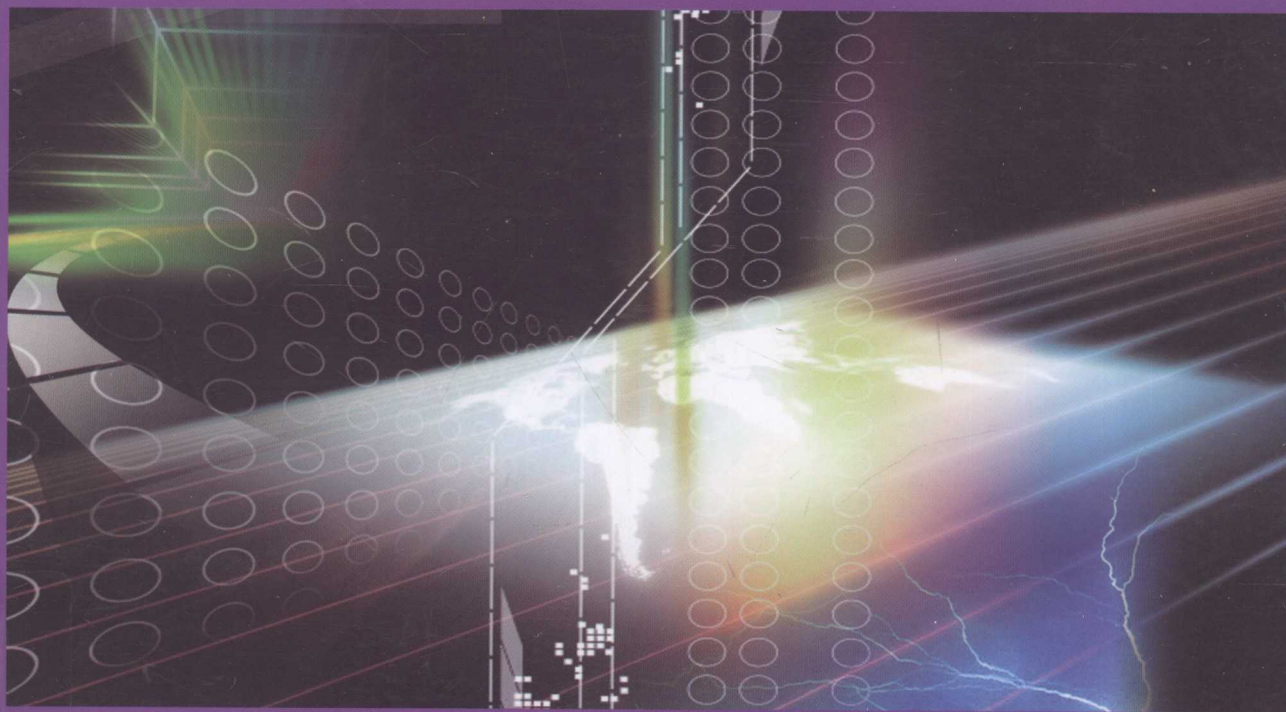


光波分复用 系统与维护

武文彦 主 编
张引发 王永强 副主编

GUANG BOFEN FUYONG
XITONG YU WEIHU



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

光波分复用系统与维护

武文彦	主 编
张引发 王永强	副主编
杨永定 董 晔 陈明贵	参 编
潘 青 党利宏 张建朝	
肖 斌 陶 正	

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

这是一本关于光纤通信领域运行维护技术的图书，对提高专业运行维护人员的技术水平有很强的指导性。本书在光纤波分复用技术知识的基础上，对影响系统性能指标和传输质量的关键技术进行了较详细的阐述，介绍了我国目前在线运行的典型波分复用设备、WDM 系统维护常用测试仪表及使用方法、WDM 系统的发展及新技术应用，重点介绍 WDM 系统的维护内容、指标优化控制、故障分析及处理。

本书注重新技术、新知识、新标准的应用，编写力求系统清晰、概念准确、简明扼要、突出特点、通俗易懂、注重实际。内容贴近通信网络实际和学院教学，可作为本专业维护人员知识用书，也可作为从事光纤通信专业的工程技术人员和院校师生的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

光波分复用系统与维护 / 武文彦主编. —北京：电子工业出版社，2010.4
ISBN 978-7-121-10458-9

I. 光… II. 武… III. 光导纤维通信系统—维修 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 034997 号

责任编辑：窦 昊

印 刷：北京天宇星印刷厂

装 订：三河市皇庄路通装订厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：15.5 字数：396 千字

印 次：2010 年 4 月第 1 次印刷

印 数：4 000 册 定价：39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

序 言

信息化、数字化、网络化是现代社会的特征之一。在信息网络中，新的业务应用方式层出不穷，人们对网络的需求日新月异，各尽所能的网络服务给信息网络带来了极强的生命力。光纤通信以高速率、大容量、长距离的信息传递能力，在信息网络中扮演着极其重要的角色。

经过近 20 年的建设，我国的光纤通信已形成以“八纵八横”为骨干架构的核心网络，大规模的光缆线路建设已经完成，长途干线运行着数百万公里的 WDM, SDH 传输系统。近年来，随着科学技术的进步和社会的发展，传输领域的新技术不断出现，像一种无形的力量推动并改变着传统网络的组网方式和应用方式，改变着人们对网络的认识和管理观念。但从光纤传输的基础理论而言，目前或相当一段时间内 WDM 仍是完成长距离、大容量信息传递最成熟的手段，做好 WDM 传输系统的运行维护管理，研究和解决 WDM 系统运行中出现的新问题和新情况，不断提高运行维护质量，是运行维护管理人员常抓不懈的工作，是光缆网络稳定运行的可靠保证。

“光波分复用系统与维护”一书，是一本针对光纤通信专业技术人员做好 WDM 系统运行维护和管理工作的参考书。本书的编者们有的长期工作在光纤通信工程建设和系统运维管理的岗位，有的工作在光纤通信专业教学一线，参加过多条光缆干线的方案规划和建设，处理过多条长途光缆干线的指标优化和故障排除，主编或参与编写了多项光纤通信专业的标准法规制度，有着丰富的工作和教学经验。他们将多年的心血和积淀凝聚在此书中，奉献于读者面前，呈献给从事光纤通信的同行们，希望能够为培养和造就更多优秀的通信人才贡献一份力量。

电子工业出版社的编辑为本书的出版倾注了极大的热忱，做了大量的工作，谨此致以诚挚的谢意。

张 宁
2009 年 11 月

前 言

信息网络作为全球最重要的基础设施之一，推动着人类社会的进步与发展。信息网络中光纤通信传送网是完成大容量、远距离、高可靠信息传递的基础平台，承载着超过80%的信息传递任务，光纤通信的发展引领着网络世界的变革。

纵观光缆网络十余年的发展史，经历了由低速到高速、由电层到光层、由可管到可控、由人工到智能的重要发展过程，走过了PDH，SDH到WDM的演进之路。目前，光缆网络正处于传统网络向智能化网络发展的转折时期，OTN和ASON等传输领域新技术正在逐步得到应用和推广。但是从光纤通信的传输技术来看，无论未来的网络如何演变，无论是基于SDH技术之上发展的ASON网络，还是基于WDM技术之上发展的OTN网络，在网络中完成大容量长距离的信息传输任务仍然要依靠WDM这一关键技术。特别是目前我国仍然在线运行着数百万公里的WDM传输系统，在相当一段时间内WDM系统在信息网络中仍然起着不可替代的作用。在今天随着传输网络向智能化方向的转变，信息传输容量的增大，传输距离的增长，传输质量对运维管理的压力随之增大，对运维人员的要求越来越高。基于这种情况，我们编写本书，主要是针对光纤通信运行维护人员，旨在提高本专业技术人员的知识水平，提高运行维护人员网络优化和故障排除技能，对不断提高的传输系统质量要求提供必备的基础知识和处理方法。

本书在光纤波分复用技术知识的基础上，对影响系统性能指标和传输质量的关键技术进行了较详细的阐述，内容贴近通信网络实际和贴近学院教学。介绍了我国目前在线运行的典型波分复用设备、WDM系统维护常用测试仪表及使用方法、WDM系统的发展及新技术应用，重点介绍WDM系统的维护内容、指标优化控制、故障分析及处理。本书是编者长期从事光纤通信专业工程建设、运行维护和教学工作的总结和多年工作经验的积淀，在编写中注重新技术、新知识、新标准的应用，力求系统清晰、概念准确、简明扼要、突出特点、通俗易懂、注重实际，对提高本专业运行维护人员的技术水平有很强的指导性。本书可作为本专业维护人员的知识用书，也可作为从事光纤通信专业的工程技术人员和院校师生的参考书。

本书由武文彦主编，张引发、王永强为副主编，参编人员有杨永定、董晔、陈明贵、潘青、党利宏、张建朝、肖斌、陶正。在本书的编写过程中，得到了张宁研究员的指导和支持，得到了卢平、杨洪卫和孙斌等同志的帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免出现疏漏和错误，敬请读者批评指正。

编 者

2009年11月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 光网络的发展及演进	1
1.2 WDM 技术的发展过程	2
1.2.1 光网络复用技术的发展	2
1.2.2 WDM 在传输网中的定位	4
1.2.3 WDM 系统的分类	5
1.2.4 WDM 的研究、应用现状与发展趋势	5
1.3 WDM 技术概述	7
1.3.1 相关定义	7
1.3.2 WDM 特点和优势	7
1.3.3 WDM 系统构成	9
1.3.4 常用器件	10
1.4 DWDM 与 SDH 的关系	17
1.5 承载 SDH 客户层信号的 WDM 分层结构	18
第 2 章 WDM 系统关键技术	20
2.1 光纤传输特性	20
2.1.1 光纤的衰减特性	20
2.1.2 光纤的色散特性	21
2.1.3 光纤的非线性效应	24
2.2 光纤的色散补偿技术	28
2.2.1 固定色散补偿	28
2.2.2 可调色散补偿	33
2.2.3 色散斜率补偿	35
2.3 前向纠错编码技术	37
2.3.1 误码纠错方法	37
2.3.2 FEC 编码方式	38
2.4 RZ 编码调制技术	40
2.4.1 NRZ 与 RZ 码简介	40
2.4.2 RZ 编码调制技术简介	41
2.5 监控技术	48

第3章 光放大器	49
3.1 概述	49
3.1.1 光放大器的作用	49
3.1.2 对光放大器的要求	50
3.1.3 光放大器的种类	52
3.2 掺铒光纤放大器 (EDFA)	54
3.2.1 EDFA 的工作原理	54
3.2.2 EDFA 的结构	55
3.2.3 EDFA 的性能参数	56
3.2.4 EDFA 的优缺点	60
3.2.5 遥泵技术 (ROPA)	60
3.3 光纤喇曼放大器 (FRA)	61
3.3.1 FRA 的工作原理	61
3.3.2 FRA 的性能	62
3.3.3 FRA 的优缺点	63
3.3.4 FRA 的种类	64
3.3.5 喇曼放大技术应用	65
第4章 WDM 系统传输距离设计	66
4.1 损耗设计 (跨段)	66
4.2 色散设计 (光复用段)	67
4.2.1 一般计算公式	67
4.2.2 色散补偿	68
4.3 OSNR 设计	68
4.3.1 光信噪比 OSNR 的含义	68
4.3.2 EDFA 的噪声特性	69
4.3.3 理想系统的 OSNR 计算	69
4.3.4 通用系统的 OSNR 计算	70
4.4 BER 的计算	72
第5章 WDM 标准及测试	74
5.1 相关技术标准	74
5.1.1 系统工作波长及分配	74
5.1.2 主要性能指标	79
5.2 系统性能与测试	87
5.2.1 误码性能与测试	88
5.2.2 抖动性能与测试	89
5.2.3 输入抖动容限及测试	90

5.2.4	抖动转移特性	91
5.2.5	主光通道的测试	93
5.2.6	光通道代价	97
第 6 章	WDM 系统的安全性 & 保护	99
6.1	WDM 的安全性	99
6.1.1	光纤和光接头的熔坏现象	99
6.1.2	光“浪涌”现象	99
6.1.3	功率自动减少功能 (APR)	100
6.1.4	线路自动关断功能 (ALS)	100
6.2	WDM 系统保护	102
6.2.1	点到点应用保护	102
6.2.2	环网应用保护	103
第 7 章	WDM 典型设备介绍	109
7.1	WDM 系统组成	109
7.2	光转发板 OTU	111
7.2.1	单板功能	111
7.2.2	工作原理	112
7.3	光合波板 OMU 和预均衡合波板 VMUX	114
7.3.1	光合波板 OMU	114
7.3.2	预均衡合波板 VMUX	116
7.4	光分波板 ODU	116
7.5	光合分波交织板 OCI	117
7.6	宽带复用板 OBD	118
7.7	光分插复用板 OAD	120
7.8	光放大板 OA	121
7.9	监控分插板 SDM	122
7.10	分布式 RAMAN 放大板 DRA	123
7.11	动态增益均衡板 DGE	124
7.12	线路衰减补偿板 LAC	125
7.13	光性能检测板 OPM	126
7.14	主控板 NCP	127
7.15	光监控通道板 OSC	127
7.16	开销处理板 OHP	128
7.17	160 波系统常见单板	129
第 8 章	WDM 系统网络管理	133
8.1	WDM 系统网管基本要求	133

8.2 网元管理系统主要功能	133
8.2.1 故障管理	133
8.2.2 性能管理	134
8.2.3 配置管理	136
8.2.4 安全管理	136
8.3 网元管理系统数据通道保护	136
第 9 章 WDM 系统的维护内容及指标优化控制	137
9.1 WDM 系统例行维护周期和维护项目	137
9.2 WDM 系统的光功率调整及主要指标控制	140
9.3 WDM 系统指标优化	144
第 10 章 WDM 系统常见故障分析及处理	147
10.1 WDM 系统的故障特点	147
10.2 WDM 系统主要故障类型	147
10.3 WDM 系统故障处理流程	148
10.4 WDM 系统故障的常用处理方法	148
10.5 WDM 系统故障的一般处理原则	151
10.6 业务中断故障分析及处理	152
10.6.1 外部原因故障的定位与排除	153
10.6.2 设备原因的定位与排除	154
10.6.3 案例 1: 单板损坏导致业务中断	154
10.6.4 案例 2: 光缆线路故障导致业务中断	155
10.7 误码故障分析及处理	156
10.7.1 外部原因故障定位与排除	156
10.7.2 设备原因的定位与排除	157
10.7.3 案例 1: 光功率异常导致误码	157
10.7.4 案例 2: 光尾纤问题导致误码	158
10.8 业务瞬断故障分析及处理	159
10.8.1 故障的定位与排除	160
10.8.2 案例: 光缆不好导致业务瞬断	160
10.9 ECC 故障分析及处理	161
10.9.1 故障的定位与排除	162
10.9.2 案例 1: SCC 板故障导致 ECC 不通	162
10.9.3 案例 2: ID 冲突导致 ECC 不通	163
10.10 公务故障分析及处理	164
10.10.1 故障的定位与排除	164
10.10.2 案例 1: SC2 设置错误导致公务不通	165

10.10.3 案例 2: 号码设置重复导致公务不通	165
10.11 设备对接故障分析及处理	166
10.11.1 外部原因故障定位与排除	167
10.11.2 设备原因的定位与排除	167
10.11.3 案例 1: 光纤错接导致设备对接故障	168
10.11.4 案例 2: 单板损坏导致设备对接故障	168
第 11 章 常用测试仪表及使用	170
11.1 ONT-30 光谱分析仪	170
11.2 ANT—20SE 光传输分析仪	180
11.3 SGT—4B 型光功率计	203
第 12 章 WDM 新技术应用及发展	206
12.1 WDM 超长距离传输的新技术	206
12.2 OTN 技术的体系架构和特点	214
缩略语	223
参考文献	233

第 1 章 概 述

随着科技的进步,时代的发展,信息网络技术正以其无形的力量推动着社会前进。在信息网络中光纤通信传送网承载着人类 80% 以上的信息传递业务,引领着网络世界的变革。光纤通信传送网的传输容量正在以平均每隔 9~12 个月增加一倍的速度扩展着,它的发展与应用已经成为网络时代中“新摩尔定律”的重要实践者。

纵观光缆网络的发展史,其在十余年的时间里,经历了由低速到高速、由电层到光层、由可管到可控、由人工到智能的不同发展阶段,走过了从 PDH 到 SDH、WDM,再到智能光网络的演进之路。

1.1 光网络的发展及演进

人类利用光进行通信的历史可以追溯到我国古代战争中的烽火狼烟。近百年来人们曾研究过光圈波导、气体透镜波导、空心金属波导管等,想利用它们作为传送光波的媒体以实现通信,但终因它们衰耗过大或者造价昂贵而无法实用化。一直到 1966 年 7 月,英籍华裔学者高锟博士(K. C. Kao)在 PIEEE 杂志上发表了一篇十分著名的文章《用于光频的光纤表面波导》,从理论上分析证明了用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性,设计了通信用光纤的波导结构;更重要的是科学地预言了制造通信用的超低衰耗光纤的可能性,即加强原材料提纯,加入适当的掺杂剂,可把光纤的衰耗系数降低到 20 dB/km 以下,以实现通信。而当时世界上只能制造用于工业、医学方面的光纤,其衰耗系数在 1 000 dB/km 以上;对于制造衰耗系数在 20 dB/km 以下的光纤,被认为是可望而不可及的。以后的事实发展雄辩地证明了高锟博士文章的理论性和科学大胆预言的正确性,所以该文被誉为光纤通信的里程碑。

美国康宁玻璃公司在 1970 年根据高锟文章的设想,用改进型化学汽相沉积法(MCVD 法)制造出当时世界上第一根超低衰耗光纤,成为光纤通信爆炸性发展的导火索。虽然当时康宁玻璃公司制造出的光纤只有几米长,衰耗系数约 20 dB/km。但它毕竟证明了用当时的科学技术与工艺方法制造通信用的超低衰耗光纤是完全有可能的,也就是说找到了实现低衰耗传输光波的理想传输媒体,从而打开了光纤通信走向实用化的大门,使光纤通信的发展有了重大的实质性突破。

1970 年以后,世界各发达国家对光纤通信的研究倾注了大量的人力与物力,其来势之凶、规模之大、速度之快远远超出了人们的意料。从光纤衰耗系数看,1970 年是 20 dB/km,1972 年是 4 dB/km,1974 年是 1.1 dB/km,1976 年是 0.5 dB/km,1979 年是 0.2 dB/km,1990 年是 0.14 dB/km。这个指标已经接近石英光纤的理论衰耗极限值 0.1 dB/km。光纤通信技术的迅猛发展,说明高锟博士当年预见的衰耗系数在 20 dB/km 以下的水平显然是太保守了,但高锟博士对人类的贡献是巨大的,40 年后在 2009 年 10 月高锟等三位科学家获得 2009 年度诺贝尔物理学奖,理由是“他们帮助塑造了当今网络社会的基础”。

在光传输介质获得突破性进展的同时,1970 年,美国贝尔实验室研制出世界上第一

只在室温下连续波工作的砷化镓铝半导体激光器，为光纤通信找到了合适的光源器件。后来逐渐发展到性能更好、寿命达几万小时的异质结条形激光器和现在的寿命达几十万小时的分布反馈式（DFB）、多量子阱（MQW）式单纵模激光器（SLM）。光接收器件也从简单的硅 PIN 光二极管发展到量子效率达 90% 以上的 III-V 族雪崩光二极管 APD。

正是光纤制造技术和光电器件制造技术的飞速发展，以及大规模、超大规模集成电路技术和微处理机技术的发展，带动了光纤通信系统从小容量到大容量，从短距离到长距离，从低水平到高水平，从 PDH 到 SDH、DWDM，再到智能化光网络的迅猛发展。

光纤通信系统经历了几个发展阶段，人类用带宽极宽的光波作为传送信息的载体以实现通信，这一百年来人们梦寐以求的幻想在今天已成为活生生的现实，然而就目前的光纤通信而言，其实际应用仅是其潜在能力的 2% 左右，尚有巨大的潜力等待人们去开发利用。因此，光纤通信技术并未停滞不前，随着科技水平的发展，光纤通信向更高水平、更高阶段方向发展是历史之必然。

1.2 WDM 技术的发展过程

1.2.1 光网络复用技术的发展

光纤通信技术的应用首先解决了通信能够长距离传输的问题，但随着信息时代宽带高速业务的不断发展，对通信网的带宽和容量提出了更高的要求。因此，在传输系统中引入了复用技术。所谓复用技术是指利用光纤宽频带、大容量的特点，用一根光纤或光缆同时传输多路信号。光纤传输网的复用技术经历了空分复用（SDM）、时分复用（TDM）到波分复用（WDM）三个阶段的发展。SDM 技术设计简单、实用，但必须按信号复用的路数配置所需要的光纤传输芯数，投资效益较差；TDM 技术的应用很广泛，如 PDH、SDH、ATM、IP 都是基于 TDM 的传输技术，据统计，在 2.5 Gb/s（或 Gbps）系统以下（含 2.5 Gb/s 系统），系统每升级一次，每比特的传输成本下降 30% 左右。正因为如此，在过去的系统升级中，人们首先想到并采用的是 TDM 技术，缺点是线路利用率较低；WDM 技术是在一根光纤上承载多个波长（信道）的复用技术，这种技术的成功应用解决了通信能够长距离、大容量传输的问题，并成为完成信息骨干网络传输的主要手段。

在多路信号传输系统中，信号的复用方式对系统的性能和造价起着重要作用。就 SDH 电时分复用而言，1992 年商用速率为 155 Mb/s，到 1998 年已经发展到 10 Gb/s，现在先进国家的水平已达到 40 Gb/s。但是，由于电子迁移速率的限制，进一步提高电时分复用的速率已经很困难，光电器件成本也很高，电子技术已成为光纤通信进一步发展的瓶颈。为了克服这一瓶颈，人们自然想到了在光域中进行复用，以进一步增大系统容量，提高线路利用率，降低经营成本。光复用的主要技术有：光时分复用（optical time division multiplexing, OTDM）、光码分复用（optical code division multiplexing, OCDM），光波分复用（wavelength division multiplexing, WDM）和光频分复用（optical frequency division multiplexing, OFDM）。

光时分复用（OTDM）指利用高速光开关把多路光信号在时域里复用到一路上的技术。其基本原理是在发送端的同一载波波长上，把时间分割成周期性的帧，每一帧再分割成若干个时隙，然后根据一定的时隙分配原则，使每个信源在每帧内只能按指定的时

隙向信道发送信号，接收端在同步的条件下，分别在各个时隙中取回各自的信号而不混乱，光时分复用原理示意图如图 1-1 所示。利用光时分复用技术可以获得较高的速率带宽比，可克服掺铒光纤放大器（erbium-doped fiber amplifier, EDFA）增益不平坦、四波混频（four wave mixing, FWM）、非线性效应等诸多因素限制，而且可解决复用端口的竞争，增加全光网络的灵活性。但由于其关键技术比较复杂，实现这些技术的器件特别昂贵，制作和实现均很困难，并且由于偏振模色散对高速信号的限制，所以这项技术迟迟没有得到很大的发展和应用。

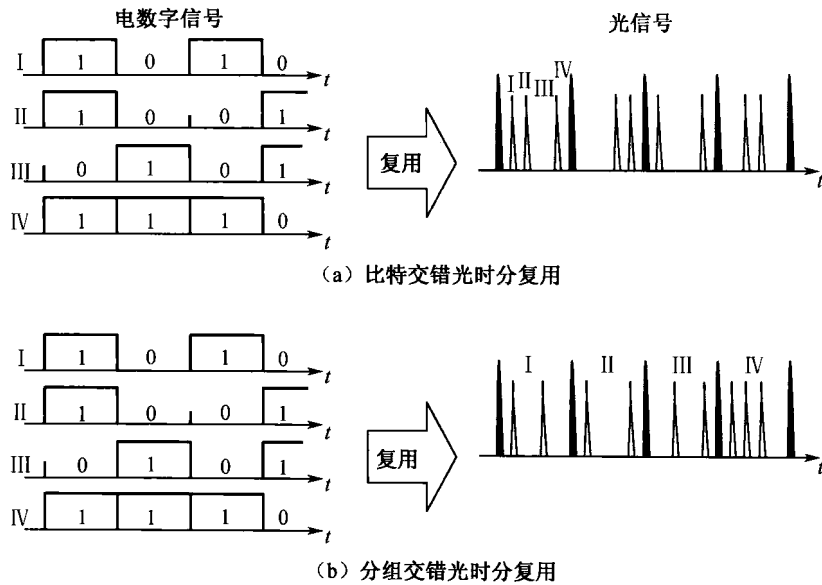


图 1-1 光时分复用原理示意图

光码分复用（OCDM）技术是 CDM（Code Division Multiplexing）技术和光纤通信技术相结合的产物，在这种复用技术中，每个信道不是占用一个给定的波长、频率或者时隙，而是以一个特有的编码脉冲序列方式来传送其比特信息。其基本原理是不同信道的信号用互成正交的不同码序列来填充，经过填充的信道信号调制在同一光波上，在光纤信道中传输，接收端用与发送方向相同的码序列进行相关接收，即可恢复出原信道的信号，OCDM 复用示意图如图 1-2 所示。由于采用的是正交码，相关接收时不会产生相互干扰。光码分复用技术能极大地改善网络的性能，提高网络的通信容量，提高系统信噪比，增强系统保密性，增加网络灵活性。但 OCDM 实用化还有一些障碍，在非相干光 CDM 方面，由于正交码的数量有限，码间干扰较大，限制了用户数量；在相干光 CDM 方面，存在着激光源的频率稳定度差，光纤极化态不稳定及光脉冲相位难以控制等主要问题。

光波分复用（WDM）技术是在一根光纤中同时传输多波长光信号的一项技术。其基本原理是在发送端将不同波长的光信号组合（复用）起来，并耦合到光缆线路上的同一根光纤中进行传输，在接收端将组合波长的光信号分开（解复用），并进一步处理，恢复出原信号后送入不同的终端。它是目前研究最多、发展最快、应用最为广泛的光复用技术。经过多年的发展和应用，波分复用技术已趋于成熟，而且越来越成为现代通信系

统中不可替代的传输技术。目前，波分复用系统的传输容量正以极快的速度增长，直接基于 WDM 传输的业务也越来越多。

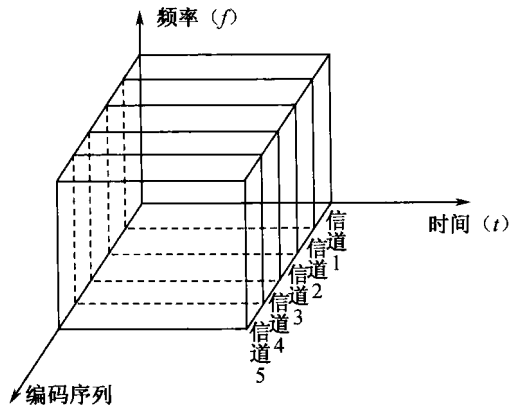


图 1-2 OCSDM 复用示意图

为了进一步提高光纤带宽利用率，相邻两光载波的间隔将越来越小，一般认为：当相邻光载波的间隔小到 0.1 nm (10 GHz) 以下时，此时的复用称为光频分复用。它与波分复用在本质上是没有什么区别的。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。在光载波间隔比较大时，用波长衡量比较方便，一般称为波分复用。而当光载波间隔比较小时，用波长来衡量就显得不方便了，习惯称为频分复用系统。

波分复用技术从 20 世纪 80 年代末、90 年代初，光纤通信兴起之初就出现了，AT&T 贝尔实验室的厉鼎毅 (T. Y. Lee) 博士大力倡导波分复用 (WDM) 技术，两波长 WDM (1 310 nm/1 550 nm) 系统在 20 世纪 80 年代就在美国 AT&T 网中使用，速率为 $2 \times 1.7 \text{ Gb/s}$ 。

WDM 发展迅速的主要原因在于以下几方面：

(1) TDM 10 Gb/s 面临着电子元器件的挑战，TDM 方式已日益接近硅和镓砷技术的极限，没有太多的潜力可挖，并且传输设备的价格也很高。

(2) 已敷设 G.652 光纤 1 550 nm 窗口的高色散限制了 TDM 10 Gb/s 系统的传输，光纤色度色散和偏振模色散的影响日益加重。人们正越来越多地把兴趣从电复用转移到光复用，即从光域上用各种复用方式来改进传输效率，提高复用速率，而 WDM 技术是目前能够商用化的最简单的光复用技术。

(3) 光电器件的迅速发展。1985 年英国南安普顿大学首先研制出掺铒光纤放大器。1990 年，比瑞利 (Pirelli) 研制出第一台商用光纤放大器。EDFA 的成熟和商用化，使光放大区域 (1 530~1 565 nm) 采用 WDM 技术成为可能。

从技术和经济的角度看，WDM 技术都是目前最经济可行的扩容技术手段。

1.2.2 WDM 在传输网中的定位

从 WDM 系统发展的方向来看，将光分插复用器 (OADM) 和光交叉连接器 (OXC) 结合将形成一个光层网络——光传送网。未来光传送网的发展就应是在 SDH 电网络层面以下建设光网络层，即传送网将在拓扑上分为光、电两个网络层面，而 WDM 系统则是

“光网络层”的核心部分。

WDM 系统在传送网中的位置如图 1-3 所示，其中 SDH 和 WDM 是客户层与服务层的关系。PDH，ATM 和 IP 等信号与 SDH 也是客户层与服务层的关系。

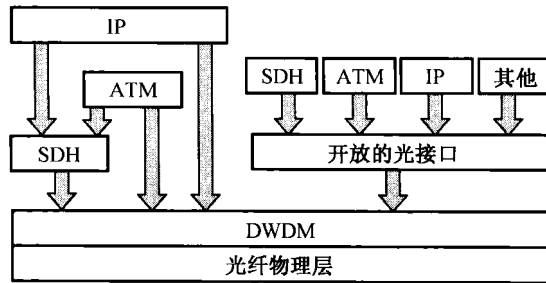


图 1-3 WDM 系统在传送网中的位置

1.2.3 WDM 系统的分类

WDM 系统分为无电中继系统和无中继系统两类。

无电中继长距离传输系统是指发射端和接收端之间光信号不需要经过光/电/光（optical electrical optical, OEO）的转化，只需要经过光放大器和其他无源光器件对光信号进行端到端的传输。根据我国关于 WDM 系统的行业标准，无电中继光纤传送系统就传输距离而言，可以划分为以下 3 种：长度在 1 000 km 以下的称常规长距离传输系统 LH（Long Haul）；长度在 1 000~2 000 km 范围内的称亚超长距离传输系统 ELH（Enhanced Long Haul）。长度大于 2 000 km 以上的称超长距离传输系统 ULH（Ultra-Long Haul）。

无中继长距离传输系统是指发射端和接收端之间既没有 OEO 也没有光放大器设备对传输的光信号进行处理，一般把超过 120 km 的无中继传输系统称为超长无中继传输系统。

由于技术上没有显著的差别，本书把 ELH，ULH 和超长无中继传输系统统称为 ULH 传输系统。书中无特指超长距离 ULH 传输系统外，一般均为常规距离的 WDM 传输系统。

1.2.4 WDM 的研究、应用现状与发展趋势

目前，全球在建的商用光纤通信系统基本上都是 WDM 系统，同时原有的光纤通信系统也都陆续被改造成 WDM 系统。随着 WDM 分插技术和网管技术的发展，WDM 系统将进入城域网领域，为未来的全光交换网络提供技术支撑。在 WDM 研究开发方面，美国和西欧国家一直处于领先地位。美国按照其 NGI 的规划，由国防部下属的国防高级项目研究署牵头，以政府研究开发项目的形式，通过大学、国家实验室、电信设备生产商和电信业务提供商的联合协作，先后进行了多个 WDM 光传送网项目的研究开发，如 MONET，NTON，WEST 等。

我国也十分重视 WDM 技术，除了理论研究和跟踪外，还对商用化试验做了很多开发工作。目前，WDM 系统在我国骨干网和省二级骨干传送网的网络上得到了广泛的应用，基于 10 Gb/s 和 2.5 Gb/s 的 DWDM 系统已经成为基本的传送平台，基于 10 Gb/s

单通路速率的 400 Gb/s 或 800 Gb/s 系统在我国干线建设中已经大量商用。较为成熟的 ULH（超长距离）传输距离为 3 000 km，波长间隔在 50 GHz，使用 C+L 波段的 160 波系统。

超大容量 WDM 系统的发展不仅彻底发掘了巨大的光传输链路的容量，而且也成为 IP 业务快速发展的催化剂和下一代光传送网灵活光节点的基础。从长远发展来看，WDM 主要技术会朝多个方向发展。

1. 单波长传输速率不断提高

单波长速率由 155 Mb/s 发展到目前的 10 Gb/s，而 40 Gb/s 速率的系统已进入实验阶段，技术日渐成熟。利用 TDM 和 WDM 两种技术进行网络扩容将是未来应用的方向。

2. 更多波长复用数量

短少的几年时间内，WDM 相邻波长间隔经历了 200 GHz—100 GHz—50 GHz（目前商用系统的波道间隔），乃至 25 GHz 的演变，每前进一步，系统可容纳的波长数就可以增加一倍。随着技术的不断发展，WDM 系统的工作波段已由 C 波段发展到 L 波段、S 波段甚至全波段。如中兴通讯的 ZXWM M900 设备，最高可提供 160 波的复用。

3. 超长的全光传输距离

通过提高全光传输的距离，减少电再生点的数量，可降低建网的初始成本和运营成本。传统的 WDM 系统采用 EDFA 延长无电中继的传输距离。目前，通过分布式喇曼放大器、超强前向纠错技术（FEC）、色散管理技术、光均衡技术以及高效的调制格式等，传输距离可从目前的 600 km 左右扩展到 2 000 km 以上。

4. 从点到点 WDM 走向全光网络

全光网络是未来光纤传送网的发展方向。普通的点到点 WDM 系统，主要由光终端复用器（OTM）组成，尽管有巨大的传输容量，但只提供了原始的传输带宽，组网能力不灵活。随着电交叉系统的不断发展，节点容量的不断扩大，点到点组网显然无法跟上网络传输链路容量的增长速度。进一步扩容的希望转向光节点，即光分插复用器（OADM）和光交叉连接器（OXC）。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度来实现的。

通过 OADM 可构成链形、环形光网络。OADM 设备控制不同波长信道的光信号传至适当的位置，并可实现光层业务的保护和恢复。WDM 系统可以与光分插复用器 OADM、光交叉连接设备 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。

5. IP over DWDM 技术的发展

Internet 骨干网的带宽增长迅猛，如果不采用 WDM 技术，那么仅 Internet 的数据流量就可以占满整个单波光纤系统的容量（目前，商用化单波长光纤系统的最大传输速率为 10 Gb/s）。因此，IP over DWDM 将是未来网络通信的主要技术。

1.3 WDM 技术概述

1.3.1 相关定义

波分复用技术,可以承载 SDH 业务、IP 业务和 ATM 业务,只需通过增加波长(信道)来实现系统扩容,即在一根物理光纤上提供多个虚拟的光纤通道,也可以称为虚拟光纤。由于 WDM 系统技术的经济性与有效性,使之成为当前光纤通信网络最广泛使用的光波复用技术。WDM 通常有 3 种复用方式,即 1 310 nm 和 1 550 nm 波长的波分复用、粗波分复用(CWDM)和密集波分复用(DWDM)。

1) 1 310 nm 和 1 550 nm 波长的波分复用

这是最初波分复用系统的使用情况。20 世纪 80 年代初人们在光纤的两个低损耗窗口 1 310 nm 和 1 550 nm 各传送一路光波长信号,利用 WDM 技术实现单纤双窗口传输。该系统比较简单,一般采用熔融的复用器件。

2) 密集波分复用(DWDM)

DWDM 技术是指相邻波长间隔较小的 WDM 技术,工作波长位于 1 550 nm 窗口。可以在一个光纤上承载 8~160 个波长。主要应用于长距离传输系统。

最早的波分复用技术是将 1 310 nm 和 1 550 nm 的两波长复用,波长间隔一般为数十纳米。随着 EDFA 的商用化,新的 WDM 系统只用 1 550 nm 窗口,这些 WDM 系统的相邻波长间隔比较窄(小于 1.6 nm),为了区别传统的 WDM 系统,称为密集波分复用系统,即 DWDM 系统。现在波分复用技术(WDM)通常专指密集波分复用技术(DWDM)。

3) 粗波分复用(CWDM)

CWDM 技术是指相邻波长间隔较大的 WDM 技术,相邻信道的间距一般不小于 20 nm,波长数目一般为 4 波或 8 波,最多 16 波。CWDM 使用 1 200~1 700 nm 窗口。

CWDM 采用非制冷激光器、无光放大器件,成本较 DWDM 低;缺点是容量小、传输距离短。因此,CWDM 技术适用于短距离、高带宽、接入点密集的通信应用场合,如大楼内或大楼之间的网络通信。

1.3.2 WDM 特点和优势

1. 超大的传输容量

WDM 系统中的各波长相互独立,可透明传输不同的业务,如 SDH, IP, ATM 等信号,实现多种信号的混合传输。多个光信号通过采用将不同的波长复用到一根光纤中传输,每个波长上承载不同信号,这样大大提高了光纤容量,极大地节约了光纤资源,降低线路建设成本。系统复用的光通路速率可以为 2.5 Gb/s, 10 Gb/s 等,而复用光通路的数量可以是 40 个、80 个甚至更多,所以系统的传输容量可达到 1 600 Gb/s 的水平。而这样巨大的传输容量是 TDM 方式目前根本无法做到的。

目前,160×10 Gb/s 的 WDM 系统已经达到商用化水平。