

通信光电子器件与系统的 测量及仿真

赵同刚 任建华 崔岩松 饶 岚 编著

通信光电子器件与系统的测量及仿真

赵同刚 任建华 崔岩松 饶 岚 编著

科学出版社

北京



内 容 简 介

本书介绍光纤通信系统的测量及仿真,主要内容包括常用测量仪表的使用和原理介绍,光纤与光缆的测量,常用通信光电子器件的工作原理和测量,光纤和光电子器件测量基本型实验,光纤通信系统的测量,包括 SDH 系统特性、WDM 特性、接入网等,PSpice、OptiSystem 等仿真软件在光纤通信中的应用,以及光纤通信系统测试和综合设计型实验。通过对本书的学习,读者可以了解如何对光纤通信系统和光电子通信器件进行准确测量,如何合理地确立测量方案,加深对光纤通信系统各个部分的认识。

本书既可作为工科院校通信专业的教材,亦可供工程技术人员和科研人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信光电子器件与系统的测量及仿真/赵同刚等编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-026097-0

I. 通… II. 赵… III. ①光纤通信-光电器件②光纤通信-通信系统
IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 214989 号

责任编辑:刘红梅 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年1月第一次印刷 印张:23 3/4

印数:1—4 000 字数:607 000

定 价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

著名科学家门捷列夫曾经说过:没有测量就没有科学。这句话充分概括了测量手段、测试技术在现代科学发展中的重要地位。

光纤通信技术是一门迅猛发展的新兴技术。从1960年7月世界上第一台红宝石激光器出现、提出利用光导纤维进行激光通信的设想的二三十年里,在全世界范围内开始了利用光纤通信取代电缆通信的进程。光纤通信以其巨大的带宽潜力、超长距离传输等方面的突出优势,逐渐成为全球高速骨干网的主要传输方式。在这个发展过程中,光纤通信测试技术也在不断地完善和进步。光纤通信新技术的迅猛发展,以及高速光电子器件的不断涌现,对光纤通信系统测量技术、光电子检测的精度不断提出新要求、新课题。准确的测试技术为光通信的发展提供了保障和依据。

现阶段,着眼于光通信发展的美好前景,众多高等院校的通信相关专业都开设了光纤通信系统、光电子技术、光纤通信器件、激光原理、光信息处理等相关理论课程。然而,相关的测量和实验课程却相对薄弱。理论课程的设置应该和实验技术相结合,这样将达到更好的教学效果。从这个角度出发,我们结合北京邮电大学已经开展的光纤通信系统和光电子器件测量的实验状况,编写了本书。在这本书里,不仅介绍光纤通信系统和光电子器件测量的基本原理,还列出通信类专业学生必须掌握的相关实验。读者通过对光纤通信系统的测量和光电子通信器件工作特性的测量,可以加深对光纤通信系统各个部分的认识,理解光电子器件的物理特性,熟悉各类光通信测试仪表的使用,巩固和促进自己在这一领域的学习。

本书分别对光纤、光电子器件、光纤通信系统网络特性等光通信中最核心的内容进行重点论述,并通过相应的实践环节提高读者的动手能力,使读者掌握光通信测量的原理、熟悉各种光通信仪表的使用,达到理论和实践相结合的目的。书中的部分实验涵盖了传统光通信测量中的实验内容,如半导体激光器输出静态特性测量、PIN光电二极管的静态特性和动态特性分析、电光调制实验、光纤熔接技术等;另一部分实验则是笔者结合近几年的科研成果和光通信发展的主流,自主开发的一些设计型、综合型、创新型实验,如OADM光交换综合实验、光纤光栅传感实验、全光波长转换实验等。目的在于使读者通过实验提高动手能力、更深刻地把握专业知识,并不断激发读者的创新能力。本书中重点介绍的实验平台基本上都是自行搭建,主要针对高校电子、信息类的本科生和研究生的学科特点设计,有着浓郁的通信特色。

另外,科研和工程人员可以通过本书了解如何对光纤通信系统和光电子通信器件进行准确测量、如何合理地确立测量方案,加深对光纤通信系统各个部分的认识,为工程施工和维护带来方便,这也是我们编写本书的一个重要原因。

因此,本书不仅可以作为一本专业课教材,也可以作为光纤通信系统的设备研发人员、工程技术人员的学习参考书。

本书由赵同刚、任建华、崔岩松、饶岚等共同编写,书中很多相关实验都是笔者多年工作经

ii 前言

验的积累。一些光电子器件测量实验紧紧围绕通信技术的发展,具有创新性,可谓本书的特色之一。赵荣华、李蔚、李乐坚、黄惠英、忻向军、杨腾、王葵如等也为本书的编写作了很大贡献,在此向他们表示衷心感谢。

最后需要特别指出的是:光电子测量技术目前仍在不断地完善和发展,加之笔者水平有限,书中难免存在一些缺点和疏漏,殷切希望广大读者批评指正。

作者

目 录

第 1 章 概 述

1.1 光纤通信的发展	1
1.2 光纤通信系统的基本概念	4
1.3 光网络技术的发展	11
1.4 光纤通信测量的主要内容	14
1.5 光纤通信测量的 ITU-T 建议和国标	15

第 2 章 常用测量仪表的使用和基本常识

2.1 光功率计	17
2.2 光源	18
2.3 光时域反射仪	23
2.4 误码分析仪	27
2.5 SDH 综合测试仪	28
2.6 光纤熔接机	31
2.7 光谱分析仪	36
2.8 示波器和眼图测试	38
2.9 其他常用的通信测量基本仪器	42
2.10 常用光电子器件的识别	44
2.11 常用电子器件的识别	50
2.12 光通信测试仪表的选择和防护	61

第 3 章 光纤和光缆的测量

3.1 光纤和光缆基本理论	67
3.2 光纤的主要性能参量	71
3.3 光纤参数的测试	77
3.4 光纤机械特性参数测试	90
3.5 光缆机械和环境性能测试	92
3.6 通信系统中的光缆自动监测系统	93

第 4 章 通信光电子器件的性能与测量

4.1 半导体激光器特性与测量	99
4.2 半导体光探测器的静态特性与测量	108
4.3 光纤放大器	111

4.4	全光波长转换器	118
4.5	光纤活动连接器、光耦合器等无源器件的测量	122
4.6	光复用/解复用器件	131
4.7	光开关特性和测量	135
4.8	光调制器	139
4.9	光纤光栅	150
4.10	光通信器件中光纤光栅的应用实例	156

第 5 章 光纤和光电子器件测量基本型实验

5.1	单模光纤截止波长测量	167
5.2	光纤衰减常数测量和 OTDR 测光纤链路特性	170
5.3	光纤色散测量	172
5.4	光纤偏振模色散特性的测量	175
5.5	半导体光源静态特性测试实验	179
5.6	光电探测器静态特性测试实验	184
5.7	半导体光源的动态特性测试	187
5.8	PIN 光电二极管和 APD 的动态特性测试	189
5.9	掺铒光纤放大器特性	194
5.10	光纤喇曼放大器原理演示	198
5.11	全光波长转换综合实验	203
5.12	光纤活动连接器	209
5.13	耦合器、分路器、隔离器、环形器等无源器件特性测试	213
5.14	光开关转换时间的测量	217
5.15	电光效应与电光调制综合实验	220
5.16	声光效应与声光调制综合实验	224
5.17	马赫-曾德尔光纤干涉仪综合实验	228
5.18	光纤光栅传感特性的测试	232
5.19	光纤光栅外腔半导体激光器综合实验	238
5.20	光纤激光器综合实验	240

第 6 章 光纤通信系统的测量

6.1	点到点光纤通信系统	245
6.2	SDH 光传输设备及其测试	250
6.3	波分复用光传输技术及其测试	269
6.4	宽带光接入网的特性和测量	292

第 7 章 光纤通信系统仿真和仿真软件

7.1	光纤通信系统仿真软件现状	313
7.2	OptiSystem 在系统仿真中的应用	314
7.3	光电子器件的电路级仿真和 PSpice 应用	319
7.4	MATLAB 在光通信中的应用	331

第 8 章 光纤通信系统测试和综合设计型实验

8.1 光发端机指标测试实验	339
8.2 光接收单元指标测试实验	340
8.3 光波分复用系统实验及其误码率测量	342
8.4 OADM 综合实验	344
8.5 红外光通信收发模块的设计	346
8.6 简易光功率计设计实验	350
8.7 CPLD 电路设计实验(综合设计型)	351
8.8 声音和图像的光纤传输系统	363
附录 1 专业词汇及缩略语	365
附录 2 常用物理和数学符号	367
参考文献	369

第 1 章

概 述

1.1 光纤通信的发展

信息技术是当今世界应用范围广、产生效益高、前景广阔的科学技术。在过去的数十年间,以计算机、光纤通信等高科技产业为主体的信息技术得到了空前的发展,这场技术革命对人类社会影响之深刻丝毫不逊色于百年前的工业革命,它大大地改变了人们传统的思维方式、生活模式,冲击着资本市场、人才市场、现存的产业界限和运作模式。随着新世纪的到来,人类在物质、精神文明领域永无止境的追求与这场方兴未艾的变革相得益彰,人类社会真正全方位地进入了一个日新月异的信息时代。

作为信息技术支柱之一,光纤通信技术的地位相当重要,光通信技术的发展经历了三次飞跃:

第一次飞跃以 1962 年第一个半导体激光器诞生为标志。1966 年科研人员首次提出用玻璃制成通信光导纤维作为通信媒质的设想。很快,1970 年康宁公司就制出了 20dB/km 的光纤,光纤通信系统的实际研究基本条件得以具备。

第二次飞跃的起点是 1970 年 LD 的双异质结构的发明,光源与光检测器的寿命达到了 10 万小时的实用化水平。与此同时,1310nm 和 1550nm 新的光纤低损耗窗口被发现,单模光纤问世。光纤的衰减系数一下降到 0.5dB/km。光纤通信迈入实用化阶段。随后,长波长多模激光器和单频半导体激光器的研制成功使通信光纤从多模光纤过渡到低色散的单模光纤,光通信的波长也从短波长过渡到低损耗的长波长,光纤通信系统陆续占领世界的电信市场,成为重要的通信手段。

第三次飞跃在 20 世纪 90 年代初,以掺铒光纤放大器 EDFA 的研制成功为标志。EDFA 的应用不仅解决了光纤传输衰减的补偿问题,而且为一批光网络器件的应用创造了条件。同时,EDFA 具有高增益、宽带宽、偏振无关、噪声小和接入方便等优点。作为一种全光器件,避免了再生中继中的光电-电光转换过程,解决了 1.55 μm 光传输窗口中近 40nm 带宽内的多波长的同时功率补偿问题。EDFA 与色散/非线性补偿技术相结合,大大提高了通信中继距离。同时,紫外诱导光纤光栅制作技术的突破改变了自 70 年代末光纤光敏性现象发现以来光纤光栅实用化进程停滞不前的局面,光纤光栅很快被应用到各类 WDM 光器件中,作为一种在滤波和色散特性上独具特色的全光纤型器件,不仅为器件设计提供了新颖、简便的构思,而且大大提高了器件性能。光纤光栅使各种全光纤型器件走向实用化,使光通信领域的技术不断创新和飞跃。

在整个光通信领域飞速发展的背景下,光通信测试技术作为基础和保障也不断向高速化、智能化蓬勃发展。

近几年,随着信息技术的进步,各种迅速发展的新型电信业务对通信网的带宽和容量提出了更高的要求。点到点光纤传输系统在提高电信网的容量方面已经取得了很大的成功,光波分

复用(WDM:Wavelength Division Multiplexing)传输技术的引入,大大提高了现阶段网络的传输容量,不断满足日益增长的网络需求方面的要求。如今,光通信网的发展一方面要求传输链路具有足够的传输容量及良好的扩容升级性能;另一方面又要求网络节点具有灵活的高速数据处理能力,以实现大批量数据的无阻塞、无延迟的交换与路由。

1. 超高速时分复用系统发展

从过去 20 多年的电信发展史来看,电时分复用(ETDM:Electric Time-Division Multiplexing)和光时分复用(OTDM:Optical Time-Division Multiplexing)技术的发展都很快。光纤通信商用系统的速率已从 45Mbit/s 增加到 10Gbit/s,其速率在 20 年时间里增加了 200 多倍。

OTDM 是一种利用时隙传送信息的技术,其结构与 ETDM 技术类似,所不同的是 ETDM 的复用和解复用是在电域内进行的,OTDM 的复用和解复用是在光域内完成的,从而克服了 ETDM 存在的“电子瓶颈”问题。“电子瓶颈”来源于数字集成电路的限制、E/O 和 O/E 转换中由于驱动激光器或调制器的高功率和低噪声线性放大器的速度限制,以及激光器和调制器带宽的限制。OTDM 技术克服了“电子瓶颈”,因此在许多方面具有不可比拟的优势。OTDM 光纤通信传输系统,主要由超快超短脉冲光源、数据编码和调制器件、光纤传输媒介、光纤放大器、全光时钟提取和恢复器件、全光复用和解复用技术器件等关键部分组成,其典型的通信系统工作原理如图 1.1 所示。

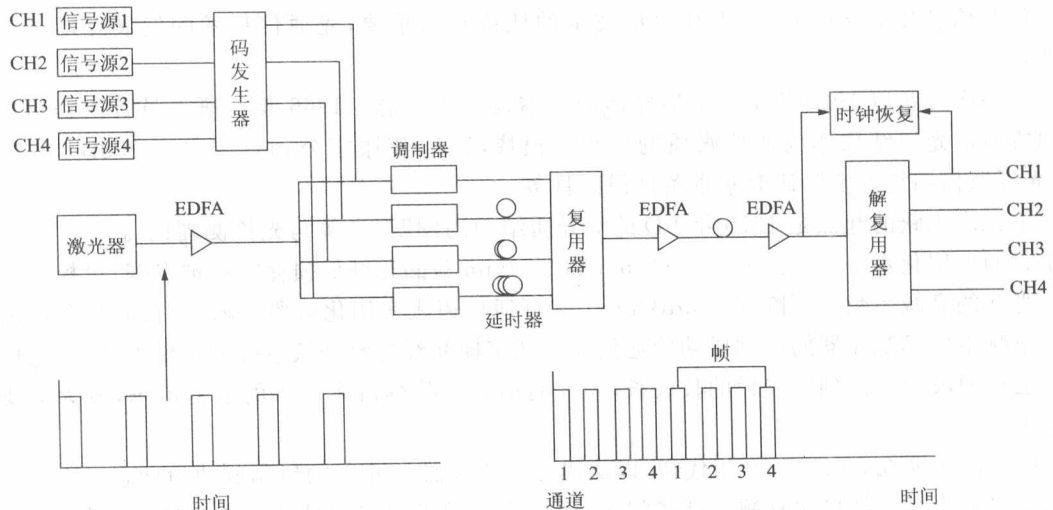


图 1.1 高速光时分复用 OTDM 光纤通信

在 OTDM 中采用单一光波长传输,它的关键技术包括高重复率超短光脉冲源、超短光脉冲传输技术、时钟提取技术、光时分复用技术、全光中继再生技术。

2. 光码分多址的发展

光码分多址(OCDMA:Optical Code-Division Multiple Access)技术经过十几年的研究也取得了重大突破。

码分多址是一种扩频通信技术,由于具有保密性好、抗干扰性强等特点,原先主要应用于军事领域,最近十几年更是广泛应用于卫星通信和移动通信,特别是在移动通信中的应用已经逐步商业化。CDMA 在光纤通信中应用的研究也在逐步开展。

在 OCDMA 系统中,系统给每个用户分配一个唯一的地址码字,用户的信号用地址码字序

列来填充,这样不同用户信号可调制在同一光载波上在光纤信道中传输,接收时只要用相应的地址码字进行相关接收,即可恢复原用户信息。系统的地址码之间应当是正交的,因此进行相关接收时,其他用户的信号不会构成同信号干扰,而只相当于噪声。

OCDMA 系统工作在低色散窗口,通过直接光编码和光解码,实现光信道的复用和信号交换,能较好地发挥光纤信道频带宽的潜力,它具有地址分配灵活、用户可随机接入、动态分配带宽、网络容易扩展、多址连接和控制灵活方便、网管简单、保密性强等优点,适合于对实时要求高、业务突发性强、速率高的宽带通信。而且 OCDMA 对光源的稳定性、谱线宽度等的要求比波分复用低,用现已成熟的通信系统光源即可;用户所用设备可规格化,便于制造和维护,因此对今后的本地网、用户接入网来说有很好的应用前景。

OCDMA 系统的原理框图如图 1.2 所示。

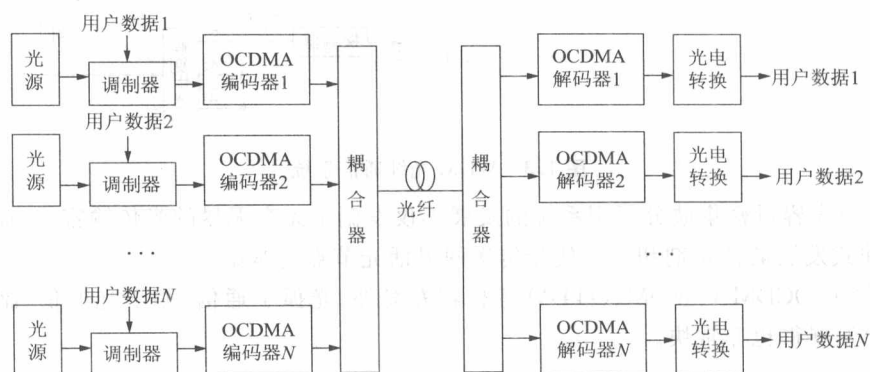


图 1.2 OCDMA 光纤通信系统

用户数据信号首先对光源进行调制,调制后的光信号通过 OCDMA 编码器进行编码,然后经过耦合器耦合进入光纤,经过传输后,在接收端在经过 OCDMA 解码器进行解码,再经过光电转换和必要的电信号处理,就可以得到最初的用户数据信号。

光码分多址中的关键技术主要有地址码的设计、编解码器的实现、光源技术、功率控制技术等。

OCDMA 网络能提供大的光纤网容量、光交叉连接、无源光上下路、光交换和故障恢复能力,无需 OXC 和 OADM,所用系统器件少,从而增加了网络的可靠性,简化了网络管理并降低了成本,同时对传输光纤无特殊要求,对光源无需精确控制波长,同 OTDM 一样,是实现全光网的重要技术,具有广阔的应用前景。

3. 超大容量超长距离波分复用系统的发展

WDM 方式利用了光纤上可同时传输多个不同波长的光载波的原理,从而大大增加了光纤上传输的信息容量。WDM 方式可利用已敷设的光纤,使单根光纤的传输容量在高速率的基础上成 N 倍地增加。既不需要敷设新的光缆线路,也不必废弃原有光传输设备,还可建立新传输方式的光传输网,能迅速解决通信网络传输能力不足的问题,达到系统扩容的目的。

WDM 实质上是在光纤上进行光频复用,因为光波通常采用波长而不是用频率来描述、监测与控制。目前广泛应用的光纤低损耗窗口为 1310nm 和 1550nm,1310nm 窗口低损耗区为 1260~1360nm,共 100nm;而 1550nm 窗口低损耗区为 1480~1580nm,共 100nm。两个工作区约 200nm 低损耗区可用,这相当于 30THz 带宽资源。若波长间隔为 5nm,则可复用约 40 个载波。在实际应用中的波分复用传输系统发送端,采用光波合波器将待传输的多个光载波长(信

道)复用至一根光纤,而在接收端采用光分波器,将已复用的各波长信道分开或实现光波长(信道)的上下复用。

典型的 WDM 光纤通信系统如图 1.3 所示。

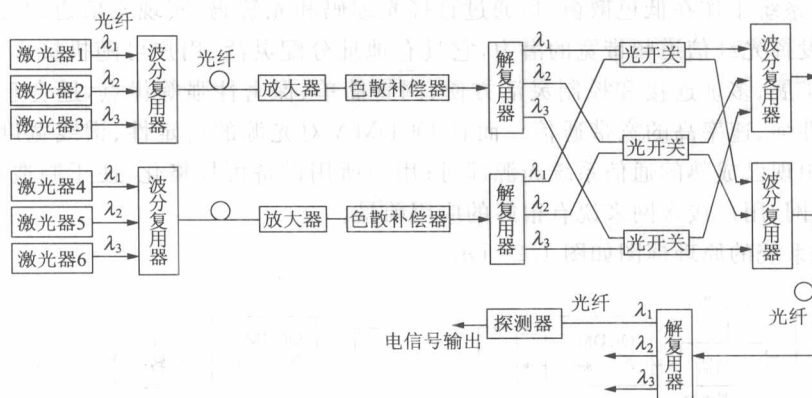


图 1.3 WDM 光纤通信系统

近年来超大容量密集波分复用系统的发展不仅发掘了无穷无尽的光传输容量,而且也成为 IP 业务爆炸式发展的催化剂和下一代光传送网灵活光节点的基础。

另外,除了 OCDMA、WDM、OTDM 等扩容方案外,光孤子通信、相干光通信、副载波复用技术(SCM)发展得也非常快。

1.2 光纤通信系统的基本概念

1.2.1 光波的频谱

光载波与通信用的无线电磁波一样,也是一种电磁波,光波的波长很短。光波是指波长从零点几毫米到大约 $0.1\mu\text{m}$ 波长范围内的电磁波。图 1.4 所示为光波在电磁波谱中的位置,可见光的波长为 $0.36\sim 0.76\mu\text{m}$,包括红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫。比红光波长更长的光是不可见的红外光,比紫光波长更短的光称为紫外光,目前光通信的波段在近红外波。

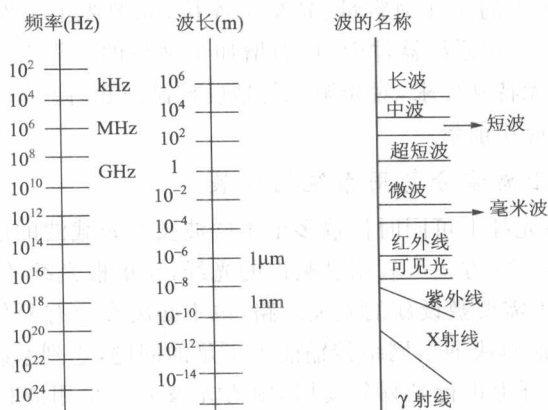


图 1.4 电磁波的波长范围及相应的种类

光通信的理论基础在历史上是按照这样的顺序发展起来的:几何光学→波动光学→电磁光学→量子光学。毫无疑问,这些理论越来越复杂和艰深,它们是越来越精密和复杂的光学试验

产物。

光波传播的时候,碰到尺寸远远大于其波长的物体时,光的波动特性就很难被观测到,这时可以用遵守一定几何规律的光线来描述其行为,即几何光学。严格地讲,只有光波长无限短时,光波才变成几何上的直线。所以几何光学适用范围是:光学边界条件远远大于光波长。

波动光学理论是光通信常用的分析手段,电磁波在空间以相互正交的两个矢量波向前传播:一个电场波和一个磁场波。但对于许多光学现象,只用一个单一的标量波函数来描述已经足够。这种对光的近似处理方法,一般被称为标量波动光学,简称波动光学。

光的电磁波理论(电磁光学)包含波动光学,波动光学又包含几何光学。波动光学和几何光学只是两种近似的模型,但它们导出的结果与运用严格的电磁波理论推导出的结果基本一致,这就是这两种模型的成功之处。

运用光的电磁波理论可以解决几乎所有经典光学问题,但也存在一些经典理论所不能解释的现象。这些现象本质上属于量子机制,可以用量子电磁理论即量子电动力学来阐明,该理论也称为量子光学。

1.2.2 DWDM 光纤通信系统

1. 点到点光纤通信系统

一个简单的点到点光纤通信系统如图 1.5 所示,电端机(交换机)将来自信号源的信号进行模-数转换、多路复用等处理。在光端机中,电信号变成光信号,输入光纤,经光收端机通过光检测器还原成电信号,再经过放大、整形、恢复后输入电端机(交换机或远端模块),完成通信。光端机间的传输距离在长波长达到 100km,超过距离则用中继器将光纤衰减和畸变后的弱光信号再生成,继续向前传输。

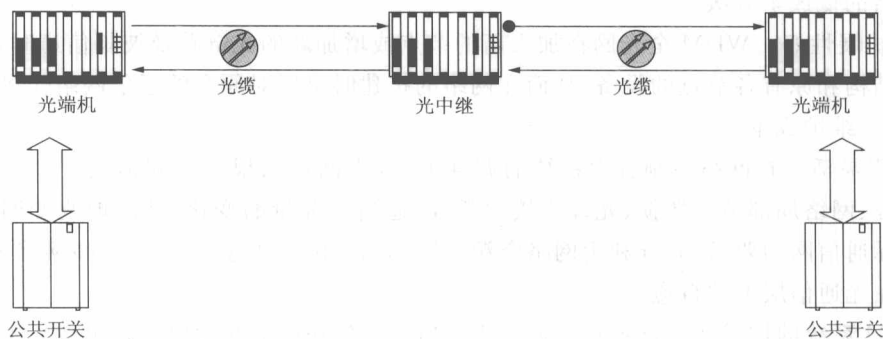


图 1.5 点到点光纤通信系统

光纤通信可采用模拟和数字调制,电信号到光信号的转变通常有两种光调制方法:其一是直接调制,电信号直接对激光器调制,激光器输出随电信号变化的光信号;其二为外调制,电信号没有直接加载在激光器上,如电光调制,而是加载在电光晶体调制器上,激光器输出稳定功率后通过该外调制器,得到随电信号变化的光信号。光源外部调制的调制速率高,调制速率可达 10~20Gbit/s。

2. DWDM 技术

传统的光纤通信系统都是在一根光纤中传输一路光信号,没有充分利用光纤的巨大带宽资源。为充分发挥光纤的超大容量的通信传输能力,多采用光波分复用的 WDM 技术,通常把光通道间隔较大(甚至在光纤不同窗口上)的复用称为粗波分复用(CWDM),把在同一窗口中通

道间隔较小的 WDM 称为密集波分复用(DWDM; Dense Wavelength Division Multiplexing)。DWDM 复用技术可在光纤中开发出 100~200 个光频道,每个频道可容纳 10~20Gbit/s 的信息容量,这样将使单根光纤的传输容量迅速增加,是一种很好的扩容方案。

在未来全光网络中,各种电信业务的上下、交叉连接等将在光层上通过对光信号波长的改变和调整来实现。DWDM 利用单模光纤低损耗区的巨大带宽,由于几十个甚至上百个波长可以在一根光纤里同时传输,基于波长的光交换才成为可能,由于波分复用技术,不同体制的信号如语音、数据、视频才有可能在一起传输。DWDM 技术已经成为实现全光网的核心技术。

与通用的单通道系统相比,DWDM 技术不仅极大地提高了网络系统的通信容量,而且具有扩容简单和性能可靠等诸多优点,特别是它可以直接接入多种业务的特点更使得其应用前景一片光明。DWDM 技术的发展与成熟是推动全光通信网络发展的最重要因素。DWDM 全光网的优点包括:

① 简单可靠。全光网结构简单,端到端采用透明光通路连接,沿途没有光电转换与存储,网中许多光器件都是无源的,便于维护,可靠性高。

② 传输透明。全光网以波长来选择路由,具有对传输码率、数据格式及调制方式透明的优点。一旦两个用户在某个波长上建立了连接,则任意格式和速率的信号都可以在这个连接上传送,与信号的内容没有关系。这样,整个网络中间如同有一个透明的媒质层,网络可以提供多种协议业务,能不受限制地提供端到端业务。

③ 与现有通信网络兼容。全光网是基于 WDM 传输以及波长路由方式的新的光网络层,具有独立的控制管理体系,比较容易地与现有的通信网络兼容,并且支持未来的综合业务数字网以及网络的低成本升级。

④ 可扩展性好。WDM 全光网在加入新的节点或增加新的光链路及波长信道时,不影响原有的网络结构和原有各节点的设备,从而在网络的扩建时可以对原有的通信网络作尽量少的改动,降低网络维护成本。

⑤ 重组灵活。在网络控制管理系统的调度下,全光网可以根据不同情况下(如统计规律、突发性业务、网络局部节点坏损、光纤连接中断等)通信业务量的变化,动态地改变网络的结构以满足实际通信网的要求,充分利用网络资源,减少资源闲置的现象,同时提高网络的可靠性,实现网络在光通信层上的自愈。

DWDM 系统的构成及光谱示意图如图 1.6 所示。发送端的光发射机发出波长不同而精度和稳定度满足一定要求的多路光信号,经过光波分复用器复用在一起送入掺铒光纤功率放大器(掺铒光纤功率放大器主要用来补偿波分复用器引起的功率损失,提高光信号的发送功率),再将放大后的多路光信号送入光纤传输,中间可以根据实际情况选用光线路放大器,到达接收端经前置放大器(主要用于提高接收灵敏度)放大以后,送入光波分解复用器分解出原来的各路光信号。

按一根光纤中传输的光通道是单向的还是双向的,DWDM 系统可以分成单纤单向和单纤双向两种。

这几年,随着各国相继制定的信息高速公路计划,DWDM 全光网在此机遇下得到了长足的发展。包括多波长激光器阵列、光波长转换器、光滤波器以及光分插复用器、光互联单元等 WDM 器件在内的各种新型光电子器件不断出现,交换和路由得以在光域上实现,DWDM 全光网已经成为国家通信骨干网,它承担着大量语音、数据、多媒体业务。

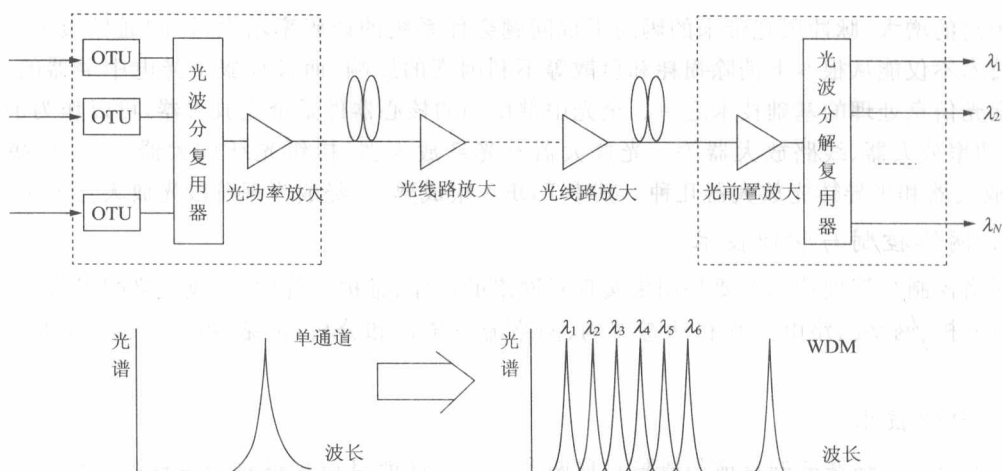


图 1.6 DWDM 系统的构成及频谱示意图

另外,由于多媒体宽带通信的需求,特别是近几年来,IP 业务呈爆炸性增长,通信具有突发性和不对称性,业务量难于预测。这些特点导致了基于电路交换的传统光网络在传输 IP 业务时的效率较低。为了要求光网络向着灵活、高效、智能化方向演变,波分复用系统的波长通道的波段正由常用的 C 波段扩展到 L 波段,同时单波长通道的传输速率也进一步提高,通过光分插复用(OADM: Optical Add and Drop Multiplexer)技术和光交叉互联(OXC: Optical Cross-Connect)技术,在同步数字体系(SDH: Synchronous Digital Hierarchy)传输网络上逐步实现光波长通道的互联。

1.2.3 全光网的关键技术

全光网的迅速发展离不开该系统中一些关键技术的相继突破,从整体上看,当代光纤通信技术的发展方向是超大容量、全光网络、低成本和集成化。这些巨大发展得益于材料和器件的发展。例如,掺铒光纤放大器(EDFA: Erbium-doped Optical Fiber Amplifier)技术的广泛应用,集成声光器件、聚合物波导光开关、波长转换滤波器、AWG(阵列波导光栅, Arrayed Waveguide Grating)、光路由器和可变光衰减器等新器件的应用使整个系统的性能获得极大改善。全光网络是当今光通信的最高形式,它的普及关键在一些新技术的进步和成熟。这主要包括以下几方面。

1. 光交换节点技术

在全光网中,主要有光上下路 OADM 和光交叉互连 OXC 两种全光交换节点。OADM 负责将本地需要的光波长信号从 WDM 信号中分离出来,同时将本地上路的光波长复用到 WDM 信号中,让与本节点无关的其他各个波长的光信号顺利通过。OXC 属于大型的交换节点,负责网络和网络之间的波长信道交换。这些 WDM 器件中有的由于工作原理复杂、功能强大,有的因为提高性能的需要,其配置往往是基于多种光器件的结构,如 OXC 节点本身就由波分复用/解复用器对、光开关阵列、波长转换器和可调谐滤波器等组成。这些光器件的发展对全光网未来实用化进程十分重要。

2. 全光中继技术

色散和损耗是限制光通信中继距离的两个主要因素。损耗导致光信号的幅度随传输距离按指数规律衰减,通过全光放大器可以提高光信号功率。色散将会导致光脉冲发生展宽,随着

传输距离的增大,脉冲展宽带来的码间干扰问题会使系统的误码率增大,影响通信质量。全光中继技术不仅能从根本上消除损耗和色散等不利因素的影响,而且克服了光电中继器的缺点,成为全光信息处理的基础技术之一。全光中继用到的核心器件是全光放大器,可以作为前置放大器、功率放大器、线路放大器等。光放大器有光纤放大器、掺铒光纤放大器、光纤喇曼(Raman)放大器和半导体光放大器几种。其中 EDFA 很成熟,已经成为现阶段光放大器的主流。

3. 网络控制与管理技术

网络控制与管理技术主要是用来实现对网络的操作、维护和管理,完成网络配置管理、故障定位及分析、网络的路由控制和动态重构、网络流量统计和分析、网络性能监测和分析等多项功能。

4. 自愈技术

自愈应该包括性能的自愈和故障自愈两个方面。性能自愈是指对一定程度上网络性能的下降实现自愈,例如线路中某个 EDFA 功率的下降或升高,应该由其后面的 EDFA 自动补偿,从而实现总体功率水平的稳定。故障自愈是指当网络出现故障,如光缆断裂时,网络应该自动启动备用资源,避开故障点,保证网络通信的正常进行,待故障解决后再自动恢复。

5. 光源技术

全光网波分复用技术所采用的光源,其发光波长必须精确稳定,而且便于集成。所以光源技术是一项非常重要的核心技术。一个稳定工作的光源还包括波长监测和稳频技术,可靠性不仅要高,而且成本要低。DWDM 还要求光源高速、大容量、低啁啾、增大传输距离、工作波长可调并且高度稳定。激光器与调制器的集成成为趋势。目前已有分布反馈(DFB; Distributed Feedback)半导体激光器与电吸收调制器的单片集成、DFB 半导体激光器与 Z 型调制器的单片集成、分布布拉格反射(DBR; Distributed Bragg Reflector)激光器与调制器的单片集成和半导体与光纤光栅构成的混合集成激光器产品。它们的调谐范围可大于 40nm,它们在未来光网络中的应用主要表现在动态波长分配,通过可调激光以及可调滤波器等器件,实现基于波长的通道分配。

6. 实现全光网的其他关键器件

事实上,在当今光通信领域,最为活跃的研究主要面对各类光子器件和高速光电子器件,每一次在光器件上的技术突破都极大地推动了光通信整个系统、网络的进步。另外,全光器件不仅作为光纤通信设备的重要组成部分,也是传感技术和其他应用领域不可缺少的器件,例如光纤传感技术。传感和信号处理的基础是光纤本身以及由其制造成的各种全光纤器件,包括光纤熔锥耦合器、光纤延迟线、光纤马赫-曾德尔(M-Z; Mach-Zehnder)光纤干涉仪、迈克尔逊(Michelson)干涉仪、光纤法布里-珀罗(F-P; Fabry-Perot)干涉腔、萨格奈克干涉仪和光纤陀螺仪等。

新型器件可使整个系统的性能大大改善,有时会推翻整个旧系统。目前,许多公司或科研单位都投入较大的力量开发新型的光器件,其中包括集成开关矩阵、滤波器、波长转换器、新型光纤、OADM 和 OXC 等关键器件,重点要解决高速光传输、复用器、高性能的探测器和可调激光器阵列以及集成阵列波导器件等关键器件,这些光器件与光纤一起构成了全光网络的物质基础。

(1) 光开关

光开关在光网络中是非常关键的器件,其主要集成在光网络设备中,用途很广泛。最根本的应用就是实现光网络的自动保护倒换。另外,还可以实现全光层次的路由选择、波长选择、光

交叉连接、自愈保护等功能。用光开关实现的光分插复用器 OADM 可以通过软件控制动态上下任意波长,极大地增加了网络配置的灵活性。光开关切换时间是衡量其性能的主要因素,例如,核心光网络的交叉连接、实现故障保护和动态光路径管理等应用要求光开关阵列响应速度快,信道切换通常要求达到毫秒量级,实现信元/包交换至少要达到微秒(μs)量级,而计算机网络的准实时交换要求达到纳秒(ns)量级。同时还要求光开关单片集成度大,因为网络信息资源的利用率取决于 OXC 的集成规模和运行的灵活程度。

光开关是目前相当热门的研究领域。在实现光开关的众多技术之中,微机电系统(MEMS: Micro-Electromechanical System)技术由于可在极小的晶片上排列大规模机械矩阵,解决了 OXC 发展中容量限制瓶颈的一大问题,同时在技术不断改进之后,MEMS 开关的回应速度和可靠性也将大大提升。因此,从目前的情况来看,利用 MEMS 设计的 OXC 极有可能成为今后 OXC 和光交换的主要发展方向。例如,采用 MEMS 技术的微镜阵列光开关技术,每个微镜的直径约 $300\mu\text{m}$,用静电就能使其弹起偏转,将入射光反射到任意方向的输出光纤中完成光交叉连接,具有成本低、体积小和容量大等优点。MEMS 还可以制作光衰减器、光功率稳定器、光功率均衡器和光波段开头等。

(2) 可调式滤波器

发展全光网络的一个先决条件是必须做到光层面的网络监控与管理。就目前的技术而言,若要对光信号进行监控,必须先将光信号取样后,经过光电转换,才能进行下一步的信号监控或路由控制。然而,这种方式不但所需的设备昂贵,而且线路复杂、管理不易,随着网络业务的快速增加,显然没有经济效益。利用可调式滤波器为基础的光纤监控和管理则不需针对每一个波长分别设置光电转换及监测设备,只需要透过可调式滤波器,将要处理的波长筛选出来即可,因此可大大简化光纤监管系统的架构。

目前,声光可调滤波器 AOTF(Acousto-Optic Tunable Filter)技术逐渐成熟,其原理是将声波信号加于光的传播介质,使光在特定的正交方向产生衍射现象,此时使用偏振器即可从入射光束(主信号)中分离出一个或多个波长的光信号。除 AOTF 之外,其他的技术还包含微机械式、阵列波导式(Array Wave-guide Grating)及布拉格光纤光栅式(FBG: Fiber Bragg Grating)等。

(3) 光纤熔锥器件

熔锥型光纤器件是全光器件中最具代表性的,也是构成其他器件的一种基础器件,在光纤通信中得到广泛应用,它具有以下特点:

- ① 极低的附加损耗。目前,利用熔锥法制作的标准 X(或 Y)型耦合器的附加损耗已低于 0.05dB ,这是其他方法所难以达到的。
- ② 方向性好。这类器件的方向性指标一般都超过 60dB ,保证了传输信号的定向性,并极大地减少了线路之间的串扰。
- ③ 良好的环境稳定性。在经过适当保护后,环境条件的影响可以限制到很小的程度。
- ④ 控制方法简单、灵活。可以方便地改变器件的性能参数。
- ⑤ 制作成本低廉、适于批量生产。

(4) 波长转换器

通过波长转换器(WC: Wavelength Converter),光网中的光通道在不同链路上可由不同波长建立起来,有效解决了全光网特别是多用户环形网、星形网中的波长路由竞争问题,降低了信道阻塞率,实现了波长再利用,在充分挖掘 WDM 带宽资源的同时提高了网络的灵活性和可扩充性。这类器件的构成,有基于半导体光放大器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)中的