

光纤通信技术

杨英杰 编著

华南理工大学出版社

9.11

光纤通信技术

杨英杰 编著

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书全面地介绍光纤通信的基本技术和发展,包括光纤结构、传输理论和传输特性;光源、光电检测器、光无源器件及光放大器的类型、原理和特性;光发射机和光接收机的组成及工作原理;数字光纤通信系统(PDH和SDH)、相干光纤通信系统、光孤子通信系统和多信道复用光纤通信系统;光纤通信网络系统等。

本书可作为电子信息技术、电子科学与技术、计算机科学与技术(网络工程)等专业的本科生和研究生教材,也可供从事光纤通信工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术/杨英杰编著. —广州:华南理工大学出版社, 2004.4
ISBN 7-5623-2038-1

I. 光… II. 杨… III. 光纤通信 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 021455 号

总 发 行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail:scut202@scut.edu.cn

http://www.scutpress.com

责任编辑:傅穗文

印 刷 者:广东省农垦总局印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:20.5 字数:510 千

版 次:2004 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1~1 000 册

定 价:35.00 元

版权所有 盗版必究

前 言

通信是社会机体的神经,是现代社会三大基础(能源、交通和通信)之一。光纤通信的诞生与发展在电信史上无异于一次翻天覆地的革命,它在当今信息时代的举足轻重的地位已被毋庸置疑地确定并得到广泛的认同。光纤通信技术引起人们极大的兴趣和关注,成为最活跃的研究领域之一,反过来又促进光纤通信技术日新月异的发展,并且方兴未艾。

本书在作者多年来为研究生和本科生讲授“光纤传输技术”和“光纤通信技术”的讲稿的基础上编写而成,并参考相关著作。在注重基本概念和基础理论的同时,力图反映最新技术和发展。全书共分为9章。第1章为光纤通信概述;第2章和第3章分别介绍光纤的传输理论和传输特性;第4章介绍光纤通信系统使用的光无源器件;第5章和第6章分别介绍光源和光电检测器以及相应光端机的原理;第7章介绍光放大器;第8章介绍数字光纤通信系统、相干光纤通信系统、光孤子通信系统和几种多信道复用光纤通信系统;第9章介绍光纤通信网络。

教学中,可根据相应专业和层次的教学要求安排讲授内容,教学参考时数为50~70学时。

在本书的编写和出版过程中,得到华南理工大学电子信息学院和教研室的支持以及国家自然科学基金资助项目(60071032,697710515)的资助。承蒙黄光周教授审阅书稿,张丽琼、杨奕、罗建生同志为本书录入文字和绘制图表,李繁、梁立贤同志为本书的校对做了许多工作,在此谨向他们表示衷心的感谢。

书中不足之处,恳请读者指正。

编 者
2004年3月



1 光纤通信概述	1
1.1 光纤通信的发展简况	1
1.2 光纤通信系统的基本组成	4
1.3 光纤通信的特点	5
习题 1	6
2 光纤的结构及其传输理论	7
2.1 光纤的结构、分类及外特性	7
2.1.1 光纤的结构	7
2.1.2 光纤的种类	8
2.1.3 光纤的外特性参量	9
2.2 阶跃光纤导波理论	10
2.2.1 阶跃光纤的导光原理	10
2.2.2 阶跃光纤的波动理论	11
2.3 渐变光纤传输理论	27
2.3.1 光射线理论分析	27
2.3.2 平方律折射率分布光纤中的场解	31
2.3.3 模式数量	34
2.4 单模光纤	36
2.4.1 导波传输	36
2.4.2 单模光纤的等效近似分析法	37
习题 2	41
3 光纤的传输特性	43
3.1 光纤的损耗特性	43
3.1.1 衰减系数	43
3.1.2 损耗的原因及其分类	44
3.2 光纤的色散特性及传输带宽	47
3.2.1 色散的分类	48
3.2.2 光纤色散的量度方法	48
3.2.3 模内色散	49
3.2.4 光纤的传输带宽	57
3.3 单模光纤的双折射及偏振特性	60
3.3.1 单模光纤的双折射	60
3.3.2 双折射对光纤传输特性的影响	61

3.3.3 线双折射的参量	62
3.4 光纤的非线性效应及其对传输特性的影响	63
3.4.1 自相位调制和交叉相位调制	64
3.4.2 四波混频与参量放大	65
3.4.3 受激喇曼散射和受激布里渊散射	66
习题 3	68
4 光波系统的无源器件	70
4.1 光纤连接技术及光纤连接器	70
4.1.1 光纤连接器的基本结构	71
4.1.2 光纤连接损耗	73
4.2 光耦合器	76
4.2.1 微光元件型耦合器	76
4.2.2 全光纤型耦合器	77
4.2.3 集成光波导型耦合器	80
4.2.4 光耦合器的特性参数	81
4.3 光波分复用器	82
4.3.1 熔融拉锥全光纤型	82
4.3.2 干涉滤波器型	83
4.3.3 光栅型	84
4.4 光隔离器	87
4.5 光开关	88
4.6 光衰减器	90
4.7 光偏振控制器	92
习题 4	93
5 光源和光发射机	94
5.1 半导体光源的物理基础	94
5.1.1 光的吸收与发射	94
5.1.2 半导体的光发射	97
5.2 发光二极管	104
5.2.1 半导体发光二极管的结构和原理	104
5.2.2 发光二极管的工作特性	106
5.3 半导体激光器	110
5.3.1 半导体激光器的构成和原理	111
5.3.2 半导体激光器的工作特性	114
5.3.3 半导体激光器的瞬态特性	120
5.4 单纵模激光器	127
5.4.1 单纵模激光器的主要类型	128
5.4.2 分布反馈半导体激光器	128
5.4.3 耦合腔半导体激光器	130

5.5 光发射机	131
5.5.1 光源的调制	132
5.5.2 模拟驱动电路	134
5.5.3 数字驱动电路	137
5.5.4 激光器的控制电路	141
5.5.5 光源的保护	145
5.6 光源与光纤的耦合	147
5.7 光源的外调制	150
5.7.1 电光效应与电光调制	151
5.7.2 声光效应及声光调制	155
5.7.3 磁光效应及磁光调制	157
习题 5	159
6 光检测器和光接收机	160
6.1 概述	160
6.2 光电检测器	161
6.2.1 半导体光电检测器的工作原理	162
6.2.2 光电检测器的主要特性	169
6.3 光接收机的基本组成	176
6.3.1 光接收机的前置放大器	176
6.3.2 光接收机的线性通道	178
6.3.3 数据恢复电路	182
6.3.4 集成光接收机	183
6.4 光接收机的噪声	184
6.4.1 光接收机噪声的来源	184
6.4.2 光电检测器的噪声	186
6.4.3 热噪声	188
6.4.4 光接收机的信噪比	189
6.5 数字接收机的灵敏度	191
6.5.1 误码率	191
6.5.2 灵敏度	194
6.5.3 光接收机的灵敏度极限——量子极限	196
6.6 动态范围和自动增益控制	197
6.6.1 光接收机的动态范围	197
6.6.2 自动增益控制	198
习题 6	199
7 光中继器和光放大器	200
7.1 光中继器	200
7.2 光放大器的分类	201
7.2.1 半导体光放大器	201

7.2.2	非线性光纤放大器	202
7.2.3	掺杂光纤放大器	203
7.3	掺铒光纤放大器	204
7.3.1	EDFA 的基本结构	204
7.3.2	EDFA 的工作原理	205
7.3.3	EDFA 的速率和传输方程模型	206
7.3.4	EDFA 的主要特性参量	209
7.3.5	EDFA 的应用	215
7.3.6	EDFA 的发展方向	219
	习题 7	221
8	光纤通信系统	222
8.1	数字光纤通信系统	222
8.1.1	系统的主要性能指标	222
8.1.2	系统的设计	229
8.1.3	光纤线路码型	233
8.1.4	光纤通信的同步数字系列	237
8.2	相干光纤通信系统	243
8.2.1	相干光纤通信的构成及相干检测原理	243
8.2.2	调制与解调方式	245
8.2.3	相干光接收机的信噪比、误码率和灵敏度	250
8.2.4	相干光纤通信的优点及关键技术	252
8.3	光孤子通信系统	258
8.3.1	光孤子形成机理	258
8.3.2	光孤子的特性	260
8.3.3	光孤子通信系统	263
8.4	多信道复用光纤通信系统	267
8.4.1	光波分复用系统	267
8.4.2	频分复用	274
8.4.3	光时分复用	275
8.4.4	光码分复用	277
8.4.5	空分复用	279
8.4.6	副载波复用	280
	习题 8	284
9	光纤通信网络	286
9.1	通信网概述	286
9.1.1	通信网络及其分类	286
9.1.2	光网络的光连接和分层结构	289
9.2	光纤接入网	292
9.2.1	接入网的简述	292

9.2.2 光接入网	297
9.3 全光网络	302
9.3.1 全光网络的概念及特点	302
9.3.2 全光网络的结构	304
9.3.3 全光网络的基本技术	306
习题9	315
参考文献	316

1 光纤通信概述

1.1 光纤通信的发展简况

一般来说,由一地(发送端)向另一地(接收端)传送信息称为通信。通常是将需传递的信息加载在某种载体(例如电磁载波)上进行传送,这一过程称为信号的调制,在接收端再将信息从载体上解调出来。通信的容量可用所能调制的频带宽度来描述,调制带宽又直接受载体(载波)频率的限制,载波频率越高,通信容量也越大。整个通信的发展过程是载波从长波长到短波长、从低频到高频,即从射频(Radio Frequency)到微波(Micro Wave)进而开拓光波频段,如图 1-1 所示。光载波的通信容量大约是微波的 10^5 倍,具有诱人的前景和实际

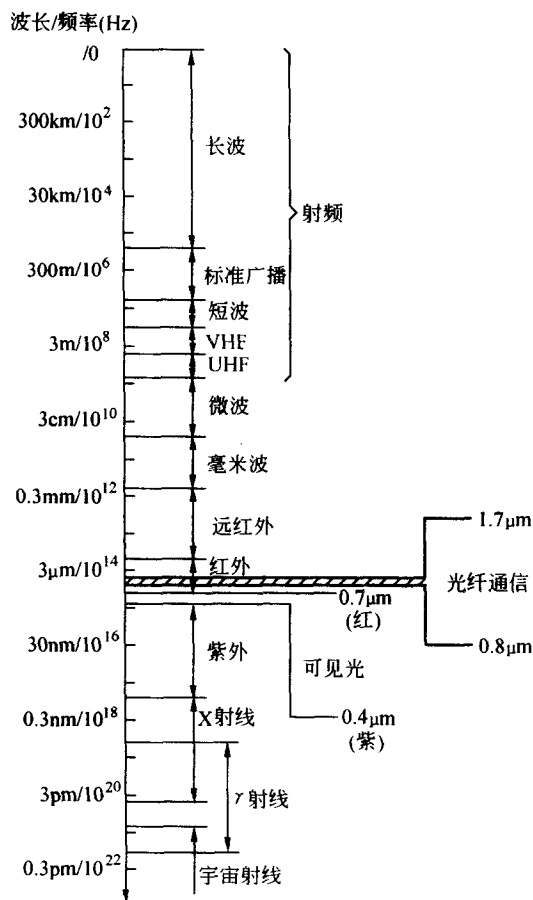


图 1-1 光纤通信在电磁频谱中的位置

意义,因此,通信向光通信发展是必然的。

从广义上讲,凡使用光作为通信手段的,都称为光通信。其频率位于远红外、红外、可见光和紫外光频区。光通信并不是一个全新的概念,其历史可以追溯到 3000 多年前我国周朝使用烽火台的“烽火”目视光通信,此后,信号灯、语旗、信号弹甚至交通红绿灯等均是沿用这种利用可见光进行视觉通信的方式,都可划入光通信的范畴。

现代光通信的概念是指采用光波作为载波来进行信息传送的通信方式。从工作原理上说,它和目视光通信方式有很大的差别。严格地说,目视光通信不能视为真正的光通信。这样,光波通信的历史只能从 1880 年由美国贝尔(Alexander Groham Bell)发明“光电话”开始。贝尔用阳光作为光源,通过振动镜将话音调制在光波上,即光的强度随话音而变化,在大气空间传输 200m 距离。在接收端,用硅光电池将光能转换成电流,实现解调,把电流送到受话器就可以听到发送端的话音。贝尔的光电话证明了利用光载波传递信息的可能性,连贝尔本人也说“光电话是我一生最伟大的发明”。但受当时技术条件的限制,主要是没有理想的相干光源和合适的传输媒质,使光通信沉睡了 80 年。

直到 1960 年,美国梅曼(Maiman)发明了世界上第一个激光器——红宝石激光器,光通信才又活跃起来。激光器发出的激光亮度极高,谱线很窄,方向性非常好,是一种频率和相位一致的相干光,而且易于调制和传输。但这种激光器体积大,耦合效率低,不适宜在光通信中应用。1962 年砷化镓(GaAs)半导体激光器(LD)问世,这种体积小的高速光源的成功给实用化的光通信光源带来新的曙光。早期的 GaAs 半导体激光器只能在低温液氮下以脉冲方式工作,阈值高,寿命短。1970 年成功地研制出 GaAlAs 双异质结注入式半导体激光器,它可以在室温下连续地工作。由于 LD 昂贵,半导体发光二极管“LED”应运被研制出来。为了适合光纤通信向 $1.3 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 的长波长方向发展的需要,利用四元系合金 In-GaAsP 制造出了 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 的 LD 和 LED。

与此同时,半导体光电检测器光电二极管 PIN 和雪崩光电二极管 APD 也相继研制成功。长寿命、高效率、高速率的光源和光电检测器的成功制出和使用,解决了光纤通信的一大难题。

应特别指出的是,光源的成就与光路的研究和发展有紧密联系,并相互促进。事实上,当梅曼发明激光器后,人们就把注意力集中在寻找用激光进行通信的途径,提出了许多解决光传输通路问题的方法。例如,针对光在大气中传输存在的缺点,先后提出空心式光波导、薄膜式光波导、透镜或反射镜阵列式光波导系统等,将光束限制在特定的光路中传输,避免外界因素对光传输性能的不良影响。虽然这些方法的试验是基本成功的,但其方法太复杂,安装机械精度极高,抗震能力差,传输性能易受温度变化的影响等,未能获得实用。

早在 1950 年,已有人对光导纤维作为光的传输介质进行探讨和研究。1951 年,发明了医学用光导纤维,它作为导光介质用于胃镜。

但当时的光纤损耗高达 1000 dB/km 以上,这是一个不可思议的天文数字。相当于光能沿光纤传输 100m 后,只剩下原来的 100 亿分之一了。换言之,用这种光纤进行通信,每隔 20m 就需安装一个中继器。显然,它不能作为光通信的传输介质,研究工作也因此而停滞不前。直到 1966 年,英籍华人高锟(C.K.Kao)和 G.A.Hockman 发表了一篇对光纤通信发展有重要历史意义的著名论文,认为普通 SiO_2 玻璃的高损耗是由其所含杂质造成的,并预言,如能将光纤材料的杂质去除,损耗将可降为 20 dB/km 。根据高锟的理论,美国康宁

(Corning) 玻璃公司于 1970 年率先制造出损耗为 20dB/km 的低损光纤,使利用光纤传输光信息已接近实用水平,成为世界上公认的第一根通信用光纤。1972 年 Corning 公司推出了 3dB/km 的光纤。1973 年美国贝尔实验室将光纤的损耗降到 2.5dB/km。该实验室于 1974 年和 1975 年分别制出损耗低达 1.1dB/km 和 1dB/km 的光纤,已使同轴电缆望尘莫及。1976 年日本电报电话(NTT)公司制造出 0.47dB/km 的光纤,第二年(1977 年)该公司采用汽相轴向沉积法(VAD 法)成功地拉制出 0.32dB/km 的光纤。1979 年日本茨城通信研究所做出了在 $1.55\mu\text{m}$ 窗口上损耗为 0.2dB/km 的单模光纤。现在光纤的最低损耗已低于 0.18dB/km,逐渐接近石英光纤的理论极限(0.15dB/km),最长的中继距离已超过 300km。

在光纤通信两大难题相继解决的同时,各种无源器件及专用仪器设备等配套技术也相应发展,这些都为光纤通信的实用化奠定了良好的基础。1976 年,美国电报电话(AT&T)公司在亚特兰大成功地进行了世界上第一个码速为 44.736Mb/s 光纤通信系统现场试验,并于 1980 年投入商用。与此同时,日本、法国和前西德等国家也进行现场试验,光纤通信进入实用时期。

从技术特点上看,光纤通信的发展可分为五代,如图 1-2 所示。第一代光纤通信系统的工作波长为 $0.85\mu\text{m}$ (短波长),使用多模光纤、GaAlAs/GaAs(镓铝砷/砷化镓)半导体激光器、Si 材料的光电检测器。这种系统主要用于中小容量、低速短距离的通信。

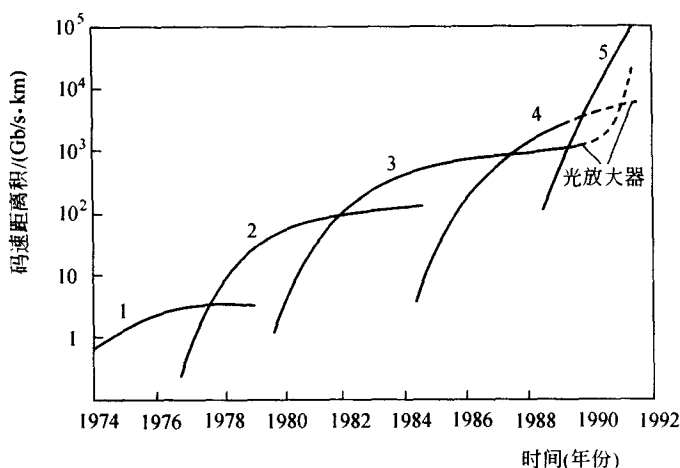


图 1-2 光纤通信系统的进展

1— $0.85\mu\text{m}$ 多模光纤; 2— $1.3\mu\text{m}$ 单模光纤; 3— $1.55\mu\text{m}$ 直接检测;
4— $1.55\mu\text{m}$ 相干检测; 5—光孤子

第二代光纤通信系统工作波长为 $1.3\mu\text{m}$,光源采用 InGaAsP/InP(铟镓砷磷/铟磷)半导体激光器,光电检测器采用 Ge(锗)材料,早期采用多模光纤,由于多模光纤的模间色散限制了系统的码速($<100\text{Mb/s}$),故后期采用单模光纤。1987 年单模光纤的第二代光通信系统开始商业营运,其码速高达 1.7Gb/s ,中继距离为 50km。

第三代光纤通信系统工作波长为 $1.55\mu\text{m}$,采用色散位移光纤(DSF)和单频激光器来改善色散特性。1990 年投入通信商业的第三代系统工作于 2.4Gb/s ,设计精良的可超过 10Gb/s ,中继距离超过 100km。

第四代光纤通信系统的特征是采用光放大器(OA)和频分与波分复用技术,甚至采用相干光纤通信方式。特别是在20世纪90年代初期掺铒光纤放大器的问世,推动了全光纤通信的发展,并使整个光纤通信领域发生重大变革。

第五代光纤通信系统的技术特征是基于在强功率下,光纤非线性效应引起的脉冲压缩抵消光纤色散效应产生的脉冲展宽的新概念产生的光孤子通信,其技术的成功可实现光信号脉冲的保形传输,具有巨大的潜力和美好的前景。1989年,掺铒光纤放大器开始用于光孤子放大之后,各国纷纷对光孤子通信进行研究。1990~1992年,美国、英国的实验室将2.5Gb/s和5Gb/s的数据传输 10^4 km以上;日本的实验室将10Gb/s的数据传输 10^6 km。1995年,法国的实验室将20Gb/s的数据传输 10^6 km;同年,线性试验也分别将20Gb/s和40Gb/s的数据传输8100km和5000km。在日本东京周围的城域网中进行的线形光孤子系统现场试验中,分别将10Gb/s和20Gb/s的数据传输了2500km和 10^3 km。1994年和1995年期间,也分别将80Gb/s和160Gb/s的高速数据传输了500km和200km。

随着光纤通信技术的发展,光纤通信已被引入公用电信网、中继网和接入网中,使通信网由第一代的纯电信网发展为第二代通信网。为了降低成本,第二代通信网络的拓扑骨架基本上是电信网的模式,只是将网络的骨架结构内的电线用光纤代替,属于光纤/同轴电缆混合网。其性能得到改善,但光纤通信的优势没有得到充分的发挥。随着新颖光纤、半导体功能光器件及相关技术的发展,全光通信网的来临将是指日可待。这种信号传输、交换、复用、控制与路由选择等全都在光域中进行的真正光波通信网成为第三代通信网。

总之,光纤通信的发展以大容量、高码速和远距离传输为目标。综观它的发展过程,可以看出其发展的趋势:①由短波长向长波长发展;②由多模光纤向单模光纤发展;③由低码速向高码速发展;④由点到点系统向光纤网络系统发展;⑤配套的新技术、新型器件层出不穷。

1.2 光纤通信系统的基本组成

光通信系统可分为非导波系统和导波系统两大类。非导波系统属于无线通信系统,光波在空间传播,传输介质为大气或真空。但由于光在大气中传播时衰减很严重,应用上受到限制。在近于真空的宇宙空间,没有大气干扰和衰减问题,故它在卫星之间的光通信上,仍有发展前途;导波系统中,光被限制在有限的通道中传输,实用的系统是光纤通信系统。光纤通信系统属有线通信系统,其传输的介质是光纤。

可以从不同的角度对光纤通信进行分类。例如按调制方式可分为模拟系统和数字系统。其中,模拟调制包括强度调制(IM),幅值调制(AM),频率调制(FM),相位调制(PM),脉位调制(PPM),脉宽调制(PWM或PDM),脉幅调制(PAM),脉冲频率调制(PFM)或脉冲数调制(PNM)等;数字调制方式包括脉冲编码调制(PCM),差分脉冲编码调制(DPCM),增量调制(Δ M)等;按传输距离可分为长距离干线、中距离的局间和短距离用户光纤通信系统;按接收方式可分为直接检测和相干检测光纤通信系统。此外,还可以从信号的复用方式进行分类等等。

目前实用的光纤通信系统采用强度调制/直接检测(IM/DD—Intensity Modulation/

Direct Detection)方式。IM 是指在发送端用电信号去改变光载波的强度;DD 是指在接收端用光电检测器直接把被调制的光波变为原始的电信号。这种光纤通信系统的方框如图 1-3 所示,主要由三部分组成:

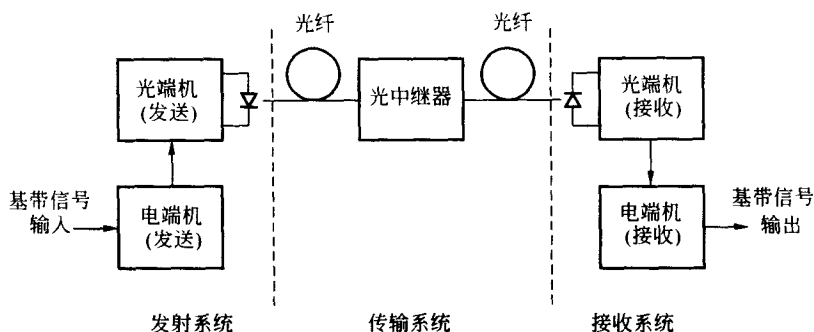


图 1-3 光纤通信系统的基本组成

1)发射系统 发射系统的主要任务是把电信号转变成为光信号,即电-光转换。由电端机发出的电信号,输入到光端机,该电信号通过驱动电路对光源进行调制,产生带有信息的光信号,并耦合到光纤(光缆)进行传输。电端机的作用是对来自信息源的信号进行处理,例如 A/D 变换、多路复用等是常规通信设备。

2)传输系统 传输系统主要由光纤(光缆)和光中继器组成。光纤的主要功能是传输光信号,完成信息的传送任务。实用的传输线路,往往采用由多条光纤构成的光缆。光信号在光纤中传输一段距离后,其幅度将被衰减,波形也产生失真。为了使光信号能长距离传送,每隔一段距离设置光中继器。光中继器的主要作用:①对光信号进行放大,补偿光信号的衰减;②对失真的信号波形进行整形。

3)接收系统 接收系统主要任务是将接收到的光信号还原为电信号,送到接收端电端机,即光-电转换。光电转换是由光电检测器来完成。

在光纤通信系统中,还使用若干无源器件。有关问题将在后面进行讨论。

1.3 光纤通信的特点

光纤通信与电通信的主要区别在于传输信号和传输线路两方面。光纤通信以光频作为载波,传输光信号;用光纤或光缆作为传输线路(介质)。所以,光源和光纤在光纤通信中起主导作用。

自 1970 年至今 30 多年的时间内,异军突起的光纤通信迅猛地发展,势不可挡。原因是它与电通信相比,具有独特的优点:

1)传输频带宽,通信容量大 携带信息所用的载波频率不同是光纤通信与电通信的本质区别。目前光纤通信使用的光载波频率的典型值约为 100THz ($1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$),而微波载体的频率为 $1\sim 10\text{GHz}$ ($1\text{GHz} = 10^9\text{Hz}$),光纤通信的信息容量为微波通信的 $10^4\sim 10^5$ 倍。通常,传送一路标准电话所需的频率宽度为 4kHz ,而一路电视所占的宽度为 6MHz 。单模

光纤的可用带宽高达 20THz,原则上,一对光纤可传送 10 亿路电话或 10 万路电视,容量之大非微波通信所及。

2)传输损耗低,中继距离长,降低成本和出故障的可能性 用同轴电缆时,中继距离只有几公里。微波通信的最长中继距离也只约 50km。微波中继站越多,通信线路成本就越高,中继站出故障的可能性就越大,维护也越不方便。前面已指出,由于光纤损耗低,目前光纤通信系统中两中继站之间的最远距离已超过 300km。如采用光放大器,则可不需再生中继,便可直通上万公里。石英光纤由于本身材料的原因,有一个 0.15dB/km 的最低损耗极限。研究者们正在探索用新材料和技术制造新光纤,期待其损耗低于 10^{-3} dB/km,一旦成功,长达数千上万公里而无需中继站的光纤通信便将不在话下。

3)抗干扰能力强,保密性好 在光纤中传输的是光波,外界强电磁干扰源的频率比它低得多,当然不可能干扰光波;何况石英光纤材料是绝缘介质,故雷电、工业火花、电弧、核辐射等都不会对它产生感应电磁干扰。此外,信号以光的形式被束缚在光纤芯子中进行传递、交换,不会外泄,用电磁感应的办法来窃听不会奏效,具有良好的保密性能。

4)直径细,重量轻 直径约 0.1mm 的光纤细如发丝,套塑后外径也小于 1mm。光纤材料的密度小,成缆后重量远比电缆轻。现在的 18 管同轴电缆重量约为 11kg/m,而 18 芯的光缆只有 0.15kg/m。因此便于运输和施工。

5)材料资源丰富,节约有色金属 光纤的主体成分是 SiO_2 ,它在地球上的储藏量也视为取之不尽。而通信电缆由铜制造,铜在地球上蕴藏量十分有限,这类资源严重紧缺的有色金属价格很贵。从经济角度看,光纤也同样占据优势。

6)抗化学腐蚀,不会产生短路电火花,不受气候变化影响。

光纤的缺点:①光纤弯曲半径不能太小,否则将有严重的弯曲损耗,甚至会导致截止;②光纤的切断和连接技术要求高;③分、合路较麻烦;④由于光纤本身不能传送电能,因此,中断站的供电须由远供系统解决。但这些缺点丝毫不影响光纤通信举足轻重的地位,何况随着技术水平的提升,其影响将减少,有的甚至会消除。

习题 1

- 1-1 为什么要发展光通信?光通信与电通信有什么不同?
- 1-2 光纤通信系统主要由哪几部分组成?简述各部分的作用。
- 1-3 光纤通信的主要特点是什么?

2 光纤的结构及其传输理论

光纤是光导纤维的简称,它是在光通信中能长距离传输光信号的圆截面介质的光波导,是一种高透明度的玻璃丝,由纯石英经复杂的工艺拉制而成,光在玻璃的界面上全反射并由它导行。

光纤的特性指光纤的几何结构特性、光学特性和传输特性等。几何结构特性主要是用光纤的纤芯和包层的几何尺寸来表述;光学特性用它的径向折射率分布和数值孔径来表述;传输特性指的是光纤的损耗和色散以及单模光纤偏振特性(下章讨论)。

光在光纤中传输,可以用几何光学(射线光学)理论和波动光学理论进行分析。用几何光学分析时,忽略光波长,用光射线去代表光能量的传输路线,适合对光波长 λ 远小于纤芯直径 $2a$ 的光纤分析,方法简单、直观,物理概念清楚,但精度受一定限制。光是一种电磁波,可采用电磁场理论,即波动光学的方法进行分析。当 $2a$ 与 λ 可比拟时,特别是在分析光纤中的模式行为时,射线光学方法显得无能为力,而用波动理论可对光学现象作定量分析,并获得严格的解。

2.1 光纤的结构、分类及外特性

2.1.1 光纤的结构

从横截面上看,光纤是由纤芯、包层、涂覆层及套塑四部分组成的同心圆柱体,其中纤芯和包层是它的基本结构,如图 2-1 所示。光纤中心部分为纤芯,折射率为 n_1 ,直径 $2a$ 一般为 $5\sim 50\mu\text{m}$,它的主要成分是高纯度(达 99.99999%)的二氧化硅(SiO_2),并掺入极少量的掺杂剂,如二氧化锗(GeO_2)和五氧化二磷(P_2O_5)。掺杂的目的在于提高纤芯的折射率。包层的折射率为 n_2 ,直径 $2b$ (含纤芯)一般为 $125\mu\text{m}$,它也是由高纯 SiO_2 并掺杂三氧化硼(B_2O_3)或氟(F)而制成。掺杂目的是为了降低包层的折射率,使 $n_1 > n_2$ 。纤芯和包层决定了光纤的光学和传输特性。为了提高抗拉强度和抗侵蚀能力,在包层外面涂覆一层很薄的环氧树脂或硅橡胶,称为涂覆层。在涂覆层外面再加套塑层,以加强机械强度并满足成缆需要。套塑层大都采用尼龙或聚乙烯作为套塑材料。套塑层的材料和结构有所不同,因此,有紧套光纤和松套光纤两种不同结构。紧套光纤是在涂覆层和套塑层之间有缓冲层($100\mu\text{m}$ 厚),以减小外应力对光纤的作

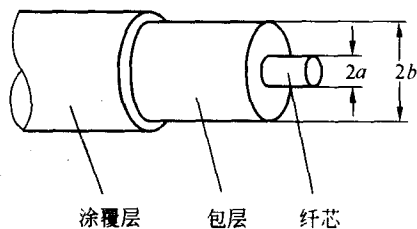


图 2-1 光纤的基本结构

用;松套光纤是在涂覆层外面套塑料套管,管中填充油膏,光纤可以在套塑中自由松动。

光纤要在工程中使用,必须成缆。光缆是由若干根光纤组成的缆芯、加强元件和护套组成,其种类繁多,图 2-2 给出了我国普遍采用的一层绞式和骨架式两种结构。

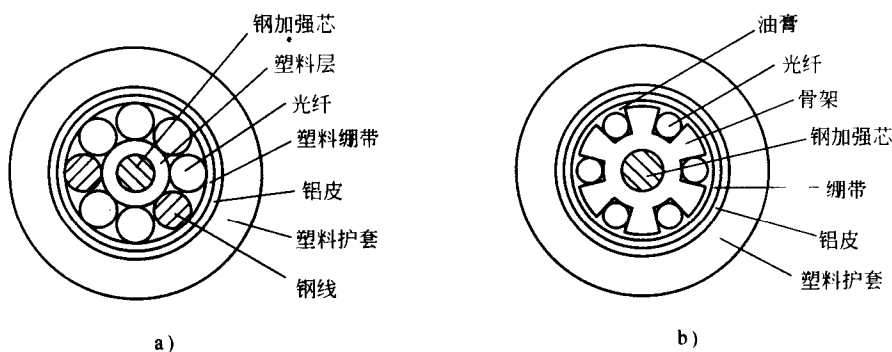


图 2-2 两种光缆结构
a)层绞式光缆; b)骨架式光缆

2.1.2 光纤的种类

光纤有不同的分类方法,同一种光纤,分类方法不同,名称也不同。

2.1.2.1 按光纤折射率分布分类

根据光纤芯部与包层折射率分布形状,光纤可分为两类:

1. 阶跃型光纤(SIF—Step Index Fiber)

这种光纤的纤芯和包层折射率都是常数,只有在纤芯和包层的界面处,折射率呈阶跃式变化,即

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & 0 \leq r \leq a \\ n_2, & r \geq a \end{cases} \quad (2-1)$$

又称为均匀光纤。如图 2-3b 所示。

2. 渐变型光纤(GIF—Graded Index Fiber)

渐变型光纤包层的折射率分布是均匀的,即 n_2 为常数。而纤芯的折射率分布由包层起逐渐增大,在轴心处达到最大值 n_1 。即纤芯的折射分布为 $n(r)$, r 是纤芯的半径

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{\frac{1}{2}}, & r \leq a \\ n_1 (1 - 2\Delta)^{\frac{1}{2}} = n_2, & r \geq a \end{cases} \quad (2-2)$$

式中

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-3)$$

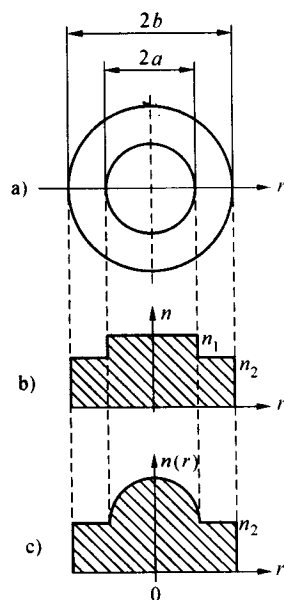


图 2-3 光纤剖面折射率分布
a)光纤的剖面; b)阶跃型光纤;
c)渐变型光纤