

7 953839

学校代码: 10246

学 号: 033021059

復旦大學

硕 士 学 位 论 文

(专业学位)

粗波分复用 (CWDM) 光纤通信系统的研究与实施

院 系 (所): 信息科学与工程学院

专 业: 电子与通信工程

姓 名: 吴 楚

指 导 教 师: 蒋凤仙 副教授

完 成 日 期: 2005 年 10 月 16 日

摘要

近年来,随着通信市场的急剧扩大,对带宽的需求也迅速增加,为了充分利用光纤巨大的带宽资源,光波分复用技术得到了长足发展。

本文通过对光波分复用技术的原理、主要特点以及基本结构和关键技术的简单介绍,比较了密集波分复用(DWDM)和粗波分复用(CWDM)的特点和区别,介绍了CWDM系统在城域网建设中的优势,并着重介绍了CWDM技术的原理和实现方法。

在此基础上,本文详细阐述了我们研发成功并推向国际市场的一套性价比较高的CWDM系统的硬件设计和软件设计,各章节的主要内容安排为:

本文前面三章主要介绍了WDM的基本原理,由于CWDM相对于DWDM具有设备成本较低、功耗低、维护成本低、体积小等优势,在城域网建设中得到广泛的应用。最后详细介绍了CWDM系统的关键技术和应用实例。

第四章详细介绍了该系统的硬件和软件的设计,并重点介绍了CWDM系统中关键的功能模块——多速率自适应光波长适配器(WLA)——的详细设计。

第五章对WLA盘样机的主要技术指标进行了测试,并给出了测试结果。测试结果表明,该多速率自适应波长适配器达到了系统设计的要求。

本人作为该项目的主要负责人之一,在项目开发前期承担了多速率自适应波长适配器(WLA)的硬件设计工作,并在项目后期负责主持样机的功能及性能测试工作。

【关键词】 波分复用,粗波分复用,城域网,多速率自适应波长适配器

中图分类号:TN914.34 文献标示码:A

ABSTRACT

In the recent years, with the rapid expansion of modern communication market, wide band and high speed is more concerned than any time in the past, especially in the area of optical communication, in order to utilize the huge resource of bandwidth of optical fiber, optical wavelength division multiplexing technology have a great progress.

This thesis introduces the principle and main characteristic of optical wavelength division multiplexing, and analyzes its basic structure and pivotal technique. After that, this thesis lists the contrast between Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) and Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM), and in particular, presents the fundamental and realization of CWDM.

On this fundamental, this thesis introduces the design of hardware and software of a CWDM system, which has been successfully entered in international market. The major content of this article is shown as following:

In the first three chapters, this thesis presents the basic principle of WDM. Because of some advantages such as low cost, low power consume and small size, CWDM system is applied widely in metro area net.

The fourth chapter introduces a CWDM system, and the design of hardware and software. And then mainly explains the design of wavelength adaptor (WLA), an important module in this CWDM system.

After the prototype WLA board is finished, function test is mandatory. The test result is shown in the fifth chapter. According to these result, this WLA can meet the requirement of system design.

As one of leaders of this project, I took charge of the development of WLA board, and lead a team to implement the function test and analyze the test result.

【Key Words】 Wavelength Division Multiplexing, Coarse Wavelength Division Multiplexing, Metro Area Net, Wavelength Adaptor

第一章 引言

自上世纪 80 年代以来, 光纤通信技术得到了巨大的发展, 光纤通信网络也随之成为现代通信网络的基础平台。但随着全球通信业务呈几何级数增长, 早期所敷设的光纤通信网络出现了传输能力不足的问题, 采用何种方式进行网络扩容成为一个亟待解决的问题。

首先最容易想到的方式是敷设更多的光纤。虽然随着技术不断成熟, 单就光纤本身而言, 相对成本并不太高, 但光纤敷设过程中需要挖地沟, 埋管道等, 这样不仅使敷设成本大大提高, 而且施工周期较长。

另一种传统的扩容方法是采用时分复用 (TDM) 技术提高传输比特率, 如 PDH 和 SDH 系统, 在 90 年代中期以前是主要的扩容方式, SDH 的比特率已从 155Mbps 到 622Mbps 再到 2.5Gbps 甚至 10Gbps, 此时的 TDM 方式已接近硅和砷化镓技术的极限, 很难再上到一个新的台阶。并且越是往高速发展, 器件的价格越是急剧攀升, 扩容成本越高。在这种背景下, 光波分复用 (WDM) 技术应运而生, 并由于其在大容量光传输业务中所体现的突出的优点而在得到长足发展。

由于现在敷设的光纤基本上都是 G. 652 的标准单模光纤, 具有如图 1.1 所示的损耗谱。

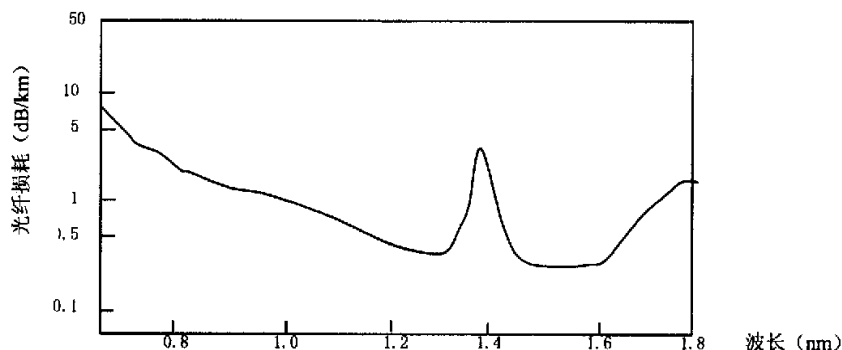


图 1.1 单模光纤损耗谱示意图

从上图可以看出, 除了在 1385nm 附近有一个 OH⁻根离子吸收峰导致损耗比较大外, 其它区域光纤损耗都小于 0.5dB/km。现在人们所利用的只是光纤低损耗频谱(1310~1550nm)极少的一部分。以常规 SDH 2.5Gb/s 系统为例, 在光纤的带宽中只占很小一部分, 大约只有 0.02nm 左右。而从理论上, WDM 技术可以利用的单

模光纤带宽可达到 200nm, 即 25THz 带宽。(通常我们把 1525~1565nm 称为 C 波段, 而把 1570~1620nm 称为 L 波段, 1400nm 附近称为 S 波段。)因而目前光纤的带宽远远没有被充分利用。WDM 技术的出现正是为了充分利用这一带宽, 而光纤本身的宽带宽, 低损耗特性也为 WDM 系统的应用和发展提供了可能。

WDM 技术充分利用了光纤的巨大带宽资源, 使单根光纤的传输容量增加几倍甚至几十倍, 从而降低了光缆线路的敷设成本, 并增加了网络扩容的灵活性, 因此在发展宽带业务、网络扩容等方面获得了广泛的应用。

通信系统的设计不同, 波长之间的间隔也各不相同。目前正式投入商用的 WDM 系统按信道间隔密度可分为密集波分复用(DWDM)和粗波分复用(CWDM)。DWDM 系统通常工作在 C 波段, 其信道间隔一般为 1.6nm 或 0.8nm 甚至更小。而 CWDM 系统通常工作在 S+C+L 波段, 其信道间隔一般 10nm 或 20nm。

相对 DWDM 系统而言, CWDM 系统具有设备成本较低、功耗低、维护成本低、体积小等优点, 板卡种类和数量也较少。但由于波长范围较宽, 不便于使用掺铒光纤放大器(EDFA)进行在线放大, 所以传输距离也比采用 EDFA 的 DWDM 系统小。但随着技术和工艺的不断进步, 大功率的激光器和高灵敏度的接收器已正式投入商用, 目前 CWDM 的传输距离已可以达到 80km。

正是由于 CWDM 系统的这些特点, 近年来在城域接入网中得到了越来越多的应用。城域接入的业务种类很多, 如传统的 SDH 信号、百兆/千兆以太网、数据、图象、音频视频信号等, 以及局域网和线路出租业务等。传输信号的带宽的跨度从 100M 到 2.5G 甚至更高(10G), 且信号的帧结构也各不相同, 从而对传输系统的灵活性也提出了较高的要求。

本文主要介绍了一套由 A 公司推出的性价比高、功能强大、组网灵活的 CWDM 系统的工作原理及实现方法, 全文内容由四部分组成, 包括 WDM 系统的发展历史与现状, CWDM 系统的关键技术及在城域网应用中的优势, CWDM 系统的设计与实现, 以及 CWDM 系统测试方法和测试结果。其中重点介绍一种多速率自适应光波长适配器的设计与实现。

本人作为该项目的主要负责人之一, 承担该系统中多速率自适应光波长适配器模块的开发和样机测试, 并对测试结果进行分析, 证明该模块完全能满足系统设计的要求。

第二章 WDM 的基本原理

2.1 WDM 技术的概念

所谓波分复用（WDM: Wavelength Division Multiplexing）技术，就是为了充分利用单模光纤低损耗窗口的巨大带宽资源，按照一定的波长（或频率）间隔，把光纤的低损耗窗口划分成若干个信道，然后将需要传输的多路光信号调制在这些信道对应的光波长上，通过专用的光器件将这些不同波长的光信号耦合一根光纤进行传输，并在接收端将这些不同波长的光信号分离的一种复用方式。简言之，就是在光纤通信系统中用一根光纤同时传输两路或两路以上光信号的一项技术。

WDM 技术本质上可以理解为光域上的频分复用（FDM）技术。每个波长通路都是通过频域的分割来实现，每个通路占用一段光纤的带宽。由于光载波的频率很高，相邻通道的频率相差很大（0.8nm 大约对应 100GHz），人们更倾向于用波长来定义这种频率上的差别，因此，这种复用技术通常称为波分复用技术。

2.2 WDM 技术的主要特点

1. 充分利用光纤带宽

WDM 技术充分利用了单模光纤巨大的带宽资源，使光纤的传输容量比单波长传输增加几倍甚至几十倍，从而在很大程度上解决了光传输的带宽问题。

2. 透明传输特性

由于 WDM 技术只是对被传输信号的波长进行变换、综合和分离的处理，而不改变信号的内容和帧结构，与信号速率及电调制方式无关。因此可以对多种业务（如 SDH 业务、ATM 业务、数据业务、音频/视频业务等）进行透明传输。

3. 组网灵活

WDM 系统一般可以组成点到点、链形、环形等多种网络形式。组建动态可重构的光网络。在网络节点使用光分插复用器（OADM）直接上、下光波长信号，或者使用光交叉连接设备（OXC）对光波长直接进行交叉连

接，可以组成具有高度灵活性、高可靠性、高生存性的全光网络。

4. 业务扩展性能好

网络扩容时不需要敷设更多的光纤，也不需要使用高速的网络部件，只需要换端机和增加一个附加光波长就可以引入任意新业务或扩充容量，因此 WDM 技术是理想的扩容手段。

5. 支持单纤双向传输

由于不同波长的光信号之间彼此独立，使得在同一根光纤中实现不同波长光信号的双向传输成为可能。

2.3 WDM 系统的基本结构和关键技术

2.3.1 WDM 系统的基本结构

一般的 WDM 系统主要由以下四部分组成：光收发器、复用/解复用器、光监控信道和光中继放大器。（如图 2.1 所示）。

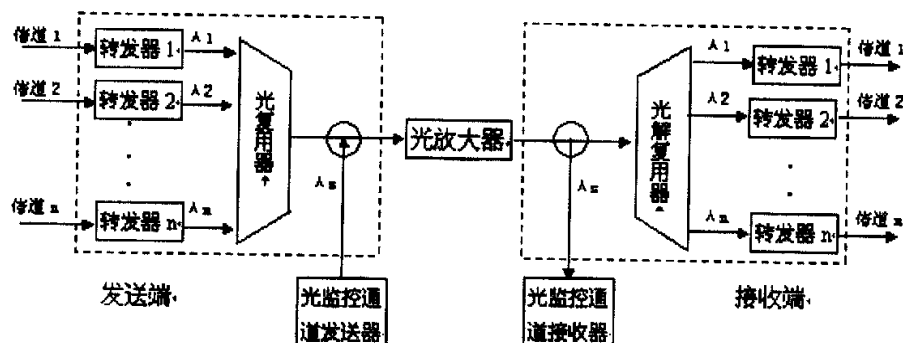


图 2.1 WDM 系统结构示意图（单纤单向）

WDM 系统的基本工作原理是在发送端用光转发器（OTU）将若干个用户端传来的非标准波长的光信号转换成 ITU-T 规定的标准波长，然后由光复用器将不同波长的若干个光信号组合起来（复用），并耦合到光缆线路上的同一根光纤中进行传输，然后在接收端再用光解复用器将组合波长的光信号分解成标准波长的

光信号（解复用），并通过 OTU 处理还原出原来的非标准波长的信号，然后送入不同的用户端。

因为光纤的损耗，经过长距离传输后接收端所收到的光功率可能会低于接收器的接收灵敏度，这时需要在线路上采用光放大器(OA)对光信号进行中继放大。目前在 DWDM 系统中广泛商用的光放大器多数是掺铒光纤放大器(EDFA)。而对于 CWDM 系统，由于波长范围(1470~1610nm)超出了 EDFA 的带宽(1530~1565nm)，目前一般不采用光放大器。一旦宽带的 LAMAN（拉曼）光放大器进入商用，CWDM 系统也可以进入长距离传输市场。

光监控通道(OSC)的主要功能是监控系统内各信道的传输情况，帧同步字节、公务字节以及网管所用的开销字节等都是通过光监控通道进行传递。如图 2.1 所示，在发送端将光监控通道发送器产生的光监控信号与业务信道的光信号合波后一起输出。而在接收端将光监控信号与业务信道的光信号分离。对于 DWDM 系统，光监控通道的波长通常为 1510nm，而在 CWDM 系统中，一般采用 1310nm 作为光监控通道。

2.3.2 WDM 系统的关键部件

根据 WDM 的基本工作原理，我们不难想到：只要有两种关键部件，再加上光纤，就可以组成一个基本的 WDM 系统。一种是能将非标准波长转换成标准波长的光转发器，另外一种为波分复用器（包括光复用器和光解复用器）。

1. 光转发器

如图 2.2 所示是一个光转发器的示意图。

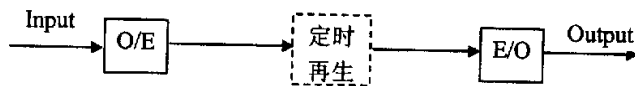


图 2.2 O/E/O 型光转发器示意图

光转发器的波长变换方式可分为两类：光/电/光(O/E/O)和光-光(O/O)。O/O 变换技术主要有基于半导体光放大器的交叉增益调制(XGM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频效应(FWM)和基于半导体激光器的布拉格反射器、双稳型 LD 等方法构成的全光波长变换器，但目前尚无商用。在现在已经商用的系统中，依然使用的是较为成熟的 O/E/O 方式。即先用 PIN 或 APD 光电二极管把光信号转换

成电信号,经定时再生整形后,对标准波长激光器进行调制,从而得到符合 ITU-T 标准的波长。

光纤通信系统的传输距离受到系统损耗和色散的限制。在高速率传输情况下,色散占主要地位。而色散问题通常需要选择谱宽极窄的半导体激光器来解决。实践证明,采用直接调制方式会使半导体激光器在高速率时产生啁啾,限制了系统的传输距离。为此 WDM 系统使用的光源必须放弃传统的直接调制方式,采用外调制方法,即所谓外调制型光源。

2. 波分复用器

波分复用器 (OMD) 包括复用器和解复用器。

光复用器用于传输系统发送端,是一种具有多个输入端口和一个输出端口的器件,它的每一个输入端口输入一个预选波长的光信号,输入的不同波长的光波由同一个输出端口输出。

光解复用器用于传输系统接收端,正好与光复用器相反,它具有一个输入端口和多个输出端口,它将多个不同波长的光信号分离开来。

对复用/解复用器的基本要求是:插入损耗低、隔离度高、良好的带通特性、温度稳定性好、复用波长数多、较高的分辨率等。

光复用器一般有耦合器型、介质膜滤波器型和集成光波导型等种类。光解复用器主要有介质膜滤波器型、集成光波导型、布拉格光栅型等种类。其中,集成光波导技术使用最为广泛,它利用光平面波导构成 $N \times M$ 个端口传输分配器件,可以接收多个支路输入并产生多个支路输出,利用不同通道的置换,可用作复用器,也可用作解复用器。具有集成化程度高的特点,但是对环境较为敏感。

3. 光分插复用器

光分插复用器 (OADM---Optical Add Drop Muxs) 实现在 WDM 光纤中有选择地上/下 (add or drop) 特定的任何速率、格式和协议类型的所需光波长信道。它是高速大容量 WDM 光纤网络与用户接口的界面。OADM 一般是复用器、解复用器、光开关阵列的单片集成或混合集成。可调波长工作的 OADM 器件正在开发之中,并且已取得突破性进展。另外 WDM 光网络间的交叉互连也将逐步过渡到完全采用光的形式进行。国际上已经有单片集成 OXC 的实验室工作报告,但是更多的工作是集中在其中的关键器件上,主要有为了解决网络阻塞和合理利用网络资源的波长转换器件。AWG (Array Waveguide Grating) 是最适于 DWDM 复用与解复用以及作为核心器件构成 OADM 和 OXC 的新型关键器件。因为 AWG 可与石英光纤

高效耦合使插入损耗很低、能够实现低成本集成。此外，AWG 减轻了对光源面阵的集成度的要求，采用多个单波长激光器与其耦合就可以实现 DWDM 目标。该研究的技术关键在于掌握厚层波导的制备技术，设法避免因应力引入偏振色散，甚至导致器件破裂。

此外，WDM 的关键器件还包括光放大器等，在本文中不作展开。

2.4 DWDM 和 CWDM 系统的比较

WDM 系统按照不同波长之间的间隔大小分为密集波分复用 (DWDM) 和粗波分复用 (CWDM)。CWDM 和 DWDM 的区别主要有二点：一是 CWDM 载波通道间距较宽，因此，同一根光纤上一般只能复用 8 到 16 个左右波长的光波，“粗”与“密集”称谓的差别就由此而来；二是 CWDM 调制激光采用非冷却激光，而 DWDM 采用的是冷却激光。冷却激光采用温度调谐，非冷却激光采用电子调谐。由于在一个很宽的波长区段内温度分布很不均匀，因此温度调谐实现起来难度很大，成本也很高。CWDM 避开了这一难点，因而大幅降低了成本，整个 CWDM 系统成本只有 DWDM 的 30%。CWDM 是通过利用光复用器将在不同光纤中传输的波长结合到一根光纤中传输来实现。在链路的接收端，利用解复用器将分解后的波长分别送到不同的光纤，接到不同的接收机。

DWDM 系统的波长间距一般为 200GHz (1.6nm)，100GHz (0.8nm) 或 50GHz (0.4nm)，将来的系统中可能会有更窄的间距。DWDM 系统的工作波长是依据国际电信联盟 (ITU) 的标准定义的。在 DWDM 系统中，采用分布反馈 (DFB) 激光器作为光源，后者的温度漂移系数为 0.08nm/°C，它需要采用冷却技术来稳定波长，以防止由于温度变化波长漂移到复用器和解复用器的滤波器通带之外。

CWDM 系统采用的 DFB 激光器不需要冷却，当 CWDM 系统工作在 0°C 到 70°C 的温度范围内，其激光器的波长一般会有 6nm 的漂移。这个波长漂移再加上激光器生产过程造成的 ±3nm 波长变化，总共大约有 ±12nm 的变化。这样就要求光滤波器的通带和激光器信道间距必须足够宽。在这些系统中，在信道带宽为 13nm 的情况下信道间距一般为 20nm。

当复用的信道数为 16 或者更少时，在成本、功耗要求和设备尺寸方面，CWDM 系统比 DWDM 系统更有优势。

CWDM 和 DWDM 系统之间的成本差别主要是由于硬件和运营成本方面的差别造成的。虽然 DWDM 系统中的激光器比 CWDM 系统中的激光器昂贵，但是对于长途传

输和大容量的大型城域环形网而言，带冷却器的 DFB 激光器更为经济。

DWDM 的收发设备要比 CWDM 系统的同类产品贵四五倍，DWDM 的收发设备价格高与激光器的许多因素相关。CWDM 的激光器与 DWDM 激光器制造上的波长容差是一个非常关键的因素，DWDM 激光器的波长容差的典型值为 $\pm 0.1\text{nm}$ 。然而 CWDM 激光器的波长容差却高达 $\pm 2\sim 3\text{nm}$ 。另外，激光片的成品率低也增加了 DWDM 激光器的造价。此外，带 Peltier 冷却设备和热敏电阻的蝶形 DWDM 激光器要比无冷却的同轴 CWDM 激光器贵得多。

在复用器和解复用器方面，DWDM 和 CWDM 的造价差别主要是由于 CWDM 的滤波器包含的层数少，故 CWDM 滤波器的成本比 DWDM 滤波器的成本低。DWDM 系统中使用的 100GHz 滤波器一般大约有 150 层，而 CWDM 系统的 20nm 滤波器大约有 50 层。CWDM 滤波器的成本比 DWDM 滤波器的成本要少 50%，预计在未来的 2 到 3 年内，自动化生产的成本可望再降 1/3。此外，新的滤波器和复用器/解复用器技术的采用有望进一步缩减成本。

2.5 CWDM 系统在城域网建设中的优势

近年来，随着 3G（第三代数字通信）等新技术的设备和成熟度进一步提高，再次带动了一度低迷的传输网和 IP 局域网等相关市场的复苏。2004 年底，美国 Light Reading 公司公布了中国宽带市场调查结果，数据显示 2004 年我国宽带服务需求急剧增加，仅 2004 年上半年用户数量达到 3000 万人。来自中国互联网信息中心的数据也显示，互联网用户和宽带接入也在飞速增长，已经成为全球最大的宽带市场。发展宽带业务是众多运营商今后一个时期的战略性任务，而目前国内长途骨干网的建设已经基本完成，网络的带宽瓶颈逐渐转移到了城域网，宽带城域网的建设正在成为电信市场的热点。

由于城域网所承载的业务灵活多样，带宽颗粒分布几乎没有严格的规律和可预见性，要求传输系统有足够的带宽来满足对多种业务的汇聚。考虑到 WDM 系统巨大的带宽和对传输数据的透明性，人们自然希望把 WDM 系统作为城域网中的传输平台。而城域网的用户群远小于长途骨干网，也就是说分摊成本的用户较少。这就从根本上决定了应用于城域网的解决方案必须兼顾成本和带宽。

从 2.4 节的对比，我们不难看出 CWDM 无疑比 DWDM 更适合作为城域网建设的解决方案。事实上，在城域网中，由于传输距离短，不必使用放大器，对光纤的传

输衰减值也不太敏感,采用 CWDM 粗波分复用技术可以降低对器件、部件的性能要求,从而大幅度降低成本。

CWDM 系统最大的优势在于成本低廉,其主要表现在器件、功耗和集成度等几个方面。

- 1) 器件成本低。
- 2) 功耗低。
- 3) 体积小,集成度高

第三章 CWDM 系统的实现

3.1 CWDM 技术的历史

粗波分复用技术在上个世纪 80 年代初期就曾经被人们用来在多模光纤上传输数字视频信号。Quante 公司推出了一种工作在 850nm 窗口的四波长系统, 每波长传输的信号速率为 140Mb/s。

国际电联通信标准部门 (ITU-T) 针对波分复用的技术发展, 在 2001 年对其作了新的分类。将通道间隔在 1000 GHz 以下的称为 Dense WDM, 并使用统一的缩写 DWDM。将通道间隔小于 50nm 的称为 Coarse WDM, 并使用统一的缩写 CWDM。将通道间隔 350 nm 的称为 Wide WDM, 并使用统一的缩写 WWDM。2002 年 6 月, ITU-T G. 694. 2 建议提出了波长间隔为 20nm, 传输距离在 50km 以内, 基于单模光纤的 CWDM 技术的相关细节, 将 CWDM 的中心频率定在 1270nm~1610nm 的 18 个波长上, 波长间隔为 20nm, 光复用器及解复用器 (8 路) 的插损定为 (带连接头) 3. 3dB。而涉及到点到点 (Point to Point) CWDM 设备光口指标的建议 G. capp 在 2003 年 10 月的会议上会通过。

CWDM 由于具有器件成本低、设备体积小、功耗低、可靠性高的优点, 在城域网、接入网、光纤区域存储网中得到青睐。它的传输距离短、复用波长少的缺点在这些应用环境中变得可以接受。特别是在城域网中, 它与密集波分复用技术互相补充, 能提供性价比很高的建网方案。从 2001 年开始, 不断有设备制造商推出 CWDM 设备, 并在相关行业得到应用。国外的 Luminent, ONI, Sorrento, Transmode, LuxN, AFC 等公司在 2001 年就推出 CWDM 产品。Nortel、CISCO 等在 2002 年也有产品推出, 或在其设备中增加 CWDM 接口和功能。从 2003 年开始, 国内上海贝尔阿尔卡特、中兴、华为、烽火等公司也都陆续推出了商用的 CWDM 系统。

CWDM 设备的发展趋势是小型化、低成本。垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 成本低廉, 在 850nm 的产品已经比较成熟, 在 1300nm 和 1550nm 的 VCSEL 技术也正在取得进展。一旦 VCSEL 技术的 CWDM 激光器取得突破, 将会使设备成本进一步降低。小封装、热插拔、具有数字诊断功能的 CWDM 光模块正在成为 CWDM 设备的主流接口。10Gbps 速率的小封装光模块正在成熟, 下一步将向 CWDM 应用发展, 从而将 CWDM 系统的容量大大提高。价格低廉的薄膜滤波器是 CWDM 设备的主流器件,

体积不断向小型化发展。同时，CWDM 系统也在向长距离发展。在 OFC2003 上，日本 Sumitomo 公司报道了采用分布式拉曼放大技术的 CWDM 光放，净增益为 10dB，增益带宽可达 140nm，覆盖从 1470nm~1610nm 的 8 个常用 CWDM 波段。国内一些科研机构，如复旦大学蒋凤仙老师的实验室也在进行拉曼光纤放大器的研究。

3.2 CWDM 系统的关键技术

3.2.1 波长选择

G.694.2 定义了从 1270nm~1610nm 的 18 个 CWDM 标称波长，每个通道之间的波长间隔为 20nm。如此大的间隔允许在使用无致冷激光器的条件下，各个波长的同时传输而不会发生相互串扰。这个波长范围覆盖了单模光纤的 O、E、S、C、L 等 5 个波段。

无致冷激光器通常工作温度范围为 0~70℃（管壳温度），其热漂移系数约为 0.08nm/℃。标称中心波长值是指在常温（23℃）下激光器的输出波长。无源器件（如复用器、解复用器）的滤波特性几乎不随温度变化，一般认为无源器件的标称中心波长应该对准在 35℃时激光器的输出波长，因为 35℃是激光器工作温度范围的中点，也就是说，无源器件标称中心波长应该加上由于温度从 23℃化到 35℃造成激光器输出波长的偏移值，即 $0.08\text{nm}/^\circ\text{C} \times (35^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) \approx 1\text{nm}$ 。为了解决激光器波长标称温度与实际工作温度不同造成的波长差异问题，ITU 将 G.694.2 中定义的波长上移 1nm，分别为 1271nm、1291nm、……、1611nm，从而消除了因温度差异带来的波长偏差。

实际应用的 CWDM 系统主要有 8 波和 16 波两种。由于 CWDM 主要用于光纤缺乏的接入区域，8 波的容量已可以满足绝大部分系统的要求，因此 8 波系统在目前应用最为广泛。从理论上讲，CWDM 系统所用的标称波长可以从 ITU-T 建议的 18 个标称波长中任意选择，但一般情况下，考虑到目前已经敷设的光纤类型（多数为 G.652 单模光纤）及其损耗特性，8 波系统都选择 1460nm~1620nm，也就是 S+C+L 波段，避开 G.652 单模光纤有 OH⁻吸收峰的 E 波段和损耗较大的 O 波段，不需要对光纤的类型提出特殊要求。

表 3.1 中列出了 ITU-T 所建议的 8 波 CWDM 系统的标称波长。由于城域网中的用户使用的波长与标称波长不同，同时各用户传输的业务不同，因而所需要的

传输速率也不尽相同。为了满足多用户的复用，研制多速率自适应的波长适配器成为 CWDM 系统的关键。

通道	标称波长	通道	标称波长
1	1471nm	5	1551nm
2	1491nm	6	1571nm
3	1511nm	7	1591nm
4	1531nm	8	1611nm
OSC 通道	1310nm		

表 3.1 8 波 CWDM 标称波长

3.2.2 波长间隔

根据目前激光器的制造技术，无制冷激光器在工作条件下及其整个寿命期内，波长的变化范围应不超过 $\pm 7\text{nm}$ 。考虑到足够的相邻通道隔离度和必需的保护带（通常取最小通道间隔的三分之一左右），G.694.2 选取 20nm 为 CWDM 系统的通道间隔。

CWDM 系统无制冷激光器在 $0\sim 70^{\circ}\text{C}$ 范围内输出光波长变化小于 6nm ，相当于在 35°C 管壳温度条件下的波长 $\pm 3\text{nm}$ ，而激光器制造过程中波长偏差也约为 $\pm 3\text{nm}$ ，总波长变化不超过 $\pm 6\text{nm}$ 。这就要求光滤波器的通带宽度以及相邻通道间波长间隔都必须足够宽，才能满足激光器波长偏移的要求。

通常如果 CWDM 系统的波长间隔为 20nm ，则滤波器的通带宽度为 14nm 。

3.3 CWDM 系统的应用和实例

根据城域网中应用情况和 CWDM 的自身技术特点，CWDM 在城域网中的应用可归结为三种：城域环形拓扑方式、点到点光纤扩容和点到多点拓扑。

3.3.1 城域环形拓扑

这是一种在核心层提供多个逻辑环网叠加到一个物理环网上的解决方案；在

核心层至汇聚层，在物理环网上使用 CWDM 技术实现逻辑双星型结构的数据网。

通过 CWDM 设备的物理环形连接建网，较以往采用路由器的物理双星型连接建网，可以节省大量的光纤资源，特别是接入节点特别多的情况下，该组网方式在成本上优势非常明显。图 1 所示环网是核心网的 CWDM 典型解决方案。CWDM 分插复用设备可以将 SDH 业务、IP 业务、视频图像等业务通过一个物理的光纤环实现多个逻辑环的叠加。每个环上承载一个独立的业务，互不干扰。

CWDM 设备用于核心网，主要优点包括：

- 8 路业务可以复用到一对光纤上；
- 支持多种业务传送；
- 在一根光纤上提供高达 20G 的业务带宽；
- 提供物理层的通道和复用段保护能力，大大增强了数据网络的可靠性。倒换时间低于 50ms, 比通过三层设备的冗余路由保护效率要高得多。

在 IP 城域网核心设备到汇聚层，双星型结构很常见。因此，利用 CWDM 技术可以组成“物理环网+逻辑双星型”结构，便于网络节点扩展和节省光纤资源。CWDM 分插复用设备和终端复用设备结合使用，通过一个物理的光纤环上实现一个具有保护功能的逻辑上的双星型结构。这种逻辑双星型结构，每个汇聚层路由器到核心路由器之间都有 1 条冗余路径，从而提高网络可靠性。

3.3.2 点到点光纤扩容

在部分电信光缆资源不足，而业务增长迅速，急需光缆扩容但又不方便的地区，CWDM 可以利用多种老旧型号的有限光缆资源，包括不能在 DWDM 上使用的 G.653 光缆，采用点到点的拓扑应用方式，提供几倍于现有传输容量的带宽，实现两点之间多业务的双向汇聚。这种方式比传统的 DWDM 具有较高的性能价格比。CWDM 的扩容过程十分简单，只需在两端增加一对 CWDM 设备就能将光缆容量扩大 8 倍，扩容过程中业务中断时间短，扩容完成后，原有业务不受任何影响，可保证业务的平滑过渡。

利用 CWDM 可非常容易地实现以波长来区分不同用户，为用户提供所需的指定带宽，从而让运营商方便地提供波长出租业务。

3.3.3 点到多点拓扑

在核心局到多个分支局间的不同业务传送,或是汇聚局与客户端之间的接入网络建设, CWDM 可以适应多种网络复杂的环境。采用 CWDM 接入传输多种数据业务, 能够实现互不干扰, 且各客户的业务传送能够得到可靠安全的保证。CWDM 还可与 EPON 或 APON 组成无源光网络、与 DSLAM 一起进行互联, 为实现光纤到大楼 (FTTH) 提供很好的解决方案, 实现多种业务的融合。

通常为实现在光网络中点到多点的应用, 需要较多数量的光纤组成星型拓扑。在光纤资源不足情况下, 利用一条光路串接各个需要传输数据的分局, 通过事先定义波长来区分用户和业务, 在各个业务节点利用 CWDM 的终端复用设备和分插复用设备结合使用, 实现地区业务的复用传输和业务的上下。通过这种方式, 可解决中心节点到多个分支节点间的不同业务的传送, 从而用一条简单的物理光路实现了逻辑上的星型结构。

3.3.4 应用

图 3.1 和图 3.2 分别给出了我们研制的这套 CWDM 系统的适用场合。

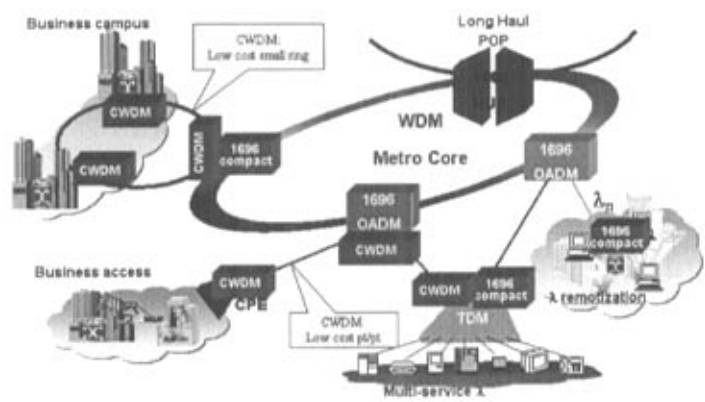


图 3.1 大城市的城域接入及企业校园网

图 3.1 描述的是在大城市的城域网中的应用, CWDM 系统可以作为大型骨干网的分支, 为城域网提供低成本接入的解决方案。而在中小城市的城域网中, 由

于用户数量相对较少，CWDM 最高达到 20Gbps 的传输容量足以作为骨干网，为城域应用提供数据、存储以及视频传输等方面的解决方案，如图 3.2 所示。

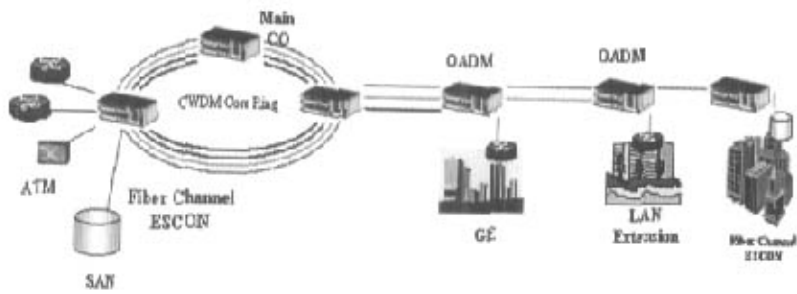


图 3.2 中小城市的城域骨干网

第四章 CWDM 系统设计

4.1 硬件系统设计

该 CWDM 系统专为大城市接入网或中小城市核心网设计，具有成本低、配置灵活、支持多种速率信号，优良的扩展性和兼容性。

4.1.1 系统概述

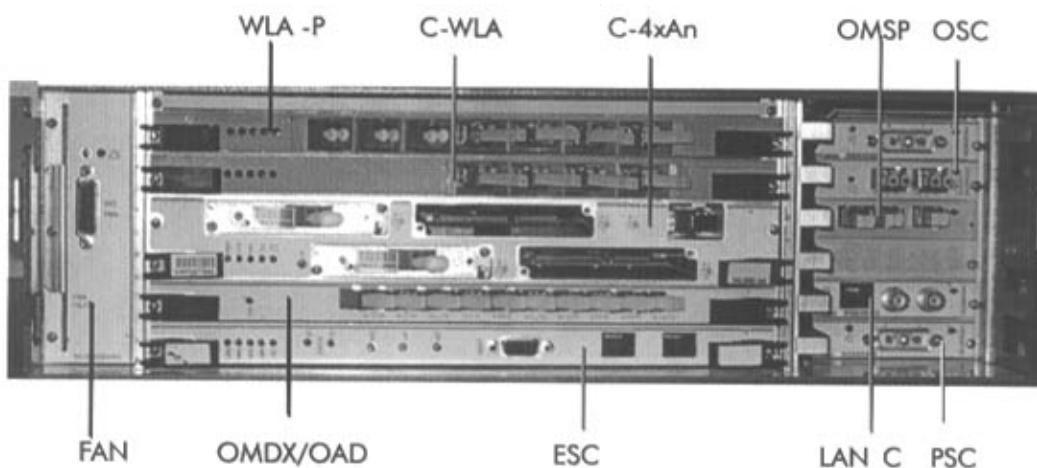


图 4.1 CDWM 设备外观

系统特点：

- ✓ 19 英寸紧凑型机框
- ✓ 支持 100Mbps-2.7Gbps 全速率
- ✓ 所有光接口支持热插拔
- ✓ 支持双纤单向 8 波或单纤双向 4 波复用/解复用
- ✓ 支持 1/2/4 波光分插复用器 (OADM)
- ✓ 提供光复用段保护 (OMSP)、电子网连接保护 (E-SNCP) 和光子网连接保护 (O-SNCP)

4.1.2 跨距设计

这一节讨论影响跨距传输的主要因素，并以系统中用户端光收发器功率预算、光监控通道功率预算和线路端的光收发器功率预算的三个实例来阐述传输跨距的设计。

功率预算的目的是确保有足够的光功率到达光接收机，并能在系统的寿命内维持可靠的性能。在一定误码率下接收机所需的最小光功率是接收机的灵敏度 R_{SENS} (dBm)， P_{OUT} (dBm) 定义为发送机的平均输出光功率。则功率预算的公式为：

$$P_{\text{OUT}} = R_{\text{SENS}} + \text{OPP} + \text{IL} + \alpha L$$

其中：OPP (dB) 为光通道代价（或称系统冗余），IL (dB) 为无源的插入损耗， α (dB/km) 为光纤衰减系数，L 为传输跨距。

4.1.2.1 无源器件插入损耗

本系统中的无源器件主要指光复用/解复用模块、光分插复用模块、1310nm 滤波器以及光环路器、分光器等。

根据目前批量生产的工艺水平，定义各无源器件的插入损耗如下：

- (1) 1310nm 滤波器对每个 CWDM 波长的插入损耗为 0.5dB；
- (2) 环路器对 1310nm 波长的损耗为 1dB。

4.1.2.2 光纤技术数据

对跨距的估算基于标准单模光纤 (SSMF)，下表的参考数据来源于 ITU-T G.957 建议的标准。其中，“Typical Att. Coeff.” 列的数据包括了安装熔接和维修熔接产生的损耗，以及由于工作温度变化引起的损耗。

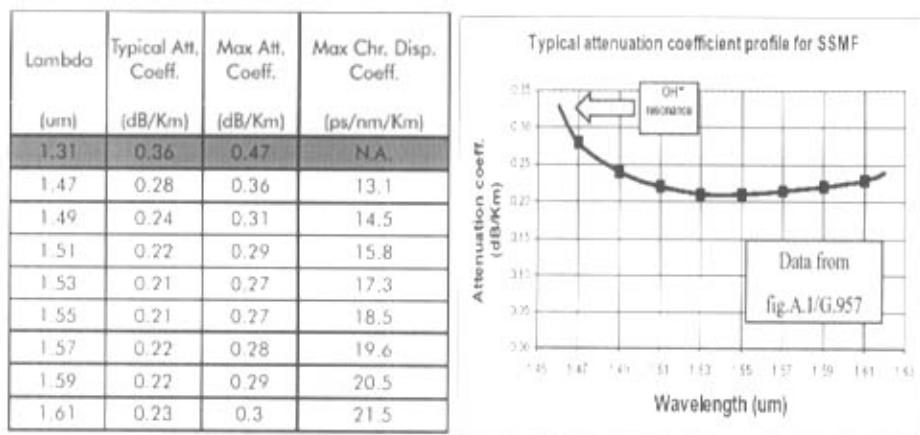


图 4.2 单模光纤（SSMF）衰减系数

从表中可以看出，在这 8 个波长中，1470nm 处的衰减系数最大，而 1610nm 处的色散系数最大。

4.1.2.3 用户端光收发器功率预算

系统采用小型可插拔（SFP: Small Form Pluggable）光收发模块作为与用户设备的接口，

根据下表所列出的 6 种用户端 SFP 光收发模块的主要参数，利用功率预算公式 $P_{OUT} = R_{SENS} + OPP + IL + \alpha L$ ，得出功率预算和传输跨距，其中，IL 约等于 1dB。由于用户端光模块的工作波长为 1310nm，其衰减系数 α 最大为 0.47dB。

项目	S1.1	S4.1	S16.1	I16	GbE SX	GbE LX
Tx 波长 (nm)	1261~1360	1274~1356	1270~1360	1266~1360	820~860	1270~1355
Rx 波长 (nm)	1260~1360	1274~1356	1260~1360	1260~1580	770~860	1270~1355
输出功率 (dBm)	-15~-8	-15~-8	-5~0	-10~-3	-9.5~-4	-11~-3
灵敏度 (dBm)	-28	-28	-18	-18	-17	-19
过载功率 (dBm)	-8	-8	0	-3	0	-3

通道代价 (dB)	1	1	1	1	NA	NA
功率预算 (dB)	11	11	11	6	6.5	7
传输跨距 (km)	23.4	23.4	23.4	12.8	13.8	14.9

4.1.2.4 光监控通道（OSC）功率预算

OSC 通道的光接口选用 L1.1SFP 收发模块。其主要参数如下表所示：

	参数	单位	符号	L1.1		
				Min	Typ	Max
Tx	输出功率（EOL）	dBm	P_{OUT}	-5		0
Rx	接收灵敏度@2Mbps	dBm	R_{SENS}			-35
	过载功率	dBm	P_{MAX}	-10		
	通道代价	dB	OPP			1

其中，接收灵敏度的测试条件为：Test Pattern = PRBS 2^7-1 ，BER $<10^{-9}$ ，CMI 码型。

在单纤双向应用中，对于 OSC 通道而言，最坏的情况是不带 OADM 节点的点到点系统，此时 OSC 所支持的功率预算为：

$$\begin{aligned}
 \text{功率预算} &= P_{OUT} - R_{SENS} - OPP - IL \\
 &= -5 - (-35) - 1 - 1.5 \\
 &= 27.5\text{dB}
 \end{aligned}$$

OSC 通道的工作波长为 1310nm，此处 G.652 光纤的最大衰减系数为 0.47dB/km，支持的最小传输跨距为：

$$\begin{aligned}
 \text{传输跨距} &= \text{功率预算} / \text{衰减系数} \\
 &= 27.5 / 0.47 \\
 &\approx 59\text{km}
 \end{aligned}$$

4.1.2.5 线路端光收发器功率预算

线路端光接口与功率预算有关的主要参数如下表所示。由于 CWDM 系统的标称波长在 1470~1610nm 之间，在设计过程中需同时考虑衰减限制和色散限制。功率预算所采用的公式与前节的相同。在如下的功率预算计算过程中，采用 1470nm 的衰减系数和 1610nm 作为参考，因为在上述工作波长段内，1470nm 的衰

減系数最大，其值为 0.36dB/km，而 1610nm 处的色散系数最大，其值为 21.5ps/km-nm。计算可得，受损耗限制的最小传输跨距约为 43km（计算过程中采用的插入损耗值为 1dB）。

受色散限制的光纤通信系统，其传输跨距公式为：

$$BDL \Delta \lambda < 1$$

其中，B 为传输速率，我们取系统最大传输速率约 2.7Gbps，D 是光纤色散参数，我们取 21.5ps/km-nm， $\Delta \lambda$ 是光源的谱宽，我们所采用的 DFB 激光器的谱宽为 0.4nm。根据上式计算得到，受色散限制的最小传输跨距也约为 43km。

	参数	单位	符号	Min	Typ	Max
Tx	输出功率 (EOL)	dBm	P_{OUT}	0	0	5
	色散	Ps/nm	$D \cdot km$	13.1	17.3	21.5
Rx	接收灵敏度@OC-48	dBm	R_{SENS}			-18
	过载功率	dBm	P_{MAX}	-3		
	通道代价	dB	OPP	1.5	2	2

计算表明，对于单纤双向无 OADM 应用的情况下，系统的最小跨距约为 43km。

4.1.3 系统保护

CWDM 系统应至少可以提供以下保护的一种或多种：

4.1.3.1 光通道 1+1 保护

光通道保护是在通道层上进行 1+1 的冗余备份保护，当其中一个通道发生故障时，启用备用光通道。要求保护时间不大于 50ms。

下面图 4.3 和图 4.4 分别是光子网连接保护（O-SNCP）和电子网连接保护（E-SNCP）的保护原理示意图。

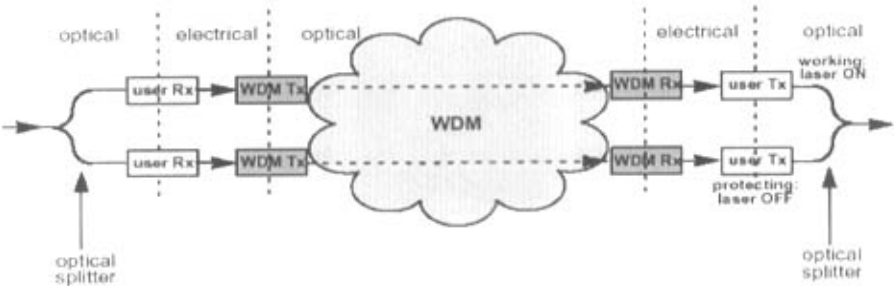


图 4.3 OSNCP 示意图

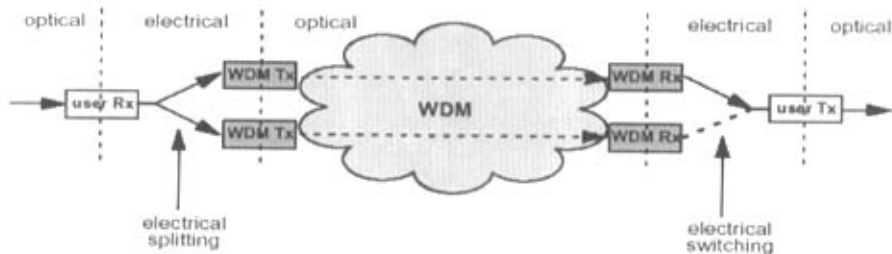


图 4.4 ESNCP 示意图

4.1.3.2 光复用段保护 (OMSP)

光复用段保护针对点对点的 CWDM 系统。

这种技术只在光复用段层上对系统进行 1+1 保护，而不对终端线路进行保护。在发送端，利用 1x2 分路器对复用后的光信号进行分离；在接收端，利用光开关对解复用前的光信号进行选择。

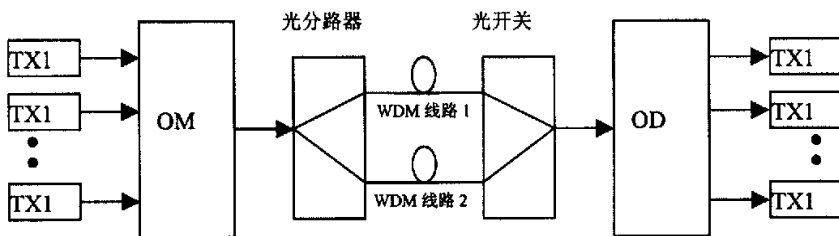


图 4.5 OMSP 示意图

图 4.5 是采用光分路器和光开关的光复用段保护方案，在这种保护系统中，只有光缆和 WDM 的线路系统是备份的，而 WDM 系统终端站的 SDH 终端和复用器是没有备份的，光复用段保护 OMSP 只有在独立的两条光缆中实施才有实际意义。光复用段保护时间要求不能大于 50ms。

4.2 软件系统设计

4.2.1 网络管理

由于 CWDM 系统定位于低成本、快速增加容量的应用，其网管系统与 DWDM 系

统相比在功能上应该尽可能简单。鉴于 DWDM 网管系统相关技术规范中采用 CMIS/CMIP(Q3) 和 CORBA (IDL) 定义信息模型,如继续在 CWDM 中仍采用 Q3 或 CORBA 接口将会增加系统复杂性和成本,因此在网络管理接口上考虑优先采用简单网络管理协议 (SNMP), 以满足 CWDM 系统低成本的需要。

在系统功能上,按照电信管理网要求,包括故障管理,性能管理,配置管理和安全管理,安全管理中包括日志管理功能。

4.2.2 故障管理

故障管理应能实时监视 CWDM 网络设备运行情况,提供故障告警和故障定位等相关信息。网管系统应支持设备告警的监视、查询,统计等功能。

CWDM 系统告警记录要求与 DWDM 管理系统一致,当前告警与历史记录包括告警类型、告警级别、告警状态、告警源、告警原因、告警发生时间、告警确认时间。对于已清除告警,应包含告警清除时间。另外应根据用户需要,增加告警加注信息。

告警类型: 设备监视的告警类型可以分为设备告警、通信告警等

告警级别: 分为紧急告警、主要告警、次要告警、警告告警、提示告警

告警状态: 包括确认、未确认、清除、未清除

告警参数列表如下表所示:

序号	告警描述	告警缩写	告警类型	告警缺省级别	备注
1	输入信号丢失	LOS	通信告警	紧急告警	
2	激光器发送失效	LTF	设备告警	紧急告警	
3	激光器寿命告警	LLW	设备告警	警告告警	可选
4	激光器背光功率告警	LBPW	设备告警	次要告警	可选
5	激光器温度过限	LTOOR	设备告警	次要告警	可选
6	激光器电流过限	LCOOR	设备告警	次要告警	可选
7	输入合路信号丢失	LOIMS	通信告警	紧急告警	可选
8	输入光功率过限	TIPOOR	设备告警	主要告警	可选
9	输出光功率过限	TOPOOR	设备告警	主要告警	可选
10	光监控通路丢失	LOOSC	通信告警	紧急告警	
11	光信号帧丢失	LOF	通信告警	主要告警	可选

12	光信号帧失步	OOF	通信告警	主要告警	可选
13	告警指示信号	AIS	通信告警	次要告警	可选
14	远端接收失效	FERF	通信告警	主要告警	可选
15	误码超限	EBER	QOS 告警	主要告警	可选
16	激光器发送失效	LTF	设备告警	紧急告警	可选
17	单元盘脱位	UM	设备告警	紧急告警	
18	单元盘故障	UF	设备告警	紧急告警	
19	所插单元盘类型错误	UTM	设备告警	主要告警	

4.2.3 性能管理

性能管理应能实时监视设备运行情况，生成性能数据，但性能指标超过门限时，应产生性能越限告警。网管系统能提供对当前性能数据、历史性能数据、性能门限以及性能越限告警的处理。

性能数据分为当前性能和历史性能数据。

表1 基本性能参数列表

序号	性能参数描述	性能参数缩写	备注
1	光波长	WL	
2	输入光功率	IOP	可选
3	输出光功率	OOP	可选
4	激光器偏置电流	LBC	可选
5	激光器温度	LT	可选
6	激光器背光功率	LBOP	可选
7	总输入光功率	TIOP	可选
8	总输出光功率	TOOP	可选
9	激光器输出光功率	LOOP	可选
10	激光器工作温度	LWT	可选
11	激光器偏流	LB	可选
12	误码秒	ES	可选
13	严重误码秒	SES	可选
14	不可用秒	UAS	可选
15	帧失步秒	OFS	可选

4.2.4 配置管理

配置管理应包括拓扑实体与网元实体的管理。包括网元的创建与删除，网元

子架与单盘的配置，网元资源的查询等。对于支持光通道保护和光复用段保护的系统应该提供相应的配置管理功能。

4.2.5 安全管理

安全管理至少提供下列管理功能：

- ✓ 用户登录管理，只有授权用户才能登录系统
- ✓ 口令管理
- ✓ 登录日志与操作日志管理
- ✓ 用户管理，包括创建、删除用户等。
- ✓ 对所有未授权操作进行监视和记录。

4.3 多速率自适应波长适配器的设计与实现。

波长适配器（WLA——Wave Length Adaptor）是 WDM 系统中最重要的一部分，其主要功能在于把非标准的波长转换成 ITU-T 所规范的标准波长，以满足系统的波长兼容性。在我们这套系统中，采用的依然是光/电/光（O/E/O）的转换方式，即采用 PIN 管或 APD 管将用户端传输来的光信号转换成电信号，经过 3R 定时再生处理之后，产生再生的电信号和时钟信号，再将该信号对标准波长的激光器重新进行调制，从而得到符合标准要求的波长信号。

在这个项目中，我的负责制定 WLA 的设计方案，并进行器件选型、硬件原理图设计、实验室样机制作和功能验证测试。

4.3.1 功能描述

本系统的 WLA 盘是一个能支持 2 路传输通道的多速率接口，包括 ORU（光接收单元 Optical Receive Unit）和 OTU（光发送单元 Optical Transmit Unit），共使用了 4 个支持热插拔的 SFP 光收发器，其中 2 个作为用户侧的收发器，另外 2 个作为 CWDM 线路侧的收发器。如图 4.6 所示，在 CWDM 接收端采用了 CDR（时钟数据恢复 Clock and Data Recovery）电路对 125Mb/s 到 2.67Gb/s 范围的信号进行定时和再生处理，并检测信号的比特率，在 FPGA 的控制下实现速率自动锁定。如果信号比特率超过门限，CDR 电路向告警单元提供告警信号。此外，在 WLA

盘中还设计了一个电矩阵交叉单元和一个告警及控制单元，它们的功能如下：

1 矩阵交叉单元的功能：

- ✓ 信号上下功能
- ✓ 近端/远端环回功能
- ✓ 电子网连接保护功能

2 告警及控制单元可完成如下任务：

- ✓ 进行单元配置
- ✓ 收集告警信号并上报网管
- ✓ 提供附加信息接口
- ✓ 进行交叉矩阵设置
- ✓ 管理 CDR 单元
- ✓ 监控 SFP 光模块
- ✓ 控制光通道保护
- ✓ 管理输入信号比特率信息

电源转换单元提供 3.3V 和 2.5V 电压。

SPIDER 单元提供 SPI 总线接口。

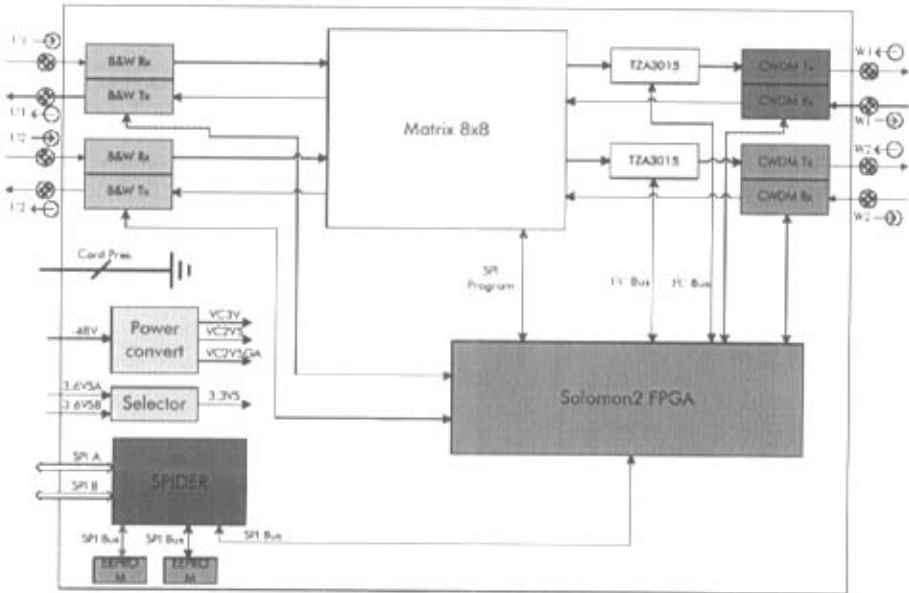


图 4.6 WLA 功能框图

4.3.2 详细设计

本节将详细介绍 WLA 盘各主要功能块的设计。包括电源电路、SPIDER 控制电路、CDR 电路、FPGA、交叉矩阵、SFP 模块等。

4.3.2.1 电源电路

本盘的电源电路主要提供+3.3V 电压和+2.5V 电压。其中+3.3V 是由-48V 通过 DC/DC 转换器产生，用于 CDR、FPGA 和 SFP 光收发器电路，+2.5V 系由+3.3V 通过 STEP-DOWN 电路产生，用于交叉矩阵电路。另外用于 SPIDER 总线接口电路的+3.6V 电压来自于背板。

根据主要器件的额定电功耗，可得出如下的功率预算：

关键器件功耗		
器件描述	器件工作电压 (V)	标称功耗 (W)
CDR TZA3015	3.3	4.0 (2X2.0)
FPGA SOLOMON	3.3	1.5
SFP CWDM	3.3	2(2X1)
SFP BW	3.3	1.6(2X0.8)
GTX01MARTIX	2.5	2
Total		11.1

4.3.2.2 SPIDER 总线电路

WLA 盘的外部控制接口由一个被称为 SPIDER 的专用芯片（ASIC）提供。其主要功能是通过 SPI（Serial Peripheral and Inventory）总线与主控板 ESC（Equipment & Shelf Control）进行通讯。

SPI 总线是一个低速串行通道，是主控板 ESC 与其他功能盘之间（通过背板连接）进行数据传输的通道。其主要特点包括：

- 16 位串行数据传输
- 单个主设备最多可以控制 64 个从设备
- 串行时钟最高可达到 1MHz

SPIDER 在 SPI 总线是从设备，负责收集状态/告警信号和控制命令信号，并通过通用 I/O 口与主设备 ESC 交换数据。

SPIDER 芯片的电源由背板提供，而不是由本盘上的 DC/DC 转换而来。这样可以保证在 WLA 盘的 DC/DC 不能正常工作的情况下，系统可以通过 SPI 收集到状态/告警信号。

SPI 总线作为主设备（ESC）和盘上的 FPGA 之间通讯的桥梁，其总线协议为一个 8 位文本传输协议。通过该协议，主设备可以对 FPGA 的寄存器进行读写操作。

写操作通过 3 个字节完成：第一个字节为命令字节，接下来依次是地址和数据字节。命令字节提供写操作命令和片选地址，地址字节指定待写入数据的寄存器地址，数据字节提供所要写入的数据。

读操作通过 2 个字节完成：第一个字节为命令字节，提供读操作命令和片选地址，第二个字节为地址字节，指定需要读取的寄存器地址。该字节的最高位为读/写命令，为“1”时表示进行的是读操作，为“0”时表示进行的是写操作。其余 7 位为片选地址。ADD [7:0] 最多可以指向 256 个寄存器地址。

读/写命令字节							
7	6	5	4	3	2	1	0
R/W							

写地址字节和数据字节													
Address Word								Data Word					
7	6	5	4	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2
ADD [7:0]								D [7:0]					

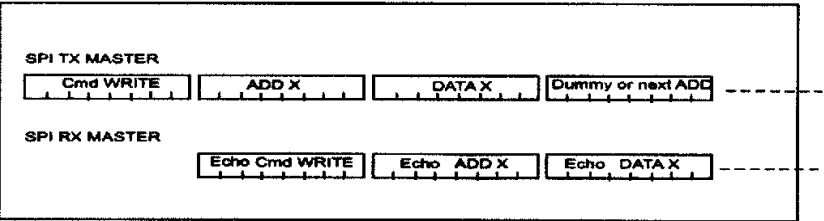


图 4.7 SPI 写操作

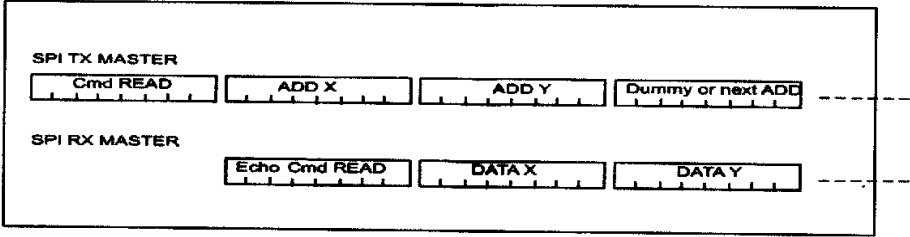
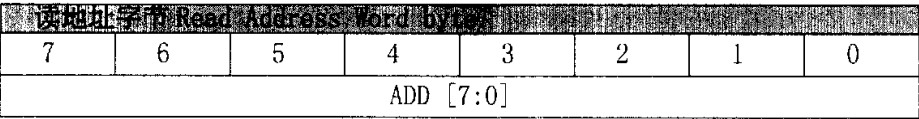


图 4.8 SPI 读操作

SPIDER 提供了 4 个 6 位并行 I/O 端口（端口 A、B、C、D），通过这些端口可以处理状态、告警和命令信号。端口 A 和 B 的信号具有固定达到方向，而端口 C 和 D 可以独立地设置为输入或输出。

Spider port description					
Name	Type	Description	Port	Pin	Startup values
CARD_TYPE_0	IN	Card Type bit #0 (CID: 0)	A-0	43	1
CARD_TYPE_1	IN	Card Type bit #1 (CID: 1)	A-1	44	1
CARD_TYPE_2	IN	Card Type bit #2 (CID: 2)	A-2	45	0
CARD_TYPE_3	IN	Card Type bit #3 (CID: 3)	A-3	47	0
CARD_TYPE_4	IN	Card Type bit #4 (CID: 4)	A-4	48	0
CARD_TYPE_5	IN	Card Type bit #5 (CID: 5) (MSB)	A-5	49	1
AL_2V	IN	2V power supply failure alarm, active low	B-1	58	1
AL_3V	IN	3V power supply failure alarm, active low	B-2	59	1
GA_RESET	OUT	Reset to FPGA, active high	B-3	60	0
RED_OFF	OUT	Red led is turned on (pin set low) by software during software reset	B-4	61	0
GREEN_OFF	OUT	Green led is turned on (pin set low) by software when card configuring is finished	B-5	62	1
AL_PS	IN	NAND of AL_2V and AL_3V, active high	C-0	74	0
SPI_CONF_EN	OUT	Select SPI as FPGA download EEPROM programming interface , active high	C-2	76	0
RESTART_2V	OUT	Turns off +2.5V step down, active high	C-5	79	0
GA_OE	OUT	Enables control FPGA outputs, active high	D-1	88	0
SPI_NCONFIG	OUT	Initiate control FPGA configuration	D-5	93	0

通过WLA盘的串行总线，主控板ESC可以远程访问以下从设备。下面是片选信号列表：

Spider 的片选信号		
CS#	Component	Function
0	2Kbit EEPROM	Remote Inventory EEPROM 访问
1	CONTROL FPGA	WLA Alarm and Control registers 访问
2	SPI to JTAG conversion components	Configure the Control FPGA via SPI bus 访问
3	2Kbit EEPROM	Additional information access 访问

通常，对于网管配置人员而言，能直观地读出系统中各功能块的名称、版本、生产批次以及板载软件/固件的名称和版本等信息是十分必要的。为了让网管能方便地获取这些信息，WLA 盘上专门设计了一个 256 字节的 EEPROM，称之为远程信息库（Remote Inventory），用于存放这些信息。

4.3.2.3 FPGA

FPGA Solomon是WLA盘上的一个控制FPGA，由它控制整个WLA盘，并为网管系统和WLA之间的通讯提供接口。其主要功能包括：

- ✓ 向网管系统上报电源告警，包括ALA_HWF, AL_2V, AL_3V
- ✓ 向网管系统上报SFP模块告警，包括LOS, TX错误，不在位
- ✓ 控制面板告警指示灯
- ✓ 访问SFP EEPROM的信息
- ✓ 自动检测数据通道的比特率，设置比特率限制告警
- ✓ 支持手动设置CDR电路比特率
- ✓ 配置交叉矩阵
- ✓ 管理电子网连接保护和光子网连接保护

通过SPI总线，当SPIDER的片选信号为“1”时，ESC可以对WLA盘的FPGA寄存器进行读写操作。

下面给出FPGA的寄存器清单和描述：

Control FPGA registers list									
@	Type	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
Reset									
0x00	R/W				Leave to' 0'	Leave to' 0'	Leave to' 0'	MATRIX	General
ALARM									
0x01	R	PS_FAIL	AL_2V	AL_3V					Protect state
LEDS									
0x02	R/W					OOS (YELLOW)		Channel1 (YELLOW)	Channel2 (YELLOW)
FPGA FIRMWARE RELEASE									
0x03		FPGA firmware major release					FPGA firmware minor release		
SFP EEPROM information reading									
0x06	R/W	EEPROM ADDRESS 0XA0H VALUE							
0x07	R/W	EEPROM ADDRESS 0XA2H VALUE							
0x08	R/W	CWDM SFP1	CWDM SFP2	BW SFP1	BW SFP2				
0x09	R	EEPROM DATA							
0x0A	R	CWDM SFP1 READING STATUS	CWDM SFP2 READING STATUS	BW SFP1 READING STATUS	BW SFP2 READING STATUS				
0x0B									
0x0C									
0x0D									
0x10									
0x11									
0x12									
0x13									
0x14									
0x17									
0x18									
0x19									
0x1A									
0x1B									
0x1C									
Optical modules									

0x1D	R	CWDM LOS1	CWDM LOS2	BW LOS1	BW LOS2	CWDM TX fault1	CWDM TX fault2	BW TX fault1	BW TX fault2
0x1F	R	CWDM SFP PRES1	CWDM SFP PRES2	BW SFP PRES1	BW SFP PRES2				
0x20									
User bit rate limiting									
0x29	R/W				Channel1 bit rate threshold configuration				
0x2A	R/W				Channel2 bit rate threshold configuration				
0x2B	R					Channel1 unlock Alarm	Channel2 unlock Alarm	Channel1 Bit rate threshold alarm	Channel2 Bit rate threshold alarm
0x2C	R				Channel1 User bit rate report				
0x2D	R				Channel2 User bit rate report				
MATRIX PROGRAMMING									
0x30	R/W	MATRIX PROGRAMMING WORD							
PROTECTION CONFIGURATION									
0x36	R/W		PROTECTION TYPE SELECTION [2:0]			PROTECTION CONFIGURATION[3:0]			
LOOPBACK CONFIGURATION									
0x37	R/W	Channel1 Loopback	Channel2 Loopback	Left to ' 0'	Left to ' 0'	Channel1 Mode		Channel2 mode	

对上表中的各项功能说明如下：

1 复位

Solomon FPGA 寄存器的 0x00 字节是读/写口，用于对 WLA 盘上的一些器件复位。该字节的缺省值为 00000000。

Solomon reset register description				
Bit #		Name	Description	Active
7	R/W		Must be left to '0	NA
6	R/W		Must be left to '0	NA
5	R/W		Must be left to '0	NA
4	R/W		Must be left to '0	NA
3	R/W		Must be left to '0	NA
2	R/W		Must be left to '0	NA
1	R/W	MARTIX RST	when set to high generates a reset pulse to 8x8 matrix	1
0	R/W	GENERAL RST	When active, all FPGA Solomon are in reset state except register 0x00and SPI block	1

2 硬件告警

0x01 字节是一个只读端口，用于提供硬件告警，其缺省值为 01100000。

Solomon alarm register description				
Bit #		Name	Description	Active
7	R	ALIM PS_FAIL	Active when one of the local power supplies (2.5V, 3.3V) is in failure	1
6	R	2V FAILURE	Active when the 2.5V power supply is in failure.	0
5	R	3V FAILURE	Active when the 3.3V power supply is in failure.	0
4to1	R		Must be left to '0'	NA
0	R	SNCP SPR ON	Active when traffic is switched spare channel	1

3 面板指示灯控制

0x02 字节提供前面板指示灯控制，缺省值为 00001011。

Solomon leds register description				
Bit #		Name	Description	Active
7to4	R/W		Must left to '0'	NA
3	R/W	OOS LED	When active, front panel led Out of Service (Yellow) is turned on, indicating the board is in test status (local loopback, remote loopback, etc.)	0
2	R/W		Must be left to' 0'	NA
1	R/W	Channel1 LED	When active, front panel led channel1 Abnormal (Yellow) is turned on, indicating channel 1 is in abnormal status	0
0	R/W	Channel2 LED	When active, front panel led channel2 Abnormal (Yellow) is turned on, indicating channel 2 is in abnormal status	0

4 SFP EEPROM 信息读取

从 0x06 到 0x0A 字节提供对 SFP EEPROM 信息的读写操作。

5 EEPROM 寄存器地址

要实现读取 EEPROM 信息，需要两个寄存器。0x06 字节描述 EEPROM 0XA0H 字节的数据，0x07 字节描述 EEPROM 0XA2H 字节的数据。

6 SFP 模块选择

0x08 字节提供访问被选中的 SFP 模块的入口。第 4 位和第 7 位不能同时为

“1”。缺省值为“00000000”。

Solomon SFP module selection register description				
Bit #		Name	Description	Active
7	R/W	CWDM SFP1 Selection	When active, the CWDM SFP module 1 will be selected	1
6	R/W	CWDM SFP2 Selection	When active, the CWDM SFP module 2 will be selected	1
5	R/W	BW SFP1 Selection	When active, the BW SFP module 1 will be selected	1
4	R/W	BW SFP2 Selection	When active, the BW SFP module 2 will be selected	1
3to0	R/W		Must be left to '0'	NA

7 SFP 模块 EEPROM 数据读取流程图

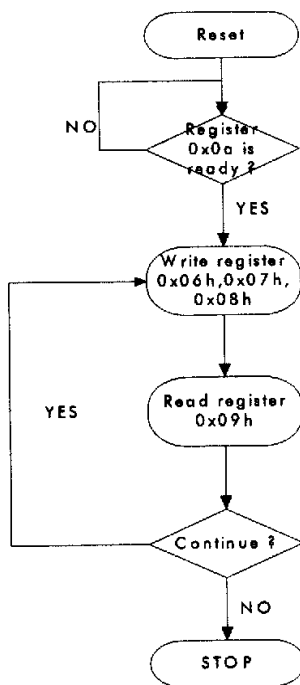


图 4.9 SFP EEPROM 数据读取流程图

8 光模块

0x1D 到 0x1F 字节提供光模块信息访问入口。

9 LOS 告警

字节 0x1D 显示 SFP 模块是否处在 LOS（信号丢失）或无光状态。其缺省值为“00000000”。

Solomon SFP module LOS and Tx fault register description				
Bit #		Name	Description	Active
7	R	CWDM LOS1	When active, the CWDM SFP module of channel1 is in Loss of signal	1
6	R	CWDM LOS2	When active, the CWDM SFP module of channel2 is in Loss of signal	1
5	R	BW LOS1	When active, the BW SFP module of channel1 is in Loss of signal	1
4	R	BW LOS2	When active, the BW SFP module of channel2 is in Loss of signal	1
3	R	CWDM Tx fault1	When active, the CWDM SFP module of channel1 transmit fault	1
2	R	CWDM Tx fault2	When active, the CWDM SFP module of channel2 transmit fault	1
1	R	BW Tx fault1	When active, the BW SFP module of channel1 transmit fault	1
0	R	BW Tx fault1	When active, the BW SFP module of channel2 transmit fault	1

10 光模块在位信息

字节 0x1F 提供 SFP 模块的在位信息访问入口。其缺省值为“00000000”。

Solomon SFP module presence register description				
Bit #		Name	Description	Active
7	R	CWDM SFP PRES1	When active, the CWDM SFP module of channel1 is presence on the board	0
6	R	CWDM SFP PRES2	When active, the CWDM SFP module of channel2 is presence on the board	0
5	R	BW SFP PRES1	When active, the BW SFP module of channel1 is presence on the board	0
4	R	BW SFP PRES2	When active, the BW SFP module of channel2 is presence on the board	0
3 to 0	R		Must left to 0	NA

11 比特率门限配置

0x29~0x2D 字节提供用户比特率限制。其中 0x29 和 0x2A 字节分别负责通道 1 和通道 2 的比特率门限设置。

Bit rate threshold configuration						
Bit7 to bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	Bit rate threshold
	0	0	0	0	1	125Mbps
Reserved Default value '000'	0	0	1	0	1	155.52Mbps
	0	0	1	1	1	200Mbps
	0	1	0	0	1	270Mbps
	0	1	1	0	0	622.08Mbps
	0	1	1	1	0	1.0625Gbps
	1	0	0	0	0	1.24416Gbps
	1	0	0	1	0	1.250Gbps
	1	0	1	0	0	2.125Gbps
	1	0	1	1	0	2.48832Gbps
	1	1	0	0	0	2.5Gbps
	1	1	0	0	1	2.67Gbps
	1	1	1	1	1	No limit
	Other					Reserved

12 失锁告警和比特率门限告警

当用户端比特率超过门限时，0x2B 字节将反映出失锁告警和比特率门限告警。该字节的缺省值为“00000000”。

unlock alarm and bit rate threshold alarm				
Bit #		Name	Description	Active
7to4	R		Must left to '0'	NA
3	R	Channel1 unlock alarm	When active, the CDRs can not lock to the input signal of channel 1	1
2	R	Channel2 unlock alarm	When active, the CDRs can not lock to the input signal of channel 2	1
1	R	Channel1 bit rate threshold alarm	When active, the user's bit rate of channel 1 is over channel 1 bit rate threshold	1
0	R	Channel2 bit rate threshold alarm	When active, the user's bit rate of channel 2 is over channel 2 bit rate threshold	1

13 比特率报告

0x2C 和 0x2D 分别负责报告通道 1 和通道 2 的比特率门限，其寄存器的排列方式与 0x29 相同。

14 交叉矩阵编程

两条专门的命令——Matrix Read 和 Matrix Write——用于读取和设置 8x8 交叉矩阵的配置。交叉矩阵的配置有 47 个字节，0x30 字节为读写字节。

15 保护机制配置

0x36 字节用于选择保护类型。缺省值为“00000000”。如果是 SNCP 保护，输入通道在主备用 CWDM 接收器之间选择。寄存器 0x01 的第 0 位指示当前状态。

Protection configuration register - address 0x36				
Bit #		Name	Description	Active
6 to 4	R/W	PROT_SEL[2:0]	WLA protection type selection: When 000=>no protection When 010=> E-SNC When 100=>O-SNC with splitter	NA
3 to 0	R/W	PROT_CONFIG[3:0]	WLA protection configuration: When 1XXX=>force to main When 01XX=>force to spare When 0000=>automatic protection	NA

在 SNCP 保护模式下，输入信号通道在主、备用接收器之间选择，寄存器 0x01 的 0 位指示出当前状态。

SNCP protection status				
Bit #		Name	Description	Active
0	R	SCNP_SPR_ON	Active when in case of SCNP protection, traffic is switched spare channel	1

16 环回配置

0x37 字节用于配置环回模式。缺省值为“00000000”。

loop back configuration				
Bit #		Name	Description	Active
7	R/W	Channel1 Loopback	When active, indicate loop back mode occur in channel 1	1
6	R/W	Channel2 Loopback	When active, indicate loop back mode occur in channel 2	1
5 to 4	R/W		It must be left to '0'	
3 to 2	R/W	Channel1 Mode	When "01", the remote loopback will be selected in channel1. When "10", the local loopback will be selected in channel1. When "11", the local-remote will be selected in channel1	NA
1 to 0	R/W	Channel2 Mode	When "01", the remote loopback will be selected in channel2. When "10", the local loopback will be selected in channel2. When "11", the local-remote will be selected in channel2	NA

4.3.2.4 Matrix GTX08 交叉矩阵

Matrix GTX08 8x8交叉矩阵是一个ASIC芯片，由一系列SiGe BiCMOS组成，最高可对2.7Gb/s数据信号进行透明的交叉处理，用于WLA盘上实现环回、交叉、保护等功能。其所有的操作均由FPGA通过SPI接口总线进行控制完成。

8x8 Matrix inputs connection		
In	Name	Description
1	CWDMRX_D2	CWDM receiver data output2
3	CWDMRX_D1	CWDM receiver data ouput1
5	BWRX_D2	BW receiver data output2
7	BWRX_D1	BW receiver data output1
8x8 Matrix outputs connection		
Output	Name	Description
0	BCDR_D1	Output to BW CDR1
2	BCDR_D2	Output to BW CDR2
5	CWDMTX_D1	Output to CWDM transmitter1
7	CWDMTX_D2	Output to CWDM transmitter2

4.3.2.5 时钟和数据恢复

WLA盘的主要功能是一个多速率自适应的光波长适配器，包含限制器、数据和时钟恢复、时钟同步、1：4解复用器和4：1复用器等功能块，能对100Mb/s～2.67Gb/s之间任何比特率的信号进行3R（Recover, Reshape and Reclock：数据恢复，整形，重定时）处理。

在WLA单元中有2个CDR芯片，用于在信号传输到用户端之前进行再生处理，同时检查信号速率，并提供给ESC控制器以确定是否超出了CDR芯片的处理能力。比特率选择和PLL状态信息见FPGA节。

当CDR失锁或者是接收端有LOS（信号丢失）告警时，FPGA将比特率寄存器置0。如果CDR成功锁定，FPGA将检测到的速率写入比特率寄存器中。在电子网连接保护（E-SNCP）和光子网连接保护（O-SNCP）的应用中，如果采用手动配置模式，网管系统将不允许2路CDR配置为不同的速率。

4.3.2.6 用户端 SFP 收发器

用户端的SFP光收发器是一个低成本的光互连模块，支持热插拔。WLA盘采用SFP光收发器作为E/O和O/E转换器。SFP模块可以方便地按照用户端的速率、传输距离等需求进行配置。SFP模块的工作电压为+3.3V，工作温度范围为0° C～+70° C，内部自带一个支持I²C 总线接口的EEPROM，用以保存模块的型号等信息，以便网管系统查询。接收端支持比特率在100Mb/s～2.67Gb/s之间的信号。

引脚功能描述如下表：

BW transceiver pin out		
Pin number	Symbol	Description
1	VeeT	Transmitter ground
2	Tx fault	Transmitter fault indication
3	Tx disable	Transmitter disable
4	MOD-DEF2	Module definition 2
5	MOD-DEF1	Module definition 1
6	MOD-DES0	Module definition 0
7	Rate select	Select full between full or reduced Receiver bandwidth
8	LOS	Loss of signal
9	VeeR	Receiver ground
10	VeeR	Receiver ground

11	VeeR	Receiver ground
12	RD-	Inv. Receive data out
13	RD+	Receive data out
14	VeeR	Receiver ground
15	VccR	Receiver power
16	VccT	Transmitter power
17	VeeT	Transmitter ground
18	TD+	Transmit data in
19	TD-	Inv. Transmit data in
20	VeeT	Transmitter ground

4.3.2.7 CWDM 端 SFP 收发器

CWDM端的SFP (Small Form Factor Pluggable) 收发器专为SDH、千兆以太网 (Gigabit Ethernet) 和光纤通道 (Fiber Channel) 等城域接入网 (环网或点到点网络) 而设计, 共有8个不同CWDM的标称波长。另外, 我们所选用的SFP模块必须符合MSA (Multi-Sourcing Agreement) 协议, 并根据传输距离的不同而分别定义了2种接收器——PIN和APD。

SFP收发器支持SFP MSA (Multi-Source Agreement)中定义的串行通讯协议, 标准的SFP串行ID提供验证信息, 如收发容量、标准接口、生产厂商以及其他信息。另外, 一些SFP光收发器还提供独特的数字诊断监控接口, 允许实时访问设备运作参数, 如收发器温度、偏置电流、发射功率、接收功率等。在这一版本的WLA中, 暂时不支持数字诊断功能。

4.3.2.8 I²C 总线

SFP收发器包含一个带双线串行接口的EEPROM, 该接口与I²C协议完全兼容, 其时序图如下所示。其中SCL是主机发出的时钟信号, 而SDA是一个双向数据信号。

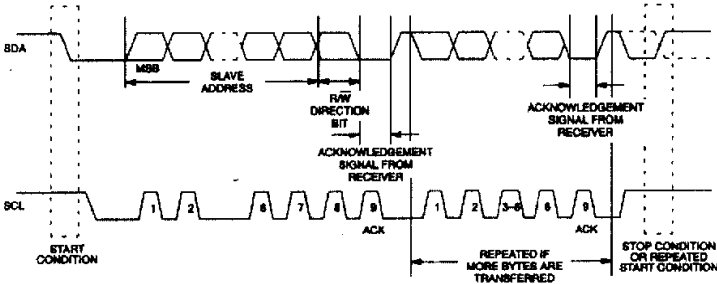


图 4.10 I²C 时序图

该双线串行接口与 FPGA 相连, FPGA 通过一个 I²C 模块读取存储在 EEPROM 中的识别信息。该信息通过 SPI 总线发送到网管系统。SOLOMON FPGA 和串行接口的电路图如下所示。

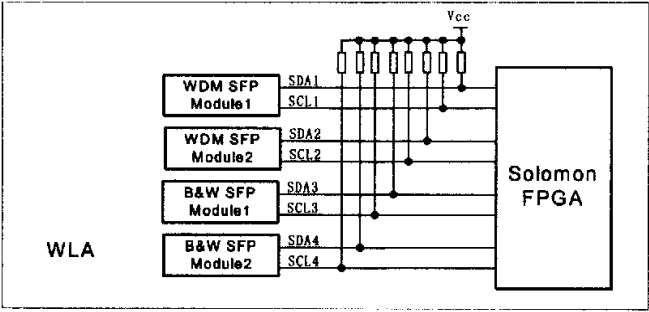


图 4.11 I²C 总线与 FPGA 接口

4.3.2.9 SFP 模块在位检测

SFP 模块中有一个引脚 MOD_DEFO, 它在模块内部是接地的。WLA 盘利用该引脚实现 SFP 模块在位检测功能。电路如下图所示。如果 A 点的电压为高电平, 则该槽位没有配置 SFP 模块, 反之, 如果配置了 SFP 模块, A 点的电压为低电平。网管系统可以通过检测 A 点的电平来判断该槽位是否配置了 SFP 模块。

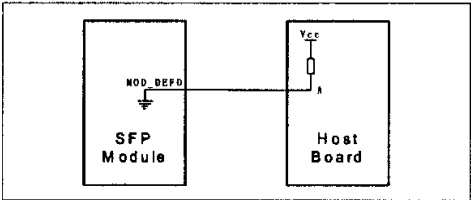


图 4.12SFP 模块在位检测

4.3.2.10 用户带宽限制

WLA 盘使用了一个连续的 CDR 芯片来自动地检测输入数据速率, 以便限制用户带宽。一个控制单元驱动 CDR 芯片按照下表中所列的比特率依次进行扫描, 一旦控制单元检测到 CDR 锁定在输入信号速率上, 它将比较输入信号的比特率和操作人员设置的门限。如果输入信号的比特率超过了门限值, 控制单元将关闭激光器或上报网管系统。这样, 不需要改变任何硬件设置, 操作人员可以方便地实现

限制用户带宽的功能。

Supported Signal Type		
No.	Protocol	Bit rate (Mbits/s)
1	Fast Ethernet, FDDI	125Mbps
2	STM1/OC3	155.52Mbps
3	ESCON/SBCON	200Mbps
4	Digital Video Channel-HDTV	270Mbps
5	STM1/OC12	622.08Mbps
6	Fiber channel	1.0625Gbps
7	OC-24	1.24416Gbps
8	Gigabit Ethernet	1.25Gbps
9	Fiber channel	2.125Gbps
10	STM16/OC48	2.48832Gbps
11	STM16/OC48 with FEC	2.67Gbps

下图是控制单元搜索输入信号比特率的流程图，其算法在 SOLOMON FPGA 中实现。详细内容参见 SOLOMON FPGA 节。

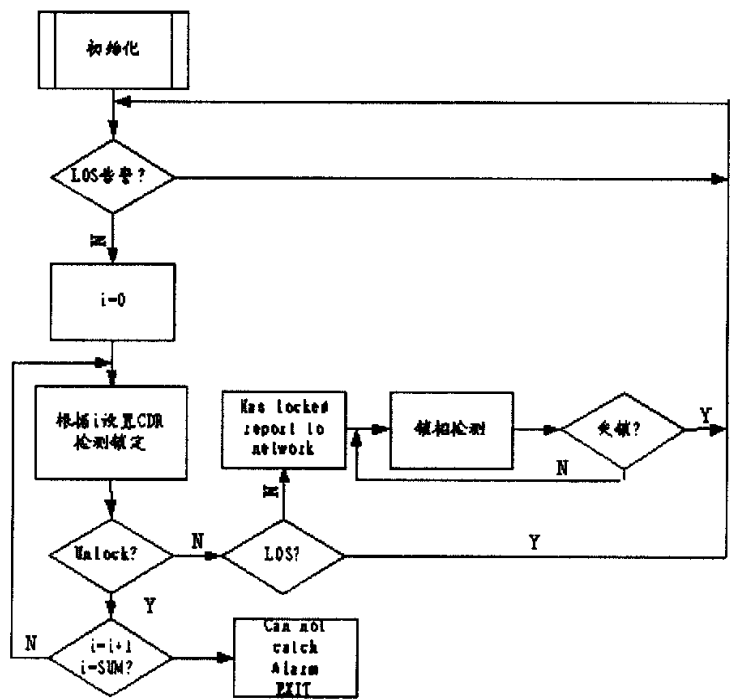


图 4.13 比特率搜索流程图

4.3.2.11 保护机制

在我们这套 CWDM 系统中，提供了两层保护。一个是子网连接保护（SNCP），一个是光复用段保护（OMSP）。其中子网连接保护由 WLA 盘提供，子网连接保护的目的是在出现故障之后恢复通信，最初在带 OADM 的环网中应用。根据不同的用户需求，分别可以采用电子网连接保护（E-SNCP）和光子网连接保护（O-SNCP），二者都由 LOS（信号丢失）告警信号触发。

WLA 盘通过 8x8 交叉矩阵来实现 E-SNCP。

1 业务上下配置

业务上下配置是 WLA 的缺省配置，从 CWDM 接收到的信号下到用户端的发射器，同时从用户端接收到的信号通过 CWDM 发射器上到光纤。

该配置可用于终端设备、背靠背设备和 OADM 设备中。两个收发器可独立配置，如当通道 1 的收发器配置为业务上下模式，通道 2 的收发器可以配置为上下模式或环回模式或不配置。交叉矩阵的设置如下图所示。

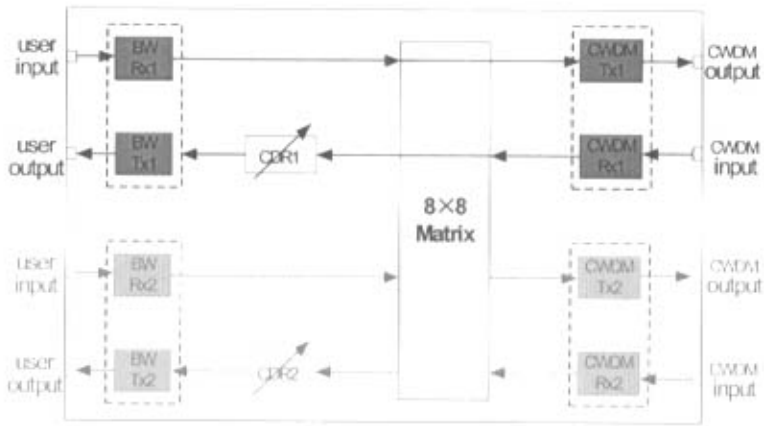


图4.14 业务上下模式的交叉矩阵配置

2 近端环回配置

近端环回配置用于 BW SFP 模块环回测试，用户端接收到的信号经交叉矩阵环回到同一收发模块的发射端，以便使用误码分析仪测试 SFP 光模块。E-SNCP 模式中不允许进行近端环回配置。

同样，两个通道的光收发器也可以独立配置。交叉矩阵的设置如下图所示。

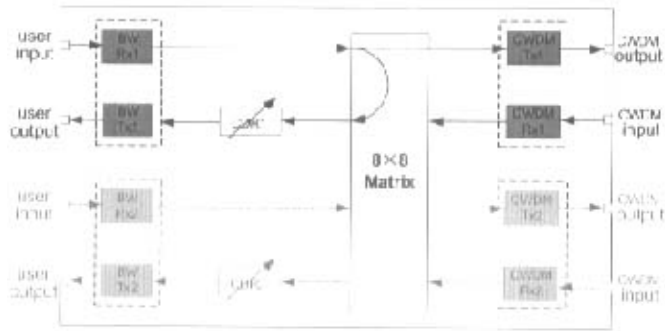


图4.15 近端环回模式的交叉矩阵配置

3 远端环回配置

远端环回配置用于 CWDM SFP 模块环回测试, CWDM 端接收到的信号经交叉矩阵环回到同一收发模块的发射端, 以使用误码分析仪测试 SFP 光模块。E-SNCP 模式中不允许进行远端环回配置。

同样，两个通道的光收发器也可以独立配置。交叉矩阵的设置如下图所示。CWDM 接收端收到的信号通过交叉矩阵后回到发送端，以便于测试。

远端环回不能用于 E-SNCP 模式下。

8×8交叉矩阵的配置如下图所示：

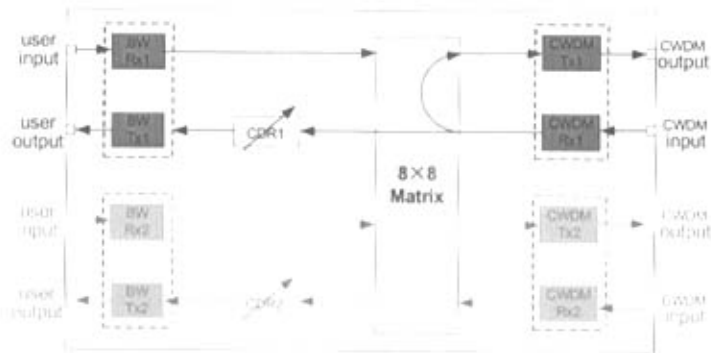


图4.16 远端环回模式的交叉矩阵配置

4 近远端环回配置

近远端环回模式用于同时 BW 和 CWDM 端的测试，该模式将 BW 端和 CWDM 端接收到的信号分别环回到同一个 SFP 模块的发射端。同样，近远端环回模式不能用于 E-SNCP 模式。

Alarms usage in Local-remote Loopback Configuration	
Alarm (I)	Action
BWRX1_LOS	Shutdown BW TX1
CWDMRX1_LOS	Shutdown CWDM Tx1
0-SNCP & 'Ch1 Loopback' & 'Ch2 Loopback'	Shutdown BW TX2
0-SNCP & 'Ch1 Loopback' & Not 'Ch2 Loopback'	Shutdown BW TX2
0-SNCP & Not 'Ch1 Loopback' & 'Ch2 Loopback'	Shutdown BW TX1

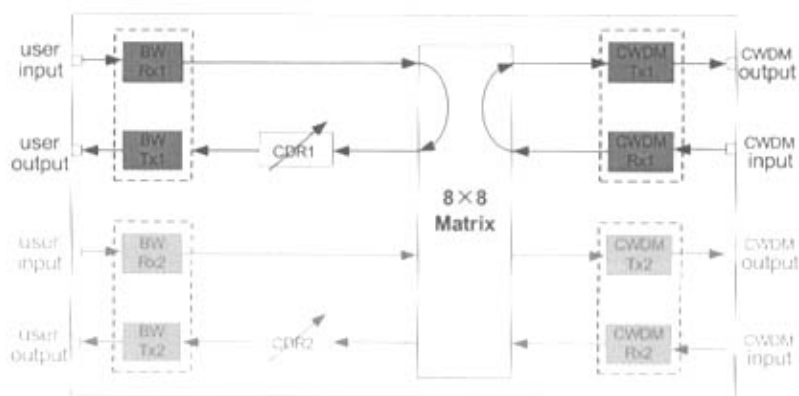


图4.17 近/远端环回模式的交叉矩阵配置

5 E-SNCP

电子网连接保护（E-SNCP）是在电层面采用所谓“并发优收”的策略，即在发送端，信号通过交叉矩阵广播到两个通道，而在接收端按照失效条件从二者中选一路。E-SNCP使用WLA盘上的两个CWDM收发器，一个配置为主用，另一个为备用。系统根据CWDM接收器的告警和状态信息采取保护动作。在这种应用中，备用的用户端收发器不需要配置。

在E-SNCP应用中，WLA的SOLOMON FPGA接受两种操作模式：强制和自动。强制模式的优先级高于自动模式。在强制模式下，系统可以控制交叉矩阵将CWDM RX1或CWDM RX2无条件地切换到BW TX1。在自动模式下，FPGA根据CWDM RX1或CWDM RX2的LOS告警进行切换。如下表所示。

Alarms usage in E-SNCP with auto mode	
Alarm (1)	Action
CWDMRX1_LOS& not CWDMRX2_LOS	Switch CWDM RX2 the BW TX1
CWDMRX2_LOS& not CWDMRX1_LOS	Switch CWDM RX1 the BW TX1
CWDMRX1_LOS& CWDMRX2_LOS	No action
Not CWDMRX1_LOS& not CWDMRX2_LOS	No action

注：为清楚起见，假定表中所有告警高电平有效。

General Alarms usage in E-SNCP Configuration	
Alarm (1)	Action
BW RX1_LOS	Shutdown CWDM Tx1 and CWDM Tx2
Not "SNCP SPR ON" & CWMRX1_LOS	Shutdown BW Tx1
"SNCP SPR ON" & CWMRX2_LOS	Shutdown BW Tx1

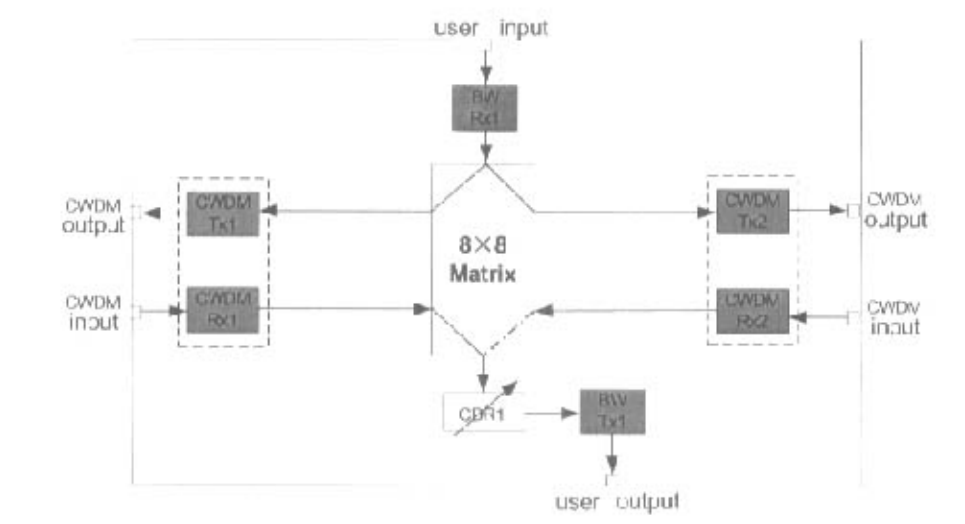


图4. 18 ESNCP模式的交叉矩阵配置

6 0-SNCP

光子网连接保护（0-SNCP）是在光层面采用“并发优收”策略。在发送端，信号通过分光器把光信号广播到两个通道，而在接收端，通过耦合器根据失效条件接收信号。0-SNCP用到了WLA盘上的两个CWDM收发器，一个配置为主用，另一个为备用。系统根据CWDM接收器的告警和状态采取保护动作。

在0-SNCP应用中，WLA的SOLOMON FPGA接受两种操作模式：强制和自动。强制模式的优先级高于自动模式。在强制模式下，系统可以控制FPGA无条件地将BW TX1或BW TX2打开或关闭。在自动模式下，FPGA根据CWDM RX1或CWDM RX2的LOS告警进行打开或关闭。如下表所示。

Alarms usage in O-SNCP with auto mode	
Alarm (1)	Action
CWDMRX1_LOS& not CWDMRX2_LOS	Disable BW TX1, enable BW TX2
CWDMRX2_LOS& not CWDMRX1_LOS	Enable BW TX1, disable BW TX2
CWDMRX1_LOS& CWDMRX2_LOS	No action
Not CWDMRX1_LOS& not CWDMRX2_LOS	No action

注：为清楚起见，假定表中所有告警高电平有效。

General Alarms usage in O-SNCP Configuration	
Alarm (1)	Action
BWRX1_LOS	Shutdown CWD Tx1
BWRX2_LOS	Shutdown CWD Tx2
CWDMRX1_LOS	Shutdown BW Tx1
CWDMRX2_LOS	Shutdown BW Tx2

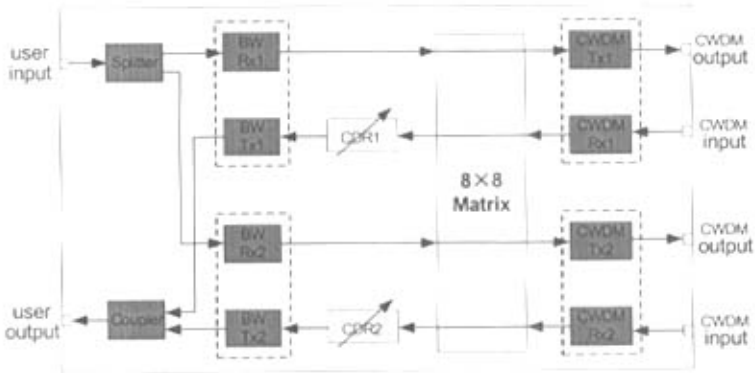


图4. 19 OSNCP模式的交叉矩阵配置

7 硬件告警

WLA的硬件告警内容如下：

- ◇ 管理界面告警
- ◇ 光模块告警
- ◇ 面板指示灯控制告警
- ◇ SFP模块类型识别

第五章 WLA 样机测试

经过近三年的努力，我顺利地完成了 WLA 盘的硬件设计以及实验室样机的装配工作，完成了原型机的测试工作，验证了设计的正确性，并对存在的缺陷进行修改。现阶段，我带领一个小组进行性能测试，并分析测试结果。下面是对正式定版的 WLA 盘样机进行测试的情况。样机实物如图 5.1 所示。

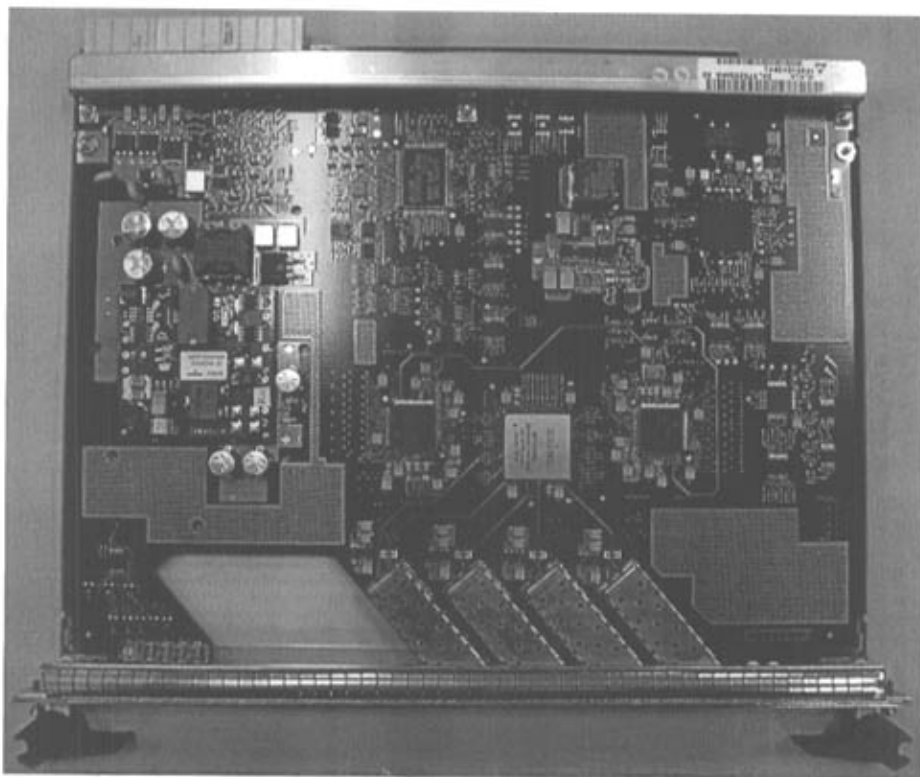


图 5.1 样机实物图

5.1 测试环境

5.1.1 测试设备

样机测试所用的主要仪表如下表所示：

仪表	参考型号	数量
光谱分析仪	Agilent86142B	1
SDH 分析仪	Anritsu1570A	1
数字数据分析仪	Anritsu1632C	1
光示波器	Agilent86100	1
光功率计	WWG OLP-15C	1
光衰减器	WWG OLA-15A	4

5.1.2 测试项目

主要测试项目如下：

1. 保护测试
2. 超过 50km 跨距时 LOS 测试
3. 误码和眼图测试
4. 测试 CDR
5. 测试 BW 和 CWDM 接口

以上所有测试项目都是在三个不同的温度下进行，温度及温度变化率如图 5.2 所示。

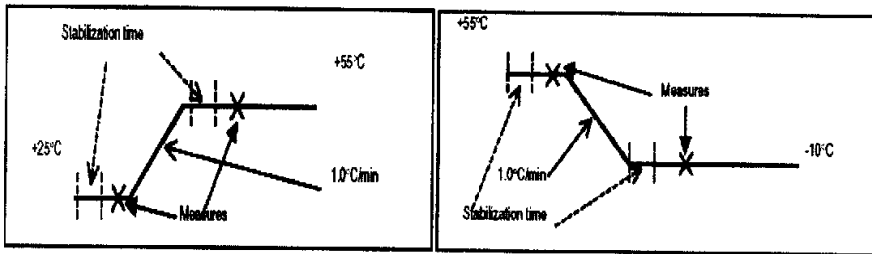


图 5.2 测试环境温度及温度变化率

5.2 接口性能测试

我们首先对 WLA 的光接口性能进行了测试，下图是 WLA 光接口性能测试的连接图。

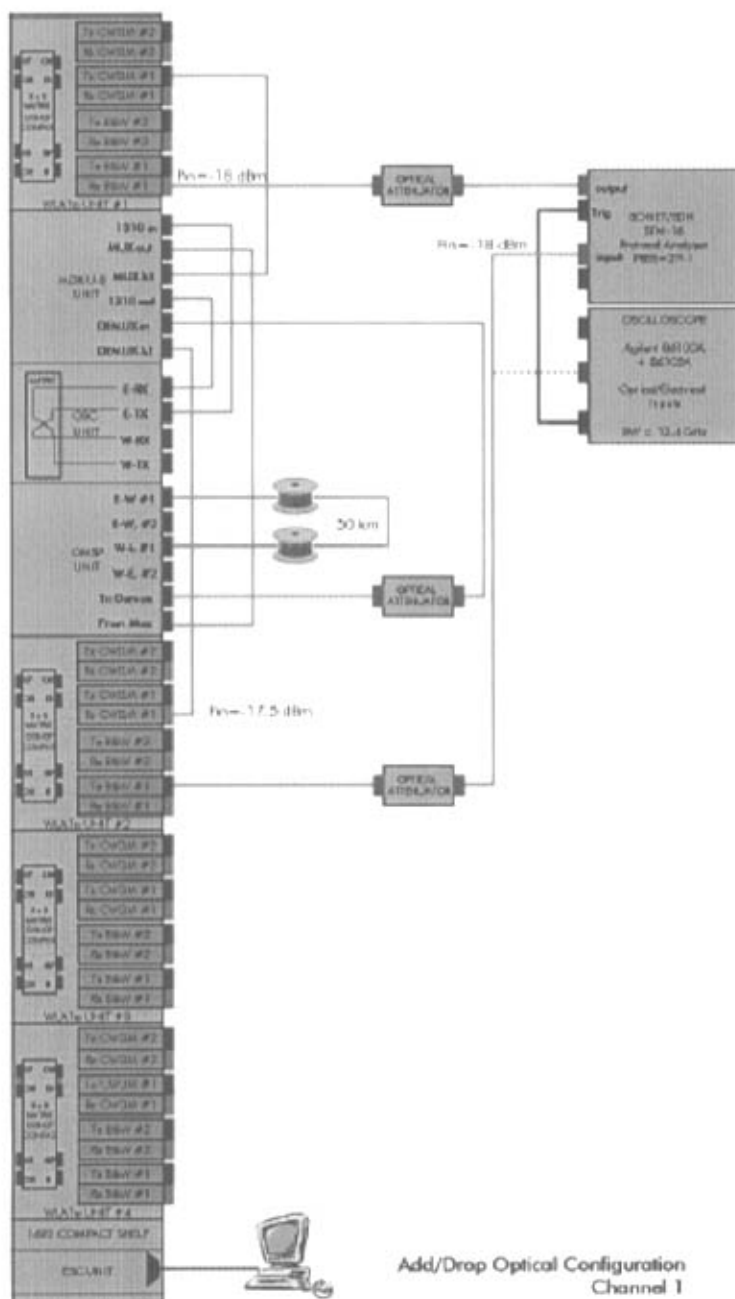


图 5.3 接口性能测试连接图

WLA 盘共有 2 个 CWDM 槽位，每个槽位可以配置 8 个标准波长之中任意一个 SFP 光收发模块，每个模块包含光发送机和光接收机。下面是对 1490nm 波长光模块接收机和发送机的性能测试记录。

接收机的性能测试侧重于灵敏度、过载功率和 LOS 告警门限的测试。温度从

-10℃到+55℃变化时，在 1×10^{-12} 误码率条件下接收机灵敏度小于-23dBm，小于设计规定的-18 dBm；过载功率和 LOS 告警门限也都超过了系统设计的要求。

发送机的性能测试侧重于波长稳定度、消光比和眼图测试三个方面。由于本系统采用的激光器不带制冷器，所以波长的温度稳定度测试尤为重要。图 5.4~5.6 表示了低温、室温和高温环境下波长漂移、20dB 谱宽和边模抑制比。图 5.7~5.9 表明了不同温度下眼图和消光比的测试结果。

在-10℃到+55℃范围内，波长漂移 4.26nm，小于设计要求的 7nm；消光比 9.6dB，大于设计要求的 8.2 dB；边模抑制比约 40 dB，远大于设计要求的 8.2 dB。测试结果表明，光接口的设计满足系统设计要求。

1. Rx 端性能

TEST ITEM	SPEC	RESULT		
		-10℃	+25℃	+55℃
灵敏度@BER= 1×10^{-12}	<-18dBm	-23.2	-23.6	-23.0
过载@BER= 1×10^{-12}	>-3dBm	>-3	>-3	>-3
LOS 门限	<-25.5dBm	-27.6	-28.1	-27.5

2. Tx 端性能

TEST ITEM	SPEC	RESULT		
		-10℃	+25℃	+55℃
波长稳定度 ^①	($\lambda - 5.5\text{nm}$) ~ ($\lambda + 7.5\text{nm}$)	1488.29	1490.75	1492.55
20dB 谱宽	<1nm	0.27	0.4	0.3
边模抑制比	>30dB	39.32	42.73	40.15
消光比	>8.2dB	10.49	9.67	10.43
眼图 ^②	ITU-T G. 957	OK	OK	OK

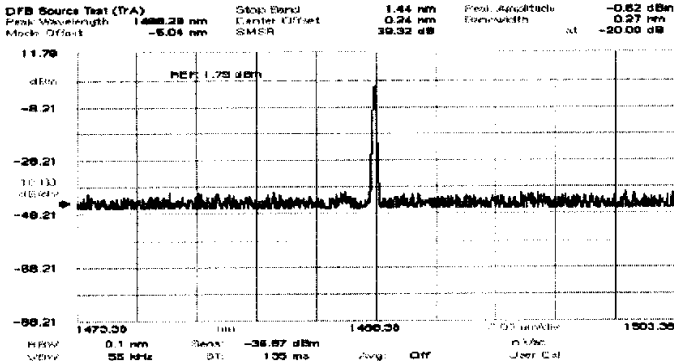


图 5.4 光谱特性@ -10℃

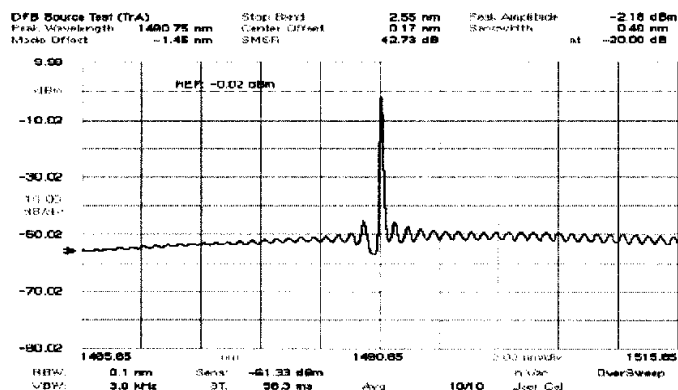


图 5.5 光谱特性@+25℃

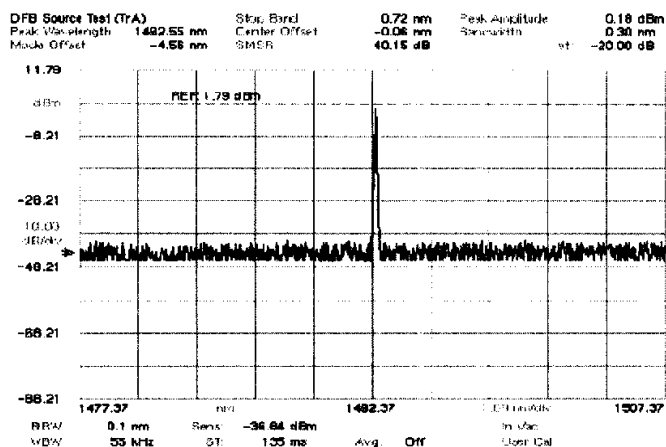


图 5.6 光谱特性@+55℃

发送机波形（眼图）应满足 CWDM 设备光接口的参数要求。我们测试了在不同的温度条件下 1490nm 波长光模块发送机的眼图。下面图 5.7~5.9 显示了在 OC-48/STM-16 眼图模板（见图中方块）下的测试结果。以上的测试结果表明，在整个工作温度范围内，WLA 光接口发送机的性能满足 ITU-T G.957 的有关规定。

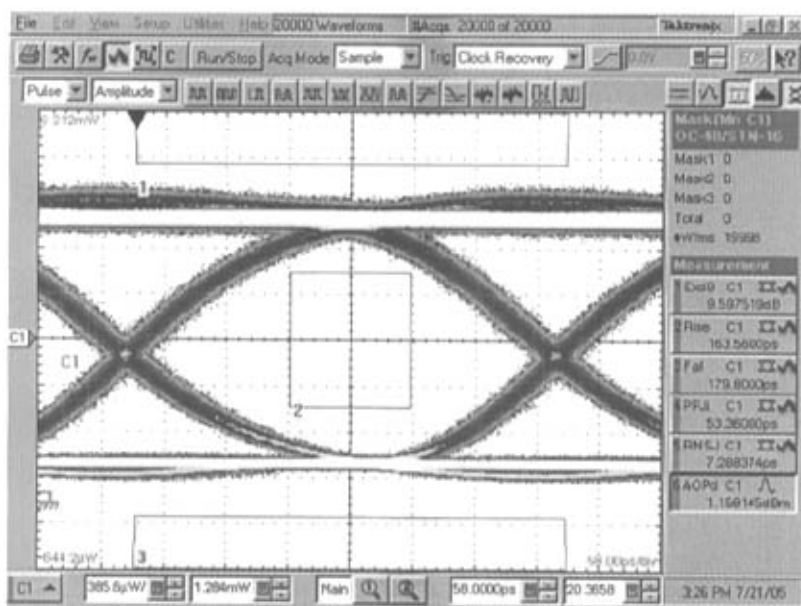


图 5.7 眼图特性@ -10℃

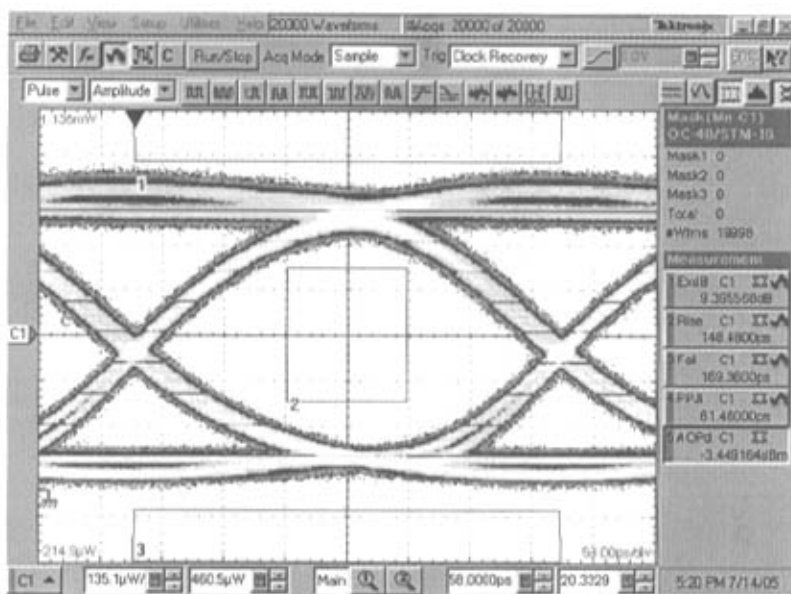


图 5.8 眼图特性@+25℃

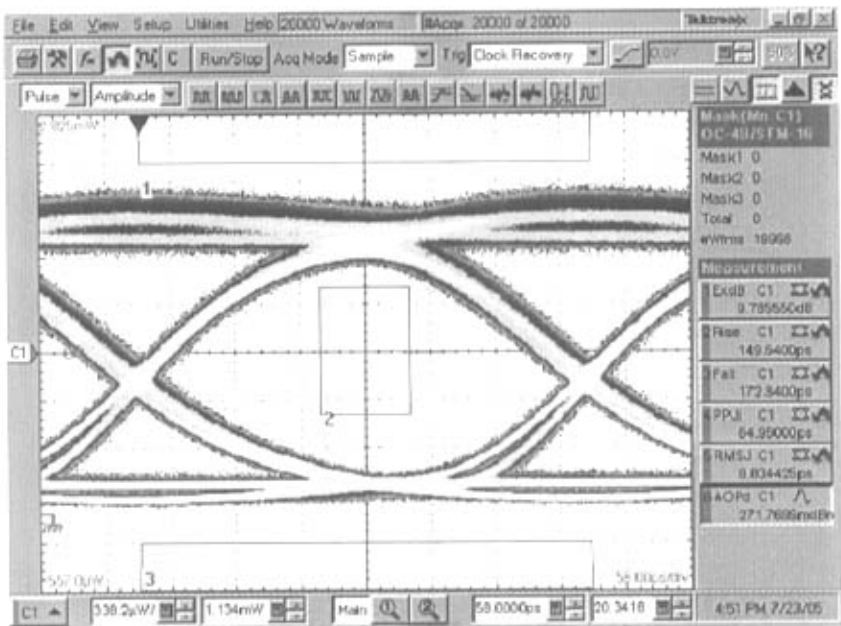


图 5.9 眼图特性@+55℃

5.3 传输性能测试

传输性能测试是以 SDH 分析仪为用户端信号源, 对 WLA 盘进行模拟实际使用环境的测试。传输性能测试包括输入抖动容限、输出抖动、抖动传递函数和长时间误码测试等项目。

测试连接示意图如图 5.10 所示。

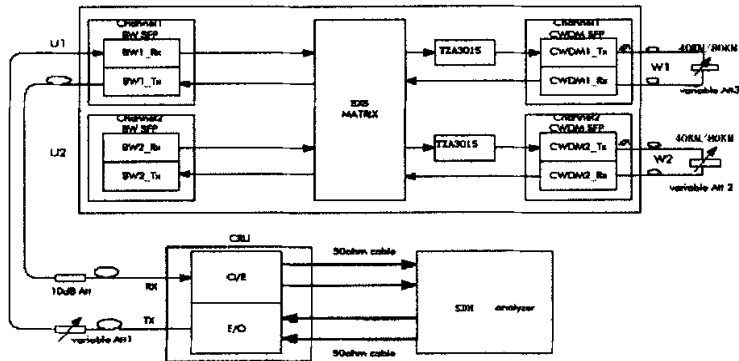


图 5.10 传输特性测试连接示意图

下表是不同温度条件下对 WLA 盘的传输性能测试结果, 包括输入抖动容限、

输出抖动、抖动传递函数以及长期误码率测试等。

测试项目	标准	测试结果		
		-10℃	+25℃	+55℃
抖动容限	ITU-T G. 958 GR-253-CORE	见图 5-11	见图 5-12	见图 5-13
抖动传函	ITU-T G. 958 GR-253-CORE	见图 5-14	见图 5-15	见图 5-16
输出抖动	ITU-T G. 825 GR-253-CORE 5kHz-20MHz≤1.5	0.068U _{Ipp}	0.06U _{Ipp}	0.075U _{Ipp}
	ITU-T G. 825 GR-253-CORE 1MHz-20MHz ≤ 0.15	0.028U _{Ipp}	0.0025U _{Ipp}	0.0033U _{Ipp}
长期误码	BER ≤ 1 × 10 ⁻¹³ @10h	0@12 hours	0@12 hours	0@12 hours

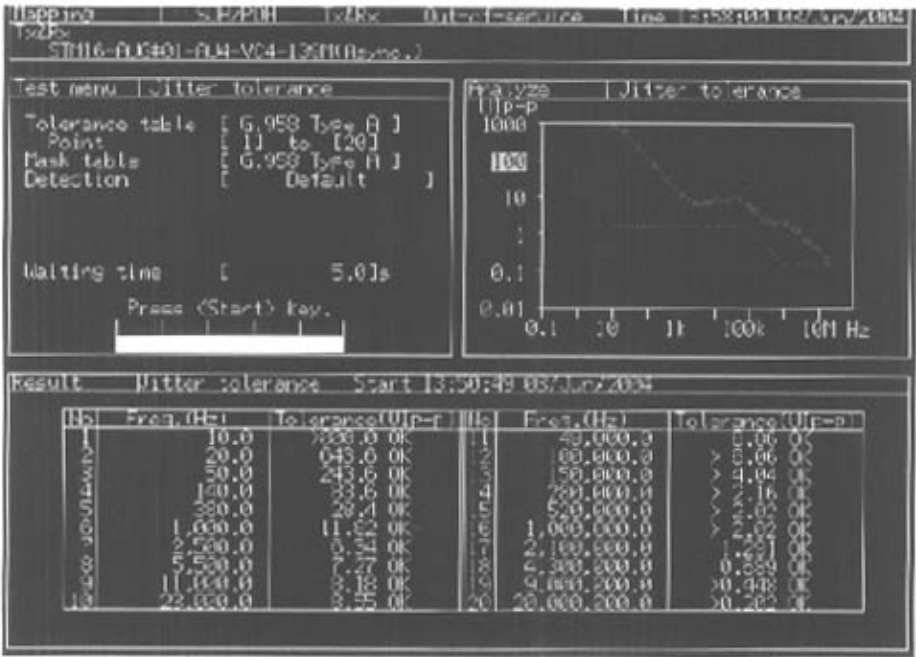


图 5.11 输入抖动容限@-10℃

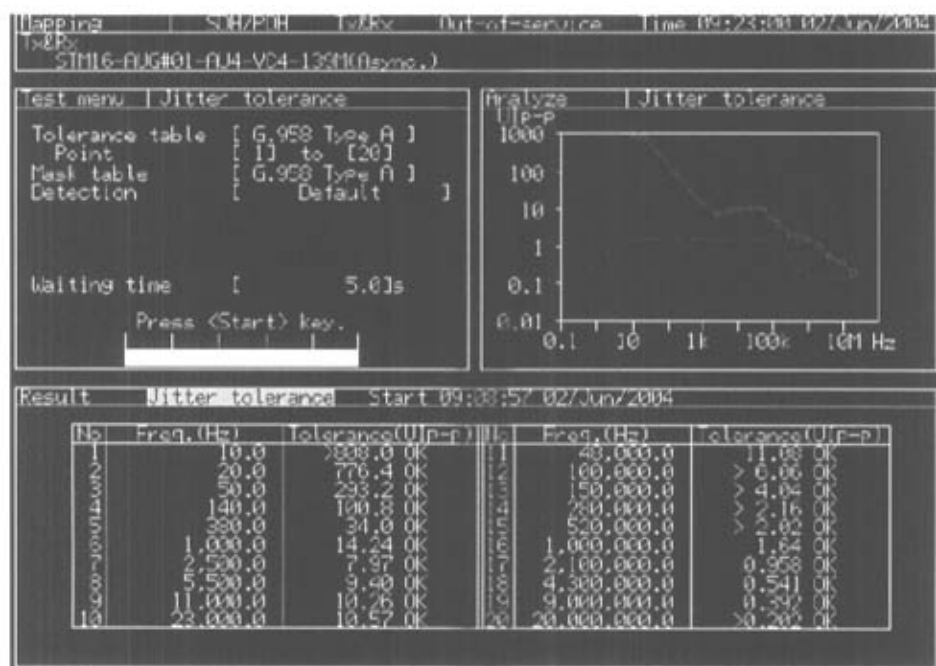


图 5.12 输入抖动容限@+25℃

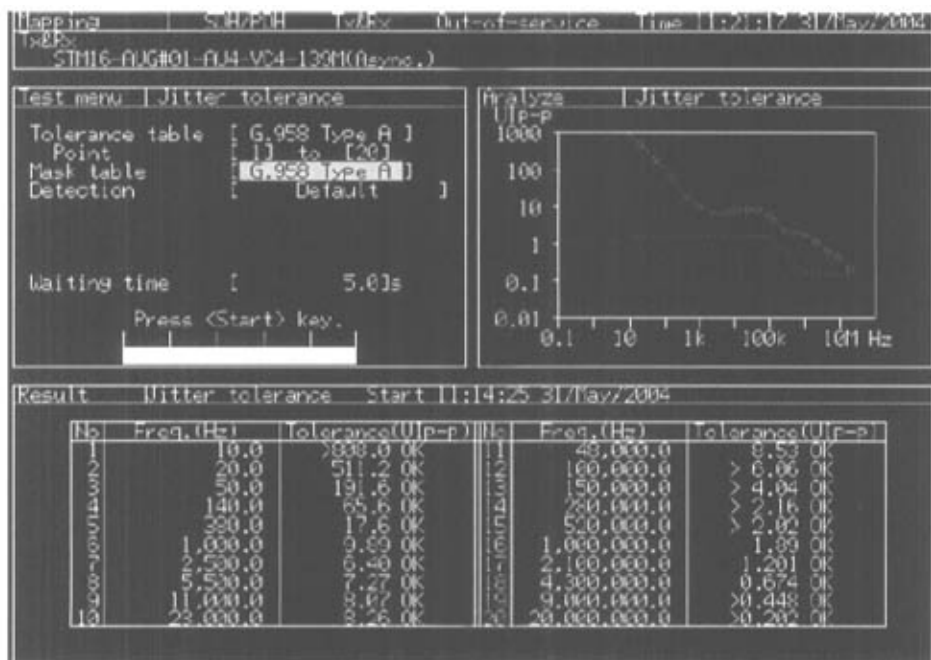


图 5.13 输入抖动容限@+55℃

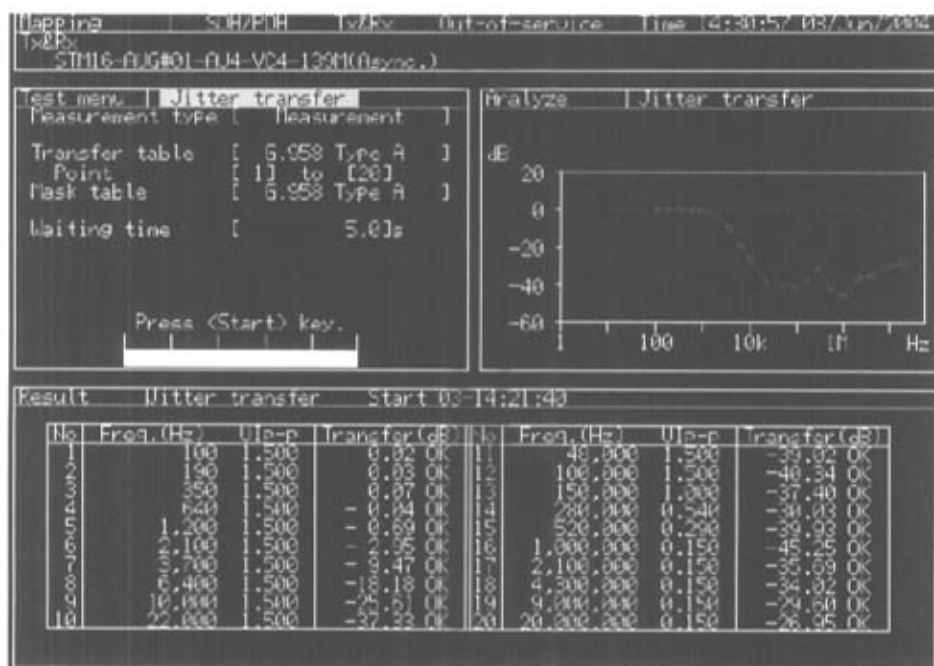


图 5.14 抖动传函@-10℃

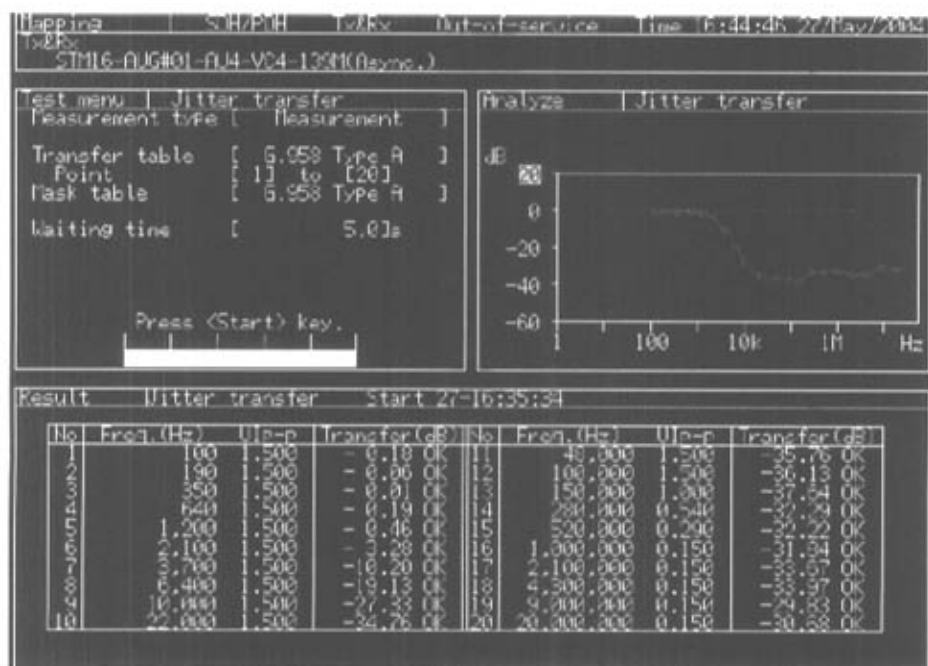


图 5.15 抖动传函@+25℃

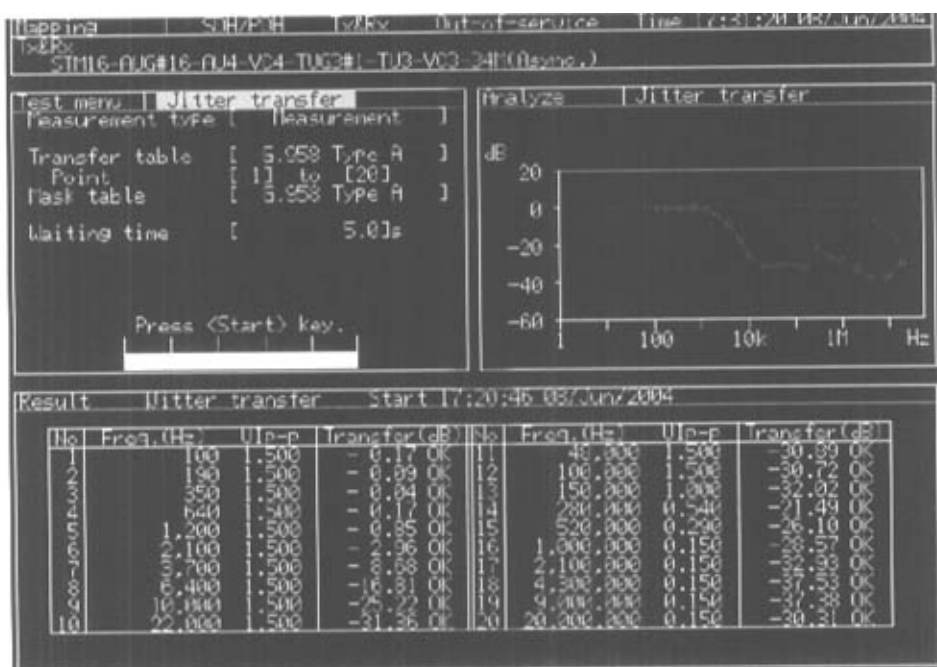


图 5.16 抖动传函@+55℃

不同温度条件下的测试表明：

(1) 在整个工作温度范围内，WLA 的输入抖动容限满足 ITU-T G.825 对 STM 网络接口的要求。

(2) 在整个工作温度范围内，WLA 的抖动传递函数满足 ITU-T G.958 对 STM 网络接口的要求。

5.4 功能测试

功能测试包括 OSNCP、LOS、保护倒换时间测试，和 LOS 门限测试。

5.4.1 OSNCP、LOS 和保护倒换时间测试

OSNCP、LOS、保护倒换时间测试的测试设备和连接如图 5.17 所示。

5.4.2 LOS 门限测试

LOS 门限测试的测试设备和连接如图 5.18 所示。

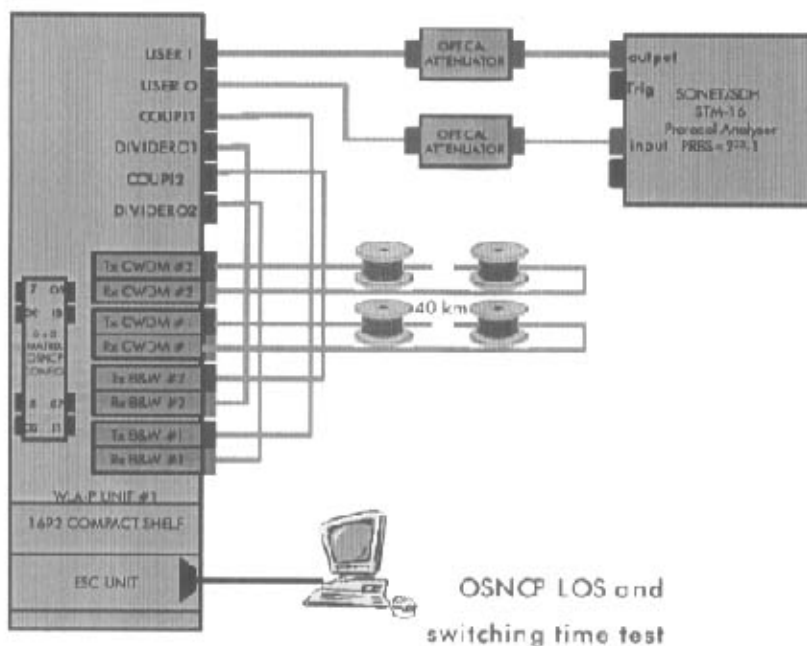


图 5.17 保护倒换测试连接图

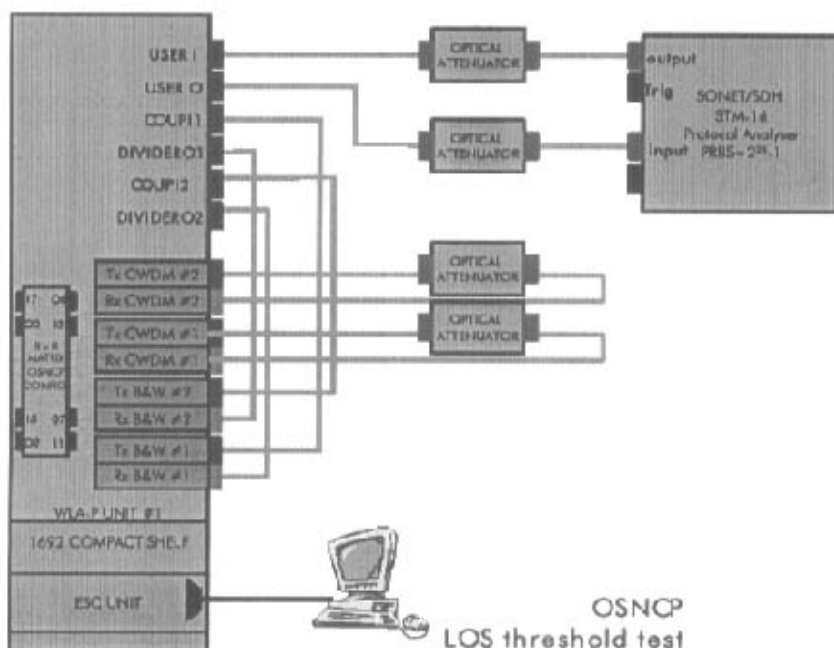


图 5.18 LOS 告警门限测试连接图

ELECTRICAL TESTS	SPEC	RESULTS		
		-10°C	+25°C	+55°C
Channel 1				
Switching time over 50 km ¹	< 50 ms	< 1 ms	< 1 ms	< 1 ms
LOS on break over 50 km	Must be detected	OK	OK	OK
Channel 2				
Switching time over 50 km	< 50 ms	< 1 ms	< 1 ms	< 1 ms
LOS on break over 50 km	Must be detected	OK	OK	OK
CDR Lock				
125 Mbps – 2 ⁷ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
155,52 Mbps – 2 ¹³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
200 Mbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
270 Mbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
622,08 Mbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
1,0625 Gbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
1,24416 Gbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
1,250 Gbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
2,125 Gbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
2,48832 Gbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
2,5 Gbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
2,67 Gbps – 2 ²³ ·1	Must auto-lock	OK	OK	OK
Unit				
Start after 10 min in temperature	All Alarms OFF	OK	OK	OK
Shelf supply set to min (-36V)	All Alarms OFF	OK	OK	OK
Shelf supply set to max (-72V)	All Alarms OFF	OK	OK	OK

测试结果表明，OSNCP、LOS、保护倒换时间和 LOS 门限等指标完全满足系统设计的要求。

5.5 结论

经过对 WLA 盘的全面测试，结果表明，我负责设计的这个多速率自适应光适配器完全符合 ITU-T 相关规范中对 CWDM 设备接口的要求，并满足不小于 40km 无中继传输的系统设计要求。达到了预期的设计目标。在设计过程中，无论是高速电路的硬件设计，还是系统整体性能的测试和分析，都得到了锻炼和提高。

目前，该系统已成功进入国内和国际市场，在欧洲、北美、澳大利亚和亚洲的韩国等国家或地区都投入使用。同时，该系统还入选上海市 2005 年度第一批专利新产品，享受上海市财政局给予的研发补贴和上海市税务局的税收优惠。本人有幸作为该项目核心小组成员之一，参加该项目并在其中承担了该系统核心模块的研制、系统性能测试和测试结果分析等工作，并提供改进意见。对于 CWDM 系统，还有更进一步的工作要做，如 16 波的 CWDM 系统（波长范围从 1270nm 到 1610nm）的研制和远距 CWDM 系统（如采用拉曼光纤放大器的 CWDM 系统）的研制，为促进我国的光通信事业作出应有的贡献。

参考文献

- [1] Govind P. Agrawal, *Fiber communication system*, Chapter 7
- [2] T. Miyamoto, T. Tsuzaki, etc, *Highly-Nonlinear-Fiber-Based Discrete Raman Amplifier for CWDM Transmission System*, MF19, OFC2003
- [3] H. Thiele, L. Nelson, etc, *Linear Optical Amplifier for Extended Reach in CWDM Transmission systems*, MF21, OFC2003
- [4] Dr Santanu Das, *Coarse Wavelength Division Multiplexing-Riding the Wave of Low cost for Metro and Access*, Business Briefing, GLOBAL OPTICAL COMMUNICATIONS 2003
- [5] 汪先明, *粗波分复用技术及其标准化进展*, 2002
- [6] 毕纪军, 孙小菡, 张明德, *CWDM 关键技术研究*, 电子器件, Vol. 25, No. 4, Dec., 2002
- [7] 肖剑, *宽带城域网的组网技术分析*, 网络通信世界, 2001, (1)
- [8] 王志军, *城域 DWDM 光网络技术方案研究*, 邮电设计技术, 2002, (5)
- [9] Yi Chen et al, *Metro Optical Networking*, Bell Labs Technical Journal, 1999, (1)
- [10] Daniel O. Awduche, et al. *Multi-Protocol lambda switching: Combining MPLS traffic engineering control with optical cross-connects*. Internet draft, Work in progress, Nov. 1999.
- [11] P. Ashwood-Smith and L. Berger, *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Constraint-based Routed Label Distribution Protocol (CR-LDP) Extensions*, January 2003.
- [12] Banerjee, et. al. *Generalized multi-protocol labels witching: An over view of routing and management enhancements[J]*. IEEE Comm. Mag., 2001, 39(1):144-150.
- [13] 龚倩, 徐荣, 张民, 叶培大编著. 北京邮电大学出版社. 2002. 6. *光网络的组网与优化设计*: 7~8, 56~57
- [14] Nasir Ghani, Sudhir Dixit, Ti-Shiang Wang. *On IP-over-WDM integration*. IEEE Communication Magazine, March 2000: 72~84
- [15] 韦乐平, *光同步数字传送网*, 人民邮电出版社, 1998
- [16] 邓忠礼 赵晖, *光同步数字传输系统测试*, 人民邮电出版社, 2001
- [17] Biswanath Mukherjee, *WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges*, Oct. 2002

致谢

经过近三年的准备和修改，如今这篇论文终于如期完成定稿了。在写这篇论文的过程中，离不了老师、同事和朋友们的指导、帮助、关心和支持，特借此一隅向他们表达我的拳拳感激之情。

首先要感谢的是我的指导老师蒋凤仙老师，正是她的耐心指导和热情帮助，这篇论文才得以如期地顺利完成。每一次与蒋老师的接触中，都能感受到她那和蔼可亲、乐观热情的生活态度和严谨认真、诲人不倦的工作精神。这些优秀品质值得我永远学习。

同时还要感谢我们 FPGA 小组、测试组的同事们，由于你们的密切配合和大力支持，才能在较短的时间内完成了从电路设计到最终测试定版的全过程。并要感谢领导对我的学业的鼓励和关心。

另外，还要感谢我的妻子，因为我平时工作很忙，经常需要加班，在家的时间也大都分配在学习上。是她承担了大量的家务，并给予我理解和支持，使我能全身心投入学习和工作。

最后，感谢所有曾经帮助我的同学和朋友们。

论文独创性声明

本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中除了特别加以标注和致谢的地方外，不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。其他同志对本研究的启发和所做的贡献均已在论文中作了明确的声明并表示了谢意。

作者签名： 吴楚 日期： 05.11.18

论文使用授权声明

本人完全了解复旦大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。保密的论文在解密后遵守此规定。

作者签名： 吴楚 导师签名： 陈安 日期： 05.12.4