

可重构的多波长光分插复用节点研究*

徐志根¹ 李艳和¹ 张汉一¹ 郭奕理¹ 周炳琨¹ 朱 洪² 何永琪³

(1 清华大学电子工程系,北京 100084)

(2 大唐电信成都光通信分公司,成都 610062)

(3 信息产业部电信科学技术研究院,北京 100083)

摘 要 设计并研制出了一种可灵活重构的多波长 OADM,建立了 OADM 级联光信噪比的理论计算模型并进行了分析计算,给出了 OADM 的内部功率预算.最后对 OADM 设备进行了测试,所有性能指标都达到设计要求,目前已经通过工程验收,并正式在“中国高速信息示范网(CAINOnet)”中运行.

关键词 光网络;光分插复用;波分复用

中图分类号 TN929.1;TP393.03

文献标识码 A

0 引言

光分插复用设备(OADM)是波分复用(WDM)光网络的关键节点设备之一^[1,2].OADM在光域内实现了传统的电分插复用器在时域内完成的功能,具有对信号制式和速率的透明性,是克服传统网络中节点的电子瓶颈问题的关键技术之一.OADM可节省电分/插复用终端,从而缓解长期困扰光纤网络的大量电交换设备和终端设备堆积的问题.同时,OADM配合光交叉互连接节点(OXC)使光传送网(OTN)可以基于波长路由对业务、阻塞率、网络扩展和生存性进行优化和设计.

本文设计了可重构的多波长 OADM 功能体系结构和光路结构,建立了级联信道光信噪比的理论计算模型并进行了分析计算,给出了 OADM 的内部功率预算.采用模块化设计,以光学解复用器/复用器、光开关阵列,以及网元监控管理模块为核心,研制出可灵活重构的多波长 OADM 设备.该设备已经通过 863-300 专家组组织的工程验收,并正式在“中国高速信息示范网(CAINOnet)”中运行.

1 OADM 设备系统设计

1.1 设计目标

OADM 设备方案设计必须综合考虑系统的功能要求、网络应用要求,以及核心器件和功能模块的性能.同时,需满足现有国家标准和通信行业标准,以实现设备横向兼容和纵向兼容性.主要参考标准

有:信息产业部《光波分复用系统技术要求(内部标准)》,以及国际电信联盟(ITU-T)的相关标准.

光网络中,OADM 必须是完整的光网元(ONE)设备,不仅需要完成全光分插复用功能,还必须提供网元监控管理、网络管理和自愈保护等功能.

本文研制的 OADM 设备的主要功能如下:

1)提供的全光网接口:2 个双向传送接口.每个传送接口支持传送 8 个波长,间隔 200 GHz,各波长都可透明地直通及分/插复用.

2)具有软件配置能力,同时分/插复用 8 个波长,支持全光网网络管理.

3)提供分/插复用接口:能提供 8 套带有波长转换器的分/插复用接口,支持 STM-16/OC-48C 速率标准.通过该接口,可以实现与核心路由器、SDH 设备互连,波长转换器能够支持全光网网管.

4)提供网络管理接口:实现简单网络管理协议(SNMP) V2 的 Agent 功能,从而与网络管理系统通信.同时,OADM 提供与本地网元管理系统的接口,实现网元监控和管理.

5)能支持 WDM 自愈环.

1.2 方案设计

OADM 系统总体设计要求结构合理、工作稳定可靠,并且能与整个光网络很好地配合.根据设计目标和功能要求,我们设计并研制出一套可灵活重构的多波长 OADM 设备,其总体结构如图 1 所示.

整个 OADM 系统主要包括以下功能单元:光监控信道单元(OSC)、预放和功放掺铒光纤放大器组(EDFA)、解复用器单元(DMUX)、复用器单元(MUX)、光上下路开关矩阵单元(Switch matrix)、自动保护倒换单元(APS)、电控光衰减器(Att)、多波长信道在线系统内监控和功率均衡单元(PE)、波长变换单元(OTU)和网元管理系统(NEMS).

*国家 863 计划(863300010299)、国家自然科学基金(69990540)及国家重点基础研究发展规划(G2000036604)资助项目

Tel:010-62772635 Email:zhigenxu@tsinghua.org.cn

收稿日期:2003-08-22

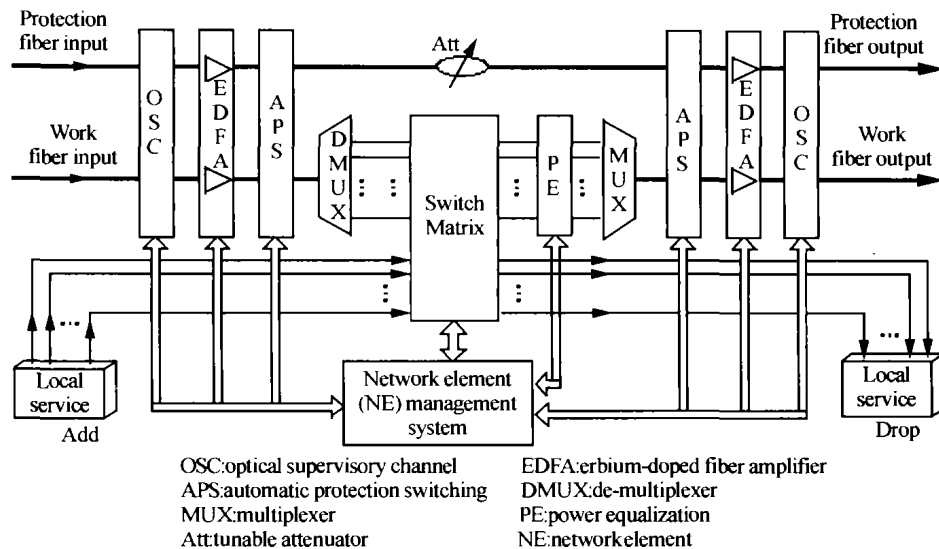


图1 可重构的多波长 OADM 总体结构图

Fig.1 Architecture of the reconfigurable multi-channel OADM

1.3 系统工作原理

保护光纤和工作光纤同时输入到 OADM 节点, 光监控信道单元 (OSC) 处理光监控信号. 输入侧掺铒光纤放大器 (EDFA) 组实现对线路来的信号光功率的预放; 解复用器/复用器单元 (DMUX/MUX) 实现对 WDM 波长信道的解复用和复用; 光上下路开关矩阵单元 (Switch matrix) 实现对上/下路的控制和重配置; 输出侧 EDFA 组实现功率放大; 波长变换单元 (OTU) 对分插复用波长实现波长变换; 电控光衰减器 (Att) 能调节保护纤上的光功率水平; 自动保护倒换单元 (APS) 实现复用段自愈保护倒换功能.

NEMS 可以实现配置管理、故障管理、性能管理和告警管理等; 实现光开关矩阵和本地上/下路监控; 实现网元状态监测、网管控制执行和上报; 采用 SNMP v2 实现网络管理通信和 Agent 功能.

1.4 OADM 级联光信噪比计算模型和功率预算

OADM 的信道级联模型如图 2 所示. 功率均衡控制点取在保护倒换单元 APS 的输出端口, 根据节点隔离原理^[3], 假设有 N 个 OADM 级联在一起, 则第 i 个节点的增益和损耗应满足如下关系

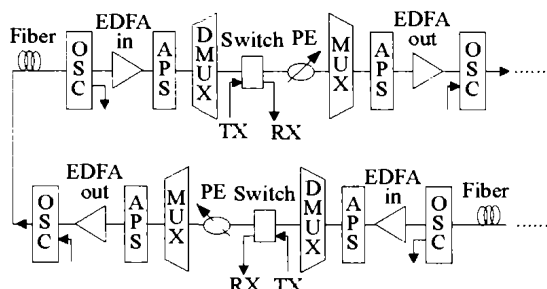


图2 OADM 的信道级联模型

Fig.2 Model of a cascading OADM channel

$$G_{out,i-1} L_{OSC,i-1} L_{Fiber,i} L_{OSC,i} G_{in,i} L_{APS,i} L_{DMUX,i} \cdot L_{Switch,i} L_{PE,i} L_{MUX,i} L_{APS,i} = 1 \quad (1)$$

式中, L_{Fiber} 表示第 i 和 $i-1$ 个 OADM 间光纤损耗,

$L_{OSC,i}$ 是 OSC 损耗, $L_{APS,i}$ 是 APS 损耗, $L_{DMUX,i}$ 是解复用器损耗, $L_{Switch,i}$ 是光开关的损耗, $L_{PE,i}$ 是单信道功率监测与均衡模块的损耗, $L_{MUX,i}$ 是复用器的损耗, $G_{in,i}$ 是输入侧 EDFA 增益, $G_{out,i}$ 是输出侧 EDFA 增益. 下标 i 表示与第 i 个 OADM 相关.

假设: $L_{node,i}$ 为第 i 个 OADM 内 EDFA 间损耗, $G_{node,i}$ 为其增益, $L_{link,i}$ 为第 $i-1$ 个 OADM 输出 EDFA 和第 i 个 OADM 输入 EDFA 之间的损耗, 则

$$L_{node,i} = L_{APS,i} L_{DMUX,i} L_{Switch,i} L_{PE,i} L_{MUX,i} \quad (2)$$

$$G_{node,i} = L_{OSC,i} G_{in,i} L_{node,i} G_{out,i} L_{OSC,i} \quad (3)$$

$$L_{link,i} = L_{OSC,i-1} L_{Fiber,i} L_{OSC,i} \quad (4)$$

假设第 i 个 OADM 的输入信号的单信道功率为 $P_{in,i}$, 则第 i 个 OADM 的输出信号的单信道功率为

$$P_{out,i} = P_{in,i} G_{node,i} = \frac{P_{in,1}}{L_{Fiber,1}} \prod_{j=1}^i L_{Fiber,j} G_{node,j} \quad (5)$$

输入和输出侧 EDFA 都会引入一定的自发辐射噪声 (ASE), 假设输入侧和输出侧 EDFA 的噪声系数分别为 F_{in} 和 F_{out} , B_0 为光信道的带宽, 通常取 $B_0 = 5B$, B 为信号速率. 则输入侧和输出侧 EDFA 引入的自发辐射噪声功率分别表示为^[4]

$$N_{in} = F_{in} (G_{in} - 1) h\nu B_0 \quad (6)$$

$$N_{out} = F_{out} (G_{out} - 1) h\nu B_0$$

第 i 个 OADM 引入 ASE 功率在线路输出端为

$$N_{node,i} = N_{in,i} L_{node,i} G_{out,i} L_{OSC,i} + N_{out,i} L_{OSC,i} \quad (7)$$

第 i 个 OADM 的输出单信道 ASE 噪声功率为

$$P_{out,i}^{ASE} = P_{out,i-1}^{ASE} G_{node,i} + N_{node,i} = \sum_{l=1}^{i-1} \{ N_{node,l} \prod_{j=l+1}^i (L_{Fiber,j} G_{node,j}) \} + N_{node,i} \quad (8)$$

第 i 个 OADM 输出端信道光信噪比 (OSNR) 为

$$OSNR = \frac{P_{out,i}}{P_{out,i}^{ASE}} = \frac{P_{in,1}}{L_{Fiber,1}} \prod_{j=1}^i (L_{Fiber,j} G_{node,j}) / \{ \sum_{l=1}^{i-1} [N_{node,l} \prod_{j=l+1}^i (L_{Fiber,j} G_{node,j})] + N_{node,i} \} \quad (9)$$

针对最坏情况(损耗和噪声系数最大)进行预算和设计,假设所有 OADM 均相同,根据节点隔离原理公式(1),采用自动增益控制功率管理方式,使 OADM 净增益等于相应光纤段损耗,即: $L_{Fiber,i} G_{node,i} = 1, (i \leq N)$,其中 N 为级联节点数. 则第 N 个 OADM 输出的信道 OSNR 为

$$OSNR = P_{out} / (N \cdot N_{node}) \quad (10)$$

根据式(6)和(7),把式(10)化成 dB 为单位

$$OSNR = P_{out} - 10 \log [h\nu B_0] - 10 \log N - F - 10 \log [L_{OSC}^{-1} L_{Fiber}^{-1} + G_{out} L_{OSC}] \quad (11)$$

根据式(11),选如下参数值: $L_{Fiber} = 22$ dB, $F = F_{in} = F_{out} = 4.0$ dB, $G_{in} = 24$ dB, $G_{out} = 19$ dB, $L_{OSC} = 1.5$ dB, $L_{node} = 18$ dB,当中心波长为 1550 nm,光带宽 B_0 为 0.1 nm 时, $10 \log [h\nu B_0] = -58$ dBm.

图 3 给出了在不同输出信道功率 P_{out} 的情况下,光信噪比与级联的 OADM 节点数目之间的关系. 可以看出:1)随着级联 OADM 数目的增加,OSNR 显著地降低,数目越小,下降得越快;2)随着 OADM 输出信道功率 P_{out} 的增加,OSNR 相应增加,但随着 P_{out} 增大, OADM 中 EDFA 模块进入输出饱和状态,限制了 P_{out} ,也会使噪声系数 F 恶化.

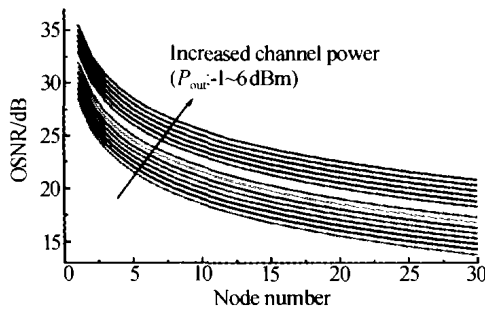


图 3 OADM 信道级联光噪比
Fig. 3 OSNR of the cascading OADM channel

表 1 给出了几种情况下输出信道 OSNR 计算结果($L_{Fiber} = 22$ dB,相当于 80 km 常规单模光纤损耗)

表 1 光信噪比计算结果

N	OSNR/dB	
	$P_{out} = 0$ dBm	$P_{out} = 5$ dBm
1	29.5	34.5
5	22.6	27.6
8	20.5	25.5
10	19.5	24.5
12	18.7	23.7
16	17.5	22.5
20	16.5	21.5

本文设计的 OADM 设备要求输出信道级联 OSNR ≥ 22 dB. 计算表明,当 P_{out} 为 0 dBm, 3 dB 和 5 dBm 时,最多可以级联的 OADM 数目分别为 6、12 和 18. 所以在进行功率预算时,需综合考虑光信噪比、EDFA 饱和增益、功率均衡单元的调节范围等情况.

表 2 给出了 OADM 内部功率预算.

表 2 OADM 系统功率预算

参考点	信道功率/dBm	
	最低	最高
OADM 输入端	-22.0	-17.0
输入侧 APS 输出端	-23.5	-18.5
输入侧 EDFA 输出端	+0.5	+5.5
输出侧 APS 输出端	-17.5	-12.5
输出侧 EDFA 输出端	+1.5	+6.5
OADM 输出端	0	+5.0

2 OADM 设备研制和测试结果

2.1 OADM 设备

图 4 是本文研制的 OADM 设备的照片. 一套 OADM 设备采用 1 个 2.6 m 高的标准机架,包括两个子架:WDM 光接口子架和分插复用子架,能同时处理 8 路波长信道的分插复用,上下路波长可以根据需要配置. 具备完善的网元管理和故障监测、管理、定位功能,能监测关键元器件的功能及运行状态,并支持自愈环.

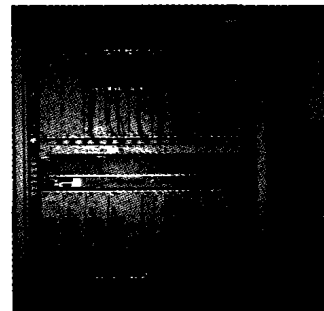


图 4 OADM 设备照片
Fig. 4 Photo of the OADM equipment

2.2 OADM 设备测试结果

图 5 给出了 OADM 设备参考点的设置,其中, MPI-R 是工作光纤输入点, MPI-S 是工作光纤输出点, MPI-R' 是保护光纤输入点、MPI-S' 是保护光纤输出点、 R_s 是上路 OTU 单元输入光纤接入点、 $R_{s,M}$ 是上路光纤接入点、 $S_{M,S}$ 是下路光纤输出参考点.

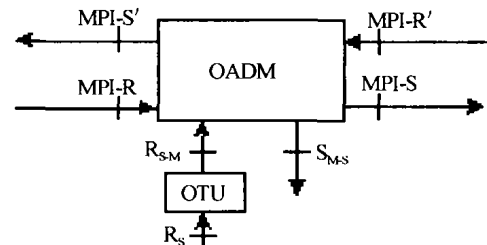


图 5 OADM 设备参考点设置
Fig. 5 Reference point of the OADM equipment

OADM 设备的主要测试结果如下(光谱分析仪分辨率设为 0.1 nm):

1) MPI-S 点输出信号中心波长和中心波长偏移:配置 8 个信道全部上路. 标称波长为:193.5 ~ 192.1 THz 的 8 个波长,波长间隔为 200 GHz. 测试

结果:中心波长偏移值 ≤ 0.07 nm(~ 9 GHz).

2) MPI-S 点总发送光功率:直通状态下, MPI-R 总功率 -11.3 dBm, MPI-S 点发送功率 11.0 dBm; 上路状态下, MPI-S 点发送功率为 10.9 dBm.

3) MPI-S 点每通路输出光功率:上路状态下, MPI-S 点信道功率最高为 1.9 dBm, 最低 1.5 dBm, 信道不均衡性 ≤ 0.4 dBm; 直通状态下, MPI-R 点输入信道功率最高为 -18.5 dBm, 最低 -18.7 dBm, 此时, MPI-S 点信道功率最高为 2.0 dBm, 最低为 1.5 dBm, 信道不均衡性 ≤ 0.5 dBm. 图 6(a) 为 MPI-S 点光谱.

4) MPI-S 点每通路光信噪比:上路状态, MPI-S 点信道 OSNR 最高 38.7 dB, 最低 37.4 dB; 直通状态, MPI-R 点输入信道 OSNR 最高 34.8 dB, 最低 34.1 dB, 此时, MPI-S 点信道 OSNR 最高为 34.7 dB, 最低 30.0 dB. OADM 最大等效噪声指数为 4.4 dB.

5) 下路波长平均光功率: MPI-R 点信道光功率最高为 -18.5 dBm, 最低 -18.7 dBm, 此时, SM-S 点下路信道光功率最高为 2.0 dBm, 最低 1.6 dBm.

6) 串扰特性:下路信号之间的串扰小于 -40 dB、下路信号对直通信号的串扰小于 -40 dB、直通信号对下路信号的串扰小于 -40 dB. 图 6(b) 给出了 SM-S 点典型的下路光谱.

7) 功率代价:波长通过 5 个节点、400 km 常规单模光纤后的功率代价为:0.8 dBm(误码率 BER 为 10^{-12} 时), 如图 7 所示.

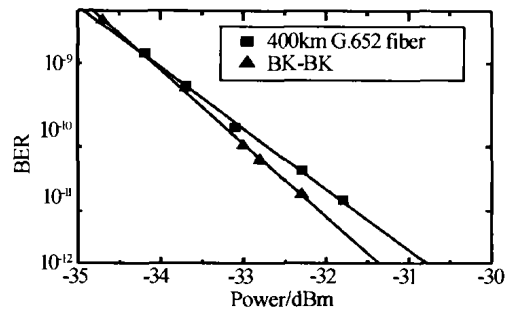


图 7 OADM 设备功率代价

Fig.7 Power penalty of the OADM equipment

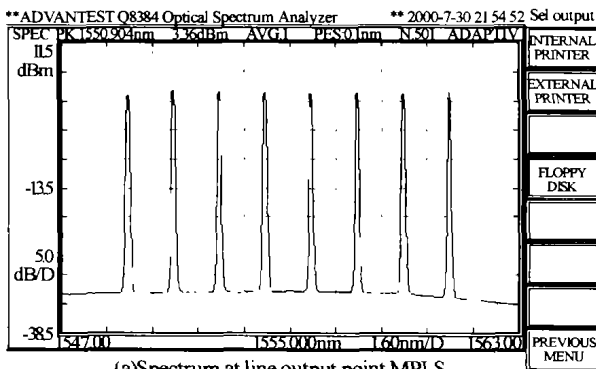
8) OTU、监控信道、公务单元、网元管理和网络管理等性能指标均达到设计要求.

3 结论

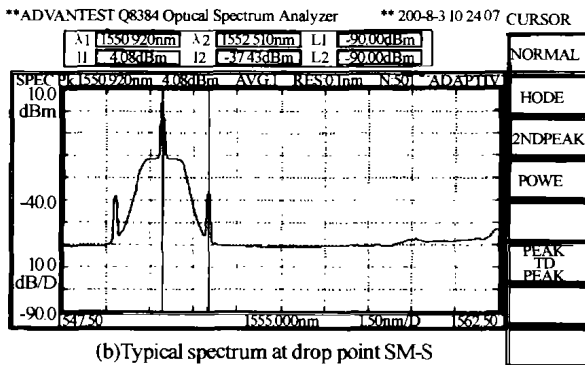
可灵活重构的多波长 OADM 设备使光网络具有更大的组网灵活性和生存性,同时降低光网络成本^[5,6]. 本文设计的 OADM 设备面向实用化和产业化,分插复用功能和各项性能指标都达到或超过了设计要求,通过在 CAINOnet 的实际运行和操作,表明其性能稳定可靠. 随着智能光网络的提出和发展, OADM 设备将进一步智能化.

参考文献

- 1 Mukherjee B. WDM optical communication networks: progress and challenges. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, **18**(10):1810 ~ 1824
- 2 Green P. Progress in Optical Networking. *IEEE Communications Magazine*, 2001. 54 ~ 61
- 3 Zhou J, O'Mahony M J. Power management system design of an optical multiwavelength transport network. *IEE Proc Optoelectron*, 1996, **143**(3):178 ~ 188
- 4 Qin Tao, Zhang Hanyi, Zheng Xiaoping. Study on Optical SNR of OXC chains. *APOC'2001, Proc SPIE*, **4585**: 122 ~ 127
- 5 王健全, 顾晓仪. 一种新型多功能的 OADM 结构. *光子学报*, 2003, **32**(8):943 ~ 947
Wang J Q, Gu G Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):943 ~ 947
- 6 韩一石, 丁金妃, 何赛灵. 一种新型光分插复用器及其在 WDM 自愈环网中的应用. *光子学报*, 2003, **32**(12):1479 ~ 1482
Han Y S, Ding J J, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12):1479 ~ 1482



(a) Spectrum at line output point MPI-S



(b) Typical spectrum at drop point SM-S

图 6 OADM 设备信道级联光噪比
Fig.6 OSNR of the cascading OADM channel

Study on the Reconfigurable Multi-channel Optical Add/Drop Multiplexer

Xu Zhigen¹, Li Yanhe¹, Zhang Hanyi¹, Guo Yili¹, Zhou Bingkun¹, Zhu Hong², He Yongqi³

¹ Dept. of Electronic Eng., Tsinghua University, Beijing 100084

² Datang Telecom. Technology Co., Ltd., Optical Communication Branch, Chengdu 610062

³ China Academy of Telecom. Technology, Ministry of Information Industry, Beijing 100083

Received date: 2003-08-22

Abstract A reconfigurable multi-channel optical add/drop multiplexer (OADM) is developed. A calculating model for analyzing the optical signal-to-noise ratio (OSNR) of the cascading channels is presented, as well as the numerical calculation results. The internal power budget of the OADM is also given. Finally, the OADM is tested and the results show that all the performance objectives are achieved. The OADM has passed the engineering receiving inspection and operated in "China Advanced Information Optical Network (CAINOnet)".

Keywords Optical network; Optical add/drop multiplexer (OADM); Wavelength division multiplexing (WDM)



Xu Zhigen received the B. S. and M. S. degrees from the Class for Special Gifted Juvenile in Huazhong University of Science and Technology, China, in 1994 and 1997, respectively. From 1997, he was a Ph. D. candidate in the Department of Electronic Engineering of Tsinghua University. His interests include optical communication networks and systems.