

21 世纪通信教材

光纤通信原理

GUANGXIAN TONGXIN YUANLI

邓大鹏 等 编著

0.11

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪通信教材

光纤通信原理

邓大鹏 等编著

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理 / 邓大鹏等编著. —北京:人民邮电出版社,2003.8

21世纪通信教材

ISBN 7-115-11339-4

I. 光… II. 邓… III. 光纤通信—高等学校—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 049966 号

内 容 提 要

本书主要介绍了光纤通信的发展;光纤的组成、导光原理,光纤光缆的损耗特性、色散特性;常用无源光器件的原理、结构和特性;光源的种类、结构、工作原理,光发送机的组成及特性;光电探测器及光接收电路的工作原理和特性指标;光放大器的工作原理、特性指标;常用光复用技术;模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统的构成、性能和系统设计;最后还介绍了相干光通信、光孤子通信和全光网络等光通信新技术。

本书是作者们多年教学和研究的总结,力求内容新颖,难易适度,深入浅出。避免了大篇幅深奥理论推导,注重理论性与实用性的结合。

本书为高等学校通信类专业的本科和专科生教材,也可作为从事光纤通信科研、生产、管理人员的培训教材或相关科技人员的参考用书。

21世纪通信教材

光纤通信原理

◆ 编 著 邓大鹏 等

策划编辑 滑 玉

责任编辑 须春美

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线 010-67129260

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 13

字数: 309千字

2003年8月第1版

印数: 1-5000册

2003年8月北京第1次印刷

ISBN 7-115-11339-4/TN · 2091

定价: 18.00元

本书如有印装质量问题,请与本社联系 电话:(010) 67129223

编者的话

30多年来光纤通信飞速发展,光纤通信新技术层出不穷,前两年还是作为新技术介绍的光放大器、密集波分复用技术等,目前已经大量投入使用,使光纤通信逐步进入了以光孤子为标志的第五代光波通信系统,并且可以预言,实现全光网络指日可待。光纤通信新技术的发展、新器件的使用使光纤通信系统无中继距离极大地延伸,光纤的巨大带宽容量得到了进一步的利用,同时也引入了一些诸如光纤非线性、光纤色散补偿、光孤子等许多新的概念和理论。

由于光纤通信日新月异,当前光纤通信原理方面的书籍有的部分内容已经过时;有的内容过于简单,不太适合作为通信专业本科生教材;有的太专,太深奥,只适应于研究生和科研人员阅读。出于教学的需要我们编写过多个版本的院内教材和教学讲义,收到了较好的效果。在这些教材和讲义的基础上经过修改整理,使内容更系统,条理更清晰,以适应在校通信专业学生和从事通信的工程技术人员的需要。使读者通过本书的学习,能较系统地掌握光纤通信的基本原理,了解国内外光纤通信的最新发展和光纤通信的新技术、新器件。

本书共分10章,第一章介绍光纤通信的发展背景、基本概念和预备知识。第二章介绍光纤的结构、类型、光纤射线理论和波动理论,光缆的构造、典型结构与光缆的型号。第三章介绍光纤的损耗特性、色散特性及色散和带宽对通信容量的影响,成缆对光纤特性的影响及典型光纤的主要特性参数。第四章介绍目前常用的无源光器件中的连接器、耦合器、波分复用器、光开关等器件的结构、工作原理及特性参数。第五章介绍光源的结构、基本工作原理及工作特性,光调制的基本原理,光发送机的构成、工作原理及主要技术指标。第六章介绍光电检测器的结构、基本工作原理及其工作特性,光解调的基本原理,光接收机的构成、工作原理及主要技术指标。第七章介绍光放大器的原理、结构、性能及系统应用。第八章介绍常用的几种光复用技术,对密集波分复用系统的构成、分类和密集波分复用系统的非线性串扰作了较详细的分析。第九章介绍模拟光纤通信系统的主要性能指标及传输距离设计方法,数字光纤通信系统的主要性能指标及数字光纤通信系统的损耗限制距离、色散限制距离和光通道的光信噪比。第十章介绍相干光通信技术的原理及关键技术,光孤子通信技术的原理及实验进展情况,同时对全光网技术也作了介绍。

本书的第一、八章由邓大鹏同志编写,第二、三章由李卫同志编写,第四章由王英杰同志编写,第五、六章由杨富印同志编写,第七章由党利宏同志编写,第九章由张引发同志编写,第十章由谢小平同志编写,全书由邓大鹏同志统稿。在本书的编写过程中,得到了西安通信学院领导和同事的大力帮助,在此一并表示感谢。

由于编者的水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编者

2003年4月

目 录

第一章 概述	1
1.1 光纤通信的发展与现状	1
1.1.1 早期的光通信	1
1.1.2 光纤通信	2
1.2 光纤通信的主要特性	4
1.2.1 光纤通信的优点	4
1.2.2 光纤通信的缺点	6
1.3 光纤通信系统的组成和分类	6
1.3.1 光纤通信系统的组成	6
1.3.2 光纤通信系统的分类	7
复习思考题.....	7
第二章 光纤和光缆	9
2.1 光纤的结构与类型	9
2.1.1 光纤的结构	9
2.1.2 光纤的类型	9
2.2 光纤的射线理论分析.....	11
2.2.1 基本光学定义和定律.....	12
2.2.2 光纤中光的传播.....	13
2.2.3 光纤中的模式传输.....	15
2.2.4 多模光纤与单模光纤.....	18
2.3 均匀光纤的波动理论分析.....	20
2.3.1 平面波在理想介质中的传播.....	20
2.3.2 阶跃光纤的波动理论.....	24
2.4 光缆.....	39
2.4.1 光缆的典型结构.....	39
2.4.2 光缆的种类与型号	42
小结	45
复习思考题	45
第三章 光纤的传输特性	48
3.1 光纤的损耗特性.....	48
3.1.1 吸收损耗.....	48
3.1.2 散射损耗.....	50

3.1.3	弯曲损耗	51
3.1.4	光纤损耗系数	52
3.2	光纤的色散特性	52
3.2.1	色散的概念	52
3.2.2	模式色散	53
3.2.3	材料色散	55
3.2.4	波导色散	57
3.2.5	极化色散	58
3.2.6	总色散	59
3.2.7	光纤的色散和带宽对通信容量的影响	60
3.3	成缆对光纤特性的影响	63
3.3.1	光缆特性	63
3.3.2	成缆对光纤特性的影响	63
3.4	典型光纤参数	64
	小结	65
	复习思考题	66
第四章	常用光无源器件	67
4.1	光纤连接器	67
4.1.1	光纤连接器的结构与种类	67
4.1.2	光纤连接器特性	70
4.2	光纤耦合器	71
4.2.1	光纤耦合器的结构与原理	71
4.2.2	光纤耦合器的特性	74
4.3	波分复用/解复用器	76
4.3.1	波分复用/解复用器的原理与分类	76
4.3.2	波分复用/解复用器的特性	78
4.4	光开关	79
4.4.1	光开关的种类	80
4.4.2	光开关的特性参数	82
	小结	83
	复习思考题	83
第五章	光源与光发送机	84
5.1	半导体光源的物理基础	84
5.1.1	孤立原子的能级和半导体的能带	84
5.1.2	光与物质的相互作用	85
5.1.3	粒子数反转分布状态	86
5.2	半导体光源的工作原理	86
5.2.1	发光二极管的工作原理	86
5.2.2	激光二极管的工作原理	87

5.3	光源的工作特性	90
5.3.1	LED的工作特性	90
5.3.2	LD的工作特性	91
5.3.3	光源的主要技术指标及简易检测	93
5.4	光发送机	94
5.4.1	光调制原理	94
5.4.2	光发送机的构成及指标	95
5.5	驱动电路和辅助电路	95
5.5.1	驱动电路	95
5.5.2	辅助电路	96
	小结	98
	复习思考题	99
第六章	光电检测器与光接收机	100
6.1	光电检测器	100
6.1.1	PIN光电二极管	100
6.1.2	雪崩光电二极管	101
6.2	光电检测器的特性指标	102
6.2.1	光电检测器的工作特性	102
6.2.2	光电检测器的典型指标及简易检测	104
6.3	光接收机	105
6.3.1	光解调原理	105
6.3.2	光接收机的构成与指标	106
6.4	光接收机的噪声	107
6.4.1	光接收机的噪声源	107
6.4.2	光接收机的信噪比	108
6.5	光接收机的灵敏度	109
6.5.1	数字光接收机的误码率	109
6.5.2	光接收机的灵敏度极限	110
6.5.3	实际光接收机的灵敏度	110
6.5.4	影响光接收机灵敏度的主要因素	111
	小结	112
	复习思考题	112
第七章	光放大器	113
7.1	光放大器概述	113
7.1.1	光放大器在现代光纤通信系统中的应用	113
7.1.2	光放大器的发展史	114
7.1.3	光放大器的分类	115
7.1.4	光纤放大器的重要指标	115
7.2	掺铒光纤放大器	116

7.2.1	掺铒光纤放大器的工作原理	117
7.2.2	掺铒光纤放大器的结构	118
7.2.3	EDFA 的重要指标	120
7.2.4	掺铒光纤放大器的系统应用	121
7.2.5	掺铒光纤放大器的优缺点	123
7.3	光纤喇曼放大器	123
7.3.1	光纤喇曼放大器的工作原理	124
7.3.2	光纤喇曼放大器的结构	124
7.3.3	光纤喇曼放大器的性能	125
7.3.4	光纤喇曼放大器的系统应用	126
7.3.5	光纤喇曼放大器的优缺点	127
7.4	其他光放大器	128
7.4.1	光纤布里渊放大器	128
7.4.2	半导体光放大器	128
7.4.3	掺铒波导光放大器	129
	小结	129
	复习思考题	129
第八章	光复用技术	131
8.1	光复用技术的基本概念	131
8.2	光时分复用技术	133
8.2.1	比特交错光时分复用	134
8.2.2	分组交错光时分复用	135
8.3	密集波分复用技术	138
8.3.1	WDM 系统基本类型	139
8.3.2	WDM 系统基本结构与工作原理	142
8.4	密集波分复用系统的非线性串扰	143
8.4.1	受激喇曼散射串扰	144
8.4.2	受激布里渊散射串扰	144
8.4.3	自相位调制和交叉相位调制	145
8.4.4	四波混频	146
	小结	147
	复习思考题	147
第九章	光纤通信系统设计	149
9.1	概述	149
9.2	模拟光纤通信系统	149
9.2.1	系统主要性能指标	150
9.2.2	传输距离设计	153
9.3	数字光纤通信系统	154
9.3.1	主要性能指标	155

9.3.2 系统设计	162
小结	172
复习思考题	173
第十章 光纤通信新技术	174
10.1 相干光通信	174
10.1.1 相干光通信技术基本原理及发展	174
10.1.2 相干光通信关键技术	175
10.2 光孤子通信技术	178
10.2.1 光孤子通信技术的基本原理	178
10.2.2 光孤子通信技术的新进展	182
10.3 全光通信网	187
10.3.1 全光网概述	187
10.3.2 全光网关键技术	188
小结	191
复习思考题	191
附录 英文缩写对照表	192
参考文献	196

第一章 概 述

3000 多年前人们就开始利用光进行通信,但光通信的真正飞跃是在光纤出现之后,由于光纤无可比拟的优越性,在短短的几十年中迅速地取代了电通信的地位,通信速率由几 Mbit/s,发展到单信道 10Gbit/s,40Gbit/s。

本章主要介绍光纤通信的一些发展背景、基本概念和预备知识。

1.1 光纤通信的发展与现状

1.1.1 早期的光通信

几千年前,中国就有火光通讯,它的设施叫烽火台。其中著名的有周朝的骊山烽火台,秦汉的长城烽火台。当时汉武帝大修万里长城,城上每隔五里设一个报警烽火台,一旦发现敌人入侵,白天燃烟,夜间举火,利用火光来传送军事情报。这种烽火台报警,就是古代的光通信方式。它也可以说是世界上最早利用光波通讯的形式了。

烽火台报警虽然简陋,但它却包含着近代光通信的一些基本要素。首先,要有一个光源,烽火台报警用的光源就是烽火;其次,必须有接收器(在光纤通信中又称为光信号接收机),也就是要有能感受火光的装置,烽火台报警用的接收机就是人的眼睛;第三,必须设法把要传送的信息加在光波上,就是对光波进行调制,在烽火台通信中,被调制的火光信号只有两种状态:有火光或无火光;第四是必须有良好的光通道,烽火台报警,就是利用地球表面的大气作为天然的光通道。

到了 1880 年,贝尔发明了第一个光电话,这一大胆的尝试,可以说是现代光通信的开端。

贝尔的光电话是以弧光灯作光源,发出的光投射在话筒的音膜上,当音膜按照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。这种被声音信号所调制的光,通过大气而传播一段距离后,被一个大型抛物面镜所接收,在该抛物面镜的焦点上放着一个硅光电池,它就是光探测器。硅光电池能将射在它上面的光转变成电信号,这个电信号的强弱及变化频率,都恰好能反映原来用于调制光信号的声音的强弱及频率。这个电信号被送进听筒,就能还原成原来的声音,完成了整个通信过程,如图 1.1 所示。

在这里,将弧光灯的恒定光束投射在话筒的音膜上,随声音的振动而得到强弱变化的反射光束,这个过程就是调制。而在接收端,载有信息的光射在硅光电池上,直接产生反映声音变化规律的光电流的过程就是解调。将这一电流送入听筒,从而恢复成声音信号,称为信息的再现。贝尔的光电话装置在晴天时通话距离可达数公里至十几公里。

贝尔光电话和烽火报警一样,都是利用大气作为光通道,光波传播易受气候的影响,在大雾天气,它的可见度距离很短,遇到下雨下雪天也有影响。因此气候不好,光电话常常是不能

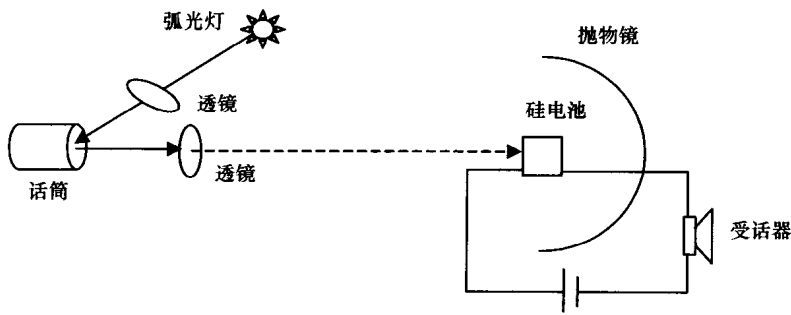


图 1.1 贝尔电话系统

通话,这显然限制了人们去考虑它的发展,甚至被人们忽视,几乎处于停顿状态,但是,贝尔光电话的遗产在现代光通信中仍闪烁着光芒。它的伟大发明,证明了可用光波作为载波来传递信息。

1.1.2 光纤通信

在大气光通信受阻之后,人们将研究的重点转入到地下光波通信的实验,先后出现过反射波导和透镜波导等地下通信的实验,如图 1.2 所示。但由于系统复杂、造价昂贵、施工调试困难而无法投入使用。1950 年,也曾出现过导光用的玻璃纤维(光纤),但传输损耗高达 1000dB/km 左右。也就是说,在 1km 的光导纤维上传送的信号损耗 10^{100} 倍。这是一个天文数字的损耗量,于是有人认为用这类光纤作为光波传输手段并无实际意义。

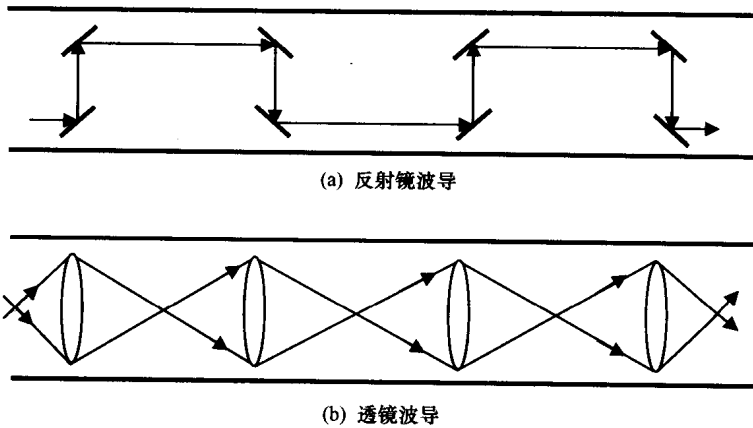


图 1.2 反射波导和透镜波导

1966 年,英籍华人高锟(K. C. Kao,当时工作于英国标准电信研究所)博士深入研究了光在石英玻璃纤维中的严重损耗问题,发现这种玻璃纤维引起光损耗的主要原因是其中含有过量的铬、铜、铁与锰等金属离子和其他杂质,其次是拉制光纤时工艺技术造成了芯、包层分界面不均匀及其所引起的折射率不均匀,他还发现一些玻璃纤维在红外光区的损耗较小。同年 7 月,高锟和他的同事 A. G. Heckhom 等人发表了著名的论文《介质纤维表面光频波导》,首次谈到实用型光纤的制造与在通信上的应用,提出了光纤传输光信号理论。他指出如能将光纤中过渡金属离子减少到最低限度,并改进制造工艺,提高材料的均匀性,就可使光纤的质量大大地提高而成为实用的光传输介质,而且有可能使光纤的光损耗减少到每公里一分贝左右。

他说：“一根带有包层的玻璃纤维，其芯线直径约为一个波长，总直径约 100 个波长，这根纤维就成为一根可能有实用价值的光学波导。它有充当新型通信手段的巨大潜力，其信息容量可能超过 100MHz。”

在高锶理论的指导下，1970 年美国的康宁公司拉出了第一根损耗为 20dB/km 的光纤。同一年贝尔实验室研制成功室温下可以连续工作的半导体激光器，其体积小、重量轻、功耗低、效率高，是光纤通信的理想光源。从此光纤通信开始飞速发展。

1977 年美国在芝加哥进行了 44.736Mbit/s 的现场实验，1978 年，日本开始了 32.064Mbit/s 和 97.728Mbit/s 的光纤通信实验；1979 年，美国 AT&T 和日本 NTT 均研制出了波长为 1.35 μ m 的半导体激光器，日本也做出了超低损耗的光纤（损耗为 0.2dB/km，波长为 1.55 μ m），同时进行了多模光纤（同时允许多个方向的光线在其中传送的光纤）1.31 μ m 的长波长传输系统的现场试验。到 1980 年，多模光纤通信系统已经投入了商用，单模光纤（只允许一个方向的光线在其中传送的光纤）通信系统也进入了现场试验。1983 年，日本新建了一条从北海道至冲绳岛纵贯南北的光缆干线，全长 3400km，采用了 24 芯单模光纤光缆，传输速率为 400Mbit/s；美国也从东西海岸各敷设了一条光缆干线，长度分别为 600km 和 270km，芯数为 144 芯；紧接着又在 1985 年敷设了 2002km 的南北干线，增设了总长 5 万公里的光缆，把全美国 22 个州用光缆连了起来，形成了长途光缆干线网。

中国从 20 世纪 70 年代初开始光通信的研究，到 1976 年研制出了可用于通信的多模光纤；1979 年，多模光纤在短波长窗口的损耗已低于 50dB/km，长波长窗口的损耗已低于 1.0dB/km，并于当年建成了长约 5.7km 的光纤数字通信试验系统；此后又分别在北京、上海、武汉、天津等地建立了现场试验系统，特别是 1983 年建成的连接武汉三镇的 8Mbit/s，1985 年扩容为 34Mbit/s 的数字光纤传输系统的开通使用，使中国的光纤通信开始走向实用化阶段。1987 年底，中国建成了从武汉至荆州全长约 250km 的第一条长距离架空光缆，使用国产长途光纤通信系统，传送 34Mbit/s 的数字信号。1988 年起，国内光纤通信系统的应用从多模向单模发展，建成了扬州至高邮全长 75km 的单模光纤传输系统，传输速率为 34Mbit/s；1989 年建成了合肥至芜湖单模光纤传输系统，传输速率为 140Mbit/s；1990 年利用国产设备建成了兰州至乌鲁木齐的直埋式长途光缆通信干线。“六五”期间，中国公用邮电通信网建设光缆线路 331.5km，“七五”期间建设光缆线路 7310.5km，“八五”期间完成 22 条光缆干线的建设任务，使国内光缆总长度达到 14.5 万公里。1994 年以后，除极少数干线采用 622Mbit/s 系统外，大多数干线直接采用 2.5Gbit/s 系统、10Gbit/s 系统和波分复用系统。截止到 1998 年底，中国公用邮电通信网已完成了连接全国 31 个省（自治区、直辖市）的“八纵八横”骨干光缆传输网建设，铺设的长途和本地中继光缆（不包括接入网）总长度为 100 万公里。

到如今，光纤通信已经发展到以采用光放大器（Optical Amplifier, OA）增加中继距离和采用波分复用（Wavelength Division Multiplexing, WDM）增加传输容量为特征的第四代系统。单信道商用速率（采用电时分复用 ETDM）可以做到 10Gbit/s，实验室速率可高达 40Gbit/s，几乎到达了电子器件的极限速率。320Gbit/s（32 \times 10Gbit/s）波分复用系统已开始大批量装备网络。北电等公司的 1.6Tbit/s（160 \times 10Gbit/s）WDM 系统也已经开始商用。朗讯公司则采用 80nm 谱宽的光放大器创造了波长数达 1022 波的世界记录。NEC 公司在实验室已完成 10.92Tbit/s 的传输试验。Essex 公司宣称实现了信道间隔 1GHz 的 4000 个波长的密集波分复用系统，信道总容量 4000 \times 1Gbit/s。

1.2 光纤通信的主要特性

光纤通信在短短的几十年中发展如此迅速,并使得世界上 80% 以上的电信业务在光纤通信网中传送,是与其无可比拟的优越性分不开的。

1.2.1 光纤通信的优点

1. 光纤的容量大

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—光波具有很高的频率(约 10^{14} Hz),因此光纤具有很大的通信容量。目前商用系统单信道速率可达 10Gbit/s(相当于一对光纤上同时传送 12 万多路电话),多信道总容量可达 1.6Tbit/s(相当于 1920 多万路电话)。即便如此,使用的带宽也大概只有光纤带宽的 1%。图 1.3 标示了目前使用的石英光纤的带宽潜力。从图中可以看到:目前使用的 1310nm 和 1550nm 两窗口的带宽和就有 20THz,如果消除 OH 吸收峰,长波长窗口的可用带宽可以到 50THz,从 1100nm 到 1700nm 的带宽更宽达 140THz。

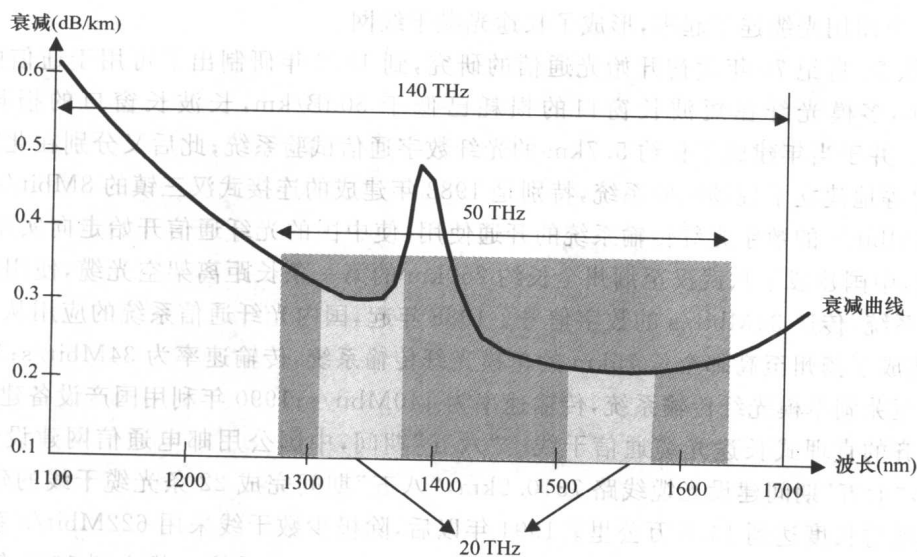


图 1.3 光纤带宽潜力

2. 损耗低、中继距离长

目前,实用的光纤通信系统使用的光纤多为石英光纤,此类光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 波长区的损耗可低到 0.18dB/km,比已知的其他通信线路的损耗都低得多,因此,由其组成的光纤通信系统的中继距离也较其它介质构成的系统长得多,参见表 1-1。

表 1.1 各种传输线路的中继距离

传输线路类型	最大通信容量(路)	中继距离(km)
大同轴电缆	10800	1.5
小同轴电缆	3600	2.1

续表

传输线路类型	最大通信容量(路)	中继距离(km)
微波线路	3600	40
140Mbit/s 光纤通信系统	1920	100
2.5Gbit/s 光纤通信系统	30240	50~60

如果今后采用非石英光纤,并工作在超长波长($>2\mu\text{m}$),光纤的理论损耗系数可以下降到 $10^{-3}\sim 10^{-5}$ dB/km,此时光纤通信的中继距离可达数千,甚至数万公里。这样,在任何情况下光纤通信系统均可以不设中继系统,它对于降低海底通信的成本、提高可靠性及稳定性具有特别的意义。

3. 抗电磁干扰能力强

我们知道,电话线和电缆一般是不能跟高压电线平行架设的,也不能在电气化铁路附近铺设。这是因为高压电线会辐射出比较强的电磁波,开动的电气列车会产生很强的电火花,它们都会干扰电话线里和电缆里传送的电信号,甚至会使打电话的人听不清对方在说什么。而光导纤维是石英玻璃丝,是一种非导电的介质,交变电磁波在其中不会产生感生电动势,即不会产生与信号无关的噪声。这样,就是把它平行铺设到高压电线和电气铁路附近,也不会受到电磁干扰。因而光纤通信除了可以在邮电通信部门使用外,还特别适合在铁道、电力等部门使用。

4. 保密性能好

对通信系统的重要要求之一是保密性好。然而,随着科学技术的发展,电通信方式很容易被人窃听:只要在明线或电缆附近(甚至几公里以外)设置一个特别的接收装置,就可以获取明线或电缆中传送的信息。更不用去说无线通信方式。

光纤通信与电通信不同,由于光纤的特殊设计,光纤中传送的光波被限制在光纤的纤芯和芯包界面附近传送,很少会跑到光纤之外。即使在弯曲半径很小的位置,泄漏光功率也是十分微弱的。并且成缆以后光纤的外面包有金属做的防潮层和橡胶材料的护套,这些均是不透光的,因此,泄漏到光缆外的光几乎没有。更何况长途光缆和中继光缆一般均埋于地下。所以光纤的保密性能好。

此外,由于光纤中的光信号一般不会泄漏,因此电通信中常见的线路之间的串话现象也可忽略。

5. 体积小,重量轻

目前常用的光纤的纤芯直径只有几个微米,加上包层以后,光纤的直径是 $125\mu\text{m}$,比一根头发丝稍微粗一点。这样的光纤,500m长也不过一两重。为了保护光纤,同时使它抗拉又抗弯,在制作光纤的时候,还在它的表面加上一层聚丙烯或者尼龙套层。加上这层套层以后,它的直径也不超过两个毫米。在实际通信线路中使用的不是单根的光纤,而是把好多根光纤跟抗拉的钢丝、塑料和填充材料等组合在一起,外面再套上厚橡胶皮这就是通常所说的光缆。这种光缆比电缆轻多了。有人把含有四根光纤的四芯光缆跟含有四根同轴管的同轴电缆作过比较,同轴电缆的直径是45mm,而四芯光缆的直径只有9mm,一公里的四管同轴电缆重4400kg,而一公里的四芯光缆只有200kg重,是电缆重量的4.6%。采用这种又细又轻的光缆,不管是运输,还是铺设线路,都很方便。另外,这种又细又轻的光缆,还特别适合用在飞机

和宇宙飞船上。

6. 节省有色金属和原材料

光纤的主要成分是二氧化硅(SiO_2),因此使用光纤可以节约大量的有色金属。我们知道,生产电缆需要大量的铜和铅。比如,生产一公里四管同轴电缆,需要 500kg 铜、1500kg 铅,这些有色金属在地球上的含量是极其有限的。而二氧化硅在地球上遍地都是,可以说,取之不尽,用之不竭。日本专家预言:将日本本土挖掘 10cm,石英可供日本使用 15 亿年。所以,光纤通信技术的发展应用既节约了大量的有色金属材料,也不会受到资源的限制。

1.2.2 光纤通信的缺点

事物都是一分为二的,光纤通信有许多优点,因而发展很快,但光纤通信也有以下缺点。

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,在光纤制造使用过程中采用一系列保护措施。其一,在光纤的生产过程中,给裸光纤增加涂覆层。其二,在光缆制造过程中,增加特殊的抗拉元件。其三,在光缆的施工过程中绝大部分拉力应加在抗拉元件上,使光纤基本不受到拉力。

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。

3. 光纤怕水

水进入光缆后主要会产生三个方面的问题。其一,水进入光纤后,会增加光纤的 OH^- 吸收损耗,使信道总损耗增大,甚至使通信中断;其二,水进入光缆后,会造成光缆中的金属构件氧化,使金属构件腐蚀,导致光缆强度降低;其三,进入光缆中的水遇冷后,水结冰体积增大有可能压坏光纤。为了保持光纤的特性不致劣化,在光纤和光缆的结构设计、生产、运输、施工、维护中应采取针对性的防水措施。

另外,光纤通信还存在分路、耦合不方便,弯曲半径不能太小等缺点。但应当指出,随着研究的深入和技术的发展,光纤通信的这些缺点都已被克服了,已经不再影响光纤通信的推广和应用。在此介绍这些缺点的目的,是要求我们在实际应用时尽量避免这些问题的发生。

1.3 光纤通信系统的组成和分类

1.3.1 光纤通信系统的组成

光纤通信系统是以光纤为传输媒介,光波为载波的通信系统。主要由光发送机、光纤光缆、中继器和光接收机组成。如图 1.4 所示(图中只画出了一个传输方向)。此外,系统中还包含了一些互连和光信号处理部件,如光纤连接器、隔离器、光开关等。

系统中光发送机的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。光发送机一般由驱动电路、光源和调制器构成,如果是直接强度调制可以省去调制器,这些将在后续章节中详细介绍。

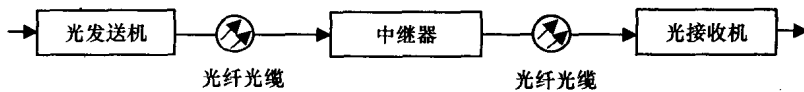


图 1.4 光纤通信系统构成

光接收机的作用是将光纤送来的光信号还原成原始的电信号。它一般由光电检测器和解调器组成,对于直接强度调制解调器可以省略。

光纤的作用是为光信号的传送提供传送媒介(信道),将光信号由一处送到另一处。

中继器分为电中继器和光中继器(光放大器)两种,其主要作用就是延长光信号的传输距离。电中继器是将经过长途传输损耗了的、有畸变的光信号转换为电信号,进行再定时、整形、再生出规则的电脉冲,然后再转换为光信号送入光纤;光中继器(光放大器)不需要进行光—电—光的转换,直接对光信号进行放大,因此比较简单。但光放大器不能对被放大信号进行再定时、整形和再生,也就是说,它在放大信号的同时,也放大了噪声,因此,一般在连续应用几个光放大器以后,要用一个电中继器进行再定时和整形。

1.3.2 光纤通信系统的分类

根据不同的分类方法,光纤通信系统可以分为不同的类型。

根据调制信号的类型,光纤通信系统可以分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统。模拟光纤通信系统的调制信号为模拟信号,它具有设备简单的特点,一般多用于广电系统传送视频信号,如有线电视的 HFC 网。数字光纤通信系统的调制信号是数字信号,它具有通信质量高,传输距离远等优点,目前得到了广泛的应用。

根据光源的调制方式,光纤通信系统可以分为直接调制光纤通信系统和间接调制光纤通信系统。直接调制光纤通信系统是用输入电信号直接施加于光源的驱动电路上,对光源的注入电流进行调制,具有设备简单的特点,因此在低速率设备中得到了广泛应用。在直接调制产生的啁啾噪声影响通信系统的性能时,就要采用外调制器将电信号调制在光波上,这种系统就为间接调制光纤通信系统,它具有调制速率高的优点,因此在一些高速系统中经常采用。

根据光纤的传导模数量,光纤通信系统可以分为多模光纤通信系统和单模光纤通信系统。多模光纤通信系统是以多模光纤为传输媒介的光纤通信系统,早期应用较多,目前应用较少,只在部分局域网中还在使用,其传输距离短、带宽窄。单模光纤通信系统是以单模光纤为传输媒介的光纤通信系统,其传输距离长,传输带宽宽,目前被广泛应用于长途以及大容量的通信系统中。

根据系统的工作波长,光纤通信系统可分为短波长光纤通信系统、长波长光纤通信系统和超长波长光纤通信系统。短波长光纤通信系统的工作波长为 $0.7\sim 0.9\mu\text{m}$,由于其线路损耗大,传输距离短,早已不再使用。长波长光纤通信系统的工作波长为 $1.1\sim 1.6\mu\text{m}$,是现在普遍采用的光纤通信系统,其损耗小,中继距离长。超长波长光纤通信系统的工作波长大于 $2\mu\text{m}$,采用的光纤为非石英光纤,具有损耗极低,中继距离极长的优点,是光纤通信的发展方向。

根据不同的分类方法,还可以把光纤通信系统分为其它类型,这里不再叙述。

复习思考题

1. 第一根光纤是什么时候出现的? 其损耗是多少?

2. 试述光纤通信系统的组成及各部分的关系。
3. 光纤通信有哪些优缺点？
4. 查阅相关资料,简述当前光纤通信系统的商用和实验室速率(单信道、多信道)。
5. 查阅相关资料,简述当前光纤研究的一些最新技术。