

DWDM

传输系统原理与测试

孙学军 张述军 等编著
李志成 姜延吉 审校



人民邮电出版社

00006988

DWDM 传输系统原理与测试

孙学军 张述军 等编著

李志成 姜延吉 审校

人民邮电出版社

内 容 提 要

密集波分复用(DWDM)技术是近年来出现的光纤通信新技术。本书较为系统地介绍了 DWDM 技术的基础知识以及发展状况,并对 DWDM 传输系统的设备网元、系统性能的测试进行了介绍。全书共包括 8 章,第一章对 DWDM 的起源与发展进行了简单介绍;第二章介绍了 DWDM 技术的工作原理以及工作方式;第三章对系统的主要网元进行了较为细致的介绍;第四章介绍了当前关于 DWDM 系统规范化标准的内容,包括国际电联的建议和原邮电部有关部门制定的标准和技术规范;第五章和第六章重点介绍了对 DWDM 网元和系统的各项指标的测试方法和要求;第七章介绍了一些网元及系统的测试数据;第八章对实现商业化的 DWDM 专用测试仪表进行了简单介绍。

本书适合于从事 DWDM 系统和设备研制开发、规划设计、施工建设和维护管理的工程技术人员和管理人员阅读,也可供大中专院校传输专业师生参考。

DWDM 传输系统原理与测试

◆ 编 著 孙学军 张述军 等

审 校 李志成 姜延吉

责任编辑 陈万寿

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

北京朝阳展望印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:787×1092 1/16

印张:10.25

字数:248 千字

印数:1-5 000 册

2000 年 2 月第 1 版

2000 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-08383-5/TN·1570

定价:20.00 元

前 言

信息时代要求越来越大容量的传输网络。开发光纤传输信息容量的潜力，提高现有光纤的利用率，从技术角度解决光纤不足的矛盾，是得到广泛认同的一种方法。

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 技术是一种比较先进的光纤通信新技术，并且相对成熟，已经逐渐步入商用。它的迅速发展使我们看到了一个基于波长业务的包括光传输、光交换在内的全光网络将要出现。在这种大趋势下，广大电信传输领域的管理人员和技术人员迫切需要一本对 DWDM 传输技术和系统设备的发展与基本原理、维护与测试进行系统介绍的图书。笔者正是应技术发展之需要，参阅了大量的文献资料，对 DWDM 技术领域的发展进行跟踪，侧重于实用化的 DWDM 传输系统设备，编写成《DWDM 传输系统原理与测试》。

本书共包括 8 章，首先介绍 DWDM 的起源与发展、工作原理以及工作方式，接下来对系统的主要网元以及当前关于 DWDM 系统的标准进行了详细介绍，重点介绍了对 DWDM 网元和系统的各项指标的测试方法和要求，并以京一沈一哈 DWDM 系统的一部分和武汉邮电科学研究院的课题实验段为模型对网元及系统的一些测试数据进行了介绍，最后简单介绍了 DWDM 专用测试仪表。

本书由孙学军主编，李志成、姜延吉审核，参加编写的还有姜延吉、张述军、陈一中、黄育飞等同志。在编写过程中，得到了中国电信总局领导、黑龙江省邮电管理局运行维护部领导和黑龙江省电信技术支援中心领导的极大关怀，信息产业部电信传输研究所的邓忠礼老师以及武汉邮电科学研究院的专家提出了宝贵的意见，在此，一并表示由衷的感谢。

由于时间仓促，不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

1999 年 11 月

目 录

第一章 DWDM 的发展与起源	1
1.1 WDM 的产生是满足社会需求的结果	1
1.2 DWDM 技术的发展现状	3
1.2.1 国际动态	3
1.2.2 国内的进展	5
1.3 DWDM 的主要技术问题与解决	6
1.3.1 光放大技术	6
1.3.2 克服色散的技术	8
1.3.3 光合波与分波技术	9
1.3.4 节点技术	10
1.3.5 网络管理技术	11
1.4 DWDM 系统的结构	11
1.4.1 未来 WDM 光通信网的逻辑分层	11
1.4.2 济南—青岛 DWDM 系统的结构	12
第二章 DWDM 的工作原理	15
2.1 工作原理	15
2.1.1 WDM 的技术原理	15
2.1.2 WDM 与 DWDM	16
2.2 工作方式	17
2.2.1 双纤单向传输	17
2.2.2 单纤双向传输	18
2.2.3 光分出和插入传输	19
2.3 密集型波分复用系统的光纤选型	19
2.4 光纤的非线性效应及解决	21
2.4.1 受激散射	22
2.4.2 克尔效应	23
第三章 DWDM 系统的组成网元	25

3.1	光源	25
3.1.1	激光器的调制方式	25
3.1.2	激光器的波长的稳定与控制	27
3.2	光波长转换器 (OTU)	28
3.2.1	工作原理	29
3.2.2	OTU 的应用	29
3.3	光放大器 (OA)	30
3.3.1	掺铒光纤放大器 (EDFA) 的工作原理	31
3.3.2	EDFA 的应用	34
3.3.3	EDFA 增益的平坦性	35
3.3.4	EDFA 的增益竞争	36
3.4	光复用器和光解复用器	37
3.4.1	光栅型波分复用器	37
3.4.2	介质薄膜型波分复用器	38
3.4.3	熔锥型波分复用器	39
3.4.4	集成光波导波分复用器	39
第四章	DWDM 光传输系统的技术标准与应用	42
4.1	ITU-T 有关 WDM 系统的建议	42
4.2	系统应用与代码	42
4.2.1	无在线光放大器的情况	43
4.2.2	有在线光放大器	44
4.3	参数定义与规范	44
4.3.1	中心频率和波长	44
4.3.2	中心频率偏差	45
4.3.3	光通道色散	45
4.4	技术规范	46
4.4.1	部科技委对发展 WDM 光网络系统的建议	46
4.4.2	8×2.5Gbit/s WDM 系统技术规范	47
第五章	DWDM 系统的网元级测试	58
5.1	集成式发送机测试	58
5.1.1	平均发送光功率	58
5.1.2	消光比	59
5.1.3	最小边模抑制比	59
5.1.4	中心频率与偏离	60
5.1.5	最大-20dB 带宽	60
5.1.6	发送信号波形	61
5.2	集成式接收机测试	62
5.2.1	接收机灵敏度	62

5.2.2	接收机过载光功率	63
5.2.3	接收机的最大反射系数	63
5.3	波长转换器 OTU 的测试	64
5.3.1	中心频率与偏离	64
5.3.2	平均发送光功率	64
5.3.3	消光比	65
5.3.4	发送信号波形	65
5.3.5	最小边模抑制比	66
5.3.6	最大-20dB 带宽	66
5.3.7	光接收灵敏度	66
5.3.8	最小过载光功率	67
5.3.9	输入波长范围	67
5.3.10	接收机的最大反射系数	67
5.3.11	输入抖动容限	68
5.3.12	抖动转移特性	68
5.4	合波器 (OMU)	69
5.4.1	插入损耗以及各通路插入损耗的最大差异、插入损耗偏差	69
5.4.2	极化相关损耗	70
5.4.3	光反射系数	71
5.5	分波器	71
5.5.1	插入损耗以及各通路插入损耗的最大差异、插入损耗偏差	72
5.5.2	极化相关损耗	73
5.5.3	信道之间的隔离度与串扰	74
5.5.4	分波器的通带特性	75
5.5.5	中心波长与偏差	75
5.5.6	光反射系数	76
5.6	光放大器	76
5.6.1	放大器的增益曲线	76
5.6.2	饱和输出功率	77
5.6.3	光放大器工作带宽	77
5.6.4	在专用测试平台上测试放大器的光功率输入范围、输出范围及小信号增益平坦度	78
5.6.5	光放大器的反射系数	79
5.6.6	噪声系数	79
5.7	光监控信道单元	80
5.7.1	光监控通路波长测试	80
5.7.2	光监控通道的光谱特性	80
5.7.3	光监控通道的发送光功率	80
5.7.4	接收机灵敏度和过载功率	81

第六章 DWDM 系统测试	82
6.1 传输性能测试	82
6.1.1 系统误码率 (BER) 特性的测试	82
6.1.2 系统的抖动和漂移特性	84
6.1.3 系统各通道间的隔离度测试	89
6.2 主光通道测试	90
6.2.1 MPI-S 点每通道输出功率	90
6.2.2 MPI-S 点总发送功率	90
6.2.3 MPI-S 点每通路信噪比	91
6.2.4 MPI-S 点最大通路功率差	92
6.2.5 光通道代价	92
6.2.6 MPI-R 点每通道输入功率	94
6.2.7 MPI-R 点总输入功率	95
6.2.8 MPI-R 点每通路光信噪比的测量	95
6.2.9 MPI-R 点最大通道功率差	96
6.2.10 光通道增益平坦度	96
6.3 系统的稳定性能	97
6.3.1 系统信道增减对光信噪比 (OSNR) 的影响	97
6.3.2 系统误码率 (BER) 与光信噪比的关系	97
6.3.3 系统信道增减对误码率的影响	98
6.3.4 OA 输出的每信道功率及增减信道的影响	98
6.4 系统的辅助功能	98
6.4.1 光放大器的状态对监控信道的影响	98
6.4.2 公务系统的功能与性能测试	99
6.4.3 激光器自动关闭与恢复的测试	100
6.5 网管功能的检查	100
6.5.1 故障管理	100
6.5.2 基本物理量 (性能) 管理	102
6.5.3 配置管理	103
6.5.4 激光器状态 (ON/OFF) 管理	104
6.5.5 安全管理	104
6.5.6 用户网元管理 (工作站) 界面显示	104
第七章 DWDM 系统测试结果举例	106
7.1 光转发器的测试	106
7.1.1 收光特性	106
7.1.2 发送信号的中心波长	107
7.1.3 发送信号的光谱特性、平均发送光功率和最小消光比	108
7.2 与光监控通道相关的测试	109

7.2.1	光监控通道和主光通道的合波、分波测试	109
7.2.2	光监控信道 (OSC) 的发光功率、接收灵敏度、最小过载光功率	110
7.3	波分复用合波、分波特性	111
7.3.1	衰减特性测试	111
7.3.2	极化相关损耗	113
7.3.3	分波器的中心波长与偏差	113
7.3.4	分波器的通带特性	114
7.4	光通道传输特性	114
7.4.1	8 通道合波器输出测试	115
7.4.2	光功放增益特性	116
7.4.3	2:1 合波器输出	117
7.4.4	光线放增益特性	117
7.4.5	1:2 分波器输入端	120
7.4.6	光预放增益特性	120
7.4.7	光通道选择器输出	121
7.4.8	光通道增益平坦度	122
第八章	多波长计和光谱分析仪简介	123
8.1	多波长计和光谱分析仪的工作原理	123
8.2	WWG 公司的高级测试仪 OSA-155	125
8.2.1	公司简介	125
8.2.2	先进的波分复用分析仪 OSA-155	126
8.2.3	OSA-155 的技术指标	131
8.3	HP 公司的先进仪表	133
8.3.1	HP 86120A/B/C 多波长计	133
8.3.2	HP86140A 光谱分析仪	142
附录一	常用缩略语	147
附录二	常用术语	152

第一章 DWDM 的发展与起源

1.1 WDM 的产生是满足社会需求的结果

随着科学技术的迅猛发展，通信领域的信息传送量正以一种加速度的形式膨胀。信息时代要求越来越大容量的传输网路。当承载长途传输使用的光纤都已经被占用时，承载商首先考虑的绝不是按原有路由增放一条新的光缆，而是尽可能利用已有的光纤进行扩容。

近几年来，世界上的运营公司及设备制造厂家把目光更多地转向了 WDM 技术，并对其投以越来越多的关注，主要是由于 WDM 技术具有以下优点：

- (1) 不需要安装新光纤就可以扩容，降低了网络费用。
- (2) 网络可随时升级扩容，以满足用户及未来新业务的需求。
- (3) 信号传输比特率及调制格式透明。

采用 WDM 技术，在实验室的条件下，传输速率已经突破了大比特(Tbit/s)量级。

增加光纤网络的容量及灵活性，提高传输速率和扩容的手段可以有多种，下面对几种扩容方式进行比较。

1. 空分复用 SDM (Space Division Multiplexing)

空分复用是传统的扩容方式，靠增加光纤对的方式线性增加传输的容量，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简单，扩容方案较易实现。

在光缆制造技术已经非常成熟的今天，上百芯的带状光缆已经比较普遍，先进的光纤接续技术也使光缆施工变得简单，但光纤线对的增加无疑仍然给施工以及线路将来的维护带来了诸多不便，对于已有的光缆线路，如果没有足够的光纤对，通过重新铺设光缆来扩容，工程费用将会成倍增长，而且，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。在网络建设中，不可能总是采用铺设新光纤的方式扩容，事实上，在工程之初，也很难预测日益增长的业务需要，规划应该铺设的光纤数。因此说，空分复用只能算做一种十分受限的扩容方式。

2. 时分复用 TDM (Time Division Multiplexing)

时分复用也是一项比较常用的扩容方式，从传统 PDH 的一次群至四次群的复用，到如今 SDH 的 STM-1、STM-4、STM-16 乃至 STM-64 的复用。通过时分复用技术，可以成倍地提高光传输信息的容量，极大地降低了每条电路在设备、线路方面投入的成本。并且采用这种复用方式很容易在数据流中抽取某些特定的数据组合信号，适合在需要采取自愈环境保护策略的网络中使用。

时分复用的扩容方式有两个缺陷，第一是影响服务，即“全盘”升级至更高的速率等级，网络接口及其设备需要进行完全更换。在升级的过程中，不得不中断正在服务中的设备；第二是速率的升级缺乏灵活性，例如 SDH 设备，当一个线路速率为 155Mbit/s 的系统，被要求提供两个 155Mbit/s 的通道时，就只有将系统升级到 622Mbit/s，即使有两个 155Mbit/s 将空闲，也是没有办法的。

对于高速率系统的时分复用，目前设备的成本还较高，并且 40Gbit/s TDM 已经达到电子器件的速率极限，即使是 10Gbit/s 的速率，不同类型光纤的非线性效应也对传输产生各种限制。

总的来说，时分复用技术是一种被普遍采用的扩容方式，它可以通过不断地进行系统速率升级实现扩容的目的，但当达到一定的速率等级时，会由于器件、线路各方面特性的限制而不得不寻找另外的解决办法。

3. 波分复用 WDM (Wavelength Division Multiplexing)

波分复用技术是利用单模光纤低损耗区的巨大带宽，将不同频率（波长）的光信号混合在一起进行传输，这些不同波长的光信号所承载的数字信号可以是相同速率、相同数据格式，也可以是不同速率、不同数据格式。波分复用扩容方案可以通过增加新的波长，按照用户的需求确定网络容量，是一种可以将一根光纤当多根光纤来使用的十分有效的扩容方案。

理论上一根光纤在 1530nm~1565nm 的带宽范围内传输容量约为 4Tbit/s，而目前实际得到利用的还不到 1Tbit/s（如图 1-1 所示），如何开发利用光纤的传输资源，是一项十分有意义的研究。

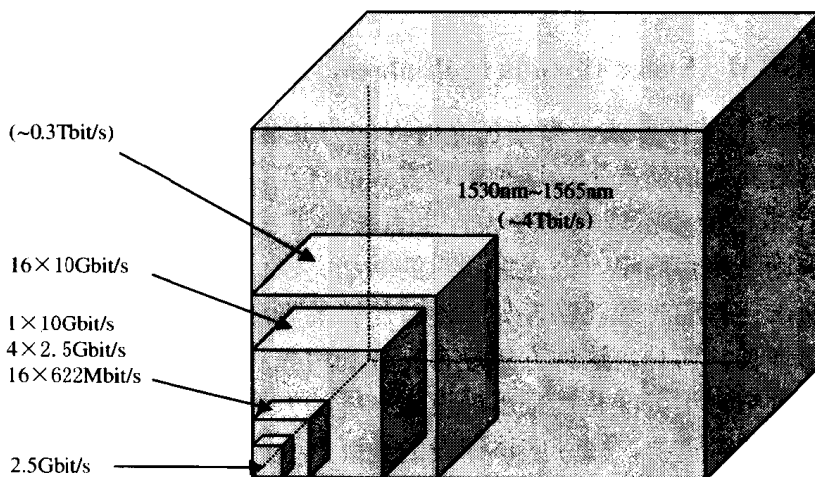


图 1-1 光纤容量的示意图

对于 2.5Gbit/s 以下速率的 WDM 系统，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。最早使用的波分复用是 1310nm 和 1550nm 的两波长复用，但随着通信业务量的迅速增长，两波长复用早已不能满足要求，因此在 1550nm 窗口更多波长的波分复用技术逐渐成熟起来，已经投入商用的有 8 个波长、16 个波长、32 个波长的系统。有时候，把这些系统称为密集波分复用 (DWDM)，以区别于早期使用的两波长系统。

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 光传输系统只用于点到点的传输。光自愈环网、光网络层的保护和恢复还需要进行研究。

4. TDM 和 WDM 技术的合用

实际上,以上所说的三种方案并不是相互排斥的,实际的问题并不在于采取何种技术,而在于如何选择一个技术、性能、价格均合理,利用现有的设备及技术,最大限度提高光纤网络容量的综合方案。由于 WDM 网是一个协议透明、格式透明的网络,可以不断地将现有的电网络叠加到光网络上,目前很多运营公司采用 WDM 与 TDM 相结合的“按需扩容”组网结构,在一个 WDM 系统网络上,将不同速率、不同厂家的电设备结合在一起并可以随时加入新的高速 TDM 系统,构筑未来的高速光纤网络,满足迅速增长的容量要求。

利用 TDM 和 WDM 两种技术的优点进行网络扩容是应用的方向。可以根据不同的光纤类型选择 TDM 的最高传输速率,如对于 G.652 常规单模光纤和 G.655 非零色散位移光纤选择 2.5Gbit/s,对于 G.653 零色散位移光纤选择 10Gbit/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。

1.2 DWDM 技术的发展现状

DWDM 技术是在 WDM 技术的基础上演变出来的。1310nm/1550nm 的两波长复用技术早在 80 年代初,就已经作为比较成熟的技术投入商用。而且,当时已有人预见到光波的复用将向更多波长(更多频率)的方向发展,提出了波分复用和频分复用的概念,将波长间隔在一个或几个纳米以上的复用称之为波分复用(WDM),而将波长间隔在零点几个纳米的复用使用光波的频率来表示,称为频分复用(FDM)。随着科技的进步,现代的技术已经能够实现纳米级的复用,而零点几个纳米级的复用也只是在器件的技术要求上更加严格而已,因此把波长间隔较小的 8 个、16 个、32 个乃至更多个波长的复用被称为密集型波分复用。

1.2.1 国际动态

DWDM 自 1995 年开始商用以来,发展速度极其迅猛,其设备的销售额突飞猛进。在 1995 年到 1997 年的三年时间里,采用 DWDM 技术的光纤通信系统仅在北美的年销售额就由 5000 万美元激增至 10 亿美元,据预测,到 2000 年北美地区的年销售额将超过 30 亿美元,世界其它地区的销售额将超过 15 亿美元。从世界范围来看,目前在建设或将要建设的商用光纤通信系统,基本上都是 DWDM 光纤通信系统,原有的光纤通信系统也都将陆续地被改造成 DWDM 系统。在其巨大的市场潜力的带动下,DWDM 技术领域的开发步入了一个良性的快车道,业内专家对其未来的发展趋势的预测见表 1-1。

表 1-1

关于 WDM 光通信网未来发展趋势的预测

	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
传输速率	2.5Gbit/s	2.5Gbit/s	2.5Gbit/s	2.5Gbit/s
系统总容量	2.5Gbit/s	2.5Gbit/s	2.5Gbit/s	2.5Gbit/s
波长信道数	4	64	128	256
波长信道间隔	200GHz	100GHz	50GHz	50GHz
全光传输距离	100km	500km	2500km	10000km
网络结构	点到点	环行网	小型格状网	格状网
节点构成	光端机	固定 OADM	可变 OADM+固定 OXC	可变 OXC

在 WDM 光传送网的研究开发方面,美国和西欧各国一直处于领先地位。他们以关键技术和设备、部件和器件,以及材料的研制开发为突破口,通过现场实验来完成实用化和商用化进程。目前,他们首批 WDM 光传送网的实验室研究已经完成,大部分正进行现场实验,部分的初期现场实验已经完成。

美国按照其 NGI 的规划,由国防部下属的国防先进项目研究署(DARPA)牵头,以政府研究开发项目的形式,通过大学、国家实验室、电信设备生产厂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,其中比较典型的是 MONET。

MONET (Multiwavelength Optical NETWORKing) 的参加者包括 AT&T、Bellcore、Bell Atlantic、Lucent Technologies、Pacific NRL、NSA,该项目由新泽西试验网、华盛顿特区试验网以及连接他们的华盛顿—新泽西光缆系统组成。新泽西试验网为星型网,以 Lucent Technologies 的交叉互连试验系统为中心节点,分别连接 Bellcore 的局域交换试验系统和 AT&T 的长途传输试验系统。华盛顿特区试验网为环行网,连接 NSA、NRL 和 Bell Atlantic 的 Silver Spring 实验室。该项目于 1996 年下半年启动,目前已经完成新泽西试验网的现场试验和华盛顿特区试验网的部分建设,预计整个试验系统将于 1999 年上半年全部建成,现场试验将于 1999 年底前完成。该系统具有多个光分插复用节点和光交叉互连节点,传输容量为每根光纤 8 个波长信号,单波长传输速率为 2.5Gbit/s (一般简称 $8 \times 2.5\text{Gbit/s}$),传输链路全长 2000km 以上,传输业务包括数据传输、数字化远程可视会议、分布式 CATV 传输等。项目主要目标在于通过实际网络演示、网络结构与经济性研究及嵌入技术研究来探索系统商用化的可能性,同时检验 WDM 光通信网及其相关技术的潜力、可行性与局限性。

在 1998 年的北京国际通信设备展览会上,朗讯公司展出了 WaveStar OLS400G DWDM 波分复用系统。该系统是在第一代 80G DWDM 产品基础上发展而来的第二代产品,是现今容量最大的商用光传输系统。与第一代 80G DWDM 相比,400G DWDM 的工作带宽增加了近两倍;逐渐向光交换方向发展,首次使用了光分插复用器(OADM),即可作为长途干线网传输,又可用于都市网的传输。

西欧各国在 ACTS (先进通信技术与业务) 项目的支持下,先后开展了以下主要 WDM 光通信网的研究项目。

(1) OPEN (AC066, 泛欧光通信网): 该项目包括两个试验网,一个是具有跨海链路的挪威—丹麦试验网(共 5 个网络节点,含一个光分插复用节点和一个光交叉互连节点),现

场试验于 1997 年 10~12 月进行；另一个是法国—比利时试验网（共 4 个网络节点，含一个光分插复用节点和一个交叉互连节点），现场实验于 1998 年 2~4 月进行。系统容量为 $4 \times 2.5\text{Gbit/s}$ ，并有 1:1 保护系统。该项目的目的在于探索能够提供泛欧通信的数字业务格式和全透明传送业务的 WDM 光通信网的技术可行性。

(2) PHOTON (AC084, 泛欧光通信网)：主要研究和模拟基于 WDM 技术泛欧全光通信网，系统为三节点（含一个光交叉互连节点）的 WDM 长途传输系统，传输容量为 $8 \times 10\text{Gbit/s}$ ，传输链路总长度超过 530km；现场试验在德国和奥地利进行（由慕尼黑至维也纳），从 1998 年 7 月开始，为期 3 个月。

(3) MOON (AC231, 光通信网管理)：它以 PHOTON 项目为基础，着重进行网络管理方面的研究，实验系统由 PHOTON 网扩充而成，主要是增加两个光交叉互连节点。现场试验将随 PHOTON 项目完成后进行。

(4) METON (AC073, 光城域通信网)：以斯德哥尔摩千兆位通信网为基础，研究主要用于大城市通信的、基于 WDM 技术的可重构光通信网，系统包括一个光交叉互连节点和 5 个光分插复用节点，具有两个光波通信窗口（其中一个含有 4 个波长信道），支持 ATM、PDH 和 SDH 传输，传输链路全长 $2 \times 160\text{km}$ ；在瑞典首都斯德哥尔摩进行的现场试验从 1997 年开始，于 1998 年春季结束。

1.2.2 国内的进展

我国的 WDM 光通信网的研究也取得了一定的进展。原邮电部已经引进了多条 WDM 传输链路进行有关的传输试验，国内自行研制开发的 WDM 传输系统也已经开始提供商用。在国家自然科学基金和 863 项目支持下，清华大学、北京大学和北京邮电大学三方合作，比较早地开展了对 WDM 光通信网的研究工作，于 1998 年 4 月完成了 4 节点、4 波长的试验网试验。武汉邮电科学研究院研制开发的济南—青岛 $8 \times 2.5\text{Gbit/s}$ 密集型波分复用系统工程设备于 1999 年 1 月通过了信息产业部科技司组织的专家验收。

武汉邮电科学研究院在国内光通信领域较早地对 WDM 技术进行了开发，到 1999 年初，已经能够达到的技术水平和技术指标如下：

- 开放式和集成式 DWDM 系统。
- 应用于干线网、地区网和都市网。
- 光信道数：4、8、16 和 32。
- 光信道传输速率：155Mbit/s、622 Mbit/s、2.5G Mbit/s、10Gbit/s。
- 总传输容量：10Gbit/s、20 Gbit/s、40 Gbit/s、80Gbit/s。
- 波长范围：1548.51~1560.61nm。
- 光信道间隔数：100GHz、200 GHz、400 GHz。
- 光信道波长稳定度： $\pm 10\text{GHz}$ 、 $\pm 20\text{GHz}$ 。
- 无电再生最长距离：640km。
- 3R 电再生功能的光波长转换器或称光转发中继器（OTU）可使 WDM 系统跨越若干个光纤数字段传输。总传输距离大于 1000km。
- 最长光纤段跨距：120km G.652 光纤。
- 增益平坦和增益锁定的 EDFA 光放大器。

- 输出光信噪比： $\geq 20\text{dB}$ ，信道串扰 $\leq -25\text{dB}$ 。
- 可固定上下 4 路光信道的 OADM。
- 有保护路由的 1510nm 波长光监控信道（OSC）。
- 分别提供光复用段和光中继段的公务话音通路（E1 和 E2 字节），并配有数字传输通路（F1 字节）。
- EMS2.0WDM 和 SDH 网管系统，按全光网络的原理和 OCH/OMS/OTS 分层模型实现配置、故障、性能和安全管理等功能，符合 ITU-T 光网络总体结构 G.872 建议的基本要求。
- 高速网络互连器组成光监控信道的 DCN 保护路由，F/Q 接口的通信协议栈下四层符合 ITU-T Q3 接口协议栈规范。
- 动态切换的中英文双语种图形界面，用户界面友好、直观方便、易学易用、配有在线字典的帮助功能。
- 支持泵浦激光器自动关断功能（APSD）进程，可控制泵浦激光器自动关断和自动恢复，同时具有激光器状态管理功能。
- 直观快速的故障定位（到站、架、框、盘）功能。

随着光通信技术的发展，以 DWDM 技术为核心的光传送网将成为电信网的主要传送平台，其中不但包括长途传输网还包括大容量的用户接入网，该网络的建成将带给我们一个提供波长的光网络层，突破电子设备的瓶颈，使传输容量得到进一步的拓展。然而，WDM 光传送网是一个综合了波分复用技术、光放大技术、光节点技术、光传输技术和光监控技术在内的一个复杂系统。由于光传送网建设的一些关键技术还处于研发、试验和实用化的阶段，因此现在的 WDM 技术更多地只是被应用于升级原有的骨干传输线路，使其传输容量得到扩大，或者兴建独立的 WDM 通信系统，解决电信发展速度较快地区的传输需求。

1.3 DWDM 的主要技术问题与解决

1.3.1 光放大技术

对于长距离的光传输来说，随着传输距离的增长，光功率逐渐减弱，激光器的光源输出通常不超过 3dBm（否则激光器的寿命可能达不到要求），为了保证一定的误码率，接收端的接收光功率必须维持在一定的值上，例如 -28dBm，因此光功率受限往往成为决定传输距离的主要因素。

光放大器（OA）的出现和发展克服了高速长距离传输的最大障碍——光功率受限，这是光通信史上的重要里程碑。OA 的形式主要有半导体光放大器（SOA）和掺铒光纤放大器（EDFA）两种，前者近来发展速度很快，已经逐步开始商用，并显示了良好的应用前景；后者较为成熟，已经大量应用，成为目前大容量长距离的 DWDM 系统在传输技术领域必不可少的技术手段。

EDFA 具有高增益、高输出、宽频带、低噪声、增益特性与偏振无关，以及数据速率与格式透明等一系列的优点。这些优点都是 WDM 系统十分需要的。但是 WDM 系统对 EDFA

有一个特殊的要求——增益平坦，因为通常情况下，EDFA 在 $1.55\mu\text{m}$ 波长窗口的工作带宽为 $30\sim 40\text{nm}$ ，将它用于 WDM 系统时，因各信道的波长不同而有增益偏差，经过多级放大后，增益偏差累积，低电平信道信号的 SNR 恶化，高电平信道信号也因光纤非线性效应而使信号特性恶化，最终造成整个系统不能正常工作。因此，要使各个信道上的增益偏差处在允许的范围内，放大器的增益必须平坦。

1. 增益均衡技术

利用损耗特性和放大器的增益波长特性相反的增益均衡器来抵消增益的不均匀性称为增益均衡技术。这种技术的关键在于放大器的增益曲线和均衡器的损耗特性准确吻合，使综合特性平坦。现在用的增益均衡器主要有标准光滤波器、介质多层膜滤波器、光纤光栅及平面光波导等。

日本 NEC 新开发的一种采用标准光滤波器的增益均衡器，适用于 8、16、32、43 信道的 WDM 系统，在 32 信道的 WDM 系统中，通过使用该均衡器可以将增益偏差由原来的 5.6dB 降至 0.28dB，效果非常明显。

增益均衡用的光纤光栅是一种长周期光纤光栅。其光栅周期一般为数百微米。其损耗峰值波长和半功率点宽度可以由紫外光照射量或光栅长度来控制。因此，通过多个长周期光栅组合，可以构成具有与 EDFA 增益波长特性相反的增益均衡器。使用该技术，在 $1528\sim 1568\text{nm}$ 的 40nm 带宽内，可以实现增益偏差在 5% 以内的宽带增益平坦的 EDFA。

2. 光纤技术

这里所说的“光纤技术”是指在进一步研究掺铒光纤特性的基础上，通过改变光纤材料或者利用不同光纤的组合来改变掺铒光纤的特性，从而改善掺铒光纤放大器（EDFA）的增益特性。光纤技术除了改善增益特性外，还可改善 EDFA 的噪声特性和扩宽增益带宽。

（1）掺铝的 EDF，是在光纤中除了掺铒外还掺入一定的铝，改变玻璃的组成成分，迫使 Er 的放大能级分布改变，加宽可放大的频率范围。普通的以硅光纤为基础的掺铒光纤放大器 EDFA 的增益平坦区很窄，仅在 $1549\sim 1561\text{nm}$ 之间，大约 12nm 的范围，通过掺铝，可以将平坦区的范围扩展为 $1540\sim 1560\text{nm}$ 。

（2）氟化物 EDF，是在 EDF 中掺入一定比例的氟化物，使用这种光纤制作的光放大器，可以将增益的平坦区的波段扩展到 $1530\sim 1560\text{nm}$ ，在这 30nm 的区域内，增益的平坦度达到 1.5dB。

（3）掺铈碲化物光纤，是在 EDF 中掺入一定比例的碲化物。使用这种光纤制作的光放大器，可放大的频带特别宽，而且与石英系光纤的其他掺铒光放大器相比，频带向长波长一侧移动。如 NTT 研制出的一种碲化物 EDFA，最高带宽已达到 80nm ，在 $1530\sim 1610\text{nm}$ 的波长区，得到了 20dB 以上的增益，增益平坦度达到 1.5dB。这种碲化物 EDFA 的宽带特性对 WDM 系统极具吸引力。

（4）掺钇 EDF，是在掺铒光纤中加入一定比例的钇（Y），由于钇（Y）可以作为铒的激活剂，以工作 792nm 附近的光源做为泵浦源，制成铒/钇光纤放大器在 $1544\sim 1561\text{nm}$ 波段的 17nm 带宽内，可以获得 0.5dB 以内的增益平坦度，输出功率大于 +26dBm，噪声系数小于 5dB。

（5）混合型 EDFA，是使用不同掺杂材料的光纤进行组合，制作混合型 EDFA。这种

组合方式,不仅可以提高设计的自由度,而且还可以使增益平坦度、噪声特性、放大效率均达到最佳。

在 DWDM 光传送网络中,应根据系统使用的信道数、系统的要求来选择使用不同种类的光放大器,要求越高性能越好的 EDFA 成本也越高。一般对于 8 个信道 600km 长度的 DWDM 系统,使用掺铝 EDFA 的较多。

1.3.2 克服色散的技术

在 1550nm 波长附近, G.652 光纤的色散典型值为 $17\text{ps/nm}\cdot\text{km}$ 。当光纤的衰减问题得到解决以后,色散受限就变成了决定系统传输距离的一个主要问题。DA 技术即色散容纳技术,就是通过一些技术手段减小或消除色散的影响,延长传输距离。一般来说,主要使用以下的几种解决方法。

1. 压缩光源的谱线宽度

色散对光脉冲传输的影响主要表现在经过传输的光脉冲将受到展宽,而这种展宽的大小在一定传输距离的情况下,取决于传输光纤的色散系数和光源发送的光波的频谱宽度。光源的谱宽越宽(频率啁啾系数越大),光纤色散对光脉冲的展宽越大。因此通过选用频率啁啾系数小的激光器,可以减小传输线路色散的影响。

频率啁啾是单纵模激光器才有的系统损伤。当单纵模激光器工作于直接调制时,注入电流的变化会引起载流子密度的变化,进而使有源区的折射率指数发生变化,结果使激光器的谐振腔的光通路长度发生变化,导致波长随时间偏移,发生所谓的频率啁啾现象,表现为光源的波长稳定性差,光谱宽。当光脉冲经过光纤传输后,由于光纤的色散作用,使受频率啁啾声影响的光脉冲波形发生展宽。光源频率啁啾系数较大,对高速信号的传输距离的限制是很大的,一般 10Gbit/s 信号只能传输几公里。

减小光源啁啾系数的一个有效的办法是,采用外调制的激光器(即间接调制光源),它是由一个恒定光源和一个光调制器构成的,通过使用恒定光源,避免了直接调制时激励电流的变化,从而减小了光源发出光波长的偏移,达到降低频率啁啾系数的目的。

采用外调制器使激光器工作在连续波方式,是一种比较彻底和简单易行的克服频率啁啾影响的方法,目前外调制器的技术已经比较成熟,在 WDM 系统中,几乎所有的光源使用的均为外调制激光器,通过使用外调制光源,可以在不采用其他色散调节技术的情况下,在 G.652 光纤上开通 2.5Gbit/s 系统无再生中继传输 600 公里以上。

有关光源的调制方式将在第三章第一节做更为详细的介绍。

2. 色散补偿光纤的运用

G.652 光纤在 1550nm 窗口的典型色散为 $17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,当传输距离增长时,光脉冲将在累积色散的作用下,产生脉冲展宽,这种展宽将引起码间干扰和模式噪声,而限制传输距离。采用色散补偿光纤(DCF)对传输线路的色散性能进行补偿是一项比较成熟的技术。

色散补偿光纤(DCF)是一种特制的光纤,其色度色散为负值,恰好与 G.652 光纤相反,可以抵消 G.652 常规光纤色散的影响。通常这类光纤的典型色散系数为 $-90\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,因而 DCF 只需在总线路长度上占 G.652 光纤的长度的 1/5,即可使总链路色散值接近于零。