

GUANG CHUAN SONG WANG GUANG CHUAN SONG WANG



光 传 送 网

GUANG CHUAN SONG WANG

顾晚仪 等编著

11

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



光 传 送 网

顾畹仪 张杰 王健全 李晗 何健吾 等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书系统地介绍了基于波分复用(WDM)技术的光传送网的基础理论和关键技术。首先介绍了WDM系统的构成、波分复用器件的原理及系统的传输限制等,然后系统地论述了光传送网的各种关键技术,包括光子交换技术、光传送网的网络结构、节点设备、网络管理、路由波长算法和网络的生存性等。最后探讨了IP over WDM的各种实现方案,展望了自动交换光网络(ASON)的发展前景。

本书可供从事光传送网研究、开发的科技人员参考,也可作为高校学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

光传送网/顾畹仪等编著. —北京:机械工业出版社, 2003 .3

ISBN 7-111-11761-1

I. 光… II. 顾… III. 光缆通信—数字传输系统
IV. TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第015065号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:吉玲 封面设计:陈沛

责任印制:路琳

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003年3月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·20.25印张·499千字

0 001—5 000册

定价:32.00元

读者信箱: jiling@mail.machineinfo.gov.cn

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前言

1970 年,第一根损耗较低的石英光纤(20dB/km)研制成功,同年,GaAlAs 异质结半导体激光器实现了室温下的连续工作,从而开始了光纤通信迅速发展的时代。在过去的 30 余年中,光纤通信以人们预想不到的速度迅速发展着,极大地提高了信息的传输容量,在人类向信息社会过渡的过程中扮演着重要的角色。

回顾光纤通信的发展里程,在第一个十年中,光纤通信由起步到逐渐成熟,并开始商用。在 20 世纪 80 年代中,光纤通信得到长足的发展,迅速由 0.85 μ m 波段转向 1.3 μ m 波段,由多模光纤转向单模光纤。第二代光纤通信系统(1.3 μ m 波段单模光纤系统)获得广泛的应用,并充分显示出光纤通信的低损耗、大容量的优势和强大的竞争力,很快替代电缆通信,成为电信网中主要的传输手段。在这个时期,基于电时分复用的光纤通信系统的传输速率几乎以每五年提高九倍的速度在迅速增长,其增长速度超过了摩尔定律。

20 世纪 90 年代以后,为了满足人类社会向信息化过渡中对带宽和容量的巨大需求,适应因特网迅猛发展对网络结构和功能提出的新的需求,光纤通信发生多次重大的变革。首先表现在由单波长系统向多波长系统的发展。在 20 世纪 90 年代,首先是掺铒光纤放大器

(EDFA)的实用化和 1.55 μ m 波段传输系统的开发,接着是密集波分复用(DWDM)技术的应用,DWDM+EDFA 被称为 20 世纪 90 年代的新一代光纤通信系统。几年来,DWDM 一直向更高的单波长比特率(已达到 80Gbit/s)、更密集的波分复用(最多路数已达 1022)、更宽的可用波长范围(C、L 和 S 波长带)、更长的光放大段(数百 km)、更长的无电再生传输距离(实验室中环路循环传输距离达到 7380km)、更大容量(最大容量达到 10.92Tbit/s)的方向迅速发展着,并在全球干线网中扮演重要角色。

第二个重大的变革是由点到点的 WDM 系统向全光网络的发展和演变。随着传输系统容量的快速增长,交换系统的压力越来越大,在交换系统中引入光子技术的需求日渐迫切。另一方面,WDM 技术不仅具有巨大的传输容量,而且具有良好的联网能力,从而引发了全光通信网的发展。

全光网已被 ITU-T 定义为光传送网,光传送网是在现有的传送网中加入光层,提供光交叉连接和分插复用功能,提供有关客户层信号的传送、复用、选路、管理、监控和生存性功能。由于全光通信网在光上进行交叉连接和分插复用,从而减轻电交换节点的压力,大大提高整个网络的传输容量和节点的吞吐容量。光传送网成为 20 世纪 90 年代中期以后光网络的研究热点,也是网络升级的优选方案。

光通信的另一重大变革是,光网络与数据网的融合及光网络向智能化的发展。1998 年,全球范围内的数据业务量已经超过传统的话音业务量。随着 IP 流量的迅猛发展和传送方式的成功,IP 将成为未来传送网络业务的主要承载方式。而 WDM 具有惊人的传送能力,成为构建下一代传送网络最有潜力的技术之一。因此,光网络和数据网络的融合成为必然的发展趋势,IP over WDM 成为人们注目的热点研究问题。

随着信息领域相关技术的发展,特别是 Internet 对数据业务增长的强大推动,人们对现

有光网络的功能提出了新的、更高的要求。要求光网络能够实时地、动态地调整网络的逻辑拓扑结构,能够快速、高质量地为用户提供各种带宽服务与应用,实现资源的最佳利用和实时的流量工程。从而引发了智能光网络的发展。在智能光网络的解决方案中,自动交换光网络(ASON)已吸引了国际学术界和工业界的广泛注意,成为下一代光网络的发展方向。

作者所在的课题组自 20 世纪 90 年代中开始研究全光通信网,先后承担并圆满完成过多项国家自然科学基金和国家 863 有关光传送网、光互联网和 ASON 的项目,在研究中也积累了较丰富的经验。本书就是在承担国家自然科学基金重大项目的研究中完成的。在此,作者对国家自然科学基金委员会多年的资助表示最衷心的感谢。

本书凝聚了作者所在课题组近年来的研究成果,广泛收集了国内外的相关资料,参照了 ITU-T 和 IETF 的最新建议。书中内容还包含了申云峰、程晓飞、林绵峰、方来付、刘雪源等博士在完成博士学位论文中所做的工作。

光传送网是一项年轻的新技术,由于作者的水平有限,书中难免有错误、不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

作者所在的课题组自1999年3月承担了国家自然科学基金重大项目“WDM全光网基础研究”子课题(69990540-3)的研究任务,近四年来,课题组对全光网(ITU-T定名为光传送网)进行了深入、广泛的研究。本书凝聚了课题组四年来的研究经验和成果。作者谨以此书献给国家自然科学基金委员会,以表达对国家自然科学基金委员会多年来资助的谢意。

目 录

前言

第 1 章 波分复用技术和复用器件	1
1.1 波分复用系统	1
1.2 复用和解复用器件	9
1.3 波分复用系统中的光放大器	16
1.3.1 掺铒光纤放大器	16
1.3.2 喇曼放大器	21
1.4 非线性光学效应对 WDM 系统的影响	24
1.5 从点到点的 WDM 系统向光传送网的发展	30
参考文献	32
第 2 章 光交换的原理	33
2.1 空分光交换和光开关	33
2.1.1 空分光交换	33
2.1.2 光开关的原理和类型	34
2.2 时分光交换	41
2.2.1 时分光交换的概念和实现	41
2.2.2 透明的光分组交换网络	42
2.2.3 光突发交换网络	46
2.3 波分光交换	51
参考文献	54
第 3 章 光传送网的网络结构	56
3.1 OTN 分层和分割	56
3.2 基于数字封包技术的光信道层	59
3.3 光传送网的结构	69
3.4 WDM 环形自愈网	75
3.4.1 WDM 环形网络的结构与类型	75
3.4.2 自动保护倒换协议	78
3.4.3 环间互联	81
3.4.4 环网中的环路问题	83
3.5 国内外主要试验网的情况	86
参考文献	93
第 4 章 光传送网中的节点结构	95
4.1 节点设备的概述	95

4.1.1	OXC 的功能	95
4.1.2	OXC 的主要特性	98
4.1.3	OXC 体系结构	99
4.2	基于空间光开关矩阵的透明 WXC 结构	102
4.2.1	基于空间光开关矩阵和波分复用/解复用器对的 WXC 结构	103
4.2.2	基于空间光开关矩阵和可调谐滤波器的 WXC 结构	107
4.2.3	基于分送耦合开关的交叉连接结构	109
4.2.4	基于平行波长开关的 WXC 结构	111
4.3	基于 FBG 和 AWG 的交叉连接结构	113
4.4	OADM 的典型结构及其性能指标	117
4.5	节点的同频串扰及其对系统性能的影响	122
4.5.1	OXC 的结构与同频串扰的产生	122
4.5.2	同频串扰的理论计算	123
4.5.3	同频串扰对系统性能的影响	125
	参考文献	126
第 5 章	光传送网的管理	128
5.1	电信管理网 (TMN)	128
5.1.1	TMN 的结构	129
5.1.2	TMN 的功能	133
5.2	开放系统互连 (OSI) 模型	135
5.2.1	通信协议和 OSI 参考模型	135
5.2.2	Q3 接口	137
5.2.3	OSI 系统管理结构框架的系统开发模型	138
5.3	简单网络管理协议 (SNMP)	144
5.3.1	SNMP 的机制	145
5.3.2	SNMP 的管理框架	146
5.3.3	SNMP 和 CMIP 比较	152
5.4	光传送网的管理方案	154
5.4.1	光传送网管理的分层结构	154
5.4.2	光网络管理的信息模型	155
5.4.3	光传送网管理的特殊要求	164
5.4.4	光传送网管理系统的结构	164
5.5	光传送网的管理需求	165
5.5.1	网元管理层的管理需求	165
5.5.2	网络管理层的管理需求	167
5.6	光传送网的管理网络	169
5.7	光传送网开销信道的实现	171
	参考文献	173

第 6 章 路由和波长分配算法	176
6.1 概述	176
6.2 路由选路策略	178
6.2.1 路由选路策略类型	178
6.2.2 路由选路策略比较	179
6.3 静态业务路由和波长分配算法	181
6.3.1 线性规划 (Linear Programming, LP)	182
6.3.2 静态 RWA 问题的启发式算法	183
6.4 动态业务路由和波长分配算法	185
6.4.1 动态业务的波长分配算法	186
6.4.2 一种新的算法模型——相对容量影响	189
6.4.3 各种动态波长分配算法性能比较	190
6.4.4 备用路由选路下波长分配算法	193
6.5 路由和波长分配算法矩阵模型	196
6.6 波长变换器	201
参考文献	203
第 7 章 光网络的保护和恢复	205
7.1 网络的保护/恢复概念和一般方法	205
7.1.1 保护和恢复的比较	205
7.1.2 光网络中一般的保护方法	207
7.2 全光网络中的保护方法	213
7.2.1 网络拓扑结构的生存性	213
7.2.2 全光网中环网的保护方法	216
7.2.3 全光 MESH 网的保护方法	219
7.3 全光网络中恢复及性能优化方法	230
7.3.1 光网络恢复概述	230
7.3.2 优化的恢复算法	230
7.4 告警相关性分析及故障定位	230
7.4.1 故障的监测	230
7.4.2 故障定位方法	230
7.5 保护/恢复时间分析	230
7.5.1 倒换时间推导	230
7.5.2 倒换时间分析	230
参考文献	230
第 8 章 IP over 光网络	266
8.1 数据光网络的发展	266
8.1.1 IP 的主要特征	266
8.1.2 数据光网络的实现方案	268

8.2 IP over SDH	270
8.2.1 IP/PPP/HDLC over SDH	270
8.2.2 IP/SDL over SDH.....	271
8.2.2.1 简单数据链路(SDL)协议.....	271
8.2.2.2 IP/SDL over SDH 的映射.....	272
8.3 IP over WDM	273
8.3.1 IP over GbE over WDM.....	273
8.3.2 IP over DPT over WDM	275
8.3.3 IP over WDM 示例.....	276
8.3.3.1 CA*net3.....	276
8.3.3.2 NTT 的 IP 光网络.....	278
8.3.3.3 中国的 IP over WDM 网络—NSFCnet	280
8.4 多协议标记交换.....	281
8.4.1 多协议标记交换 (MPLS) 的基本概念	282
8.4.2 标记分发协议(LDP).....	283
8.4.2.1 LDP PDU	284
8.4.2.2 LDP 消息	285
8.4.3 MPLS 流量工程的实现方式	286
8.4.3.1 资源预留协议 (RSVP)	287
8.4.3.2 约束路由标记分发协议 (CR-LDP)	288
8.5 广义多协议标记交换.....	289
8.5.1 多协议波长标记交换.....	290
8.5.1.1 概述.....	290
8.5.1.2 OXC 控制平面.....	291
8.5.2 广义多协议标记交换.....	294
8.5.2.1 概述.....	294
8.5.2.2 网络的性能分析.....	296
8.6 智能光网络——自动交换光网络.....	296
8.6.1 智能光网络.....	296
8.6.2 自动交换光网络概述.....	297
8.6.3 自动交换光网络控制平面的组成.....	299
8.6.4 自动交换光网络的接口.....	305
8.6.5 ASON 控制平面的传送网.....	306
参考文献.....	308
词汇对照表.....	311

第 1 章 波分复用技术和复用器件

从光纤通信开始发展到 20 世纪 80 年代后期, 光纤通信还主要局限于单一信道的传输, 局限于光/电/光 (O/E/O) 的中继器。但这种系统容量有限, 容量的加大受限于电子器件的速率响应瓶颈, 而且中继设备复杂, 只能适用单一速率。

20 世纪 90 年代以后, 光纤通信成为一个发展迅速、技术更新快、新技术不断出现的技术领域。其中最引人注目的是密集波分复用 (DWDM) 技术和掺铒光纤放大器 (EDFA)。WDM 和 EDFA 的迅速实用化, 为高速率、大容量信息的长距离传输提供了易于实现的方案, 使通信网的传输容量极大地增加。而传输容量的增长又给交换节点带来巨大的压力和急待变革的动力, 从而激发了以波长选路为基础的全光通信网 (ITU-T 定义为光传送网 (OTN)) 的发展和对光网络智能化的需求。可以说, WDM 对整个通信网产生了长期、深远的影响。

1.1 波分复用系统

波分复用 (WDM) 是一项 20 世纪 90 年代在通信网中已经扮演重要角色的技术。它的兴起反映了人类向信息社会迈进的过程中对通信容量和带宽日益增长的需要。自 20 世纪 90 年代以来数据业务 (电子信函、会议电视、点播电视、传真等) 爆炸式的增长, 计算机互联网 (Internet) 的流量迅猛增加, 人们对网络带宽和容量的需求持续稳定地增长。WDM 正是适应这种需求而迅速发展起来的。

光纤通信发展的 20 多年来, 传统的电时分复用的光纤通信系统的速率几乎以每 10 年 100 倍的速度稳定增长, 但其发展速度最终受到电子器件速率响应瓶颈的限制, 在 40Gbit/s 以上很难实现。而 WDM 技术以较低的成本、较简单的结构形式成几倍、数十倍、数百倍地扩大单根光纤的传输容量, 使其成为未来宽带光网络中的主导技术。WDM+EDFA 也被称为 90 年代中新一代光纤通信系统。

1. 波分复用 (WDM)、密集波分复用 (DWDM) 和光频分复用 (OFDM)

从 1970 年第一根低损耗光纤研制成功以来, 光纤通信经历了几次变革。到 20 世纪 80 年代末, 已基本完成由短波长的多模光纤通信系统向长波长的单模光纤通信系统的演变, 单信道的光纤通信系统的速率达到 Gbit/s 的量级, 大大改变了通信网的面貌。然而, 单信道系统仅仅利用了光纤带宽的很小的一部分。光纤具有巨大的带宽, 如图 1-1 所示, 光纤在 1.3 μ m 和 1.55 μ m 波段具有丰富的频率资源, 可以支持多信道的同时传输。随着对网络容量需求量的日益增加和多用户网络的发展, 波分复用 (WDM) 技术的发展和成为必然的趋势。

波分复用技术是指处于不同波长的多个独立光信号, 在同一光纤芯中同时传输。这些光信号可以独立地进行路由选择和检测, 其波长还可以作为源、目的或者路由的标识地址来确定通信的路径。为了允许特定波长的传输、检测和路由, 必须要由具有波长选择功能的光器件来实现, 也就是说波分复用器件是实现波分复用技术的关键。

WDM、DWDM、OFDM 本质上都是光波长分割复用（或光频率分割复用），所不同的是复用信道波长间隔不同。20 世纪 80 年代中期，复用信道的波长间隔一般在几十到几百纳米，如 1300nm 和 1500nm 波分复用，当时被称为 WDM。DWDM 的发展和应用是与光纤放大器的发展与应用联系在一起的，20 世纪 90 年代后，EDFA 实用化，为了能在 EDFA 的带宽内同时放大多个波长的信号，波长间隔必须减小，DWDM 发展起来后，其波长间隔为 nm 量级。

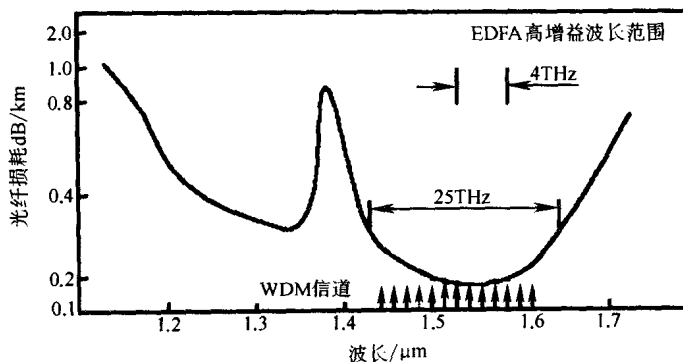


图 1-1 1.3μm 和 1.55μm 窗口的带宽

在 20 世纪 80 年代，OFDM 主要指相干光通信。20 世纪 90 年代以后，非相干的 OFDM 也发展起来，其复用信道间的频率间隔仅为几个 GHz 至几十 GHz。

目前 WDM 系统主要指密集波分复用系统，它的主要优点为：

- 1) 充分利用光纤的低损耗波段，大大增加光纤的传输容量，降低成本；
- 2) 对各信道传输的信号速率、格式具有透明性，有利于数字信号和模拟信号的兼容；
- 3) 节省光纤和光中继器，便于对已建成系统的扩容；
- 4) 可提供波长选路，使建立透明的、具有高度生存性的 WDM 全光通信网成为可能。

2. 波分复用系统的构成

WDM 系统可以分为单向传输方式和双向传输方式，从它对外的光接口来看，又可分为集成式 WDM 系统和开放式 WDM 系统。WDM 传输系统可分为集成式和开放式两种。单向传输的集成式系统的结构如图 1-2a 所示， N 个光发射机分别发射 N 个不同波长，经过光波分复用器 M 合到一起，耦合进单根光纤中传输。到接收端，经过具有光波长选择功能的解复用器 D ，将不同波长的光信号分开，送到 N 个光接收机接收。集成式系统是指接入合波器的 SDH（同步数字体系）终端具有满足 G.692 的光接口，即具有标准的光波长和满足长距离传输的光源。也就是说，集成式系统是把标准的光波长和满足长距离传输的光源集成在 SDH 系统中，整个系统构造比较简单，没有增加多余设备。但当非标准波长的老的 SDH 系统接入 WDM 系统时，还必须引入波长转换器（OUT），将波长转换为标准波长。

开放式系统的组成如图 1-2b 所示。开放系统就是在波分复用器前加有波长转换器（OTU），将 SDH 非规范的波长转换为标准波长。开放是指具有开放的对外光接口，在同一 WDM 系统中，可以接入不同厂商的 SDH 系统。OTU 具有符合 G.692 的标准接口，即输出端光具有标准的光波长和满足长距离传输的光源，它对输入端的信号波长没有特殊要求，可以兼容任意厂家的 SDH 信号，以满足系统的波长兼容性的要求。

在现在已商用的产品中，OTU 依然是光/电/光（O/E/O）的变换。即先用光电二极管 PIN

或雪崩光电二极管 APD 把接收到的光信号转换为电信号, 然后用该电信号对标准波长的激光器重新进行调制, 从而得到新的合乎要求的光波长信号。OTU 常具有 3R 功能, 即有定时、整形和再生电路。OTU 可用于发送端, 也可用于再生中继器中。在再生器中, 除执行 3R 中继, 完成光/电/光转换外, 还需要具有对某些再生段开销字节进行监视的功能, 如对再生段踪迹和误码监测字节 (J_0 和 B_1) 的监测。

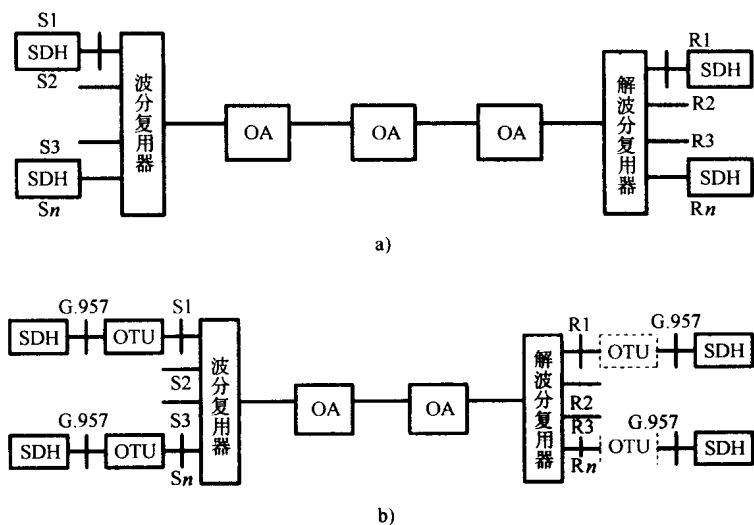


图 1-2 单向 WDM 系统的组成

a) 集成式 WDM 系统 b) 开放式 WDM 系统

OA—光放大器 OTU—光转换器

图 1-3 是双向 WDM 系统。图中 DM 是具有波长选路功能的解复用/复用器。光发射机 T_1 、 T_3 ... 发射波长为 λ_1 、 λ_3 ... 的光信号, 经 DM 送入传输光纤, 在接收端, 再经另一个 DM 的波长选择后送到接收机接收。 λ_2 、 λ_4 ... 是另一方向传输的信号。



图 1-3 双向 WDM 光纤通信系统的组成

注: DM 为解复用/复用器。

WDM 系统的关键器件是复用和解复用器, 其基本结构如图 1-4 所示。这两个器件的引入, 必定会带来一定的插入损耗, 以及由于波长选择功能不完善而引起的复用信道间的串扰。对于解复用器, 插入损耗 IL 和远端串扰 $FC_j(\lambda_i)$ 分别表示为

$$IL = 10 \log(P_1 / P_0) \quad (1-1)$$

$$FC_j(\lambda_i) = -10 \lg[P_j(\lambda_i) / P_i(\lambda_i)] \quad (i, j=1, \dots, n, \text{ 且 } j \neq i) \quad (1-2)$$

式中, P_1 和 P_0 分别为某一波长的信号的输入和输出光功率; $P_j(\lambda_i)$ 是从第 j 个端口输出的波长为 λ_i 的信号的光功率; $P_i(\lambda_i)$ 是从第 i 个端口输出的波长为 λ_i 的信号的光功率。

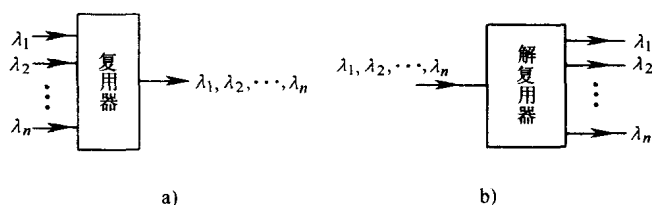


图 1-4 合波器和分波器

a)复用器 (合波器) b)解复用器 (分波器)

另外，回波损耗和偏振相关损耗(PDL)也是波分复用器重要性能。回波损耗定义为：

$$RL = -10 \log(P_r / P_i) \quad (1-3)$$

式中， P_i 是输入的光功率； P_r 是从同一个输入端口返回的光功率。

偏振相关损耗指的是对于所有的偏振态，由于偏振态的变化造成的插入损耗的最大变化值。

3. WDM 系统的标称波长

在WDM系统中，光波长的稳定性是一个重要的问题，ITU-T已建议193.1THz（即1552.52nm）值作为WDM的参考频率，从而为WDM光信号提供较高的频率精度和频率稳定度。WDM的通道间隔是指相邻通路间的标称频率差，可以是均匀间隔，也可以是非均匀间隔的，适当设计的非均匀间隔可以用来抑制G.653光纤中的四波混频效应(FWM)，减小非线性串扰。但目前的规范和大多数的应用多采用均匀通道间隔。对通道间隔均匀的系统，ITU-T规定标准的波长间隔为0.8nm（在1.55 μ m波段对应100GHz频率间隔）的整数倍，如0.8nm、1.6nm、2.4nm、3.6nm等。对于超密集的WDM系统，也采用0.4nm的波长间隔。我国国标《光波分复用系统总体技术要求》中对32波以及16波、8波的WDM系统中心波长的规定如表1-1所示^{[1][2]}。

表 1-1 32、16、8 波 WDM 系统连续频带中心频率

序号	中心频率/THz	32 通道波长/nm	16 通道	8 通道
1	192.1	1560.61	※	※
2	192.2	1559.79	※	
3	192.3	1558.98	※	※
4	192.4	1558.17	※	
5	192.5	1557.36	※	※
6	192.6	1556.55	※	
7	192.7	1555.75	※	※
8	192.8	1554.94	※	
9	192.9	1554.13	※	※
10	193.0	1553.33	※	
11	193.1	1552.52	※	※
12	193.2	1551.72	※	
13	193.3	1550.92	※	※

(续)

14	193.4	1550.12	※	
15	193.5	1549.32	※	※
16	193.6	1548.51	※	
17	193.7	1547.72		
18	193.8	1546.92		
19	193.9	1546.12		
20	194.0	1545.32		
21	194.1	1544.53		
22	194.2	1543.73		
23	194.3	1542.94		
24	194.4	1542.14		
25	194.5	1541.35		
26	194.6	1540.56		
27	194.7	1539.77		
28	194.8	1538.98		
29	194.9	1538.19		
30	195.0	1537.40		
31	195.1	1536.61		
32	195.2	1535.82		

注：※为 WDM 系统使用的波长。

由表 1-1 可见, 32 通道 WDM 系统的频带可以分离为蓝带和红带两个频带, 红带的范围是 1560.61~1548.51nm, 蓝带的范围是 1547.72~1535.82nm, 每个频带中安排 16 个波长, 通带间隔为 0.8nm (100GHz)。另外, 将现有的频带分为两部分, 适于在单根光纤上分别用这两个频带的信号传送两个方向的光信号。16 和 8 通道系统都安排在红带, 通道间隔分别为 0.8nm 和 1.6nm (200GHz)。

中心频率偏移定义为标称中心频率与实际中心频率之差。对于 DWDM, 解复用器带宽有限, 为避免由于环境温度、湿度的变化和器件的老化引起光波长偏离解复用器的通带范围, 光信道中心频率的偏移必须严格限制。我国国标规定, 对于 32 和 16 通路 WDM 系统, 在寿命终了时, 最大中心频率偏移为 $\pm 20\text{GHz}$ (约为 0.16nm)。对于 8 通道 WDM 系统, 为了未来向 16 通道系统升级, 规定对应的最大中心频率偏移也为 $\pm 20\text{GHz}$ 。寿命终了值意味着即在系统设计寿命终了, 考虑到温度、湿度等各种因素仍能满足的数值。

4. 波分复用系统的参考配置

图 1-5 给出 WDM 系统的参考配置^{[1][2]}, 其中 OM/OA (Optical Multiplexer / Optical Amplifier) 表示光复用器/光功率放大器, OA/OD (Optical Amplifier / Optical Demultiplexer) 表示光前置放大器/光解复用器。图中参数为:

- $S_1, \dots, S_n$: 通路 1, $\dots$, n 在发射机光输出连接器处光纤上的参考点;
- $RM1, \dots, RMn$: 通路 1, $\dots$, n 在 OM/OA 的光输入连接器处光纤上的参考点;

- MPI-S: OM/OA 的光输出连接器后面光纤上的参考点, 称为主通道接口的 S 点;
- S': 线路光放大器的光输出连接器后面光纤上的参考点;
- R': 线路光放大器的光输入连接器前面光纤上的参考点;
- MPI-R: OA/OD 的光输入连接器前面光纤上的参考点, 称为主通道接口的 R 点;
- $S_{D1}, \dots, S_{Dn}$: 是 OA/OD 的光输出连接器处的参考点;
- $R_1, \dots, R_n$: 接收机光输入连接器处的参考点。

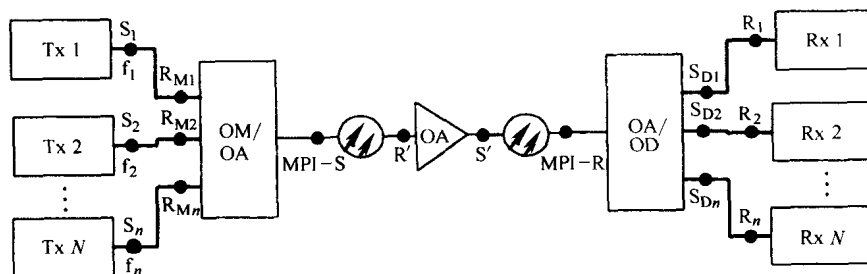


图 1-5 WDM 系统的参考配置

Tx—光发射机 Rx—光接收机 OM—光复用器 OD—光解复用器 OA—光放大器

系统中各个接口的性能指标请见 ITU-T 的建议和我国关于 WDM 的标准。

对于高速率、长距离的波分复用系统, 采用 $nW\text{-}y.z$ 表示无中继光放大器系统的应用代码, $nWx\text{-}y.z$ 为有中继光放大器系统的应用代码, 对于每种应用代码, $nWx\text{-}y.z$ 的含义是:

- n 是最大波长数目;
- W 是代表中继距离的字母, 可为 L、V 或 U, L 代表长距离, V 代表很长距离, U 代表超长距离;
- x 是该应用代码允许的最大中继间隔的数目;
- y 是该波长信号的最大比特率 (STM (同步传送模块等级) 等级)
- z 是光纤类型, 如: .2 代表 G.652 光纤
.3 代表 G.653 光纤
.5 代表 G.655 光纤

5. 波分复用系统的管理技术

WDM 系统的管理是系统正常、经济、可靠和安全地运行的重要保证, 在整个系统中发挥着举足轻重的作用。它的存在可减少系统发生故障的几率, 减少故障修复时间, 增强网络的生存性和强壮性, 降低运行、维护、管理成本。

由于 WDM 和 SDH 系统是处于不同“层”的信号, 其网络管理也应分开。对于实际运行的 WDM 系统, 它既可以承载标准的 SDH 信号, 也可以承载 PDH (准同步数字体系) 信号或其他数字信号, 甚至模拟信号。因此, WDM 系统应有自己的独立的网管, 与 SDH 网管平行, 分别通过 Q3 接口同时送给上层的网络管理层。这样可以增加 WDM 系统的承载的多样性, 真正发挥 WDM 技术“业务透明”的特点。

点到点的 WDM 系统应设置自己独立的网元管理功能 (EM) 层, 应具有在一个平台上至少管理 EDFA、波分复用/解复用器、波长转换器 (OUT) 的功能, 对设备进行性能、故障、配置及安全等方面的管理。

对 WDM 系统而言, 为保持客户信号传送的透明性, 其管理开销信道的实现不同于 SDH 或 ATM 网采用的方式。考虑到 WDM 向全光网发展的长远需要, 最好是能够由光传送网自身实现传送信令的功能, 即通过带外的监控信道来传送管理信息。

带线路放大器的 WDM 系统需要附加光监控信道, 对光层进行监控和管理。光监控信道 (OSC) 的位置一般在 EDFA 的有用增益带宽外 (称为带外 OSC), 光监控信道应满足以下条件:

- 1) 监控通路不限制光放大器的泵浦波长;
- 2) 监控通路不应限制两线路放大器之间的距离;
- 3) 监控通路不能限制未来在 1310nm 波长的业务;
- 4) 线路放大器失效时监控通路仍然可用;
- 5) OSC 传输应该是分段的且具有 3R 功能和双向传输功能, 在每个光放大器中继站上, 信息能被正确的接收下来, 而且还可附加上新的监控信号;
- 6) 只考虑在两根光纤上传输的双向系统, 允许 OSC (运行系统控制) 在双方向传输。以防一旦一根光纤被切断后, 监控信息仍然能被线路终端接收到。

在目前的 WDM 系统中, 监控信道使用的波长为 (1510 ± 10) nm, 速率为 2Mbit/s, 采用伪双极性 CMI 码型。主光通道和光监控信道的关系如图 1-6 所示。

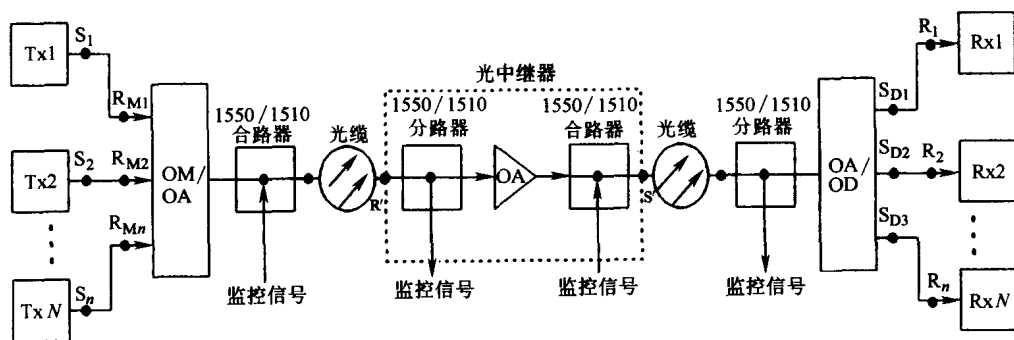


图 1-6 主光通道和光监控信道的关系

由于波分复用系统的容量很大, 又常常用在干线网或大城市的城域网中, 安全性能特别重要。

点到点线路保护主要有两种保护方式。一种是基于单个波长, 即在通道层实施的 1+1 或 1:N 的保护。通道层的 1+1 保护对所有的系统设备都需要有备份, 单波长信号在发送端被永久桥接在工作系统和保护系统上, 在接收端监视从这两个 WDM 系统收到的信号状态, 择优接收。这种方式的可靠性比较高, 但是成本也较高。通道层的 1:N 保护可以使 N 条链路中的某个波长通道由保护链路中的同一波长通道来保护, 从而提高了保护通道的利用率。考虑到一条 WDM 线路可以承载多个波长通道, 因而也可以使用同一 WDM 系统内的空闲波长作为保护通道。

另一种是基于光复用段上保护, 即在光路上, 同时对合路信号进行保护, 这种保护也称为光复用段共享保护 (OMSP)。这种保护只在光路上对多波长信号进行 1+1 保护, 而不对终端线路进行保护。图 1-7 给出光复用段共享保护 (OMSP) 框图, 在发端使用 1:2 光分路器将合路的光信号分送到工作系统和保护系统, 在接收端, 通过 1×2 光开关对光信号进行选