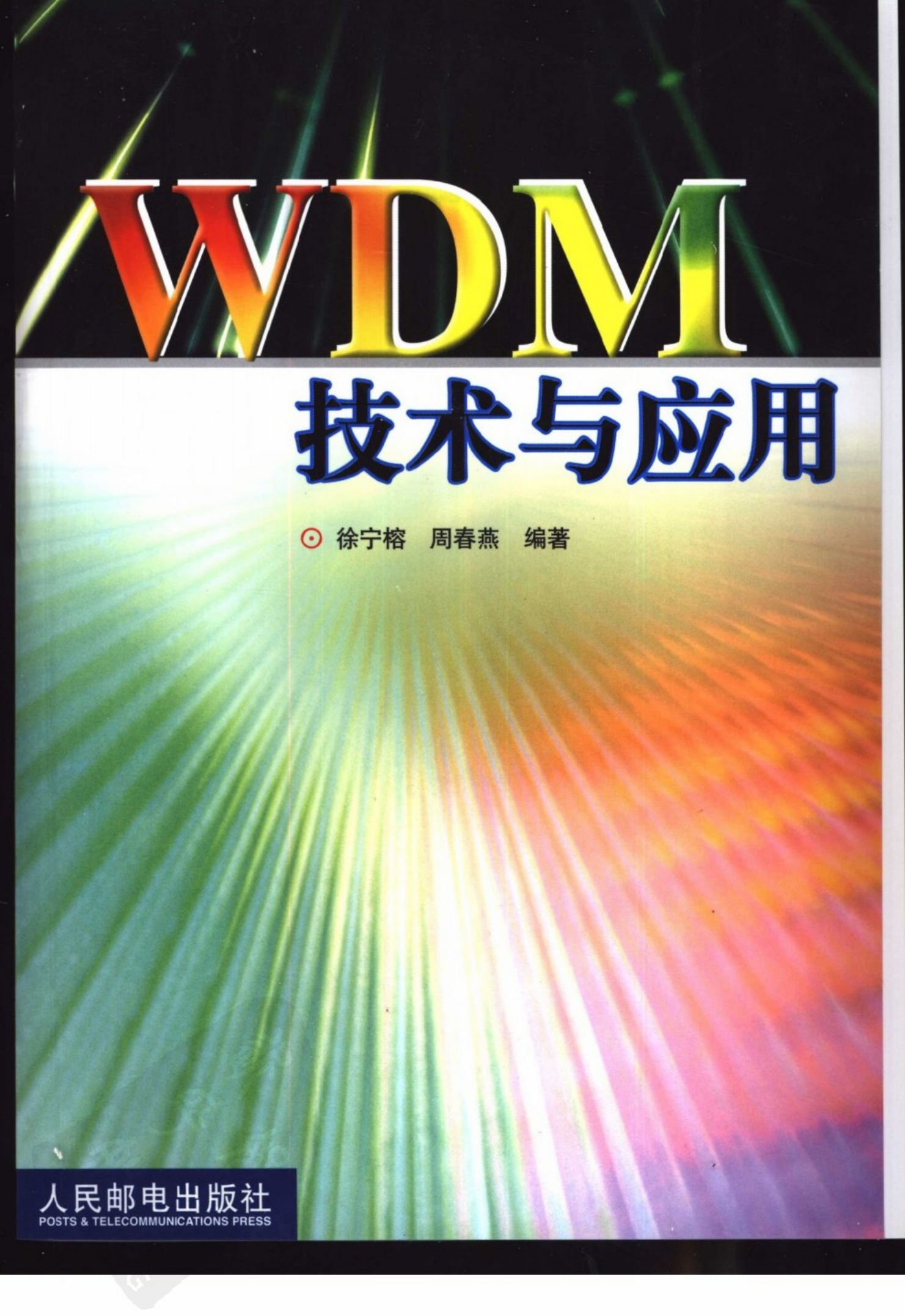


The book cover features a dark background at the top with green and yellow light rays. The title 'WDM' is rendered in large, 3D, multi-colored letters (red, orange, yellow, green). Below it, the Chinese title '技术与应用' is in large blue characters. The authors' names are in the center, and the publisher's name is in a dark blue box at the bottom left. The bottom half of the cover is filled with a vibrant, multi-colored light burst pattern.

WDM

技术与应用

◎ 徐宁榕 周春燕 编著

人民邮电出版社
POSTS & TELECOMMUNICATIONS PRESS



WDM

技术与应用

ISBN 7-115-10811-0



9 787115 108111 >

ISBN7-115-10811-0/TN·1944
定价:32.00 元

人民邮电出版社
<http://www.ptpress.com.cn>

WDM 技术与应用

徐宁榕 周春燕 编著

人民邮电出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

WDM 技术与应用 / 徐宁榕, 周春燕编著. —北京: 人民邮电出版社, 2002.12

ISBN 7-115-10811-0

I. W... II. ①徐... ②周... III. ①光通信—数字传输系统 ②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 088003 号

内 容 提 要

本书共分两部分: 第一部分介绍了 WDM 技术的发展、基本原理、系统构成、性能要求以及关键技术, 并着重介绍了光源、光放大、光滤波和光纤技术; 第二部分针对 WDM 技术在通信网中的应用, 介绍了 WDM 光网络的基本原理、构成 WDM 光网络的关键设备, 着重讲述了光传送网, 并结合城域网和接入网的特点介绍了 WDM 技术的应用, 最后结合实例进行了分析。通过本书的阅读, 读者可以了解到 WDM 专业技术的背景、概念、技术原理、最新设备及未来的发展趋势。

本书可作为大专院校的通信专业的参考教材, 也适合于有兴趣学习了解 WDM 光网络知识的专业人士, 还可供从事通信工作的技术人员阅读。

WDM 技术与应用

- ◆ 编 著 徐宁榕 周春燕
责任编辑 杨 凌
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
读者热线 010-67129258
北京汉魂图文设计有限公司制作
北京顺义振华印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17
字数: 406 千字 2002 年 12 月第 1 版
印数: 1-4 500 册 2002 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-10811-0/TN · 1944

定价: 32.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

前 言

近几年来,传统的语音业务的增长率只有5%~10%,而以Internet为代表的业务的增长率为20%~30%。数据通信业务量如此高速、持续增长的最直接动力来自Internet业务量持续指数级的增长。主要的Internet提供商给出的数据表明:系统带宽正以超摩尔的速率增长,带宽大约每6~9个月就需要翻一番。全球通信业务的迅速增长,出现了所谓的“光纤耗尽”现象和对代表通信容量的带宽的“无限渴求”现象。为提高通信系统的性价比和经济有效性,满足不断增长的电信和Internet业务需求,如何提高通信系统的带宽已成为焦点。

波分复用(WDM)技术,尤其是密集波分复用(DWDM)技术对网络的升级扩容、发展宽带新业务、充分挖掘和利用光纤带宽能力,特别在现有光纤用完而敷设十分困难的情况下实现超高速通信具有十分重要的意义。

然而,大多数人对WDM技术还比较陌生,或者说有所了解但不够全面。因此,本书力求从WDM技术的基本原理、关键技术及其最新进展、在通信网中的应用等方面给予全面的介绍。注重用实例对各技术原理进行解释,有助于读者对技术本身的了解。

本书由以下四部分组成:

第一部分——概述(第1章),包括:几种光复用技术的比较,WDM技术的三个发展阶段及其发展方向,以及各大公司的DWDM产品及其光网络解决方案。

第二部分——WDM技术及其三大关键技术(第2、3章),包括:WDM技术的基本原理、系统构成、系统容量、技术规范和性能要求、现有技术水平及其应用水平,三大关键技术即光源技术、光放大技术、光滤波技术,同时也介绍了光纤技术。

第三部分——光网络(第4~6章),包括:全光网的基本原理及其关键技术、基于WDM的光传送网、光传送网的自动化即智能网、光网示例,WDM光网络的关键设备——OADM、OXC、OTU、波长路由和光交换技术,针对城域网和接入网的特点的WDM技术的应用。

第四部分——WDM网络应用实例(第7章),介绍了WDM广域网中的应用实例和中国宽带城域网实验——China MAN Trial' 2000。

本书的编写参考了大量的国内外网络书籍以及学术论文,还有很多信息来源于论坛、国内外一些设备供应商的技术支持中心、一些标准化中心的公开文档和作者工作中的工程案例。本书在编写过程中得到了浙江工业大学毛培法教授、浙江省长途传输局严绍康高级工程师的支持和帮助,凌坚博士、汪彦龙硕士给予了意见和建议,在此表示感谢!

同时还要感谢杭州市公安局信息通信处李望同、杜立贤处长及有关领导,以及浙江省天屹集团公司陈立新高工给予我工作的极大支持!

本书第5章由周航程编写,第1、2、3、4、6、7章由周春燕编写,徐宁榕教授负责审校。

由于水平有限,加上时间仓促,书中欠妥乃至错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。建议和批评请发电子邮件至:cy-z@163.com,笔者将不胜感激。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 光复用技术的比较	1
1.1.1 光码分复用 (OCDMA) 技术	2
1.1.2 光时分复用 (OTDM) 技术	2
1.1.3 光频分复用 (OFDM) 技术	2
1.1.4 波分复用 (WDM) 技术	3
1.2 WDM 发展的三个阶段	4
1.2.1 第一代和第二代 WDM 系统	4
1.2.2 第三代 DWDM 系统	5
1.2.3 第三代光网络的三大技术	6
1.3 WDM 的发展方向	7
1.4 各大公司的 DWDM 产品及其光网络解决方案	8
1.4.1 国外公司的 DWDM 产品及其光网络解决方案	8
1.4.2 国内公司的 DWDM 产品及其光网络解决方案	11
第 2 章 WDM 技术	14
2.1 WDM 系统的工作原理	14
2.2 WDM、DWDM 和 CWDM	15
2.3 WDM 系统的分类	17
2.4 WDM 系统的保护	18
2.4.1 基于单个波长, 在 SDH 层实施的 1+1 或 1:n 保护	18
2.4.2 光复用段保护 (OMSP)	18
2.5 WDM 系统的构成	19
2.5.1 双纤单向和单纤双向	19
2.5.2 无纤光通信	20
2.6 WDM 系统的容量	23
2.6.1 影响系统容量的几个因素	23
2.6.2 光纤传输的总信号功率	24
2.6.3 影响传输距离的因素	25
2.7 WDM 系统的技术规范	26
2.7.1 光波长区的分配	27
2.7.2 光接口分类	29

2.7.3	光接口参数	30
2.7.4	性能要求	30
2.7.5	光监控信道 (OSC) 要求	31
2.7.6	安全要求	31
2.8	WDM 的技术优点	32
2.9	WDM 的现有技术水平及其应用水平	34
2.10	WDM 的发展趋势	35
第 3 章	WDM 系统的三大关键技术	37
3.1	光源技术	37
3.1.1	光纤通信系统中的光源	37
3.1.2	激光器的构成	38
3.1.3	激光器分类	38
3.1.4	光纤通信系统所用的激光器	39
3.1.5	可调激光器	40
3.2	光放大技术	43
3.2.1	光放大器的分类	43
3.2.2	光放大器的工作频段	44
3.2.3	光纤放大器	45
3.2.4	半导体光放大器	53
3.2.5	光纤拉曼放大器	53
3.2.6	光放大器的市场分析与发展方向	54
3.3	光滤波技术	54
3.3.1	光滤波技术的工作原理	54
3.3.2	技术比较	56
3.3.3	可调光滤波技术	57
3.3.4	光分/合波技术	59
3.3.5	群组滤波——Interleaver 技术	63
3.4	光纤技术	64
3.4.1	WDM 与光纤	64
3.4.2	光纤性能的要求	64
3.4.3	新型光纤的发展	66
第 4 章	WDM 光网络	68
4.1	全光网概述	68
4.1.1	通信网络的发展趋势	68
4.1.2	光网络的基本原理、特点与结构	70
4.1.3	光网络的演变与发展	72
4.2	全光网的关键技术	73

4.2.1 全光放大中继技术	73
4.2.2 光多路传输技术	74
4.2.3 波长选择技术	74
4.2.4 光交换技术	74
4.2.5 光分插复用 (OADM) 技术	75
4.2.6 波长转换技术	75
4.2.7 网络控制和管理技术	75
4.2.8 网络安全技术	75
4.2.9 集成光学和光纤光栅技术	76
4.3 基于 WDM 的光传送网	76
4.3.1 几种光传送网技术的比较	76
4.3.2 WDM 光传送网的分层结构	81
4.4 光传送网的原子功能模型	85
4.4.1 功能模型的概念	85
4.4.2 原子功能模型	86
4.4.3 参考点命名	86
4.4.4 参考点信息命名	86
4.4.5 原子功能命名和图形符号约定	87
4.5 光传送网的功能块特性	87
4.5.1 监控过程和管理信息流	87
4.5.2 光传输段层的网络功能	88
4.6 光传送网和 IP 业务	92
4.6.1 光传送网技术比较	92
4.6.2 光传送网协议体系结构的比较	94
4.7 IP over WDM 光网络	98
4.7.1 IP over WDM 光网络分层体系结构	98
4.7.2 IP over WDM 网络中光层的保护系统	108
4.7.3 多层网络的恢复	115
4.8 WDM 光传送网的设计与操作	118
4.8.1 基本概念	118
4.8.2 WDM 光传送网的设计	121
4.8.3 WDM 光传送网的操作	123
4.9 光传送网的自动化——智能光网络	125
4.9.1 智能光网络的涵义的形成	125
4.9.2 智能光网络的要素	126
4.9.3 智能光网络的革新	127
4.9.4 智能光网络的创新——以软件为核心	128
4.9.5 新型波长服务	130
4.9.6 典型的智能光网络的实现	130

4.9.7 光域服务互联 (Optical Domain Service Interconnect)	136
4.10 WDM 光网络示例——中兴通讯光纤传输网络整体解决方案	137
4.11 WDM 光传送网有待解决的问题	140
4.12 光传送网研究的最新进展及发展趋势	140
第 5 章 WDM 网络的关键设备	144
5.1 光分插复用器 (OADM)	144
5.1.1 概述	144
5.1.2 OADM 的体系结构和节点实现方案	145
5.1.3 OADM 产品和应用	148
5.2 光交叉连接设备 (OXC)	149
5.2.1 概述	149
5.2.2 OXC 的特点及主要功能	150
5.2.3 OXC 的性能指标	152
5.2.4 OXC 设备分类	153
5.2.5 OXC 的保护恢复策略和恢复算法	154
5.2.6 OXC 的管理	155
5.2.7 OXC 的结构	155
5.2.8 实现 OXC 的关键器件	158
5.2.9 OXC 的主要技术难点	159
5.2.10 OXC 的设计要素	160
5.2.11 OXC 在网络中的应用	162
5.2.12 国内外 OXC 的发展现状	163
5.2.13 小结	165
5.3 波长转换器 (OTU)	165
5.3.1 波长转换技术	165
5.3.2 O/E/O 波长转换	165
5.3.3 全光波长转换	166
5.3.4 波长转换对全光网络设计与性能的影响	171
5.4 波长路由和光交换技术	177
5.4.1 全光网络中光交换/光路由的作用	177
5.4.2 光交换/光路由的技术原理	178
5.4.3 光交换/光路由的关键器件技术	181
5.4.4 光交换/光路由的发展现状	182
5.4.5 光交换/光路由的典型应用	183
5.4.6 光交换/光路由的发展前景	184
5.4.7 国外厂家的方案设计	184
5.5 目前进展情况	186

第 6 章 WDM 技术在城域网与接入网中的具体应用	188
6.1 城域网中的 WDM 技术	188
6.1.1 什么是城域网	188
6.1.2 城域网的现状	189
6.1.3 DWDM 技术在城域网中的应用	189
6.1.4 CWDM 技术在城域网中的应用	198
6.1.5 城域光网络的设备市场	199
6.1.6 城域光网络的建设情况	200
6.1.7 目前存在的问题	201
6.1.8 华为城域传输网的综合解决方案	203
6.2 接入网中的 WDM 技术	207
6.2.1 接入网概述	207
6.2.2 波分复用无源光网络 (WDM PON) 的关键技术	208
6.2.3 WDM 光接入网的网络结构	211
第 7 章 WDM 网络的应用实例	221
7.1 广域网中的应用实例	221
7.1.1 工程概况	221
7.1.2 传输系统	222
7.1.3 网络管理系统	224
7.1.4 公务通信系统	225
7.1.5 时钟同步系统	225
7.1.6 设备选型及主要技术要求	225
7.1.7 DWDM 传输系统指标	231
7.1.8 SDH 传输系统指标	231
7.1.9 设备电缆	237
7.1.10 供电系统	237
7.1.11 告警系统	238
7.1.12 地线系统	238
7.1.13 其他需要说明的问题	238
7.2 中国宽带城域网实验——China MAN Trial' 2000	239
7.2.1 China MAN Trial' 2000 实验概况	239
7.2.2 实验现场演示网络	240
7.2.3 China MAN Trial' 2000 测试分析	242
7.2.4 宽带 IP 城域网总体解决方案分析	248
7.2.5 小结	253
参考文献	258

第 1 章 概 述

IP 网络技术推动了 Internet 在全球范围的迅猛发展, 势不可挡。世界因特网业务一直保持每 6~9 个月翻一番的速度, 2001 年全球因特网用户持续快速增长。随着全球 Internet 用户数量和 Web 站点数量的急剧增长, 带宽的需求也急剧增长, 每半年主要 ISP 的 Internet 骨干链路的带宽增长一倍。Internet 如此迅速地发展给电信网络带来了巨大的冲击, 随之出现了所谓的“光纤耗尽”现象和对代表通信容量的带宽的“无限渴求”现象。以美国为例, 从 1994 年起, 几家主要长途电信业务承载商光纤通信系统的负载能力都接近饱和。为了提高通信系统的性价比和经济有效性, 满足不断增长的电信业务和 Internet 业务的需求, 如何提高通信系统的带宽已成为焦点问题。密集波分复用 (DWDM) 正是解决这一问题的关键技术, 它可以让 IP、ATM 和同步数字序列/同步光纤网 (SDH/SONET) 协议下承载的电子邮件、视频、多媒体、数据和语音等数据都通过统一的光纤层传输。

波分复用 (WDM) 技术的最早使用是在美国, 20 世纪 80 年代建设的被称为“东北走廊”的光缆干线工程就采用了 WDM 技术。WDM 技术既可以用在光纤的某一波长窗口内, 也可用在不同的波长窗口。90 年代由于时分复用 (TDM) 技术的迅速发展及其技术的简单实用, 在光通信领域占据了主导地位, 因此 WDM 技术发展得并不迅速, 直到 1995 年后才进入了发展的旺盛期。朗讯公司率先推出了 $8 \times 2.5\text{Gbit/s}$ 系统, 而后 Ciena 公司推出了 $16 \times 2.5\text{Gbit/s}$ 系统。目前在实验室已达每秒太比特的速率。

光纤通信系统的复用技术一开始采用的是原来同轴电缆上使用的脉冲编码调制 (PCM) 方式, 先把模拟信号变成数字信号, 再利用 TDM 技术组成一次群至五次群等, 这种系统就是我们所称的 PDH 系统。后来改进的 SDH 系列有 STM-1 (155Mbit/s)、STM-4 (622Mbit/s) 和 STM-16 (2.5Gbit/s) 等, 所采用的复用技术仍为 TDM 技术。由于目前电时分复用技术已大多使用 2.5Gbit/s 的速率, 且当传输速率超过 10Gbit/s 时, 就会遇到一些困难。目前在一根光纤上利用多个波长传输光信号的 WDM 技术已得到了业界的认可, 并被认为是光纤通信系统的主要发展技术。可以利用 WDM 技术在每根光纤上同时传输 n 路光载波, 从而使其容量迅速扩大 n 倍。在目前 SDH 系统的速率已达 2.5Gbit/s 的情况下, 单通路的传输速率已不再是现代通信系统的性能瓶颈, 人们更多的追求在于光纤通信系统的超大容量和宽频带。

1.1 光复用技术的比较

光纤最重要的一个特点是容量大, 可以传送高速率的数字信号。为了进一步提高光纤的利用率, 参照已经比较成熟的电复用方法, 人们提出了各种光复用方法, 如波分复用、频分复用、时分复用、空分复用、副载波复用、光码分复用等。其中, 被认为最具潜力的是波分

复用、频分复用、光码分复用与光时分复用。

1.1.1 光码分复用 (OCDMA) 技术

CDMA 技术不是一项新技术,作为一种多址方案已经成功地应用于卫星通信和蜂窝电话领域,并且显示出许多优于其他技术的特点。但是,由于卫星通信和移动通信中带宽的限制,因此 CDMA 技术尚未充分发挥优点。光纤具有丰富的带宽,能够很好地弥补这个缺陷。近年来, OCDMA 已经成为一项备受瞩目的热点技术。

OCDMA 技术在原理上与电码分多址技术相似。OCDMA 通信系统给每个用户分配一个惟一的光正交码的码字作为该用户的地址码。在发送端,对要传输的数据的地址码进行光正交编码,然后实现信道复用;在接收端,用与发送端相同的地址码进行光正交解码。

OCDMA 通过直接光编码和光解码实现光信道的复用和信号交换,在光纤通信系统中具有极大的应用前景。从目前情况来看,由于技术方面的原因, OCDMA 并不成熟,距离实用化还有一段路要走。

1.1.2 光时分复用 (OTDM) 技术

由于电开关器件的限制,若采用常规的电/光 (E/O) 调制的 TDM 技术,其理论上的速率不可能超过 50Gbit/s。但是,如今实验室已经开发出单通路的传输速率达 40Gbit/s 的 TDM 系统,所以今后想用单纯改进电器件的方法进一步提高传输速率已经没有什么余地了。如果要提高传输速率、改进传输效率,惟一可行的办法就是采用光时分复用 (OTDM) 技术。

OTDM 实质就是将多个高速电调制信号分别转换为等速率光信号,然后在光层上利用超窄光脉冲进行时域复用,将其调制为更高速率的光信号。目前解决 OTDM 的关键在于三个关键技术:超窄光脉冲产生与调制、全光时分复用、全光时分分解复用和定时提取。超窄光脉冲产生与调制的方法有增益开关法、啁啾光纤光栅法等等;全光时分复用的方法目前主要采用平面波导复用器,将光时延和方向耦合集成在一起;而全光时分分解复用和定时提取技术较为复杂。虽然现在有采用米克尔光开关矩阵、交叉相位调制频移开关及非线性光纤环路镜等方法,但总体来说,到目前为止,还没有一种适宜于大批量工业生产的实用技术。因此, OTDM 在今后几年内仍然会是实验室的宠儿,而不可能成为光传输技术的基石。

1.1.3 光频分复用 (OFDM) 技术

一般相邻两峰值波长的间隔小于 1nm 时,我们称之为光频分复用 (OFDM) 技术,它与 WDM 技术在本质上没有什么区别。频率表示每秒出现的波峰数,波长表示此电磁波的一个波峰到另一个相邻波峰的长度,两者互为倒数关系。当光载波间隔比较大时,用波长衡量比较方便,一般称之为波分复用。而当光载波间隔比较小时,用波长来衡量就显得不方便了,所以光载波间隔小于 1nm 的系统习惯称为 OFDM 系统。

由于 OFDM 的光载波间隔很密,传统的 WDM 器件(如分波器、合波器)等技术已很难区分开光载波,因此要求用分辨力更高的技术来选取各个光载波。目前能采用的主要有可调谐的光滤波器和相干光通信技术等。OFDM 一般可以用于大容量高速通信系统或分配式网络系统,如 CATV、广播等。

1.1.4 波分复用 (WDM) 技术

所谓波分复用,是指在一根光纤上不只是传送一个光载波,而是同时传送多个波长不同的光载波。这样一来,原来在一根光纤上只能传送一个光载波的单一信道变为可传送多个不同波长光载波的信道,从而使得光纤的传输能力成倍增加。另外,也可以利用不同波长沿不同方向传输来实现单根光纤的双向传输。

WDM 是对多个波长进行复用,能够复用的波长数与相邻两波长的间隔有关:间隔越小,复用的波长数就越多。一般当相邻两峰值波长的间隔为 50~100nm 时,称为 WDM 系统。而当相邻两峰值波长的间隔为 1~10nm 时,则称之为密集波分复用 (DWDM) 系统。

DWDM 是目前市场最热的技术之一,40 个波长的 DWDM 系统已经进入商用阶段。根据波士顿一家咨询公司最新报告,2000 年, DWDM 设备的市场增长率达到了 65%。随着 IP over WDM、IP over DWDM 技术的产生, WDM 与 DWDM 更加备受瞩目。WDM 及 DWDM 在建设中的全光网上必然占据重要的地位。

WDM 技术之所以在近几年得到迅猛发展,是因为它具有下述优点:

(1) 超大容量传输

WDM 系统的传输容量十分巨大。由于 WDM 系统的复用光通路速率可以为 2.5Gbit/s、10Gbit/s 等,而复用光信道的数量可以是 4、8、16、32,甚至更多,因此系统的传输容量可达到 300~400Gbit/s。而这样巨大的传输容量是目前的 TDM 方式根本无法做到的。目前, $(8 \sim 32) \times 2.5\text{Gbit/s}$ 和 $16 \times 10\text{Gbit/s}$ 的 WDM 系统已经达到商用水平,而 $132 \times 10\text{Gbit/s}$ 的 WDM 系统也已有报道。

(2) 节约光纤资源

对于单波长系统而言,1 个 SDH 系统就需要一对光纤,而对于 WDM 系统来讲,不管有多少个 SDH 分系统,整个复用系统只需要一对光纤就够了。例如,对于 16 个 2.5Gbit/s 系统来说,单波长系统需要 32 根光纤,而 WDM 系统仅需要两根光纤。节约光纤资源这一点也许对于市话中继网络并非十分重要,但对于系统扩容或长途干线来说就显得非常可贵。

(3) 各通路透明传输、平滑升级扩容

只要增加复用光通路数量与设备,就可以增加系统的传输容量以实现扩容,而且扩容时对其他复用光通路不会产生不良影响。所以 WDM 系统的升级扩容是平滑的,而且方便易行,从而最大限度地保护了建设初期的投资。WDM 系统的各复用通路是彼此相互独立的,所以各光通路可以分别透明地传送不同的业务信号,如语音、数据和图像等,彼此互不干扰,这给使用者带来了极大的便利。

(4) 充分利用成熟的 TDM 技术

以 TDM 方式提高传输速率虽然在降低成本方面具有巨大的吸引力,但面临着许多因素的限制,如制造工艺、电子器件工作速率的限制等等。据分析, TDM 方式的 10Gbit/s 光传输设备已非常接近目前电子器件的工作速率极限,再进一步提高速率是相当困难的(至少目前的技术水平如此)。而 WDM 技术则不然,它可以充分利用现已成熟的 TDM 技术,相当容易地使系统的传输容量达到 80Gbit/s 水平,从而避开开发更高速率 TDM 技术(10Gbit/s 以上)所面临的种种困难。目前 TDM 方式的 2.5Gbit/s 光传输技术已十分成熟, WDM 可以把几个甚至几十个 2.5 Gbit/s 的光传输系统作为复用通路进行复用,使传输容量呈几倍甚至几十倍地

增加, 达到 10Gbit/s、20Gbit/s、40Gbit/s、80Gbit/s, 甚至更高水平。而目前用 TDM 方式达到如此高的传输容量几乎是不可能的。

(5) 利用掺铒光纤放大器 (EDFA) 实现超长距离传输

EDFA 具有高增益、宽带宽、低噪声等优点, 在光纤通信中得到了广泛的应用。EDFA 的光放大范围为 1530~1565nm, 但其增益曲线比较平坦的部分是 1540~1560nm, 它几乎可以覆盖整个 WDM 系统的 1550nm 工作波长范围。所以用一个带宽很宽的 EDFA 就可以对 WDM 系统的各复用光通路的信号同时进行放大, 以实现系统的超长距离传输, 避免每个光传输系统都需要一个光放大器的情况。WDM 系统的超长传输距离可达到数百公里, 因此可以节省大量中继设备, 降低成本。

(6) 对光纤的色散无过高要求

对于 WDM 系统来讲, 不管系统的传输速率有多高、传输容量有多大, 它对光纤色度色散系数的要求基本上就是单个复用通路速率信号对光纤色度色散系数的要求。例如, 20Gbit/s ($8 \times 2.5\text{Gbit/s}$) 的 WDM 系统对光纤色度色散系数的要求就是单个 2.5Gbit/s 系统对光纤色度色散系数的要求, 一般的 G.652 光纤都能满足。但 TDM 方式的高速率信号却不同, 其传输速率越高, 传输同样距离所要求的光纤色度色散系数就越小。以目前敷设量最大的 G.652 光纤为例, 用它直接传输 2.5Gbit/s 速率的光信号是没有多大问题的, 但若传输 TDM 方式 10Gbit/s 速率的光信号, 就对系统的色度色散等参数提出了更高的要求, 同时对光纤的偏振模色散值也提出了较高的要求。

(7) 可组成全光网络

全光网络是未来光纤传送网的发展方向。在全光网络中, 各种业务的上下、交叉连接等都是在光路上通过对光信号进行调制来实现的, 从而消除了 E/O 转换中电子器件的瓶颈。例如, 在某个局站可根据需求用光分插复用器 (OADM) 直接上、下几个波长的信号, 或者用光交叉连接设备 (OXC) 对光信号直接进行交叉连接, 而不必像现在这样首先进行 O/E 转换, 然后对电信号进行上、下或交叉连接处理, 最后再进行 E/O 转换, 把转换后的光信号输入到光纤中进行传输。WDM 系统可以与 OADM、OXC 混合使用, 以组成具有高度灵活性、高可靠性、高生存性的全光网络, 以适应宽带传送网的发展需要。

1.2 WDM 发展的三个阶段

1.2.1 第一代和第二代 WDM 系统

第一代 DWDM 设备已经成为长途网的首选技术。这些相对简单的点对点系统已经由 OC-48 的几个波长迅速扩展到 OC-192 的 100 个以上波长的系统, 提供的总容量相当于每纤 60Gbit/s。由于容量有限而且敷设新光纤的费用很高, 业务提供商安装了点对点的 DWDM 设备, 以最大限度地扩大每光纤公里的单位容量。这种方法虽然能暂时解决光纤耗尽的问题, 但是由于增加了不少设备而导致了网络成本的上升。

近来, 第二代 DWDM 设备准备为城域网 (MAN) 的业务提供商提供 DWDM 的容量。在 MAN 中引入小容量的第二代 DWDM 设备, 可以如同在长途传输中一样有助于解决光纤

耗尽的问题。更为重要的是,当今第二代 DWDM 系统的网络结构能支持有保护的环形结构,并且提供多种业务接口,如吉比特以太网、ESCON、FICON、光纤通道和从 OC-3 到 OC-48 的各种接口。

虽然这些改善与 SONET 相比,看起来好像是巨大的,但即使是第二代的容量(如每对光纤 80Gbit/s)也估计只能维持 12~18 个月。第二代 DWDM 网络仍然存在三个问题:成本、可扩容性和可管理性。

有三项费用占了大多数业务提供商的预算,即光纤、设备和 OAM&P(运行、管理、维护和供应)的花费。在运营方面,由于第一代和第二代网络设备依靠繁重的手工操作,使得 OAM&P 的开销高达网络总成本的 40%~80%。

为了迎接这个挑战,业务提供商现在非常需要具备远程配置、激活和纠错功能的端到端管理系统。备用设备的花费也是相当大的,这是由于激光器和过滤器都是静态的,不得不保留相当数量的备用资源。例如,容量为 40 信道的节点,必须准备 40 个备用转发器。

费用影响了成本的底限,而最大利润受限于系统的可扩容性和可管理性。如果没有可用的带宽,业务提供商就不能满足用户对新业务的要求,这就意味着失去了竞争力。同样,提供业务的速度很慢,也肯定会在竞争中处于劣势。

第二代网络的一个主要瓶颈就是 OXC 节点。由于人们对 OXC 的研发和投资方面所做的付出很大,迫使制造商继续大量生产交换能力很强的 OXC 产品。如今,由于在光波长连接方面缺乏多厂商产品互通的标准,故大多数 OXC 节点仍然采用光/电/光(O/E/O)设备。O/E/O 交换机的可扩容性有限,而且非常昂贵。O/E/O 要求对 DWDM 系统的光束进行解复用,然后转换成电信号,经交换,再把它们还原成光信号重新送到复用器进行传输。

网络容量从兆比特到吉比特以至太比特持续爆炸式增长,只有采用全光交换才能提供所需求的容量和相应的投资保护。最近,在网络结构方面的改进已经减少了城域网所需要的 OXC。

1.2.2 第三代 DWDM 系统

第三代 DWDM 网络提供可升级的、全光的、分布式的波长交换。同第二代结构相比,第三代光网络在成本、可扩容性和可管理性方面有了很大的改进。而且,第三代网络可以使业务提供商从新的有特色的服务中获取最大利润,同时降低运营成本。在城域网和局域网情况下,应用全光的波长交叉连接器(WXC)、可动态配置的 OADM、可调激光转发器以及可动态控制光层的高级管理软件,可以对环间互联和逻辑格形网进行优化设计。

业务提供商能够动态地将任意波长插入任意链路的任意节点上,从而把 DWDM 系统从一种光纤耗尽的解决方案转换为一个商业系统。具有波长配置灵活性的第三代网络排除了网络交换中心所需要的大型 OXC 节点,直接面对互联环或者格形网中的波长路径。

如图 1.1 所示,本地业务 λ_8 经过多个全光网络单元后仍留在 MAN 中;长途传输业务 λ_{15} 则通过 OXC 节点被送到长途网络上。这种波长级的管理能力有以下 3 种效果:

- ① 减少了需要连到 OXC 节点的波长数,从而可减少 OXC 节点的端口数;
- ② 通过远程配置和波长调谐能力,快速提供即时性业务;

③ 由于采用了装有可调激光器和滤波器的通用转发器以及远程配置设备,降低了 OAM&P 的花费。

第三代 DWDM 系统的另一个好处是波长可优化再使用。如图 1.1 所示, λ_3 在接入环 1 中的一段链路上启用, 在中心环上不被启用, 而在接入环 3 上又被启用。为了跳过发生故障的节点或者链路, 可利用交换和波长调整来实现。

动态选路可以支持许多不断出现的业务, 如视频节目、存储区域网和虚拟专用网。例如, 在市区内, 一个 ASP 可以向一群用户提供数据存储和灾难恢复业务。当转移数据时, 每个用户只需短时间与 ASP 连接。ASP 只利用单一波长就可以把它的连接从公司 A 转移到公司 B。不断涌现的信令协议, 如多协议波长交换将会使这种想法成为可能。

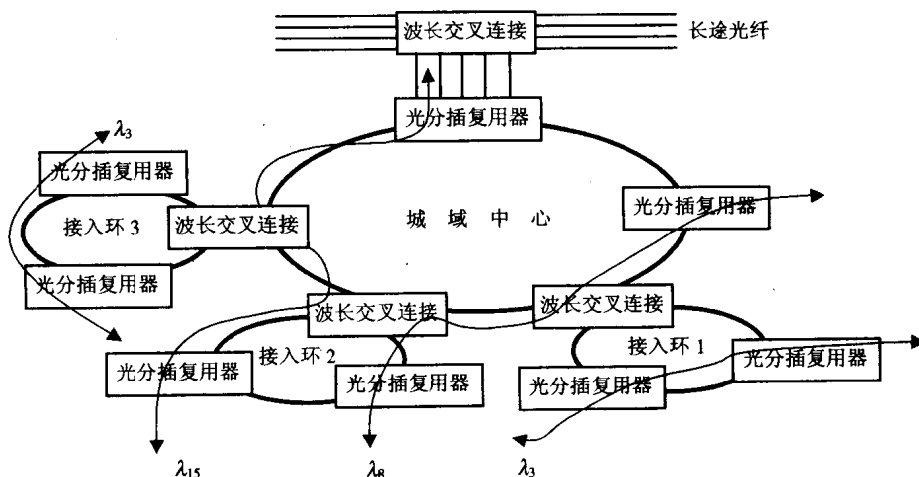


图 1.1 第三代 DWDM 网络结构示意图

第三代 DWDM 网络利用前向纠错 (FEC) 和数字封装技术改善了光域的性能, 包括对单波长的保护和光性能的监测。光保护能力包括波长级、通道级和链路级, 允许业务提供商划分和保证业务等级。同样, FEC 和数字封装技术给第三代业务提供商带来了以下两个好处:

- (1) 性能检测。例如, 误码率和通道/链路状态, 可确认的服务水平协议 (SLA)。
- (2) 与比特率和协议无关的波长业务。所有这些改进以及基本的结构更新, 使得第三代业务提供商能够提供多样化的特色服务, 同时也极大地改善了整体效益。

1.2.3 第三代光网络的三大技术

第三代光网络引发了三大技术的进步: 动态波长交换、可调激光器和可调光滤波器。利用完全可动态配置的 OADM 和 WXC, 波长交换节点能够将任何波长分配给任何节点。在光域中, 利用软件 and 高级功率均衡算法可以实时地配置基于波长的业务。

这些基于波长的业务是与协议和比特率无关的, 并能支持吉比特以太网和十吉比特以太网、从 OC-3 到 OC-12、从 STM-1 到 STM-64 以及 ESCON、FICON 和光纤通道, 允许在互联的环形网或格形网中和在没有 O/E/O 转换和 OXC 中心节点的干预下将任何波长分配给任何节点。

第二个关键性技术是可调激光器, 在最理想的情况下, 一个可调激光器能够对所有的波长进行调谐, 调谐范围很广, 调谐速度快, 而且还有足够的传输功率, 以减少对 EDFA 的依赖性。

光纤网络原来是很死板的,仅仅能满足长途电信网的要求,它在给定通道上使用固定波长的激光器,无法动态地把波长分配给其他通道。自从工业界掌握了如何在一个激光器上产生多种光波长的技术以后,快速增加网络容量的方法才成为现实。然而,随着带宽需求和网络业务的持续快速变化,可调范围很窄的滤波器的效率也日益下降。调谐范围只有 20~30 个通路的可调光滤波器的成本高、体积大、结构复杂等特点使得大型网络的更新和扩展变得很困难和昂贵。目前,光网络行业需要的是能够支持长途电信网和波长范围更大的激光器。

基于取样光栅分布式布拉格反射镜(SGDBR)的宽可调谐激光器已经成熟,它能发出比当前市场上出售的激光器更高的功率,并且能送到 100 个通路中的任意一路。这些突破使得业务提供商能够得到以下好处:

① 快速地分配波长和带宽,并能够满足应用范围更广的功率要求。

② 支持 1525~1565nm 的整个 C 频段(一般称 1525~1565nm 为 C 频段,1570~1620nm 为 L 频段,1400nm 为 S 频段),带宽间隔为 50GHz,极大地增加了网络的容量,允许用户动态地从 100 个可用通道中任意选择一路。

③ 由于一个转发器能支持所有的通道,而不是每个通道都要求配备一个激光器,大大减少了备用转发器所需的空间和费用。

④ 由于通信公司能够很方便地增加通路,并依靠动态交换来提高网络容量,因此网络的扩容规划变得很简单。

可调光滤波器是第三代光网络所需要的第三个关键性技术。可调激光器使发射机能够选择一个可用的波长,波长交换机使我们能在发射机和接收机之间建立一条链接,可调光滤波器允许接收机调谐到所要求的波长上以建立完整的链路。

各种各样的可调光滤波器层出不穷,如可调光纤布拉格光栅、可调腔滤波器和可调多介质薄膜滤波器。

第三代光网络借助于动态可管理的全光 DWDM 技术,支持以波长为单位的分级式业务。第三代光网络业务提供商为了满足用户对服务速度的要求,使用了动态可管理的 OADM 和 WXC 节点、可调激光器、可调光滤波器、光性能监测、波长级的保护机制和网络管理软件。这样,在降低运营成本的同时,业务提供商可方便地提供增加收益的新业务。

1.3 WDM 的发展方向

虽然 WDM 技术问世的时间不长,但由于具有许多显著的优点而表现出强大的生命力,从而迅速得到推广应用,并向全光网络的方向发展。从发展的角度看,今后全光技术的发展可能表现在以下几个方面:

(1) 光分插复用器(OADM)

目前采用的 OADM 只能在中间局站上、下固定波长的光信号,使用起来比较僵化。而未来的 OADM 对上、下光信号将是完全可控的,就像现在分插复用器上、下电路一样,通过网管系统就可以在中间局站有选择地上、下一个或几个波长的光信号,使用起来非常方便,组网(光网络)十分灵活。

(2) 光交叉连接设备(OXC)