



光纤通信原理与技术

主 编/ 郑玉甫
副主编/ 蔡小林
张椿玲
耿 勇



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS

- 责任编辑/魏春玲
- 封面设计/赵 会

ISBN 7-311-02800-0



9 787311 028008 >

ISBN7-311-02800-0/T·175 定价: 28.00元

光纤通信原理与技术

主 编 郑玉甫

副主编 蔡小林 张椿玲 耿 勇

兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理与技术/郑玉甫主编. —兰州: 兰州大学出版社, 2006, 5
ISBN 7-311-02800-0

I. 光... II. 郑... 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(2006)第 057824 号

内 容 简 介

全书共分七章:第一章光纤通信及系统构成;第二章光纤通信用光纤传光原理;第三章光纤通信用光源发光原理;第四章光纤通信用光检测器原理;第五章光纤通信网络技术;第六章光纤通信设计与施工技术;第七章光纤通信测试与特色应用技术。

本书不仅是通信工程、电子信息工程、计算机通信专业的一门专业课,而且也可以作为电气信息类学科的一门技术课程。同时也适合光纤通信技术培训用书,以及科研和工程技术人员的参考和阅读。

光纤通信原理与技术

主 编 郑玉甫

副主编 蔡小林

张椿玲 耿 勇

兰州大学出版社出版发行

兰州市天水南路 222 号 电话:8912613 邮编:730000

E-mail:press@onbook.com.cn

http://www.onbook.com.cn

兰州交通大学印刷厂印刷

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:18.75

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

字数:448 千字 印数:1~1000 册

ISBN 7-311-02800-0/T·175 定价:28.00 元

前言

光纤通信的发展虽然时间很短,但其传输理论、材料选择、系统应用技术发展却很快,光纤是一种非常优良的光波传输介质,光纤通信已经成为现代通信网络的支柱。光纤通信业已渗透到社会生活的各个方面,一方面为社会创造巨大利益;另一方面也深刻地影响着人们的学习、生活、社会交往方式。目前光纤通信正从点到点之间的链路向网络渗透,原始光纤通信的意义已经不能涵盖现代通信与网络的内容。现代光纤通信普遍采用单模光纤、用光放大器取代传统的电再生中继器、用波分复用技术代替单波长技术,而且单波长的传输速率目前已经能够达到10Gb/s甚至40Gb/s、光纤通信网络从PDH向SDH、DWDM的新型传送网发展、在长途网络中业已实现了全光化,目前正向城域网、接入网的方向逐步渗透,可以预见在不久的将来全光通信将会实现。它将与卫星通信、数字微波通信共同支撑着全球通信网。到目前为止80%以上的信息在光纤中传送,为个人通信提供足够的信息通道。

随着我国国民经济建设持续、快速、健康地发展,通信业务的种类会越来越多,信息传送的需求量越来越大。我国光纤通信的产业规模亦不断壮大,产品结构覆盖了光传输设备、光纤与光缆、光器件以及各类施工、测试仪表与专用工具。可以展望:光纤通信作为一门高新技术产业,将以更快的速度发展,光纤通信技术将逐步普及,光纤通信的应用领域将更加广阔。

为适应光纤通信技术发展和教学工作的需要,我们在多年的教学和实践基础上,编写了这本书。全书围绕着光纤通信的发展主线和应用技术进行了全面详尽的论述,体现了光纤通信的原貌和发展方向;具有扎实的理论知识,注重基本概念和基本原理,避免了繁琐的公式,强调结论的物理含义;内容紧扣理论与实践的结合,体现了理论应用于实践的思想;同时书后附有复习与思考题,以便于学习。

本书由郑玉甫任主编,蔡小林、张椿玲、耿勇任副主编。郑玉甫编写第一章、第二章、第三章和第五章第三、四、五节,张椿玲编写第四章,耿勇编写第六章和第五章第一、二节,蔡小林编写第七章,全书由郑玉甫统校。

第一章介绍光的基本知识及光纤通信系统的构成;第二章介绍光纤和光缆的结构、类型,并应用射线理论和电磁场理论,讨论通信用光纤的传光原理;第三章介绍通信用光源的发光原理;第四章介绍通信用光检测器的检测原理;第五章介绍目前光通信网络使用的常用光器件及光纤通信网络(SDH、MSTP、OTN、ASON)技术;第六章介绍光纤通信的设计与施工技术;第七章介绍光纤通信的测试以及在高速铁路、高速公路方面的特色应用技术。

在本书编写过程中参考了书后文献,研究生邓克岩、肖强、安小琛、肖莎对本书的编写提供了文字录入、绘图、校对等工作,在此表示衷心的感谢。不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2006年6月

目 录

第一章 光纤通信及系统构成	(1)
第一节 光纤通信	(1)
第二节 光纤通信系统的构成	(6)
第三节 光纤通信的基础理论	(10)
复习与思考题	(15)
第二章 光纤通信用光纤传光原理	(16)
第一节 光纤结构与折射率分布	(16)
第二节 光纤的传光原理	(19)
第三节 光纤的传输特性	(33)
第四节 单模光纤	(41)
第五节 光纤通信中的光缆	(51)
第六节 光纤通信新技术	(55)
复习与思考题	(66)
第三章 光纤通信用光源发光原理	(69)
第一节 激光产生的基础	(69)
第二节 半导体激光器	(74)
第三节 光发射机	(92)
复习与思考题	(96)
第四章 光纤通信用光检测器原理	(98)
第一节 光电二极管的检测工作原理	(98)
第二节 光电二极管的特性	(104)
第三节 光接收机	(115)
复习与思考题	(118)
第五章 光纤通信网络技术	(121)
第一节 无源光器件技术	(121)
第二节 光同步传输网技术	(130)
第三节 多业务传送平台(MSTP)技术	(153)

第四节	WDM 光传送网络(OTN)技术	(187)
第五节	智能交换光网络(ASON)	(196)
复习与思考题		(198)
第六章	光纤通信设计与施工技术	(200)
第一节	光纤通信网	(200)
第二节	光纤通信工程设计技术	(204)
第三节	光缆线路的施工技术	(225)
复习与思考题		(236)
第七章	光纤通信测试与特色应用技术	(237)
第一节	光纤通信测试技术	(237)
第二节	光纤通信在高速铁路中的应用技术	(251)
第三节	光纤通信在高速公路中的应用技术	(280)
复习与思考题		(288)
参考文献		(289)

第一章 光纤通信及系统构成

光纤通信从它诞生之日起,人们就预测到其巨大的通信传输容量。这个时代已经到来,光纤通信已渗透到各种通信与信息网络中,尤其是光波技术向网络交换节点的渗透,使得下一代光纤通信网络——全光网络成为现存网络升级的首选方案。为使在系统学习之前对光纤通信有一基本了解,本章将对现代光纤通信所涉及的基本概念进行介绍。

第一节 光纤通信

一、什么是光纤通信

所谓光纤通信,是指以光信号作载波、利用光导纤维(简称为光纤)传输光波的一种通信方式。用光纤代替电缆进行通信不仅是传输手段和形式上的变化,也是电信史上一场深刻的革命。它不仅为电信网提供了几乎无限的带宽资源,而且触发了一系列观念上的重大转变。尽管光纤通信已经为世界电信的面貌带来了巨大的变化,但仅仅是拉开了一个序幕,它将对未来世界产生更加深刻而长远的影响。

在 1867 年,麦克斯韦就证实了光是一种电磁波,当磁场发生变化时,由于电磁感应,会产生与磁通量变化成比例的电场;反过来,电场变化也会产生相应的变化磁场。光的传播就是通过电场、磁场的状态随时间变化的规律来实现的。

电磁波按照波长不同(或频率不同),可分为如图 1-1 所示的种类。其中,紫外线、可见光、红外线都属于光波。目前光纤通信工作在近红外区,波长是 $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$,对应的频率为 $167 \sim 375 \text{THz}$ 。

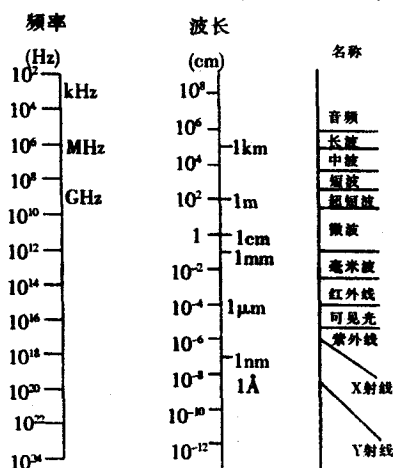


图 1-1 电磁波的种类和名称

二、光纤通信的发展过程

古代,我们的祖先就已经利用光来传递信息,如建造烽火台、用烟和火花来报警、用旗语来传递信息等,这些都可以看作是原始形式的光通信。

当然,上述这种传递信息的方法极为简单,信息的内容也极为有限。严格来说,上述种种都不能称之为真正的光通信。直到1880年,第一个真正的光学电话才由电话的发明者贝尔研制成功。这是利用弧光作光源,弧光灯发出恒定的光束,投射在送话器的薄膜上,薄膜随声音振动而振动。反射光束的强弱变化,就反映出声音的振动规律。在接收端用一个大型的抛物面反射镜,把发送端送来的随着声音变化的光信号反射到硅光电池上,转变成光电流,送给送话器,就完成了发送和接收的过程。但自此之后的几十年内,光通信的进展不大。究其原因,首先是所用的光源是热辐射源,发出的光都是非相干光,调制困难;其次,作为接收机的硅光电池内部噪声很大;另外,没有一个适当的光传输媒质,光在大气中传输损耗很大。

现在我们所说的光通信是利用谱线很窄、方向性极好、频率和相位都一致的相干光——激光作为光源的通信方式。20世纪60年代初,相继发明了红宝石激光器、氮氛激光器、二氧化碳激光器,并利用这些激光器为光源进行了激光大气传输的试验。但因这些固体激光器或气体激光器的体积大、功耗大、不适宜做通信设备中的光源;同时以大气作为传输媒质受气候影响极大。因此,当时光通信的出路是在寻找合适的光源及理想的传光媒质。

1966年,英国标准电信实验室的英籍华人高锟首先提出用玻璃纤维作为光纤通信的媒质。到1970年美国康宁公司用超纯石英为材料,首先拉制出损耗为20dB/km的光纤,这是向使用光纤作为传输媒质迈出的最重要的一步。

就在光纤有了重大突破的同一年,美国贝尔实验室研制成功可在室温下连续振荡的GaAlAs半导体激光器,为光纤通信找到了合适的光源。1977年,GaAlAs激光器的寿命可达100万小时,这为光纤通信的商业化奠定了基础。

1973年,贝尔实验室发明用MCVD(改进的化学气相沉积法)制造光纤,使光纤的衰减下降到1dB/km。1974年,日本解决了光缆的现场敷设及接续问题。1975年出现光纤活动连接器。1976年,日本把光纤的衰减降到0.5dB/km,这一年美国首先成功地进行了44.736Mb/s传输10km的光纤通信系统现场试验,使光纤通信向实用化迈出了第一步。1979年美国和日本均研制出1550nm激光器,日本做出超低损耗光纤(0.2dB/km,1550nm),同时进行多模光纤1310nm波长系统的现场试验。到了1980年,多模光纤通信系统已投入商用,单模光纤通信系统也进行了试验。在以后的几年内,日本、英国、美国都兴建了单模光缆长途干线。随着光纤通信技术的日益成熟,光缆线路从陆地敷向海底。美、日、英等国联合建立的太平洋光缆、横跨大西洋的海底光缆都相继开通。

光纤通信的发展,经历了从20世纪60年代的准备阶段、20世纪70年代的实验和试用阶段、20世纪80年代的实际商用阶段到20世纪90年代的世界范围大规模使用阶段的发展过程。在现代通信方式中,已形成了一个以光纤通信为主、微波和卫星通信为辅的格局。

三、光纤通信的主要特点

从1970年美国康宁公司研制出损耗为20dB/km的光纤开始,光纤通信的历史也才只有30多年的时间,它所以能够得到飞速的发展应用,与电通信相比,它有如下的突出优点:

1. 传输频带宽、通信容量大

我们知道,载波频率越高通信容量越大。目前使用的光波频率比微波频率高 $10^3 \sim 10^4$ 倍,所以通信容量约可增加 $10^3 \sim 10^4$ 倍。

2. 损耗低、中继距离长

目前实用的光纤均为 SiO_2 (石英) 系光纤, 减小光纤损耗, 主要是靠提高玻璃纤维的纯度来达到的, 由于目前制成的 SiO_2 玻璃介质纯度极高, 所以光纤的损耗极低。在光波长 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 附近, 衰减有最低点, 可低至 0.2dB/km , 接近理论极限值。由于光纤的损耗低, 故中继距离可以很长, 在通信线路中可减少中继站的数量, 降低成本并提高通信质量。例如, 对于 400Mb/s 速率的光纤通信, 可以实现 100km 以上的无中继传输, 而同样速率的电缆传输, 无中继传输仅为 1.6km 左右。

3. 不受电磁干扰、保密性好、无串话

由于光纤是非金属的介质材料, 所以它不受电磁干扰。电缆通信中的干扰、串话等现象在光纤通信中不复存在。

4. 线径细、重量轻

由于光纤的直径很小, 只有 0.1mm 左右, 因此制成光缆后, 直径要比电缆细, 而且重量也轻, 这样在长途干线或市话线上, 空间利用率高, 而且便于制造多芯光缆。

5. 节约有色金属、资源丰富、石英材料取之不尽

除此之外, 光纤还有抗化学腐蚀等优点。当然, 光纤本身也有缺点, 如光纤质地脆、机械强度低; 要求比较好的切断、连接技术; 分路、耦合比较麻烦。但随着技术的不断发展, 这些问题都是可以解决的。

四、光纤通信的波段

目前采用的石英系光纤有三个低损耗工作窗口: $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 。其中, 将 $0.85\mu\text{m}$ 称为光纤通信的短波波长; 将 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 称为光纤通信的长波波长。光纤通信使用的波段具体名称和分类如表 1.1 所示。

表 1.1 光纤通信波段划分

波段名称	说明	波长范围/nm
O 波段	原始 (Original)	1260~1360
E 波段	扩展 (Extended)	1360~1460
S 波段	短波 (Short)	1460~1530
C 波段	常规 (Conventional)	1530~1565
L 波段	长波 (Long)	1565~1625
U 波段	超长 (Ultralong)	1625~1675

五、光纤通信的未来展望

20 世纪 70 年代以来, 在短短的 30 年中光纤通信已经取得了突飞猛进的进展。回顾光纤通信的发展历程, 可以看到光纤通信在提高传输速率或提高通信容量上下了很大的功夫。目前 2.5Gbit/s 的系统已经商用化, 10Gbit/s 的系统也已投入使用。如果采用波分复用技术, 则可进一步提高通信容量。光纤通信研究的另一个方向则是提高中继距离, 采用的技术主要是提高接收机的灵敏度和提高入纤光功率。提高接收灵敏度的最有效的方法是采用相干光通信方式, 而提高入纤光功率的最有效的方法是采用半导体激光放大器或光纤放大器。展望未来的光纤通信系统, 必然仍将在超高速及超长距离无中继传输上下功夫。因此可以

看到今后光纤通信将主要在以下几个方面发展:

1. 为了实现越来越大的信息容量和长距离传输必须使用低损耗和低色散的单模光纤

目前在通信网光缆线路中广泛使用的是 G. 652 常规单模光纤,这种光纤对于 $1.55\mu\text{m}$ 波长虽然损耗最小,但色散值较大,约为 $18\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,因此,这种光纤运用在 $1.55\mu\text{m}$ 波长时,传输性能不理想。如果将零色散波长从 $1.31\mu\text{m}$ 移至 $1.55\mu\text{m}$ 时,称为色散位移光纤(DSF),但这种光纤与掺铒光纤放大器(EDFA)运用在波分复用系统(WDM)中时,会由于光纤的非线性而产生四波混频,妨碍 WDM 的正常运用,这就意味着,光纤色散为零对 WDM 不利。

为了使光纤通信技术顺利地运用到波分复用系统中,应该减小光纤色散,但不允许为零,因此,设计的新型单模光纤称为非零色散光纤(NZDF),它在 $1.54\sim 1.56\mu\text{m}$ 范围内色散值可保持在 $1.0\sim 4.0\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,避开了零色散区,但是保持了较小的色散值。

2. 光纤通信系统所用光子器件近年来也有明显发展

为了适应 WDM 系统的需要,近年来开始研制多波长光源器件(MLS),它主要是把多路激光管排成阵列,连同一个星形耦合器制成混合集成光组件。

对于光纤通信系统的接收端机,它的光电检测器和前置放大器,主要是向高速率或宽频带响应方向发展。PIN 光电二极管经过改进仍可符合要求,对于长波长 $1.55\mu\text{m}$ 波段使用的宽带光电检测器,最近几年曾研制一种金属—半导体—金属的光电检测管(MSM),它是以 InP 为基的行波式分布光电检测器。据报道,这种 MSM 对 $1.55\mu\text{m}$ 光波能够检测的 3dB 频率带宽可达到 78GHz。

FET 的前置放大器有可能被高电子迁移率晶体管(HEMT)代替。有报道介绍,利用 MSM 检测器和 HEMT 前置放大的光电子集成(OEIC)工艺组成 $1.55\mu\text{m}$ 光电接收机的频带宽度为 38 GHz,预计可达到 60 GHz。

3. 传输体制从准同步体系向同步数字体系过渡,以适应建立全球统一的光纤网的要求

过去,光纤通信系统主要是基于 ITU-T G. 702 建议所规范的准同步数字系列(PDH)。随着光纤通信的迅速发展和普及应用,对高速率光纤通信系统的要求越来越迫切,B-ISDN 的发展及对电信管理网发展的需求都暴露了 PDH 系统的一系列问题,经过一些国家的研究开发,ITU-T 在各国所提出的方案的基础上,经过研究和协调,于 1988 年 11 月通过了新的、关于同步数字系列(SDH)的第一套建议,经不断完善形成了目前广泛采用的 SDH 标准。

4. 由单波长通道向多波长通道过渡

下一代光纤通信系统可能仍将是强度调制直接检测(IM-DD)系统,但将采用波分复用 WDM 技术使光纤传输速率提高到几百 Gb/s 以上,而中继距离也达数百公里。为了进一步扩大光波通信系统容量,采用了复接技术(MUX)来实现信号在空间域、频域、时间域上的复用,即空分、频分(波分)、时分、码分多址复用。空分复用采用多根光纤来传送信号,单根光纤是采用频分、时分、码分复用。频分复用是在光域上进行密集波分复用,是目前最常用的光波复用方式,目前已有相当多的 DWDM 系统投入商用。

5. 用户网的光纤化

光纤通信的另一个重要领域是实现电信网的全光纤化。实现通信网的全光纤化最困难的是光纤用户网,它作为电信网的一部分,直接面向用户。因而光纤用户网是近年来光纤通

信领域中的研究热点。在未来的用户网中需要传输多种宽带业务,现在的电缆网可能无法担此重任;用户网从电缆网向光纤网过渡是大势所趋。目前由于光纤用户网成本较高,在价格上难以与电缆网竞争,加之图像压缩技术的进展,电缆网较窄的传输带宽还未成为致命的弱点,所以在用户网中电线仍居于主要地位。随着光纤及光器件成本的降低以及用户对多种宽带业务需求的增长,通过光纤到大楼(FTTB)、光纤到路边(FTTC)、光纤到家庭(FTTH)等手段,为用户提供各种业务。随着用户对数据通信需求的快速增长,光纤接入网是当前重要的研究课题,有望 FTTH 早日实现。可以估计光纤用户网会取得突破性进展,电信网的全光纤化已为时不远了。

6. 光交换节点将取代电交换节点

由于采用波分复用技术使得传输速率极大提高,原有电交换机的速率成了整个网络的瓶颈,将被光交换机取代。所谓光交换是指对光纤传送的光信号直接进行交换。光交换是在光域中完成光交换功能,而无需将光信号转换成电信号,输入输出都是光信号,因而光交换有效地减小了延时,增大了系统的吞吐量。

7. 相干光通信是未来的光纤通信方式

它与传统的 IM-DD 系统相比,主要差别在于其接收机采用外差式接收或零差接收,在接收机中增加了本振光源和光混频器,具有混频增益,从而使得系统的接收灵敏度极高,而且具有出色的波长选择性。这些优点使得相干光通信必将在波分复用系统,尤其是密集波分复用系统(光频分复用系统)中发挥巨大的作用。相干光通信对光源的谱宽、光源的频率稳定性以及光的偏振(极化)特性、光纤的损耗、色散、偏振状态都提出了十分苛刻的要求,因而目前尚未实用化。随着时间的推移,上述问题必将得到解决。不久的将来,人们就像现在调谐无线电接收机那样,通过调节光接收机的本振光源波长,即可从众多的信息通道中极为方便地调出所需要的任何信息。

8. 光孤子通信与全光系统

光脉冲在光纤中传输时,光纤的色散效应会导致光脉冲的展宽,从而限制了传输速率和中继距离。而光纤的非线性作用则刚好相反,它使脉冲在传输过程中变窄,并最终导致脉冲破裂,从而限制了入纤光功率。如果同时利用上述两种作用,则在一定条件下可以使光纤的非线性效应与色散效应相互抵消,从而保持光脉冲形状在传播过程中不变形,而形成所谓的孤子。产生光孤子的条件是光脉冲要足够窄,脉冲能量在一定范围之内。大量的实验表明,当光脉冲宽度小于几十个皮秒,入纤功率达到几十毫瓦时,光纤中将会产生孤立子。利用光孤子通信,在理论上几乎没有容量限制,其传输速率可高达 1000Gbit/s。用这样的速率传输信息,世界上最大的图书馆—美国国会图书馆的全部藏书只需 100s 即可传送完毕。将孤子传输技术与光放大技术相结合即可抛弃传统的光—电—光再生中继方式,实现超长距离、超高速的全光通信。实现全光通信的关键是光孤子的产生及光孤子的编码调制技术以及光放大技术。近年来光孤子通信取得了突破,例如日本 NTT 公司采用 DFB 激光器产生脉宽为 30~45ps 的光脉冲,再利用马赫—曾德尔光脉冲调制器对光孤子进行编码,数据速率达到 10Gbit/s,在 510km 的光纤环中,每隔 50km 加一光纤放大器(EDFA),传输 10^6 km 以后,光孤子的形状几乎不变。可以预料,通过不懈的努力,以光孤子通信为标志的全光通信时代,必将到来。

第二节 光纤通信系统的构成

一、光纤通信系统的分类

根据光纤通信系统所使用的光波长、传输光纤、传输信号形式、光电检测方式、复用方式等不同,可分为各种光纤通信系统。

1. 按传输信号的类型划分

(1) 光纤模拟通信系统

它传送的是模拟信号,适合于短距离传输,常用于广播节目、彩色电视节目、工业监视信号、交通监控信号等的传输,具有成本较低的特点。

光纤模拟通信系统按照调制方式不同,可分为连续模拟调制和脉冲模拟调制两类。连续模拟调制又可分为振幅调制(AM)方式、频率调制(FM)方式、相位调制(PM)方式、强度调制(IM)方式和偏振调制(PL)方式。连续模拟强度调制常用的有模拟基带直接强度调制(DD-IM)和副载波直接强度调制(SCM-IM)光纤模拟传输系统。模拟基带直接强度调制又可分为调幅方式、残余边带调幅方式和单边带调幅方式。副载波直接强度调制又可分为调幅方式、调频方式和调相方式。脉冲模拟调制又可分为脉冲幅度调制(PAM)、脉冲频率调制(PFM)、脉冲宽度调制(PWM)和脉冲位置幅度调制(PPM)。

(2) 光纤数字通信系统

它用来传输电的 PCM 数字信号。它的设备较为复杂,但传输质量高、通信距离长、抗干扰能力强,是广泛采用的系统。

光纤数字通信系统按照数字信号的复用方式不同又分为准同步数字系列 PDH 光纤通信系统和同步数字系列 SDH 光纤通信系统。

2. 按光调制的方式划分

(1) 强度调制直接检测系统

它用电信号对光源进行强度调制,把光作为粒子来处理,在接收端用光检测器直接检测,称为 IM-DD 系统。目前应用的光纤模拟通信系统和光纤数字通信系统均属此类型。其优点是简单、经济,但通信容量受到限制。

(2) 相干光纤通信系统

把光作为波来处理,在发送端用电信号对光源发出的单频光载波进行调制。用单模光纤传输到接收端,收到信号与接收机内部产生的本振光源混频,再用光检测器检出为光载波和本振光之差频的中频电信号,然后再解调出电信号,具有光接收机灵敏度高、中继距离长、通信容量大的优点,但设备复杂,它类似于无线通信的外差接收技术。

相干检测光纤通信系统按照调制方式不同,可分为幅移键控调制(ASK)、频移键控调制(FSK)、相移键控调制(PSK)和差分相移键控调制(DPSK)之分,按照相干接收方式又有外差和零差之分。

3. 按光纤的传输特性划分

(1) 多模光纤通信系统

这种系统用石英多模梯度光纤作为传输媒质。传输带宽受到限制,一般应用于140Mbit/s以下的系统。20世纪在80年代中期以前的系统大多为多模光纤通信系统。目前,多模光纤系统主要应用于数据网络以及某些专用网络。

(2) 单模光纤通信系统

它采用石英单模光纤作为传输媒质。传输容量大,无中继传输距离长。目前建设的长途干线网以及本地网光纤通信系统基本上都是这一类型的系统。

4. 按光波长划分

(1) 短波长光纤通信系统

光纤通信早期多采用多模光纤系统,工作在800~900nm波长范围,其中继间距较短。目前主要用于计算机局域网、用户接入网等传输速率较低、传输距离较短的系统。

(2) 长波长光纤通信系统

工作波长为1000~1600nm范围。通常用1310nm和1550nm两种波长。采用1310nm波长时,可以用石英多模光纤,也可选用石英单模光纤,目前多数选用单模光纤。在1550nm波长上只用单模光纤,由于此波段上石英光纤有最低的衰耗,这类系统的中继距离较长。

(3) 超长波长光纤通信系统

当采用非石英系光纤,如卤化物光纤,工作波长大于2000nm时,衰耗值可低至 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ dB/km,可望实现1000km无中继传输。这种光纤尚在研制阶段。

5. 按应用的范围划分

(1) 公用光纤通信系统

通常把电信、广电部门应用的光纤通信系统称为公用光纤通信系统。其中又可分为光纤市话中继通信系统、光纤长途传输系统、光纤用户环路系统以及有线电视系统等。

(2) 专用光纤通信系统

通常把各部门、各行业,例如电力、铁道、石油、公路交通、大型厂矿企业、军事等部门应用的光纤通信系统称为专用光纤通信系统。

但是目前电信运营的格局已有所变化,国家政策已允许某些具备条件的专用网络进入公用电信服务。

6. 按传输信道数目划分

(1) 单信道(波长)系统

在一根光纤中只传送一个光波长,而采用时分复用的方式(TDM)提高系统传输容量。

(2) 粗波分复用系统(CWDM)

在一根光纤中同时传送少量不同光波长(信道间隔大于20nm)。粗波分复用系统在业务类型繁杂、传输容量多变的城域网中广泛采用。

(3) 密集波分复用系统(DWDM)

在一根光纤中同时传送多个不同波长的光信号(信道间隔小于8nm),同时采用时分复用提高每一波长的传输速率,使系统容量得到数百倍提高。

DWDM技术将是光传输系统扩容的发展方向。高速DWDM系统对光纤器件的性能有特殊要求,又推动了光纤、器件及光放大技术的快速发展。

7. 按复用方式划分

(1) 光时分复用通信系统

按照时间分割进行光信号的多路复用。

(2) 光频分复用通信系统

按照频率分割进行光信号多路复用。

(3) 光波分复用通信系统

按照波长不同进行光信号多路复用。

(4) 光空分复用通信系统

按照空间波面分割进行光信号多路复用。

(5) 光码分复用通信系统

按照正交码序列不同进行光信号多路复用。

8. 其他

(1) 光孤子通信系统

利用光纤的非线性通信模式,具有容量大、通信距离长的特点。

(2) 量子光通信系统

利用光的量子性通信模式,具有通信容量大、距离长的特点。

(3) 全光通信系统

不需要光/电、电/光变换,通信容量大、质量高。

二、五代光纤通信系统

20 世纪 60 年代早期的实验已演示了波导传送经光编码信息的能力,直到 70 年代初期低损耗光纤发明,光纤通信系统才真正产生。基于硅材料的光纤有三个低损耗窗口,其中心波长位于 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$,其中在 $1.55\mu\text{m}$ 波长窗口的损耗最低为 0.25dB/km ,光纤能够将光信号传输几十千米而不需中继器。这里中继器是指光信号变换为电信号经放大处理后重新变换到光信号的电中继器,经这样处理后光信号跟发送时一样,克服了经传送后信号功率和波形的畸变。

第一代光纤通信系统是指工作在波长 $0.85\mu\text{m}$ 和 $1.31\mu\text{m}$ 、采用发光二极管(LED)或者多模(MLM)法布里—珀罗(F-P)激光器发送光信号,在多模光纤中传送的系统。由于采用了相对低廉的发光器件,其光谱范围宽为几个 nm 到十个 nm,发送功率小,因而第一代光纤通信系统的数据速率低、传输距离短。目前第一代光纤通系统主要应用于速率较低(几百 Mbit/s)、距离较短(几千米)的计算机之间的互连。多模光纤的直径为 $50\mu\text{m}/62.5\mu\text{m}$,发光器件的能量被分配在不同的模式上,因为不同模在光纤中传输时速率是不一样的,经过一定长度的光纤后,不同的模到达的时间有差异,所以经过传输后光脉冲的宽度被展宽了。这种光脉冲宽度的展宽通常称为色散,这里主要是模间色散,它是影响第一代光纤通信系统性能的主要因素。

第二代光纤通信系统是指工作在波长 $1.31\mu\text{m}$ 或 $1.55\mu\text{m}$ 、采用多模光纤激光器,在单模光纤中传送光信号的系统。第二代光纤通信系统采用的单模光纤直径为 $8\sim 10\mu\text{m}$,它将光源发出的光能量集中在一个模式上,因而避免了模间色散,进一步提高了数据速率,增加了传送距离。80 年代初期主要以 $1.31\mu\text{m}$ 波长的系统为主,其典型的工作速率为几百

Mbit/s, 中继距离为 40km, 系统传输距离主要受损耗的限制(0.5dB/km)。为了继续增加传输距离, 自然想到采用 1.55 μ m 波长窗口, 因而 80 年代末, 主要以 1.55 μ m 波长的系统为主。但人们发现, 除了模间色散之外, 在 1.55 μ m 波长窗口上还有色度(波长)色散, 相反在 1.31 μ m 窗口不存在色度色散, 因而 1.31 μ m 窗口称为零色散窗口, 1.31 μ m 波长的光纤称为标准的单模光纤。正是因为 1.55 μ m 窗口存在非零色散, 迫使人们研究如何降低其色散, 产生了第三代光纤通信系统。

第三代光纤通信系统是指工作在 1.55 μ m 波长, 采用单模 DFB 激光器发送光信号, 在标准单模光纤中传送的系统。由于 1.31 μ m 窗口的色散为零、但损耗不是最小, 因而设法通过对光纤重新设计, 让其零色散波长移至 1.55 μ m, 这样损耗最低且色散又为零, 这样的光纤是较理想的, 称之为色散位移光纤(DSF), 但由于各国都铺设了标准单模光纤, 因而实际应用中很难推广。另一方面, 研究发现当光源的谱宽减小时色散也减小, 因而用单模 DFB(分布反馈)激光器代替多模 F-P 激光器。典型的工作速率为 2.5Gbit/s 甚至更高。

第四代光纤通信系统是指 90 年代早期产生的以 WDM(波分复用)+EDFA(光纤放大器)为代表的系统。光纤放大器的使用给光纤通信带来许多优点:(1)中继器的价格下降了, 采用了光纤放大器代替了原来的电中继器;(2)对传送的数据速率和调制格式透明, 这样系统只需改变链路的终端设备就很容易升级到高的速率;(3)可以同时放大多个波长信号, 使波分复用(WDM)的实现成为可能;(4)提供了系统扩容的新途径, 无须增加光纤和工作的速率, 只需通过增加波长来提高系统的容量;(5)最关键的是系统的成本下降了, 因为虽然可以增加更多的光纤来扩容, 但每根光纤所需的中继器或放大器数目使系统的成本较高, 与之相比采用光放大器的系统成本低。典型的 WDM 系统工作在 8~32 个波长, 每个波长工作在 2.5Gbit/s 的速率上。目前时分复用(TDM)技术已将数据速率提高到 10Gbit/s, 实验室已成功演示了总容量为 2Tbit/s 的系统。进一步提高系统容量的限制因素仍然是色度色散, 同时光纤的非线性现象、EDFA 的非平坦增益谱、偏振效应等也成为系统升级的主要障碍。

第五代光纤通信系统所关心的是如何降低光纤的色散。已有许多好的解决方案, 但最终的解决方案可能是光纤孤子通信系统。

光放大器的使用解决了光纤的损耗问题, 但同时由于光放大器的使用, 光纤的色散经过多个放大器后会累积从而使得光纤的色散更加严重。目前已有许多色散补偿方法, 但最终的解决方法是基于光孤子的通信系统。由于光放大器的使用和波分复用技术的采用, 势必增加发送光功率, 从而光纤的非线性作用对通信系统有影响。早在 1973 年, 人们就发现光纤的色散使输入的光脉冲展宽, 而光纤的非线性效应使得光脉冲在无损耗光纤中传输时宽度受到压缩, 因而只需在光纤的非线性和色散效应之间取得平衡, 则光脉冲在光纤中传输其形状不变。这样的光脉冲为光孤子。直到 1988 年, 光孤子得到实验验证, 实验中采用受激拉曼散射克服光纤的损耗, 光孤子可传送 4000km, 现已有许多实验系统验证了光纤孤子通信的巨大潜力。

三、光纤通信系统的基本组成

光纤通信系统由光缆线路和系统设备两部分组成。系统设备通常由主、备用工作系统及辅助工作系统组成。其主、备用工作系统每部分均由发端电端机、发端光端机、光缆、光中

中继器、收端光端机、收端电端机组成。而辅助工作系统有远供系统、监控系统、勤务电话系统、主备切换系统等。现行光纤通信系统的基本构成见图 1-2。

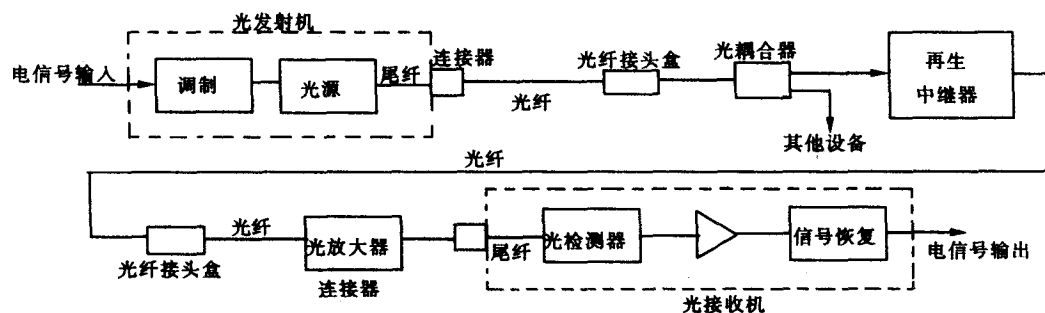


图 1-2 现行光纤通信系统的基本构成

1. 终端发送

终端发送包括发送电端机和发送光端机两部分。发送电端机的作用是将待传送的声音、图像、文字等信息，经过变换处理成 PCM 电信号。

发送光端机的作用是用电信号调制光源发出的光载波，将电信号转换成光信号。它的核心部分是由发光器件(LD、LED)和按输入电信号的变化而变化的驱动电路等组成。

2. 终端接收

接收光端机对收到的光信号进行检测(PIN、APD)和放大，完成光信号到电信号的转换。接收电端机对电信号进行解调处理，将电信号还原为原始的信息。

3. 光中继器

光中继器的主要功能是补偿光能量的损耗，恢复信号脉冲的形状。传统的光中继器采用光—电—光的转换形式，即先将收到的微弱光信号用光检测器转换成电信号后进行放大、整形和再生后，再用半导体激光器将整行放大后的电信号转换成光信号，送入光纤继续传输，以保证整个系统的通信重量。

4. 光纤

光纤按传输的模式有单模光纤和多模光纤、按折射率来分有阶跃型光纤和渐变型光纤，具体详见第二章。

第三节 光纤通信的基础理论

一、光波的波粒特性

光具有两种特性：波动性和粒子性，即光的波粒二象性。

1. 光的波动性

所谓波动性，就是说光具有电磁波的特性，就像无线电、X 射线一样，光是一种电磁波，因而同样具有反射、折射、衍射、干涉、衰减、偏移损耗等特性。

麦克斯韦方程是经典电磁场理论的基本方程，它用数学形式概括了宏观现象的基本性质，其积分形式包括如下四个方程：