



光纤通信 原理与系统

GUANG XIAN TONG XIN YUAN LI YU XI TONG

○张明德 孙小菡
○东南大学出版社

光纤通信原理与系统

张明德 孙小菡

东南大学出版社

TN9-1

内 容 简 介

本书在阐述光纤通信技术基本原理的同时,结合光纤通信系统与设计的实际及光纤通信的新技术、新发展进行深入讨论。主要内容有:光纤传输原理与特性、光源与光发送机、光检测器与光接收机、模拟与数字光纤通信系统、相干光纤通信、波分复用光纤通信、光纤网、光放大器与全光通信、光纤孤子通信等。本书既可作为高年级本科生或研究生的教材,亦可供从事光纤通信技术的科研与工程技术人员参考。

责任编辑:冉榴红

责任校对:汤铭权

责任印制:王小宁

光纤通信原理与系统

张明德 孙小菡

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编 210096)

江苏省新华书店经销 东南大学激光照排中心印刷

*

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 11.435 字数 297.2 千

1996年12月第1版 1998年10月第2次印刷

印数:801—2800册

ISBN 7-81050-185-2/TN·24

定价:13.50元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

前 言

光纤通信在现代信息科学技术中的举足轻重地位已是有口皆碑,它的出现与迅速发展大大地改观了信息技术的面貌。当今世界上光纤通信得到了广泛的应用,不仅陆地上使用,而且还铺设了许多跨越大洋大海的海底光缆,可以毫不夸张地说,光缆现在已经包裹了整个地球。光纤通信已成为现代通信的支柱、世界通信网的骨干。用光缆代替传统使用的电缆,电信网的光纤化已是大势所趋。虽然一般讲光纤通信技术已经成熟,但其发展势头方兴未艾,各种新技术、新产品、新构思仍雨后春笋般地涌现,推动着光纤通信技术的进一步发展。“信息高速公路”铺设到各个家庭也不是遥远的事,从而将更深刻地影响到人们的生活方式、工作方式与学习方式,并推动人类社会的文明进步与发展。

相应于此,国内外许多高校,无论是工科还是理科,纷纷开设了光纤通信的有关课程,以满足社会对各种层次人才的需求。本书旨在希望用不太大的篇幅,在详细阐明光纤通信技术基本原理的同时,又尽可能结合光纤通信的系统与设计的实际,及光纤通信的新技术、新发展,以满足高年级本科生及低年级研究生学习光纤通信原理与系统的教学需要,同时亦可供从事光纤通信技术工作的科研与工程技术人员参考。

读者只要具有电磁场理论、大学物理及高等数学的基本知识,就可阅读本书。如读者学习过光电子学及通信原理的基本知识当然更好,但这并不是阅读本书的前提。全书共分五章,主要围绕应用最广的强度调制、直接检测光纤通信系统展开讨论。第一章光纤通信概论,介绍光纤通信的特点、历史、系统结构组成与发展。接着

三章介绍光纤通信系统的核心部件,其中第二章介绍光纤传输原理与特性;第三章介绍光源与光发送机,包括半导体光源的基本工作原理、应用特性、驱动电路与调制技术;第四章介绍光检测器与光接收机,包括半导体光检测器的光检测原理及主要特性,然后着重对光接收机的性能特性进行系统分析。第五章为光纤通信系统,首先对光纤通信系统的元件选择、设计原则与方法进行综合讨论,接着对模拟光纤通信系统及数字光纤通信系统的组成与性能作详细介绍,然后对更复杂的光纤通信系统如相干光纤通信、波分复用、光纤网等进行讨论,最后对光纤通信新技术如光放大器与全光通信、光纤孤子通信等进行介绍。

本书是在作者讲授光纤通信原理与系统课程的基础上编写而成的。在课程讲授过程中吸收了多届学生的建议,书稿编写过程中承蒙徐淦卿教授审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此向他们表示深切的谢意。由于水平有限,对书中的不足及错误之处,祈请专家学者与读者不吝赐教批评指正。

作者

1996年3月

目 录

1 光纤通信概论	(1)
1.1 光纤通信的发展史	(3)
1.2 光纤通信系统	(6)
2 光纤	(9)
2.1 概述	(9)
2.2 光线在光纤中的传输	(14)
2.2.1 阶跃光纤中的光线分析	(14)
2.2.2 梯度光纤中的光线分析	(17)
2.3 单模光纤的波动理论	(22)
2.3.1 波动方程	(22)
2.3.2 归一化变量	(24)
2.3.3 贝塞尔方程的场解	(25)
2.3.4 特征方程	(29)
2.3.5 线偏振模及其特性	(30)
2.3.6 传播常数 β 与归一化频率 V 的关系	(33)
2.3.7 光纤中的功率流	(34)
2.3.8 单模光纤	(37)
2.4 光纤的损耗特性	(43)
2.4.1 材料的吸收损耗	(44)
2.4.2 光纤的散射损耗	(45)
2.4.3 辐射损耗	(46)
2.5 光纤的色散特性及带宽	(48)
2.5.1 群延时和时延差	(49)

2.5.2	材料色散和波导色散	(50)
2.5.3	模间色散	(56)
2.5.4	光纤的传输带宽	(57)
2.6	无源光器件	(61)
2.6.1	光纤的连接与光纤连接器	(61)
2.6.2	光纤分路器及耦合器	(62)
2.6.3	波分复用器	(65)
2.6.4	光隔离器	(66)
2.6.5	光开关	(67)
2.6.6	光滤波器	(68)
3	光源与光发送机	(70)
3.1	半导体中的光发射	(73)
3.1.1	光的吸收与发射	(73)
3.1.2	半导体的光发射	(77)
3.2	发光二极管	(85)
3.2.1	发光二极管的结构	(85)
3.2.2	发光二极管的主要特性	(88)
3.3	半导体激光器的工作原理与结构	(93)
3.3.1	半导体激光器的工作原理	(93)
3.3.2	半导体激光器的结构	(101)
3.4	半导体激光器的工作特性	(116)
3.4.1	$P-I$ 工作特性	(116)
3.4.2	模式特性与线宽	(122)
3.4.3	调制特性	(124)
3.4.4	光束的辐射图与方向性	(134)
3.4.5	波长调谐特性	(134)
3.4.6	噪声特性	(136)
3.4.7	半导体激光器的安全使用	(139)

3.5	光发送机	(140)
3.5.1	光载波的调制	(141)
3.5.2	发光二极管驱动电路	(142)
3.5.3	激光二极管驱动电路	(147)
3.6	光源与光纤的耦合	(151)
3.7	光源的外调制技术	(156)
4	光检测器与光接收机	(159)
4.1	概述	(159)
4.2	光检测器	(164)
4.2.1	光检测器的工作原理	(164)
4.2.2	光检测器的主要工作特性	(174)
4.3	光接收机的噪声	(179)
4.3.1	光接收机中的噪声源	(181)
4.3.2	接收机等效电路及放大器电路噪声	(183)
4.3.3	光检测器的噪声	(185)
4.3.4	背景噪声	(191)
4.4	模拟接收机的噪声及信噪比	(192)
4.4.1	均方信号电流	(192)
4.4.2	光检测器噪声	(193)
4.4.3	信噪比及接收灵敏度	(194)
4.5	数字接收机的噪声分析	(197)
4.5.1	概述	(197)
4.5.2	数字接收机的分析模型	(199)
4.5.3	信号分析	(200)
4.5.4	放大器电路噪声	(201)
4.5.5	光检测器噪声	(203)
4.5.6	输入输出脉冲形状及 I_1 、 I_2 、 I_3 、 Σ_1 值	(205)
4.6	光接收机前置放大器	(213)

4.6.1	高阻抗前置放大器	(215)
4.6.2	互阻抗放大器	(226)
4.6.3	动态范围	(230)
4.7	数字接收机的误码率和接收灵敏度	(233)
4.7.1	数字接收机的误码率	(233)
4.7.2	数字接收机的接收灵敏度	(237)
4.7.3	数字接收机的灵敏度极限——量子极限	(247)
4.8	数字接收机中的定时提取与判决再生	(248)
4.8.1	定时提取	(248)
4.8.2	判决再生	(250)
4.9	光接收机的比特率穿透能力及响应时间	(253)
4.9.1	比特率穿透能力	(254)
4.9.2	响应时间	(255)
5	光纤通信系统	(257)
5.1	系统设计考虑	(257)
5.1.1	工作波长的选择	(258)
5.1.2	元件的选择	(259)
5.1.3	损耗限制系统的计算——功率预算法	(261)
5.1.4	色散限制系统的计算——上升时间预算	(264)
5.1.5	中继距离的光纤带宽限制估算	(269)
5.1.6	中继距离与码速的关系	(271)
5.2	数字光纤通信系统	(273)
5.2.1	光纤传输系统最适合于传输数字信号	(273)
5.2.2	数字光纤通信系统的体制	(275)
5.2.3	数字光纤通信系统的基本结构	(281)
5.2.4	线路码型	(284)
5.2.5	数字光纤通信系统	(289)
5.2.6	数字光纤通信系统的主要性能指标测试	(295)

5.3	模拟光纤通信系统	(298)
5.3.1	模拟调制技术	(299)
5.3.2	基带直接强度调制(D-IM)	(301)
5.3.3	脉冲频率调制(PFM-IM)电视信号传输	(303)
5.3.4	副载波强度调制	(305)
5.4	光纤通信系统的复用	(318)
5.4.1	波分复用	(318)
5.4.2	频分复用	(320)
5.4.3	空分复用	(321)
5.5	光纤局域网	(321)
5.5.1	LAN 的结构模型	(322)
5.5.2	总线型光纤 LAN	(327)
5.5.3	环形光纤网	(332)
5.6	相干光纤通信系统	(335)
5.6.1	基本原理	(335)
5.6.2	调制与解调技术	(338)
5.6.3	相干光纤通信的优点及关键技术	(341)
5.6.4	相干光纤通信系列实例	(342)
5.7	光放大器与全光通信	(343)
5.7.1	光放大器	(343)
5.7.2	光放大器在光纤通信系统中的应用与全光光纤通信	(348)
5.7.3	光纤孤子通信	(351)
主要参考资料		(355)

1 光纤通信概论

人类为了生存和发展,在生产及社会活动中,常常需要把信息从一个地方传送到遥远的另一个地方,这种信息的传递称为通信。通信须依靠通信系统来完成。任何一个通信系统均包括三个主要的组成部分,即发送、传输及接收,光纤通信也不例外。需传送的信息在发送端输入到发送机中,将信息叠加或调制到作为信息信号载体的载波上,然后将已调制的载波通过传输介质传送到远处的接收端,由接收机解调出原来的信息。通常,信息的载波是射频波、微波或毫米波等,传输介质为金属导线、同轴电缆、金属波导管或大气等。但近 20 多年来,以光波为载波、光纤作为传输介质的光纤通信异军突起,在通信领域中发展十分迅速。光纤通信与其它通信方式相比,其优点为:

(1) 光纤损耗低,在 1550 nm 波长时仅 0.2~0.3 dB/km,因而中继距离长,可达 50~100 km,采用光放大器作功率放大器及接收机前置放大器后可达 300 km 以上。图 1.0.1 为光纤损耗与同轴电缆等的比较,表 1.0.1 为它们中继距离的比较。

(2) 光纤的可用带宽非常大,每个传输窗口(850、1300 或 1550 nm 波长)的带宽约有 20000 GHz,通信容量十分大。

(3) 光纤尺寸小、重量轻,其制造原料 SiO_2 资源十分丰富。

(4) 光纤是电绝缘的,也不受强电磁干扰的影响。

(5) 光纤间串话小,保密性好。

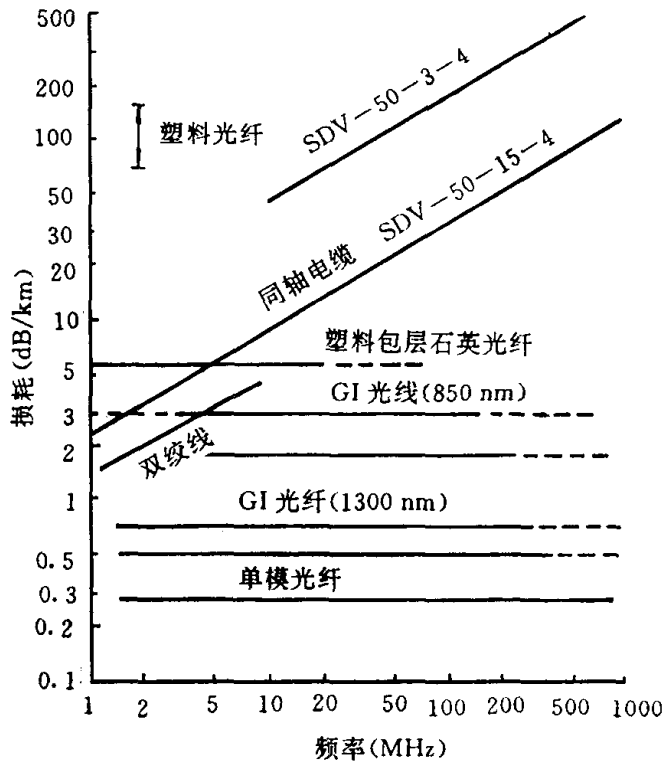


图 1.0.1 光纤与同轴电缆的损耗特性比较

表 1.0.1 不同传输介质的中继距离

传输介质	容量(路)	中继距离(km)
微波	960	50
小同轴	960	4
中同轴	1800	6
光缆	1920	50
光缆	7680	70(1550nm)

由于这些,光纤通信技术发展迅速,至今已在公用通信网中占据了半壁江山,在未来的信息传输与交换网中将起举足轻重的作用,发展前景十分广阔。

1.1 光纤通信的发展史

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。后来的手旗、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是十分有限的。

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严重的大气衰减,这种大气通信光电话未能像其它电通信方式那样得到发展。

近代光通信的真正发展则只是近二三十年的事,其中起主导作用的是激光器和光纤的诞生。首先是 1960 年 Maiman 发明了红宝石激光器,激光器产生的强相干光为现代光通信提供了可靠的光源。这种单波长的激光具有普通无线电波一样的特性,可对其调制而携带信息。利用激光的早期光通信也是通过大气传输的。但很快发现,许多因素如雾、雨、云,甚至一队偶然飞过的鸟,都会干扰光波的传播,因而只能作短距离通信用。显然,需要一种像射频或微波通信的电缆或波导那样的光波通信传输线,以克服这些影响,实现信息的长距离稳定传输。

1965 年, E. Miller 报导了由金属空心管内一系列透镜构成的透镜光波导,可避免大气传输的缺点,但因其结构太复杂且精度要求太高而不能实用。而另一方面,光导纤维的研究正在扎实进行。

早在 1951 年就发明了医疗用玻璃纤维,但这种早期的光导纤维损耗太大(>1000 dB/km),也不能作为光通信的传输介质。1966 年,C. K. Kao 和 G. A. Hockman 发表了对光纤通信发展具有历史意义的著名论文。他们在分析了造成光纤传输损耗高的主要原因后指出,如能完全除去玻璃中的杂质,损耗就可降到 20 dB/km——相当于同轴电缆的水平,那末,光纤就可用来进行光通信。在这种预想的鼓舞下,Corning 公司终于在 1970 年制出了 20 dB/km 损耗的光纤,从而为光纤通信的发展铺平了道路。对光纤谱特性的研究发现,它有三个低损耗的传输窗口,即 850 nm 的短波长窗口和 1300、1550 nm 的长波长窗口。而后,随着新的制造方法的出现及工艺水平的不断提高,光纤损耗不断降低。到 1979 年,单模光纤在 1550 nm 波长上的损耗已降到 0.2 dB/km,接近石英光纤的理论损耗极限。

在光纤损耗不断降低的同时,激光器的研究进展亦十分迅速。1962 年,GaAs 半导体激光二极管(LD)问世,意味着现代光通信有了小体积的高速光源。GaAs-LD 的发射波长为 870 nm,在掺杂铝后移到了光纤的短波长低损耗窗口。后来,GaAsAl-LD 又实现了室温长时间工作。利用四元系合金 InGaAsP 制造出了 1300 及 1550 nm 的 LD 光源。由于 LD 昂贵,适合光纤通信的高亮度 LED 便研制了出来。这样,随着符合光纤传输要求,各种波长、高效率、长寿命、高速率半导体光源的研制成功,光纤通信的实用化及大发展已是水到渠成。

此外,在光接收机的研究方面,各种波长范围的高效率、高速率半导体光电转换器件(如 APD、PIN)也陆续问世。1973 年,S. D. Personick 发表了有关 PCM 数字光接收机的分析的论文,解决了现代光纤通信系统中光接收机的设计问题。

此外,为了满足系统应用的需要,各种光无源器件(如光纤活动连接器、光衰减器、光波分复用器、隔离器及分路器等)及专用仪

器设备(如光纤熔接机、时域反射计、光功率计等)也陆续配套商用。

1974年左右,许多国家都进行了各种室内的光纤通信传输实验,1976年后出现了各种实用的光纤通信系统,1980年美国电报电话公司的45 Mb/s 光纤通信系统 FT-3 实现商用。从本世纪80年代起进入了光纤通信高速发展的时期,经历了从短波长到长波长、从多模光纤到单模光纤、从低速率到高速率的发展过程。至今,光纤通信的发展已经历四代,即850 nm 波长多模光纤的第一代系统(1973~1976)、1300 nm 波长多模光纤的第二代系统(1976~1982)、1300 nm 单模光纤多模激光器的第三代系统(1987~)及1550 nm 单模光纤单频激光器的第四代系统(1990~)。全世界已铺设的光缆总长达几千万公里,我国亦铺设了约十万公里,形成了遍布全国、全世界的陆地及海底光纤网。预期到1997年,光纤通信产业在世界通信总产值中所占的比例将从1990年的45.7%增加到60%。国际上从565 Mb/s 到2.4 Gb/s 的系统均已实用化并大量应用,10 Gb/s 甚至20~40 Gb/s 的超高速光纤通信技术进展亦十分迅速。我国过去大量装备的是140 Mb/s 的系统,但现在2.4 Gb/s 的系统已开始投入使用。

为了充分发挥光纤的带宽潜力,克服光纤损耗及色散的影响、延长中继距离、扩大传输容量及降低成本,一直是光纤通信的发展目标。各种光纤通信新技术不断出现,系统的码速距离积一再提高,几乎每4年增加一个数量级(图1.1.1)。这些新技术包括:

(1) 系统端机的集成化与模块化,提高速率与性能,简化结构降低成本;

(2) 密集多路波分复用(WDM)及频分复用(FDM)技术,实现单根光纤上超高速、超大容量传输;

(3) 全光通信技术,光放大器在长途干线系统及用户分配系统中的应用;

(4) 孤子通信技术;

(5) 高速光纤网技术,如光纤/同轴电缆混合网、高速信息公路等。

发展这些新技术的宗旨,都是为了更好地满足日益增长的信息需求。

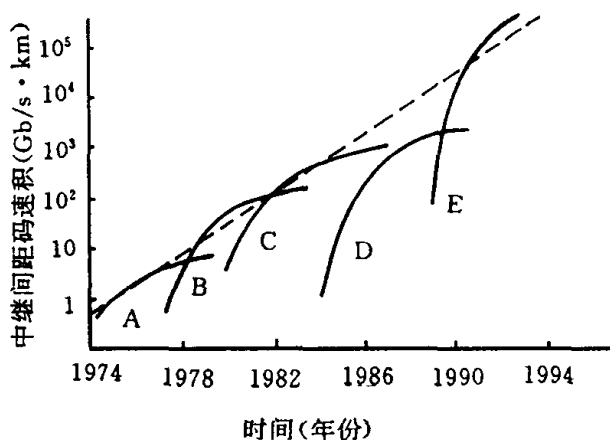


图 1.1.1 中继距离码速积的增长图

A. 800 nm 多模光纤; B. 1300 nm 单模光纤; C. 1500 nm 单模光纤单频 LD;

D. 相干检测; E. 铒光纤放大器系统

1.2 光纤通信系统

一个典型的点一点光纤通信系统(图 1.2.1(a))主要包括收发信电端机、光发送机、传输光纤、中继器及光接收机等几部分。从光发送机到光接收机是光信息的传输通道,称为光信道,其任务是把信息可靠有效地从始端传送到终端。各部分的作用如下:

(1) 电端机 需传输的信息信号包括话音、图像及计算机数

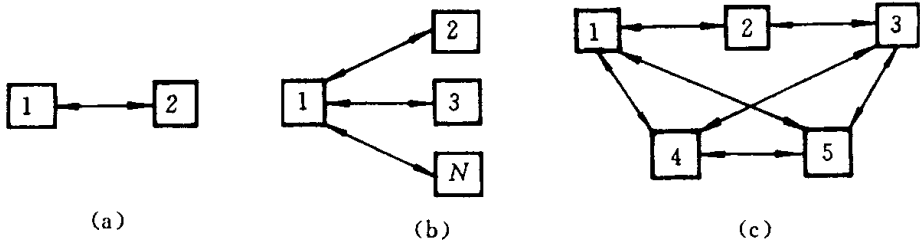


图 1.2.1 光纤通信系统的拓扑结构

(a) 点对点系统；(b) 一点对多点系统；(c) 光纤网

据等，电端机就是常规电通信中的载波机、图像设备及计算机等终端设备。对数字通信来说，信号在电端机内要进行 A/D 及 D/A 转换，变换成二进制数字信号。

(2) 光发送机 包括光源(LD 或 LED)及其驱动电路，电端机来的电信号调制光源，产生载有信息的光信号，完成电—光转换。

(3) 传输光纤或光缆 将光源发射的光信号传送到远处的接收端，它可以是多模光纤或单模光纤。

(4) 光接收机 完成光—电转换。接收的光信号由光检测器检测转换成电信号，然后放大解调、判决再生，送入电端机恢复出原信号。

(5) 中继器：在长途光纤通信系统中，每隔一段距离需设置中继器，以把经过长距离传输衰减变得很微弱并畸变的光信号进行光检测变成电信号，经放大整形再生后驱动光源，产生光信号再送入光纤传输，这就是传统的光—电—光中继器。然而，现在，光放大器，尤其是铒光纤放大器已经成熟，其增益高、输出功率大、噪声低、带宽大、码速穿透，完全可代替光—电—光中继器，正推动着光纤通信技术的革命——新一代全光通信技术。

若若干个点对点通信系统组合就构成通信网(图 2.2.1(b))、