

"十五"国家重点图书出版规划项目: 光通信技术丛书

光波分复用技术

GUANGBOFEN FUYONG JISHU

张劲松
编著 陶智勇
韵 湘



光 波 分 复 用 技 术

张劲松 陶智勇 韵 湘 编著

北京邮电大学出版社
·北 京·

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了光波分复用技术的基本原理、系统总体结构,对与光波分复用技术相关的光纤传输特性、光纤光缆技术、光发送和光接收、光无源器件、光放大器也作了比较深入的介绍。此外,详细地阐述了波分复用技术的工程设计、系统规范、标准和测试原理与方法,以及未来全光网络技术。

本书是编者近几年来从事光波分复用技术教学、科研成果的积累和总结。其内容系统、详实、实用性强,既可作为通信工程技术人员进行光波分网络的规划、设计及维护的参考文献,也可作为从事光通信研究和光网络技术的大专院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光波分复用技术/张劲松,陶智勇,韵湘编著. —北京:北京邮电大学出版社,2002

ISBN 7-5635-0535-0

I. 光… II. ①张…②陶…③韵… III. 光导纤维通信系统 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 014647 号

书 名: 光波分复用技术

编 著: 张劲松 陶智勇 韵 湘

责任编辑: 孙伟玲

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

电话传真: 010-62282185(发行部) 010-62283578(FAX)

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷厂印刷

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张: 16

字 数: 408 千字

印 数: 1—5 000 册

版 次: 2002 年 6 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-0535-0/TN·245

定 价: 30.00 元

如有印装质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系

前言

人类社会对信息的需求正爆炸性地增长,提高骨干网的传输速率、增大传输容量是光通信发展的大方向之一。提高传输速率的方法有很多种,如:ETDM, WDM, OTDM, OCDM 等。当前,最切合实际、发展最快的是波分复用(WDM: Wavelength Division Multiplexing),尤其是在光纤资源较为紧张的情况下,人们往往把 WDM 作为目前系统升级扩容的首选方案。

光纤放大技术、窄带激光技术、无源波分复用技术的发展带来的 WDM 技术的成熟应用,在光纤传输领域也发生着深刻的变化。WDM 在传输网的引入,打破了原来的网络结构。WDM 提供的是一个全透明的传输平台,在全新的网络上构筑新的网络层次,影响了网络层次重新划分。

1997 年以来,8 波道、16 波道、32 波道、64 波道甚至 128 波道 WDM 系统相继出现,传输速率也从 20 Gbit/s, 80 Gbit/s, 320 Gbit/s, 640 Gbit/s 到 1.28 Tbit/s,国际干线、国内干线、省内干线也开始采用 WDM 系统。新的光缆干线选用了能适合 WDM 系统的新型光纤,相继出现了利用密集波分复用(DWDM)系统的改造和容量升级,国内外各大通信公司纷纷推出自己的 WDM 系统。1998 年 12 月,武汉邮电科学研究院自主开发的我国第一个具有完全自主知识产权的 8×2.5 Gbit/s DWDM 系统工程,成功地通过了信息产业部的鉴定验收,这标志着我国已成为世界上少数能够提供 WDM 设备商用产品的国家之一;2000 年又推出了 32×2.5 Gbit/s WDM 系统,并在加紧研制 8×10 Gbit/s 及 32×10 Gbit/s WDM 系统。

要实现 WDM 传输,需要许多与其作用相适应的高新技术和器件。其中包括发光波长精确、稳定的光源,插入损耗低、通带内损耗平坦、通路间隔离度高、偏振相关性小、温度

稳定性好的光分波合波器,增益平坦和增益锁定的光放大器,功能强大、可靠的网络管理技术,以及克服各种光纤色散的光纤非线性效应的系统设计技术等等。本书将对 WDM 系统总体结构和相关的技术作较全面的介绍。第 1 章介绍了 WDM 的由来和发展;第 2 章介绍 WDM 的总体结构和性能要求;第 3 章和第 4 章详细讨论了 WDM 的传输媒质;第 5~7 章分别介绍了 WDM 中的各种光电器件;第 8 章和第 9 章主要介绍了 WDM 的网络管理、工程设计、测试以及相关标准。

目前,WDM 基本上都是点到点的链形系统到由光分插复用(OADM)组成环网的过渡阶段,主要解决节点间容量不足的问题。随着技术的不断进步和 WDM 系统的逐渐增多,网络会逐步向光传输网络(OTN)发展。OTN 不仅仅解决传输容量的问题,重要的是可以在光域组网和调度,解决光信道的保护与恢复,即由 20 世纪的电网络时代向 21 世纪的光网络时代演进。本书第 10 章对全光网技术进行了展望。

在本书编写过程中得到了烽火通信 WDM 课题组的大力支持和帮助;毛谦院长对此书的修改也付出了巨大的心血,没有他的指导,本书不可能这么快出版,在此一并表示衷心的感谢。

全书由张劲松组织编写,其中的第 1~4 章由张劲松编写,第 5~7 章由陶智勇编写,第 8~10 章由韵湘编写。鉴于作者学识有限,写作时间仓促,因而书中一定有谬误和偏颇之处,还望读者指正为盼。

编者

2001 年 9 月

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 光纤通信的发展史	1
1.2 光纤通信系统的分类	2
1.3 光纤通信的发展方向	5
1.4 波分复用光传输技术	6
1.5 WDM 的优势	7
1.6 WDM 的关键技术	9
1.7 WDM 技术的研究、开发与应用现状	9
第 2 章 WDM 系统总体结构	12
2.1 WDM 的基本原理	12
2.2 WDM 系统的应用类型	15
2.3 WDM 系统的基本组成和技术参数	16
2.4 对 WDM 的技术要求	17
2.5 WDM 系统的解决方案	18
2.6 SDH 与 WDM 的关系	21
2.7 WDM 系统的监控技术	22
2.8 WDM 系统实现方案	22
2.9 全光网络的发展前景	27
第 3 章 光纤的传输特性	30
3.1 光纤的损耗特性	30
3.1.1 材料的吸收损耗	31
3.1.2 光纤的散射损耗	31
3.1.3 辐射损耗	32
3.2 光纤的色散特性	33
3.2.1 光纤色散概述	33
3.2.2 色散的组成	34
3.2.3 光纤色散表示方法	35
3.2.4 色度色散对光脉冲的作用机理	39

3.2.5 色散对通信的影响	42
3.3 光纤的偏振特性	45
3.3.1 线双折射	45
3.3.2 应力双折射	46
3.3.3 圆双折射	47
3.3.4 单模光纤的偏振色散	49
3.4 光纤的非线性特性	51
3.4.1 光纤非线性效应概述	51
3.4.2 非线性效应描述	51
3.4.3 非线性折射率效应	52
3.4.4 受激非弹性散射效应	54
3.4.5 非线性参量过程	57
3.4.6 光孤子与光孤子通信	58
3.4.7 非线性和色散的共同影响	59
第4章 光纤和光缆	62
4.1 单模光纤的发展	62
4.2 光纤的主要参数	68
4.3 新型光纤的发展	70
4.3.1 大有效面积 NZDSF 光纤	70
4.3.2 全波光纤	73
4.3.3 未来 G.655 光纤的技术指标要求	73
4.4 新建干线光纤的选择	73
4.5 我国对光纤的研究	75
4.6 光缆的新进展	77
4.6.1 光缆的结构和种类	77
4.6.2 光缆材料的进展	80
4.6.3 光缆结构的进展	81
第5章 光发射和光接收	83
5.1 发光机理	84
5.2 激光器的结构与特性	87
5.2.1 半导体激光器的结构与种类	87
5.2.2 半导体激光器的特性	92
5.3 波长可调谐半导体激光器	96
5.4 光纤激光器	100
5.4.1 掺铒光纤激光器	100
5.4.2 光纤光栅 DFB 式激光器	101
5.5 光电检测器	102

5.5.1 半导体光电检测器的工作原理	102
5.5.2 PIN 光电二极管	102
5.5.3 雪崩光电二极管	103
5.5.4 光电检测器的特性	104
5.6 WDM 对光源和探测器的要求	107
5.6.1 WDM 对光源的要求	107
5.6.2 WDM 对探测器的要求	111
5.7 光电集成电路	111
5.7.1 基本原理与发展方向	111
5.7.2 OEIC 的元件	112
5.7.3 OEIC 的技术	113
5.7.4 OEIC 的应用和主要问题	114
第 6 章 光无源器件	115
6.1 光无源器件的种类	115
6.2 光纤连接器	117
6.3 光纤耦合器	122
6.4 波分复用器	127
6.4.1 光波分复用器概述	127
6.4.2 角色散型光波分复用器	127
6.4.3 干涉滤光片	132
6.4.4 光纤熔锥型耦合器	134
6.4.5 集成光波导型波分复用器	136
6.4.6 光纤光栅	136
6.4.7 光波分复用器件的性能	138
6.5 偏振控制器	141
6.6 光隔离器与光环行器	143
6.7 光衰减器	144
6.8 光开关	148
第 7 章 光放大器	153
7.1 光放大器概述	153
7.1.1 光放大器的分类	154
7.1.2 EDFA 简介	155
7.2 EDFA 的结构与工作原理	157
7.2.1 EDFA 的基本结构	157
7.2.2 EDFA 的工作原理	157
7.2.3 EDFA 的典型产品	161
7.2.4 EDFA 的噪声和性能指标	163

7.3 非线性效应光纤放大器	169
7.3.1 光纤拉曼放大器	169
7.3.2 光纤布里渊放大器	171
7.4 WDM 中 EDFA 的特性要求	172
7.4.1 增益平坦的 EDFA 光放大器	172
7.4.2 EDFA 光放大器的增益动态调节和锁定技术	175
7.5 EDFA 在 WDM 系统中的应用	175
7.5.1 EDFA 用作前置放大器	175
7.5.2 EDFA 用作功率放大器	176
7.5.3 EDFA 用作线路放大器	176
第 8 章 WDM 网络管理及工程设计	178
8.1 系统网元管理	178
8.1.1 WDM 网络的分层管理	178
8.1.2 WDM 网元管理功能概要	188
8.1.3 WDM 网元管理实例	191
8.2 光监控信道和 DCN 策略	194
8.3 WDM 系统的工程设计	194
第 9 章 WDM 系统规范和测试	201
9.1 WDM 的相关标准和规范	201
9.1.1 光网络系列建议	201
9.1.2 系列建议的框架结构	202
9.1.3 阶段性制定建议	203
9.1.4 关于光接口的建议	203
9.1.5 系统衰减范围	206
9.1.6 色散	206
9.1.7 有关光网络结构的建议	206
9.2 WDM 系统的测试要求	207
9.2.1 WDM 光传输系统参考配置	207
9.2.2 光监控信道	208
9.2.3 光接口参数	210
9.3 WDM 系统的测试内容	211
9.3.1 光波分复用器的测试系统与测试原理	211
9.3.2 光波分复用器的测试方法	212
9.3.3 光波分复用器的有关标准	214
9.3.4 EDFA 测量	216
9.3.5 SDH 传输测量	218
9.4 WDM 测试仪器	218

第 10 章 未来全光网络技术	223
10.1 全光网络系统	223
10.2 全光网络的网络元件	224
10.3 全光网络的保护	226
10.4 未来全光网络技术	231
10.5 典型全光通信实验网	239
参考文献	243

1.1 光纤通信的发展史

1970 年,美国 Corning 公司第一次宣布它所研制的高纯硅酸盐玻璃单模光纤的损耗已小于 20 dB/km,从而打开了光纤通信走向实用化的大门,使光纤通信迅速地发展起来。

几年之后,光纤损耗迅速下降,1980 年,光纤损耗进一步降低到 0.2 dB/km。光纤通信的发展,和与之相关的关键元器件的发展是紧密相联的。作为传输媒质的光纤,当然是其中最关键的元器件之一。但除此之外,光源和光电探测器也是光纤通信系统中的关键元器件。光纤通信是一门综合技术,没有光源和光电探测器的进步也是不可能发展的。在 20 世纪 50 年代末和 60 年代,固体技术、半导体材料和工艺技术等得到了迅速的发展。作为可见光和近红外波段的半导体硅光电探测器的工艺水平已经相当成熟,包括 Si-PIN 和 Si-APD。因此,作为光纤通信系统来说,完全可以借用,不存在重大问题。但是,作为光纤通信系统中的光源——半导体激光器来说,仍然是除了光纤以外的另一个大障碍。虽然半导体激光器已经于 1962 年问世,但开始它只能在低温液氮下以脉冲方式工作,阈值高,寿命短。值得庆幸的是,由于采用所谓异质结结构这一关键工艺技术,使得半导体激光器阈值迅速下降,并开始能在室温工作。特别是在 1970 年,由于采用双异质结结构,使得镓砷/镓铝砷(GaAs/GaAlAs)半导体激光器实现了室温连续运转工作,为光纤通信走向实用化在光源方面奠定了基础。所谓“双异质结结构”,是指在具有较宽能带间隙的 N 型和 P 型半导体材料之间,夹一层能带间隙较窄的半导体材料作为有源层,形成“势阱”,将载流子限制在这一势阱内以有利于形成激光振荡。虽然半导体激光器实现了室温连续运转,但开始工作寿命还很短,只能工作一两个小时。要使光纤通信真正走向实用化,半导体激光器的工作寿命必须在百万小时以上。又经过近 10 年的努力,在 70 年代末,这一目标终于实现了。此时光纤通信才完全走上实用化、商业化的轨道。

光纤通信最初的工作波段是在 850 nm 附近,使用的光源是 GaAs/GaAlAs 半导体器件,探测器是硅半导体器件。后来发现在 1310 nm 附近,光纤的损耗和色散都更低,特别是在 1310 nm 附近,是光纤的零色散点;而在 1550 nm 附近,是光纤的最低损耗点。因此,光纤通信自然而然地向 1310 ~ 1550 nm 的长波长方向发展。

同时,这也促进和推动了光源和光电探测器向 1310 ~ 1550 nm 的长波长方向发展。于是,出现了铟镓砷磷/磷化铟(InGaAsP/InP)四元化合物的长波长半导体激光器件和半导体光电探测器件以及锗(Ge)半导体光电探测器件的发展。

在光纤通信发展史上,另一重要里程碑是掺铒光纤放大器(EDFA; Erbium Doped Fiber Amplifier)的出现。1986年英国南安普敦大学制作出了最初的掺铒光纤放大器。它是在光纤基质中加入铒粒子作激光工作物质,用氩(Ar)离子激光器作泵浦源,能对1550 nm的光信号进行直接放大。这种采用笨重的氩离子激光器作泵浦源的光纤放大器显然不可能在光纤通信中实用,但能直接对1550 nm波长的光信号进行放大,因而本身就对光纤通信的发展具有重大意义。在此之前,由于不能直接放大光信号,所有的光纤通信系统都只能采用光/电/光(O/E/O)中继方式。即先将光信号变为电信号,在电域内进行放大、再生等信息处理,然后再变成光信号在光纤中传输。光纤放大器可直接放大光信号,这就可使光/电/光中继变为全光中继。这是一次极为重要的飞跃,其意义可与当年用晶体管代替电子管相提并论。因此,这一发明激起了世界性的研究热潮。其形势恰如一石激千浪,把光通信推向了一个新的阶段。当作为掺铒光纤放大器泵浦源的980 nm和1480 nm的大功率半导体激光器研制成功后,掺铒光纤放大器趋于成熟,进入了实用化阶段。掺铒光纤放大器的意义不仅在于可进行全光中继,它还在多方面推动了光纤通信的发展,引起了光纤通信的革命性变革。其中最突出的是在波分复用(WDM: Wavelength Division Multiplexing)光纤通信系统中的应用。波分复用是在一根光纤上传输多个光信道,从而充分利用光纤带宽,有效扩展通信容量的光纤通信方式。由于掺铒光纤放大器具有约35 nm的带宽,可覆盖1530~1565 nm波分复用信号的频带,因而用一只掺铒光纤放大器就可取代与信道数相应的光/电/光中继器,实现全光中继。这极大地降低了设备成本,提高了传输质量。这一优越性推动了波分复用技术的发展。

在整个光纤通信的发展过程中,可将光纤通信的发展大致归纳为下面四代。

第一代光纤通信的工作波长 $\lambda_0 = 850$ nm,属短波长波段,传输光纤用多模光纤。光源使用砷化铝镓半导体激光器,光电检测器为硅(Si)材料的半导体PIN光电二极管或半导体雪崩光电二极管(APD: Avalanche Photodiode)。这一代光通信以1977年美国亚特兰大进行的码速率为44.736 Mbit/s的现场实验为标志。

第二代光纤通信的工作波长 $\lambda_0 = 1310$ nm,传输用多模光纤。该波段属长波长波段,是石英光纤的第二个低损耗窗口,有较低的损耗且有最低的色散。相应的光源是长波长InGaAsP/InP半导体激光器,光电探测器采用Ge材料。

1984年实现了波长 $\lambda_0 = 1310$ nm单模光纤通信系统,这是第三代光纤通信。单模光纤较多模光纤色散低得多,损耗也更小。这一代光纤通信广泛地用于长途干线和跨洋通信中。

20世纪80年代中后期又实现了波长 $\lambda_0 = 1550$ nm单模光纤通信系统,这是第四代光纤通信。1550 nm是石英光纤的最低损耗窗口。后来,工作波长为1550 nm的掺铒光纤放大器的问世,又使这一波长具有更重要的意义。

1.2 光纤通信系统的分类

光纤通信系统可以按不同的方式进行分类。

1. 按传输媒质分类

若按传输媒质进行分类,光纤通信系统可分为无纤光纤通信系统和光纤通信系统。无纤

光纤通信系统是属于无线通信系统,它的传输媒质是大气或真空。由于地球表面大气层对光衰减很严重,因此地面大气光纤通信作为长距离通信的发展受到限制。但是,近年来随着光纤通信领域的不断拓展和技术的进步,人们在不宜挖沟铺设光缆的两幢摩天大楼之间及不宜建桥的河两岸之间的局域网或接入网上,建立了有效的通信数据连接,提出了无纤 WDM 系统。2001 年 9 月这种采用光纤通信中的许多先进技术(如波分复用、掺铒光纤放大器、前向纠错信道编码等技术)的系统,实现了距离为 5 km、传输速率高达 20 Gbit/s(8×2.5 Gbit/s)无误码传输。无纤光纤通信的主要应用:①在不具备接入条件或原带宽不足的情况下,提供高效的接入接出方案;②解决各种业务接入的“最后 1 公里”问题;③提供临近局域网之间的有效互连互通;④用作紧急“备用链路”。今后卫星之间的光纤通信,即空间或深空光纤通信系统,仍然是非常有前途的,因为在宇宙空间中,传输媒质几乎是真空,没有大气干扰和衰减的问题;另外,平流层光纤通信系统也展现出良好的发展前景。光纤通信系统是属于有线通信系统,它的传输媒质是光纤。

2. 按调制方式分类

若按调制方式进行分类,光纤通信系统可分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统。模拟光纤通信系统传送的是模拟信号;数字光纤通信系统传送的是数字信号。所谓模拟信号,是指在幅度上和时间上都是连续变化的信号;所谓数字信号,是指在幅度上和时间上都是不连续变化的、离散的信号。对于一般的脉冲信号,虽然它在时间上是间断的、不连续的,但它在幅度或宽度上仍是连续变化的,一般也认为它们是模拟信号而不是数字信号。因此,不能将脉冲调制方式一律看作是数字调制方式,不能将两者简单地等同起来。但是,数字调制方式必然是脉冲调制的。模拟调制方式有许多类型,如强度调制(IM: Intensity Modulation)、幅度调制(AM: Amplitude Modulation)、频率调制(FM: Frequency Modulation)、相位调制(PM: Phase Modulation)、脉位调制(PPM: Pulse Position Modulation)、脉宽调制(PWM: Pulse Width Modulation 或 PDM: Pulse Duration Modulation)、脉幅调制(PAM: Pulse Amplitude Modulation)、脉冲频率调制或脉冲数字调制(PFM: Pulse Frequency Modulation 或 PNM: Pulse Number Modulation)等;数字调制方式主要有脉冲编码调制(PCM: Pulse Code Modulation)、差分脉冲编码调制(DPCM: Differential Pulse Code Modulation)、增量调制等。由于数字通信系统所占的带宽比较宽,而带宽非常宽又是光纤的主要优点之一,因此,光纤通信系统特别适合于采用数字调制方式的数字通信系统。光纤通信的发展极大地促进和推动了数字通信的发展。虽然光纤通信和数字通信两者是密切相关的,但光纤通信和数字通信毕竟是两个不同的概念,两个不同的范畴,不能将两者等同起来,混为一谈。

3. 按信号的复用方式分类

若按信号的复用方式进行分类,光纤通信系统可分为光频分复用(OFDM: Optical Frequency Division Multiplexing)系统、电时分复用(ETDM: Electrical Time Division Multiplexing)系统、光时分复用(OTDM: Optical Time Division Multiplexing)系统、波分复用(WDM)系统、光码分复用(OCDM: Optical Code Division Multiplexing)和空分复用(SDM: Space Division Multiplexing)系统。所谓频分、时分、波分、码分和空分复用,是指按频率、时间、波长、编码和空间的不同进行分割的光纤通信系统。

(1) ETDM 技术

准同步传输网(PDH)、同步传输网(SDH)都是使用 ETDM 技术,速率从 STM-1(155 Mbit/s),

STM-4(622 Mbit/s), STM-16(2.488 Gbit/s), STM-64(10 Gbit/s)发展到 STM-256(40 Gbit/s)。采用 ETDM 技术的 10 Gbit/s SDH 系统已商用。目前,其实验速率已达 40 Gbit/s,但再提高容量受到电子瓶颈的限制,因为现有的微电子工艺难以支持;另外新的工艺(如铜引线绝缘)虽然给速率提高带来可能,但是成本及可靠性有待探讨。应用中,单波长数十吉比特每秒的系统其传输距离严重受限于色散,特别敏感于 PMD;10 Gbit/s 速率以上开始使用前向纠错(FEC: Forward Error Corrected)技术,以减小信号质量的下降对误码性能的影响。

(2) OTDM 技术

OTDM 的特点是超大容量,与 WDM 结合后容量更大,采用高速光信号处理技术上、下通路方便,与未来全光网络兼容。它是单波长技术,不受四波混频(FWM: Four Wave Mixing)非线性影响,对传输线路中光纤放大器平坦度要求不严,对放大器管理简单。但是,由于采用归零超短脉冲,信号占用带宽宽,色散影响更为显著,需采用色散管理或孤子传输技术,长距离传输需使用全光再生整形。在 OTDM 中需要解决的关键技术有:

- ① 超短脉冲光源技术;
- ② 超短脉冲的长距离传输和色散控制技术;
- ③ 光脉冲提取技术;
- ④ 帧同步及路序确定技术。

(3) OCDM 技术

OCDM 是在光传输之前的一种编码方法,通过在每个比特时间内编码目的地址,建立起专门的通信链路。OCDM 有诸多的优点,如:解码可异步的进行、传输的保密性;但在发展中也遇到了诸多的困难,如:用户数的限制、调制速度的限制、编解码器的光分束损耗高等,从而限制了 OCDM 的发展,使其至今没能在光通信界受到普遍推崇。

OCDM 技术的优势在于利用相干通信,以统计的方法利用光的频率,使系统带宽得到极大的提高。由于目前相干光发展不够成熟,只是利用光信号的强度信息代表 0/1,对于光波中的许多特性,如相位、偏振等都难以利用,无法实现地址码之间的完全正交,地址码之间不可避免地会产生干扰。所以,目前 OCDM 的编码机制采用非相干编码和非相干信号处理方法。非相干系统的地址码之间是伪正交的,自相关有一峰值,互相关不为零。因互相关不为零,解码器解码时,其他用户就会对信号产生干扰,所以目前 OCDM 系统的容量还很小。

应当说,频率和波长是紧密相关的,频分也即是波分。但在光纤通信系统中,由于波分复用系统分离波长是采用光学分光元件,它不同于电通信中一般采用的滤波器,再加上目前的光通信系统采用的是非相干的强度调制/直接检测(IM/DD)方式,很难精确控制光的频率,所以波分技术是光频分技术的初级阶段。

4. 按光电探测方式分类

若按光电探测方式进行分类,光纤通信系统可分为直接探测光纤通信系统和相干探测光纤通信系统。直接探测是将光作为粒子,即光子来处理的;而相干探测则是将光作为波,即光波来处理的。

5. 按传输距离分类

若按传输距离的长短进行分类,光纤通信系统可分为长距离干线光纤通信系统、中短距离局间光纤通信系统和超短距离用户光纤通信系统。长距离干线光纤通信系统一般是几百公

里、上千公里、甚至几千公里陆地或跨洋海底光纤通信系统,中短距离局间光纤通信系统一般只有几公里或几十公里。随着光纤光缆成本的下降,光缆甚至可以直接到用户,这种超短距离使用的用户光纤通信系统一般只有几十米到几百米;同时,这种超短距离使用的光纤通信系统在光纤传感通信方面,也有相当广阔的应用前景。

1.3 光纤通信的发展方向

1. 光纤向保偏光纤方向发展

随着光纤通信系统容量不断增大、中继距离不断增长,不仅要求光纤的损耗要越来越低,而且要求光纤的色散也要越来越小。光纤的色散主要分为模间色散、材料色散和波导色散。模间色散是多模光纤中产生色散的主要因素。采用单模光纤一般就不考虑模间色散的问题。对于单模光纤来说,特别有意义的是由于材料色散和波导色散可能相互抵消,而在 1310 nm 附近出现所谓光纤的“零色散点”。另外,在 1550 nm 附近光纤的损耗比 1310 nm 附近还要低,因此又出现将零色散点从 1310 nm 向 1550 nm 方向移动的所谓色散位移型光纤,以及兼顾色散和损耗两者的所谓色散平坦型光纤。由于波长越短,散射损耗越大,因此,为了减小瑞利散射所产生的固有损耗,光纤有可能向 2~10 μm 内的超长波段方向发展。对于这种超长波长的光纤,光纤的连接耦合问题也较容易解决。再有,随着相干光纤通信的发展,要求光纤能保持光的偏振方向,保证相干探测效率,因此,保偏光纤也是一个重要研究方向。

2. 光纤通信系统的中继距离越来越长

光纤通信系统的中继距离受光纤损耗和带宽两个因素的限制,因此,光纤通信系统分为受损耗限制的光纤通信系统和受带宽限制的光纤通信系统。由于光纤损耗不断降低,光纤带宽不断增宽,使得光纤通信系统的中继距离越来越长,从十来公里一个中继站发展到几百公里一个中继站。有人估计,若采用超长波长相干光纤通信系统,可实现跨洋无中继通信。

3. 光纤通信系统向波分复用系统方向发展

波分复用是光纤通信系统中的一种特殊的复用方式,采用波分复用可以充分利用光纤宽阔的低损耗区域,在不改变现有的已安装好的光纤通信线路的基础上,可以很容易地成倍地提高光纤通信系统的容量。现在 EDFA+WDM 已成为高速光纤通信网发展的主流,代表新一代的光纤通信技术。

4. 光纤通信系统向相干光纤通信方向发展

目前大多数光纤通信系统采用的都是直接探测方式,在相干光纤通信中将采用相干探测方式。相干探测方式的最大优点是能提高光纤通信系统接收机的探测灵敏度。相干探测可分为自差法和外差法两种。为了实现相干光纤通信,要求光源是相干性很好、谱线很纯、频率很稳定的单频激光器;光纤应是单模单偏振的保偏光纤;还需要性能很好的光隔离器、偏振控制器等等。

5. 光纤通信系统向全光通信方向发展

全光通信是指所有的信号都是用光学的方法进行处理,而不需要把它们变成电信号来进行处理。随着光纤放大器的出现,中继方式由光/电/光方式变为光/光方式,即在中继器中不

需要先用光电探测器将光信号解调成电信号来进行处理。

1.4 波分复用光传输技术

一、波分复用的基本概念

波分复用是光纤通信中的一种传输技术,它利用了一根光纤可以同时传输多个不同波长的光载波的特点,把光纤可能应用的波长范围划分成若干个波段,每个波段用作一个独立的通道传输一种预定波长的光信号。通常将波分复用缩写为 WDM。光波分复用的实质是在光纤上进行光频分复用,只是因为光波通常采用波长而不用频率来描述、监测与控制,在波分复用技术高度发展,以及每个光载波占用的频段极窄、光源发光频率极其精确的前提下,或许使用光频分复用(OFDM)来描述更恰当些。在波分复用传输系统的发送端,需要采用波分复用器将待传输的多个光载波信号进行复接,而在接收端采用去复用器分离出不同波长的光信号。通信系统的设计不同,每个波长之间的间隔宽度也有差别。按照通道间隔的差异,WDM 可以细分为 CWDM(Coarse WDM,通道间隔小于 50 nm)、密集波分复用(DWDM:Dense WDM,通道间隔小于或等于 100 GHz)、超密集波分复用(SDWDM:Super DWDM,通道间隔小于或等于 25 GHz)。通道可以是等间隔的,也可以是非等间隔的。采用非等间隔是为了减少光纤中四波混频的影响。

这里可以将一根光纤看作是一个“多车道”的公用道路,传统的 ETDM 系统只不过利用了这条道路上的一条车道,提高比特率相当于在该车道上加快行驶速度来增加单位时间内的运输量。而使用 WDM 技术,类似于利用公用道路上尚未使用的车道,以获取光纤中未开发的巨大传输能力。

二、信息流量的发展及对技术的选择

计算机的广泛应用,促进计算机文化迅速提高,激发了人们对 WWW 接入和 Internet 浏览的浓厚兴趣。这对日益膨胀的信息需求和对优质服务的向往又施与了加速度。现有的通信能力与信息流通的需要远远不相适应,从而造成通信网络容量危机。满足市场需求成为通信业面临的首要问题。根据预测来规划电信网络规模、传输能力已经不太现实,因为无人可以十分准确地预测出网络的发展、信息流通量的增长速度,以及何种通信技术最有发展前景。即使预测接近实际,建设不滞后于社会需求发展速度的新网络要花费很多时间和投资,而已经敷设光纤的巨大带宽得不到合理利用。要解决信息流量问题,目前可以采取下面几种方法。

1. 空分复用

空分复用(SDM)是传统的扩容方式,靠增加光纤对的方式线性增加传输容量,传输设备也线性增加。在光纤对充足的情况下,这种扩容方式的优点是最简单,扩容方案较易实现。显然,如果没有足够光纤的光纤对,单靠再敷设光缆来扩容,工程费用将会成倍增长;并且,这种方式没有充分利用光纤的传输带宽,造成光纤带宽资源的浪费。作为网络建设,不可能总是采取敷设新光纤的方式扩容;同时,也很难预测日益增长的业务需要来规划目前应该敷设的光纤数。因此,SDM 只能成为权宜的扩容方式。

2. 电时分复用

同步数字系列(SDH)的国际标准使时分复用以4倍传输比特率增加,如STM-1(155 Mbit/s)、STM-4(622 Mbit/s)、STM-16(2.488 Gbit/s)和STM-64(10 Gbit/s)等。40 Gbit/s电时分复用(ETDM)是一项新技术,受到电子器件的速率限制。ETDM扩容的优点是扩容的策略很明确,可以实现4倍的“无缝”升级,以达到更高的速率;而且这种方法最容易在数据流中抽取某数据和组合信号,适合在需要采取保护策略的环路网络中使用。其缺点是对于高速率系统,目前设备的成本较高;对光纤带宽利用不够;虽然有国际标准,但各种厂商的设备互操作问题仍然存在;由于ETDM总是以4倍的方式升级到更高的速率,不能逐步扩容,因此投资较大;对于10 Gbit/s以上的高速率,不同类型光纤的非线性效应和PMD也将产生各种传输限制。

3. 波分复用

波分复用(WDM)扩容方案充分利用了光纤的带宽,可以混合使用各种速率、各种数据格式和各厂家的设备(开放式系统);可以通过增加新的波长和特性,按用户的要求确定网络容量。对于2.488 Gbit/s以下速率的WDM,目前的技术已经完全可以克服由于光纤色散和光纤非线性效应带来的限制,满足对传输容量和传输距离的各种要求。WDM扩容方案的缺点是需要较多的光学器件,增加了失效和故障的概率。光纤非线性可能影响某些设计(信道数量少、距离短等),而且必须考虑标准化方面的问题(如信道间隔、中心频率等)。目前WDM光纤传输系统只适用于点到点的传输,如何在网络环路中使用,如何进行自愈保护还存在网络管理上的问题。

4. ETDM和WDM技术合用

利用ETDM和WDM两种技术的优点进行网络扩容是其应用的方向。可以根据不同的光纤类型选择ETDM的最高传输速率(如对于未色散位移光纤(NDSF)选择10 Gbit/s,对于非零色散位移光纤(NZDSF)选择40 Gbit/s),在这个基础上再根据传输容量的大小选择WDM复用的光信道数,在可能情况下使用最多的光载波。虽然EDFA的带宽、滤波器和激光器技术、光载波的调制带宽以及光功率和传输距离等因素对传输容量的升级会有一定的限制,但在单信道ETDM基础上的WDM应该是扩容的绝对选择。毫无疑问,多信道永远比单信道的传输容量大,更经济。

1.5 WDM的优势

一、WDM——目前解决通信容量危机的最佳方案

面对市场需求增长,现有通信网络规模、传输能力不相适应等多方面的问题,需要从多种可供选择的方案中找出低成本的解决方法。缓和光纤数量不足的一种途径是敷设更多的光纤,这对于那些光纤安装耗资少的网络来说,不失为一种解决方案。但这不仅受到许多物理条件的制约,也不能有效地利用光纤宽带。再一种选择方案是采用时分复用(TDM)方法提高比特率,即通过时间分割,增加每秒传输的信息量来扩大单根光纤的传输容量。使用这种方法的前提是必须实现更高的比特率,例如,从10 Gbit/s提高到20 Gbit/s,甚至40 Gbit/s。即使这样,