 $10\ \text{Gb/s}$ 的数据传输距离为 $10^6\ \text{km}$ 。1995 年,法国的实验室则将 $20\ \text{Gb/s}$ 的数据传输 $10^6\ \text{km}$,中继距离达 $140\ \text{km}$ 。1995 年线形试验也将 $20\ \text{Gb/s}$ 的数据传输 $8100\ \text{km}$, $40\ \text{Gb/s}$ 传输 $5000\ \text{km}$ 。线形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 $10\ \text{Gb/s}$ 与 $20\ \text{Gb/s}$ 的数据传输了 $2500\ \text{km}$ 与 $1000\ \text{km}$ 。1994 年和 1995 年 $80\ \text{Gb/s}$ 和 $160\ \text{Gb/s}$ 的高速数据也分别传输 $500\ \text{km}$ 和 $200\ \text{km}$ 。

光波通信技术得到巨大发展,现在世界通信业务的 90% 需经光纤传输,光纤通信的业务量以每年 40% 的速度上升。随着光波通信系统技术的发展,光波系统在通信网中的应用得到了相应的发展。现在世界上许多国家都将光波系统引入了公用电信网、中继网和接入网中,光纤通信的应用范围越来越广。

进入 21 世纪,光纤通信更是突飞猛进地向前发展。实现超高速的传输速率,不断提升系统容量是光纤通信永恒的追求。在单通道 $10\ \text{Gb/s}$ 和 $40\ \text{Gb/s}$ 通信系统得到大规模应用之后,单通道 $100\ \text{Gb/s}$ 的光纤通信系统已从 2011 年开始在国内外得到开通和运营。传输系统的关键技术,如调制码型、相干检测等在 $100\ \text{Gb/s}$ 时代得到了广泛的统一,并且随着硬判决和软判决 FEC 的大量应用, $100\ \text{Gb/s}$ 系统传输能力和传输质量相比 $10\ \text{Gb/s}$ 和 $40\ \text{Gb/s}$ 系统有了质的飞跃,有望开创光通信的下一个黄金时代。在 $100\ \text{Gb/s}$ 系统部署的同时,产业界已经就超过 $100\ \text{Gb/s}$ (目前以 $400\ \text{Gb/s}$ 为主)技术展开了讨论和标准化工作。

目前,光传送网除了承载语音、专线等传统电信业务以外,其越来越多的需要是为蓬勃发展的 IP 数据业务提供快速、灵活、高效的传输通道,并且要努力降低自身成本,为运营商的全业务经营提供便利。基于以上要求,近年来光传送网的发展体现出超高速、智能化和分组化三大主要特征。近年来,随着高清视频,在线游戏和高可靠数据业务的飞速增长,骨干光传网的网络容量急需扩容。DWDM/OTN 系统已经呈现出长距离和大容量传输的趋

势。电信网络中以 GE/10GE/40GE、2.5Gb/s/10Gb/s/40Gb/s POS 接口为代表的大颗粒宽带业务大量涌现,飞速增长的数据流量需求直观地引导着光传送网络的发展,推动光传输技术不断前进。从单信道速率(单波长速率)来看,100 Gb/s 的系统已经开始在国内外大规模商用,400 Gb/s 的系统也已在实验室完成研发,并有部分的部署案例。单信道容量为 11.2 Tb/s 的系统在实验室已经实现;从单显信道数来看,C 波段 80 波系统、C+L 波段 160 波系统已经成熟商用,单纤 432 波、波长间距 25 GHz 的试验系统已经实现;从整个传输系统的总容量来看,单纤 10 Tb/s 技术已经完全突破,目前单纤容量最高已经达到 69.1 Tb/s,正在逼近 100 Tb/s。这些都表明下一代光传送网络有能力为未来业务提供大容量传输平台。

超长距离传输能有效地降低系统成本并提高系统的可靠性,所以也备受产业界的青睐。随着分布式拉曼放大器、超强前向纠错技术、高速信号调制与接收处理技术、色散管理与相干检测技术、PMD 补偿技术、光子集成技术和严格的光域均衡技术的使用,全光网传输的距离也在大幅度增加,部分厂家研发的系统已经达到 4000 km 以上。

1.3 光纤通信的特点和应用

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,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传输 100 亿话路。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 万话路(40 Gb/s)的试验已经取得成功,它比传统的同轴电缆、微波等要高出几千乃至几十万以上。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、几百根光纤,其通信容量就更加惊人了。

2) 中继距离远

由于光纤具有极低的衰减系数(目前达 0.25 db/km 以下),若配以适当的光发射、光机收设备以及光放大器,可使中继距离达 100 km 以上,比同轴电缆大几十倍。

3) 抗电磁干扰能力强,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和感应电流。这有利于传送动态图像(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敷设,通信也不受干扰,适于在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强的军政单位使用。由于光信号被限制在光纤内传输,不会逸出光纤,所以光缆内光纤之间不会“串话”,即没有纤间串扰,不易被窃听。

4) 光纤细,光缆轻

光纤直径一般只有几微米到几十微米,相同容量话路光缆,要比电缆轻 90%~95%(光缆的质量仅为电缆的 1/20~1/10),直径不到电缆的 1/5。故运输和敷设均比铜线电缆方便,并利于在军用战斗机上作信号控制用。

5) 资源丰富,节约有色金属和能源

光纤的纤芯和包层的主要原料是二氧化硅,资源丰富且价格便宜。而电缆所需的铜、铝矿产则是有限的,采用光纤后可节省大量的铜材。制造 10 000 km 光纤比 10 000 km 单管同轴铜线节约能源 2.64×10^{11} J,折合标准煤为 9×10^5 kg。

光纤还具有均衡容易、抗腐蚀、不怕潮湿的优点,因而经济效益非常显著。

但是光纤通信同样也存在以下缺点:

- 需要光/电和电/光转换部分;
- 光直接放大困难;
- 光纤弯曲半径不宜太小;
- 需要高级的切割接续技术;
- 分路耦合不方便。

此外,光纤元件价格昂贵,且光纤质地脆、弯曲半径大、机械强度低易因屈曲而损毁、布线时需要小心及需要专门的切割及连接工具,光纤的接续、分路及耦合比铜线麻烦等。但这些都不是很严重的问题,随着科技的发展这些问题都得到解决。

2. 光纤通信的应用

人类社会现在已经发展到了信息社会,声音、图像和数据等信息的流量非常大,而光纤通信正以其容量大、保密性好、体积小、质量轻、中继距离长等优点得到广泛应用。其应用领域遍及通信、交通、工业、医疗、教育、航空航天和计算机等行业,并正在向更广更深的层次发展。可以把光纤通信网分成三个层次,一是远距离的长途干线网;二是城域网,由一个大城市中的很多光纤用户组成;三是局域网,比如一个单位、一个大楼、一个家庭。光纤通信的应用主要体现在以下几个方面。

1) 光纤在公用电信网间作为传输线

由于光纤损耗低、容量大、直径小、质量轻和敷设容易,所以特别适应作室内电话中继线及长途干线线路,这是光纤的主要应用场合。

2) 满足不同网络层面的应用

为适应光传送网向更高速、更大容量、更长距离方向发展,不同层次网络对光纤要求也不尽相同。在核心网层面和局域网层面,光纤通信都得到了广泛应用。局域网应用的一种是把计算机和智能终端通过光纤连接起来,实现工厂、办公室、家庭自动化的局部地区数字通信网。

3) 光纤宽带综合业务数字网及光纤用户线

光纤通信的发展方向是把光纤直接通往千家万户。在我国已敷设了光纤长途干线及光纤市话中继线,目前除发展光纤局域网外,还要建设和发展光纤宽带综合业务数字网以及光纤用户线。光纤宽带综合业务数字网除了开办传统的电话、高速数据通信外,还开办可视电话、可视会议电话、遥远服务以及闭路电视、高质量的立体声广播业务。

4) 作为危险环境下的通信线

诸如发电厂、化工厂、石油库等场所,对于防强电、防辐射,防危险品流散、防火灾、防爆炸有很高要求。因为光纤不导电,没有短路危险,通信容量大,故最适合这类系统。

5) 应用于专网

光纤通信主要应用于电力、公路、铁路、矿山等通信专网,例如电力系统是我国专用

通信网中规模较大、发展较为完善的专网。随着通信网络光纤化趋势进程的加速,我国电力专用通信网在很多地区已经基本完成了从主干线到接入网向光纤过渡的过程。目前,电力系统光纤通信承载的业务主要有语音、数据、宽带和 IP 电话等常规电信业务;电力生产专业业务有保护、完全自动装置和电力市场化所需的宽带数据等。可以说,光纤通信已经成为电力系统安全稳定运行以及电力系统生产生活中不可缺少的重要组成部分。

3. 我国的光纤通信工程

中国在通信网络建设中应用光纤是从第六个五年计划期间开始的。此后,中国信息产业高速发展,光纤市场平均年增长率高达 20%~30%。到 2002 年底,我国光缆年敷设量约为 120 万~150 万芯公里,已敷设光纤总数达 1200 多万芯公里。据有关部门的不完全统计,到 1999 年,国内已有光缆厂 170 多家,总生产能力超过 1300 万芯公里。

目前,国内以中国电信为首的各大运营商纷纷在规划建设全新的全国骨干光传输网络,以迎接加入 WTO 后的电信大战。中国电信已宣布在过去“八纵八横”的基础骨干网之外建设以三个 10 Gb/s 密集波分复用(DWDM)环状网为主体的全国高速大容量骨干网;中国铁通已全面启动以两个 10 Gb/s DWDM 环状网为主的全国网一期工程,在中国联通也将建设以五个 10 Gb/s DWDM 环状网为主的国家级高速骨干网;中国移动正在积极规划建设自身的国家干线网和省内二级干线网;中国网通也正在策划其骨干网络的扩展和提速。

据统计,1999 年我国总敷设光缆约 660 万芯公里,2000 年我国总敷设光缆约 720 万芯公里,2001 年光缆总需求为 1000 万芯公里,2002 年 4 月达 1150 万芯公里,2005 年达到 1600 万芯公里以上。

目前我国的公众网络运营商形成 5+1 的局面,即中国电信、中国移动、中国网通、中通、中国铁通和卫星通信。5 大陆地公众运营商的骨干传输网络无一例外地均采用 DWDM 技术建设,目前我国各大通信网络运营商大规模采用 DWDM 系统进行网络建设,大量使用 $32 \times 2.5 \text{ Gb/s}$ 、 $32 \times 10 \text{ Gb/s}$ 的系统,单根光纤容量达 320 Gb/s。2005 年,我国建设当时首个 $80 \times 40 \text{ Gb/s}$ 的超高速光纤系统。现在也在建设 100 Gb/s 系统超高速光纤系统,并开展 400 Gb/s 系统超高速超长距离光纤系统的研究。

1.4 光纤通信的发展趋势

光载波有无比巨大的通信容量,预测光通信的容量可达 40 Tb/s,如此巨大的天文数字通信容量正在奇迹般地一步一步变为现实,光纤通信发展潜力十分巨大。下面介绍一下光纤通信的发展趋势。

1. 时分复用方式向超高速系统发展

从过去二十多年的电信发展看,网络容量的需求和传输速率的提高一直是一对主要矛盾。传统光纤通信的发展始终按照电的时分复用(TDM)方式进行,每当传输速率提高

4 倍,传输每比特的成本大约下降 30%~40%,因而高比特率系统的经济效益大致按指数规律增长。目前实用化的商用光纤通信系统可达 10 Gb/s,这样的系统已经大量装备网络。

采用外调制技术、色散补偿技术和放大自发辐射(ASE)滤波等技术,可以达到 40 Gb/s,目前可靠且无误码地传输 40 Gb/s 信号乃至 40 Gb/s 以上的信号的技术还处于实验阶段,马上成为商用系统还有一定的困难,随着科技的不断进步将逐步商品化。

2. 波分复用(WDM)方式向密集化方向发展

采用电的时分复用(TDM)方式的扩容潜力已经接近极限,然而光纤的带宽资源仅仅利用了不到 1%,还有 99%的资源尚待发掘。如果将多个发送波长错开的光源信号同时在一根光纤上传送,则可大大增加光纤的信息传输容量,这就是波分复用(WDM)的基本思路。

WDM 系统目前从 1528.77 nm 到 1560.61 nm 信道间隔 25 GHz,可配置 80 个信道。考虑到多通道 WDM 受 EDFA 的可用带宽和窄带光滤波器成本等各种技术上和经济上的限制,目前的实用水平已达 40×10 Gb/s。实验室水平远远超过这一水平,据估计 160×40 Gb/s 的商用技术不久的将来也将成为现实。

3. 新型光纤不断发展

光纤是构筑新一代网络的物理基础。传统的 G. 652 单模光纤在适应上述超高速长距离传输网络的发展方面已暴露出力不从心的态势,开发新型光纤已成为开发下一代网络基础设施的重要组成部分。

为了适应干线网和城域网的不同发展需要,非零色散光纤(G. 655 光纤)已经广泛地应用于 WDM 光纤通信网络。非零色散光纤(G. 655 光纤)在 1550 nm 附近的工作波长区呈现一定大小的色散值,足以压制四波混合和交叉相位调制等非线性影响,同时满足 TDM 和 DWDM 两种发展方向的需要。

无水吸收峰光纤(全波光纤)也在不断地开发与应用。这种光纤是设法消除 1385 nm 附近的水吸收峰,使光纤的可用频谱大大扩展,用来满足城域网面临复杂多变的业务环境。要有效地提升业务量,光纤是网络设计至关重要的因素,采用具有数百个复用波长的 DWDM 技术将是一项很有前途的解决方案。因此开发具有尽可能宽的可用波段的光纤成为关键,全波光纤就是在这种形势下诞生的。

4. 向宽带光纤接入网方向发展

接入网是信息高速公路的最后一公里。以铜线组成的接入网成为宽带信号传输的瓶颈。为适应通信发展的需要,我国正在加紧改造和建设接入网,逐渐用光纤取代铜线,将光纤向家庭延伸。

实现宽带接入网有各种不同的解决方案。其中光纤接入是最能适应未来发展的解决方案,ATM 无源光网络(APON)已被证明是当前一种既经济有效又较为成熟的方案。因地制宜地发展宽带接入网,最终实现光纤到家庭,是接入网的发展方向。

5. 新型器件和高新技术在光纤通信系统的应用

由于科学技术日新月异,新型器件不断研发成功,各种高新技术的不断研究,并且逐步应用于光纤通信中,必将使光纤通信的容量进一步提高。

6. 全光通信网络

近年来新技术和新型器件的发展使全光通信网络逐步成为现实。这些技术包括光放大技术,色散补偿技术,光交换技术,光互连与光处理技术等,以上技术的实现依靠近年来光电子器件的迅速发展。因此必将带动光纤通信商用系统水平的提高,全光通信网络成为发展的必然趋势。

1.5 光纤通信认知

构成光纤通信系统的光纤通信元器件种类繁多,为了使广大读者对光纤通信系统有一个感性的认识,仅仅对下面的光纤通信元器件进行简单的介绍。

1. 光纤和光缆

1) 光纤

光纤从材料上可以分为石英系光纤、多组分玻璃光纤、氟化物光纤、塑料光纤等。图 1-5-1 所示的是一种石英系光纤。图 1-5-1(a)为光纤桶;图 1-5-1(b)为局部放大图,看到的很细的玻璃丝即是加涂覆层的光纤。裸光纤由高纯度 SiO_2 组成,光纤直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$,在光纤外面加的涂覆层,材料是环氧树脂或硅橡胶,其作用是增强光纤的机械强度。

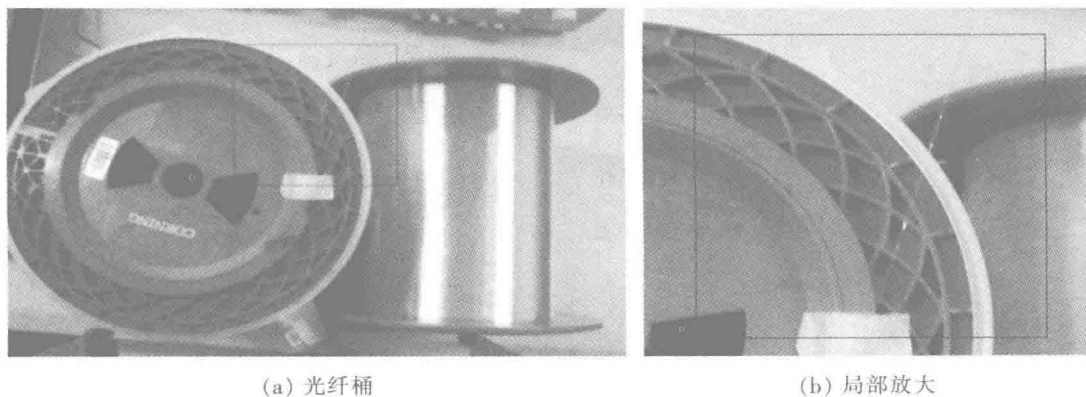


图 1-5-1 石英系光纤

2) 光缆

涂覆后的光纤还需要制作成光缆芯线,目前,国内外对二次涂覆主要采用下列两种保护结构,如图 1-5-2 所示。

- 紧套结构 如图 1-5-2(a)所示是在光纤与套管之间有一个缓冲层,其目的是减小外

力对光纤的作用,缓冲层一般采用硅树脂,二次涂覆用尼龙材料,这种光纤的优点是结构简单,使用方便。

• 松套结构 如图 1-5-2(b)所示,将一次涂覆后的光纤放在一个管子中,管中填充油脂,形成松套结构,这种光纤的优点是机械性能好防水性能好,便于成缆。

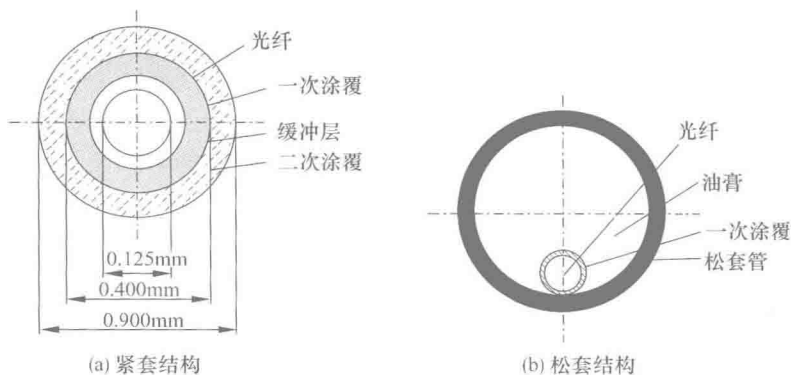


图 1-5-2 光纤保护结构示意图

光缆芯线再加上加强元件和保护层构成光缆。光缆的结构是根据其应用条件和环境确定,习惯上分为室内光缆和室外光缆。

室外光缆主要有以下几种具有代表性的结构形式,如图 1-5-3 所示。

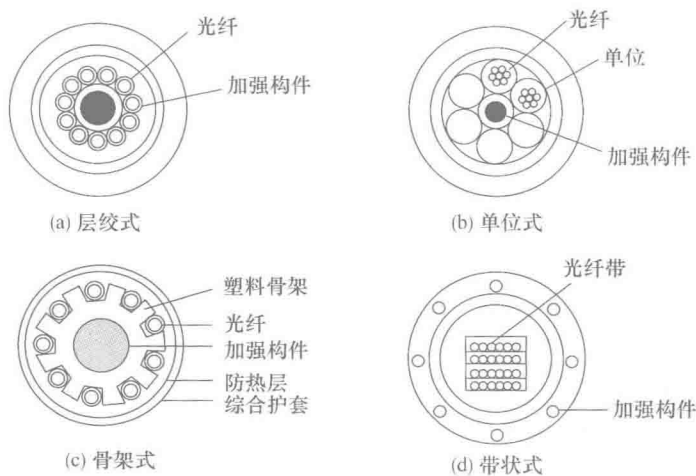


图 1-5-3 光缆的基本结构

• 层绞式光缆 是将若干根光纤芯线以强度元件为中心绞合在一起的一种结构,光纤芯线数一般不超过 10 根。

• 单位式光缆 将几根至十几根光纤芯线集成为一个单位,再由数个单位以强度元件为中心绞合成缆,这样光缆的芯线数一般适用于几十芯。

• 骨架式光缆 这种结构是将单根或多根光纤放入骨架的螺旋槽内,骨架的中心是强度元件,骨架的沟槽可以是 V 形、U 形或凹形。由于光纤在骨架沟槽内具有较大空间,因此