北京大学

Peking University

硕士研究生学位论文

(申请工学硕士学位)

Graduate Thesis for M.Eng. Degree

题目：基于阵列波导光栅（AWG）的光分插复用器（OADM）研究

Title：Research on Optical Add/Drop Multiplexers (OADM) Based on Arrayed Waveguide Grating(AWG)

姓　　名：　邓恒华
Name:　Henghua Deng

学　　号：　19707012
Student Number:　19707012

系　　别：　电子学系
Department:　Department of Electronics

专　　业：　通信与信息系统
Specialty:　Communication and Information Systems

研究方向：　光纤通信
Area of Research:　Fiber-Optic Communication

导　　师：　吴德明教授　徐安士教授
Supervisor:　Prof. Deming Wu & Prof. Anshi Xu

二零零零年六月十九日

June 19, 2000

摘　　要

波分复用全光网由于其高传输容量、灵活的波长路由、传输透明性以及与现有系统良好的兼容性，而得到了迅速发展。光分插复用器以及阵列波导光栅分别作为全光网的关键节点和关键器件，正在方兴未艾地发展。

本论文系统论述了全光网（AON）的重要节点光分插复用器（OADM），以及阵列波导光栅（AWG）。概述了全光网意义，优点及发展概况；介绍了 OADM 结构，分类及研究动态，提出了研究见解；阐述了 AWG 的基本原理、特性、功能、配置。系统总结了 AWG 曾存在的问题及解决情况，以及目前 AWG 的广泛研究和应用。本文提出了一种具有广泛意义且简单适用的测量 AWG 传输特性的方法。

随着系统对自愈和保护提出了越来越高的要求，双向 OADM(BADM)越来越显出重要价值。本论文分析了 BADM 的设计及在保护和自愈环中的应用，对各种流行 OADM 结构进行了双向化扩展，设计了一系列新型 BADM。其中，作者提出的 AWG 型全双工 BADM 有极好的对称性、可扩充性、及传输性能，具有极高实用价值。然后，对设计的 BADM，包括光栅型半双工 BADM，环回/折返路径配置 AWG 型半双工/双工 BADM，进行了双向传输实验，比较了各自优缺点。这些工作是目前 BADM 研究的系统地补充，对 WDM 系统的保护和自愈有重要意义。

阵列波导光栅（AWG）是光电子器件研究的重大突破。阵列波导最早是荷兰的 M.K.Smit 提出的（1988 年），然后 AT&T 贝尔实验室的 C.Dragone 在其基础上加了两个星型耦合器（1991 年）。之后经过日本 NTT 公司，美国马里兰大学，朗讯公司等不懈努力地研究，已很好解决了 AWG 曾经存在的问题如损耗大、串扰大、温度敏感、偏振敏感性。AWG 的路由表是一种拉丁路由，对全光网意义非常重大。麻省理工学院（MIT）的 Barry 博士对该路由特性进行了详尽研究。目前 AWG 已进入了可实用化的阶段。作为最有前途的波分复用器，它已广泛应用于复用器、解复用器、滤波器、OXC、OADM、激光源以及双向网络等。本论文针对 AWG 在 OADM 方面的应用进行了系统而详尽的研究。

作者首先对基于 AWG 的 OADM 模型进行了同频串扰方面的研究。得出了 OADM 各个端口（Out 端口，Drop 端口）各个波长（Add/Drop 波长以及直通波长等）同频串扰与分插复用通道、直通通道、空闲通道的数目的关系。分析了两种典型情况（无功率均衡和有功率均衡）的同频串扰曲线。发现同频串扰只与环回路径的数目有关且随之增大，直通通道的同频串扰与系统是否进行功率均衡无关，而分插复用通道与之有关。并且实验验证了理论结果。实验理论的偏差是因为理论尚未考虑 AWG 的损耗不均衡性。该部分工作是对斯坦福（Stanford）大学 S.M.Gemelos 等 1999 年对基于 AWG 的 OADM 异频串扰研究的有益补充。同时发现：AWG 的损耗不均衡性不但对传输损耗有影响，同时对传输串扰也有严重影响。目前文献尚没有报道过该结论。

由于衍射效率不一致，AWG 器件都有损耗不均衡性。该不均衡度在全光网中的积累对系统性能将是致命破坏。由于工艺尚不能实现理想设计极限的均一衍射效率，所以对 AWG 的损耗均衡研究就很有意义。本论文首次将移位连接原理应用于对单个 AWG 组成的 OADM 损耗不均衡度进行补偿，该原理同样可应用于 AWG 级联情况。得出了损耗不均衡度与移位 δ 是二次曲线的关系，以及所能实现最小损耗不均衡度的极限，证明了该极限仅与 AWG 端口数目 N 有关，与损耗不均

衡特性参数α、β无关；且不管对单个AWG构成的OADM还是偶数个AWG级联的移位均衡配置，可能实现的最小损耗不均衡度都相同，最好效果是使系统总损耗不均衡度下降为均衡前的 21.4%。目前文献尚没有报道过以上理论结果。最后通过实验很好地证明了理论推导。

环回路径配置和折返路径配置是 AWG 的两种基本配置。日本 NTT 公司 Y.Tachikawa 等 1993 年提出环回路径配置；NTT 的 H.Takahashi 等 1994 年提出了折返路径配置，并且理论分析了当 AWG 串扰为固定值时，折返路径配置比环回路径配置在串扰性能方面优越。

本论文通过 BADM 实验及串扰模型研究证实了 H.Takahashi 等人的结论，还在以下方面补充了其理论：1)、作者首次证明，在损耗均衡方面，若传输波长数目不超过 N/2,折返配置均衡效果比环回配置均衡效果最好的情况还稍好。但若传输波长数超过 N/2，环回配置仍可应用于损耗均衡，折返配置却无能为力。2)、理论分析了当 AWG 本身的串扰值从－80dB 与 0dB 之间变化时，两种基本配置各波长串扰性能对比。确定了折返配置优于环回配置的条件是 AWG 本身的串扰小于－6dB，所以我们的结果是更普遍的情况。3)、AWG 的串扰值越小，折返配置对于系统串扰的抑制越明显。4)、折返配置对于直通波长和分插复用波长的串扰特性几乎完全相同，而环回配置中它们与 Add 功率及干线功率的比值有关。本论文关于 AWG 基本配置的研究是对 H.Takahashi 等人理论很系统很有意义的扩展和补充。

作者相信，本论文关于基于 AWG 的 OADM 的研究提出的许多结论是对现有理论很有意义的补充和完善。对于全光网的实现也必将有重要意义。

【关键词】: 波分复用全光网（Wavelength Division Multiplexing All Optical Network－WDM AON)，光分插复用器（Optical Add/Drop Multiplexer－OADM)，阵列波导光栅（Arrayed Waveguide Grating－AWG)，环回路径配置（loopback path configuration）,折返路径配置（foldback path configuration）,双向 OADM（Bidirectional OADM－BADM）,串扰（Crosstalk），损耗不均衡度（loss-imbalance）

目　录

第一章、概述.....1

【导论】.....1
1.1、全光网(AON)简介.....1
1.1.1、为什么要全光联网.....1
1.1.2、全光网优点.....2
1.1.3、世界全光网发展概况.....2
1.2、光分插复用器（OADM）概述.....3
1.2.1、OADM 简介.....3
1.2.2、OADM 分类.....4
1.2.3、OADM 常见结构.....4
1.2.4、OADM 结构新动态.....8
1.2.5、对 OADM 节点研究的想法.....12
1.3、阵列波导光栅（AWG）概述.....13
1.3.1、AWG 传输特性及原理.....14
1.3.2、AWG 基本功能和应用.....18
1.3.3、AWG 性能理论分析.....19
1.3.4、AWG 曾经存在的问题及解决情况.....21
1.3.5、我们实验所用 AWG 的特性.....21
【参考文献】.....23

第二章、基于 AWG 的 BADM 方案设计和实验研究.....26

【导论】.....26
2.1、双向 OADM 的设计及在保护和自愈环中的应用.....26
2.1.1、双向 OADM（Bidirectional OADM, BADM）的提出.....26
2.1.2、OADM 及 BADM 的分类.....27
2.1.3、常规 OADM 的双向化扩展.....27
1).分波器+波长交换单元+合波器.....27
2).耦合单元+滤波单元+合波器.....27
3).基于声光可调谐滤波器(AOTF)的 OADM.....29
4).基于波长光栅路由器(WGR，AWG).....29
2.2、双向 OADM 实验.....31
2.2.1、光栅型半双工 BADM 模拟实验.....31
2.2.2、AWG 型 OADM 之双向传输实验.....33
2.2.2.1、半双工双向传输实验.....33
2.2.2.1.1、loopback 配置半双工 BADM 传输模拟实验.....33
2.2.2.1.2、foldback 配置半双工 BADM 传输模拟实验.....35
2.2.2.1.3、loopback 配置和 foldback 配置半双工 BADM 实验比较.....36
2.2.2.2、双工双向传输实验.....37
2.2.2.2.1、loopback 配置双工 BADM 传输实验.....37

2.2.2.2.2、foldback 配置双工 BADM 传输实验 39
2.2.2.2.3、loopback 配置和 foldback 配置双工 BADM 实验比较 41
【参考文献】 43

第三章、基于 AWG 的 OADM 串扰模型研究 44

【导论】 44
3.1、基于 AWG 的 OADM 串扰模型理论研究 44
3.1.1、模型 1 同频串扰情况 44
3.1.2、模型 2 同频串扰情况 48
3.1.3、同频串扰理论研究结论 49
3.2、基于 AWG 的 OADM 串扰模型实验 52
【参考文献】 53

第四章、基于 AWG 的 OADM 损耗不均衡度的补偿 54

【导论】 54
4.1、基于 AWG 的 OADM 损耗不均衡度补偿理论研究 54
4.1.1、AWG 损耗不均衡度的产生及特性 54
4.1.2、loopback 配置损耗均衡研究 56
4.1.3、foldback 配置损耗均衡研究 59
4.1.4、各配置损耗均衡的效果比较 60
4.1.5、AWG 级联的损耗均衡方案 61
4.2、AWG 构成的 OADM 损耗不均衡的补偿实验 62
4.2.1、实验所用 AWG 损耗不均衡度的测量 62
4.2.2、各种损耗均衡方案及实验 63
4.2.3、实验结果分析 65
【参考文献】 67

第五章、基于 AWG 的 OADM 基本配置串扰特性比较 68

【导论】 68
5.1、基本定义 68
5.2、环回配置直通通道和分插复用通道串扰分析 69
5.3、折返配置直通通道和分插复用通道串扰分析 71
5.4、AWG 基本配置各通道串扰关系 72
【参考文献】 74

攻读硕士学位期间完成的论文……75

致谢……76

第一章、概述

【导论】

由于其高传输容量、灵活的波长路由、传输透明性以及与现有系统良好的兼容性，波分复用（Wavelength Division Multiplexing—WDM）全光网（All Optical Network—AON)得到了迅速发展。光分插复用器（Optical Add/Drop Multiplexer－OADM），以及阵列波导光栅（Arrayed Waveguide Grating－AWG）分别作为全光网的关键节点和关键器件，正在方兴未艾地发展。

本章系统地概述了全光网（AON），光分插复用器（OADM），以及阵列波导光栅（AWG）。第一节阐述了为什么要全光联网，全光网所存在的优点并且介绍了世界全光网发展概况。第二节对OADM 进行了简介，介绍了 OADM 的分类方法，OADM 的流行常见结构，并且进一步介绍了 OADM 结构研究新动态,最后提出了自己对 OADM 节点研究的想法,提出了衡量一个 OADM 的标准,改进 OADM 的思路。第三节介绍了 AWG 的基本原理及传输特性，AWG 的基本功能和应用，AWG 的基本配置，对 AWG 的性能进行了理论分析，系统总结了 AWG 曾经存在的问题(温度稳定性、损耗大、串扰较大，偏振敏感性)及解决情况以及目前对 AWG 广泛的研究和应用；最后针对本论文实验所用 AWG 研究了其传输特性和温度特性，作者提出的一种测量 AWG 传输特性的方法具有广泛意义而且简单适用。

1.1、全光网(AON)简介

1.1.1、为什么要全光联网

随着社会经济的发展，人们对信息的需求急剧增加，信息量呈指数增长，通信业务也从电话、数据向视频、多媒体等宽带业务发展。特别是 INTERNET 业务爆炸式地迅猛崛起，社会对通信需求的迅速增长提高了对通信网的容量需求。INTERNET、宽带 ISDN、视频点播、海量数据库存取、视频会议和远程诊断等新兴通讯业务的提出，要求整个社会的信息基础结构能够有一个突破式的进展。

基于以上需求，欧美等国提出了未来的信息高速公路计划，其物理基础就是需要一个容量大、组网灵活、可动态分配资源的信息传输网络。光纤近 30THZ 的巨大潜在带宽容量，使光纤通信成为支撑通信业务量增长最重要的技术。目前实用化的 WDM 系统信道总容量可达 80G 比特/秒。预计在未来十年中，光纤传输系统速率还可提高 100 倍。在这种超高速传输的网络中，如果网络节点处仍采用原有的设备，以电信号处理信息的速度进行交换、交叉连接和分/插复用，通信网就会受“电子瓶颈”的制约，在网络容量、网络透明性、交换和处理能力上很难再有大的发展。而 90 年代发展起来的 WDM 全光网（AON—All Optical Network）技术，以其巨大的传输容量、良好的业务透明性、灵活的波长路由以及对现有系统的良好兼容性等优点，得到了极大的关注和迅猛的发展，可望成为未来社会信息高速公路计划的基石。由于 WDM 干线传输系统已经迈入实用化和产业化阶段，且发展势头非常迅猛。可以展望，建立在 WDM 干线传输系统基础上的 WDM 全光网技术也必将在不久的将来投入使用。[1][2][3][4]

1.1.2、全光网优点

全光通信网，从原理上讲，就是网中直到端用户节点之间的信号通道仍然保持光的形式，即端到端的完全的光路，中间没有光电转换的介入。

波分复用全光网已成为光纤通信技术的研究前沿和热点，原因就在于利用全光交换/路由技术，不必再经过光/电、电/光转换，波分复用全光网可以克服传统网络无法逾越的电子瓶颈，从而大幅度的提升系统容量和性能。

波分复用全光网具备和以往通信网和现行光通信系统所不具备的优点[1][2]：

（1）、协议透明性

可不受限制地提供端对端业务。全光网以波长选择路由，对传输码率、数据格式及调制方式均具有透明性，可以提供多种协议业务，具有协议的多样性和灵活性。

（2）、全光网络的可扩展性

加入新的网络节点时，不影响原有网络的结构和原节点设备，所以在网络扩容时，对原有网络的改动最少，降低了网络成本。

（3）、网络可重组性

可以根据通信业务的需求，动态地改变网络结构，充分利用网络资源。光纤折断或节点损坏，可重新组构，迅速连通和恢复通信。

（4）、网络可靠性、可用性和可维护性

全光网结构简单端到端采用透明光通路连接，沿途没有逻辑处理与存储。网络中许多光器件都是无源的，不易出故障，比传统网络可靠性更高，更易于维护。

1.1.3、世界全光网发展概况

当今世界上许多发达国家均在大力支持和发展全光网的研究[3]，并已着手建立全光通信实验网。从 OFC'96 会议开始，特别表现出对 WDM 光网络前所未有的兴趣和热情。国外全光实验网的特点是投资大、参与单位众多、功能齐全并强调实用化，其中具有代表性的有以下一些网络：

1、 美国：

美国 ARPA (Advanced Research Projects Agency)（MONET、NTON、ICON、WEST、ONTC、AON）

美国的 Bellcore, Hughes Research Labs 和 Northern Telecom 等九个单位联合组成的光网络技术联盟(ONTC)建立的全光 WDM 实验网；

美国国家透明光网络(NTON)由 Northern Telecom, Sprint, Pacific Bell 等十家单位联合建立的全光 WDM 测试床；

美国 AT&T, Bellcore, National Security Agency 等单位联合建立的 MONET 全光实验网；

2、 欧洲：

欧洲 ACTS(Advanced Communications Technologies and Services)的泛欧光

网络计划 OPEN（Optical Pan-European Network project）

欧洲光网络（European Optical Network）,欧洲的全光网项目 RACE(Research and development in Advanced Communications technologies in Europe) R2028(多波长传输系统)和 COST239(超容量传输系统)；

3、 法国：

法国的 Alcatel 全光网；

4、 德国：

德国电信的德国电信网包括用户服务区，一个局域层（主要在环拓扑中）和一个高层传输网（网格网）。目前局域和传输网是以 SDH 为基础的，但是在将来在整个网络中将应用越来越多的 ATM 技术。[7]

5、 日本：

日本主要是一些大的公司和实验室在从事这方面的工作，比如 NTT、NEC 和富士通公司,日本 NTT 的光路网（Optical Path Network）等。

6、 非洲：

Africa ONE 计划。非洲光网络是一个环非洲的光纤网络。[8]

7、 其它：

另外，澳大利亚[9]，荷兰[10],台湾[11]等国家和地区也分别报道了它们的全光网的进展情况。奥地利在 ACTS 计划中的 PHOTON（Pan-European Photonic Transport Overlay Network,泛欧光子传输覆盖网）计划方面做了主要工作，并且建立了 MOON（Management of Optical Networks,光网络管理）计划。[12]

另外值得一提的是：

Oxygen 计划。[13] 该计划是一个海底光网络。该计划是考虑到近年来全世界光网络的迅速发展，为了给国际通信提供最经济有效的传输中介而提出的。Oxygen 计划将连接 50 多个国家 160,000 公里的新海底光缆。该网络将集成最新最成熟的技术以提供无处不在的端对端用户通信服务。这些技术包括：密集波分复用（Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM）,异步转移模式（Asynchronous Transport Mode, ATM）,同步数字体系（Synchronous Digital Hierarchy, SDH）和准同步数字体系（Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH）和网络管理系统（Network Management System, NMS）.

SuperNet 和 NGI 计划。[14] NGI（Next Generation Internet,下一代互连网）计划是 1998 财政年度开始的美国总统基金计划。它是一个 3-5 年的计划。参加的组织有 DARPA，NSF，NASA，NIST 和 NIH 等。其目标是建立 Tb/s 网络。

1.2、光分插复用器（OADM）概述

1.2.1、OADM 简介

在全光网中的网络节点可分为两种：OXC（Optical Cross Connect,光交叉互

连节点）与 OADM（Optical Add/Drop Multiplexer，光分插复用节点）。两者并无本质区别，相对来说，OXC 比 OADM 更为复杂，功能更齐全。在全光网中，OXC 完成 WDM 子网与 WDM 子网之间的信息交换，侧重于它的交换功能；而 OADM 则更侧重于完成 WDM 子网与用户之间的接入功能。[15]

光分插复用器(OADM)是全光网中的关键网络节点。OADM 在密集波分复用系统（Dense Wavelength Division Multiplexed Systems，DWDM）中用于在终端中间点之间插入或分出频道。OADM 通常包括四个端口：输入端(input)，输出端(output)，插入端(add)，分出端(drop)。OADM 功能是从传输设备中选择性地取下、或上路、或仅仅通过某个波长信号，同时不影响其它波长信道的传输。也就是说 OADM 在光域内实现了传统的电 SDH 分插复用器在时域内完成的功能，而且具有透明性，可以处理任何格式和速率的信号，这一点比电 ADM 更优越。OADM 是克服传统光网络中节点的电子瓶颈问题的关键器件之一。

1.2.2、OADM 分类

1.2.2.1、从功能上分类

OADM 在功能上可分为可调谐和不可调谐两类[5]。不可调谐 OADM 只能上下路固定波长，而可调谐 OADM 可以上下路几路波长。可调谐 OADM 按照调谐波长是否是连续可调，可以分为连续可调谐 OADM 和离散可调谐 OADM。

不可调谐 OADM 结构简单，但其功能较弱，只能固定的某一或几路波长的信号，不利于全光网的灵活性和可重构性，也不利于网络的可扩展性。可调谐 OADM 可动态地选择上下路的波长，具有很大的灵活性，对提高全光网的性能有重要意义。

离散可调谐是指只能工作于几个离散波长。实际应用中离散调谐性对系统工作更有好处。因为 WDM 通信系统中，所使用的波长均已标准化，系统中通常只有几个标准波长。因此离散调谐完全可以满足现代 WDM 光通信系统需求。离散可调谐另一个好处就是它没有调谐时的波长对准和波长稳定等问题，从而可减小系统复杂性。

后述基于光纤光栅的 OADM 中，采用单个光栅的结构是不可调谐 OADM，采用光栅并联的结构是离散可调谐 OADM，而热调节聚合物布拉格光栅 OADM 是连续可调谐 OADM。

1.2.2.2、从结构上分类

OADM 从结构上可以分为两种类型，即非重构型 OADM 和可重构型 OADM。[16]前者主要采用复用器解复用器以及固定滤波器等无源光器件，在节点上下固定的一个或多个波长，也就是说节点的路由是确定的。后者采用光开关、光栅或可调谐滤波器等光器件，能动态调节 OADM 节点上下话路的波长，从而达到光网络动态重构的能力。相比而言，前者缺乏灵活性但性能可靠而且没有延时，后者结构复杂但可以使网络的波长资源能够得到良好的分配。

1.2.3、OADM 常见结构

目前已有多种 OADM 方案。[16]从 90 年有人提出波长上下话路开始，到目前为止，

人们提出了很多种 OADM 方案，这些方案很大程度上取决于新的光器件开发和研制，特别是无源光器件，这些器件的性能最终决定 OADM 的一些主要性能参数，比如插入损耗、通道之间的隔离度以及上下话路的延迟时间等。现有的 OADM 方案归纳起来主要有如下几种基本形式：1).分波器+波长交换单元+合波器；2). 耦合单元+滤波单元+合波器；3).基于声光可调谐滤波器(AOTF)；4). 基于波长光栅路由器(WGR，AWG)。具体实施方案可能有所不同，但一般是这几种基本方案演化形式。

1.2.3.1、分波器+波长交换单元+合波器

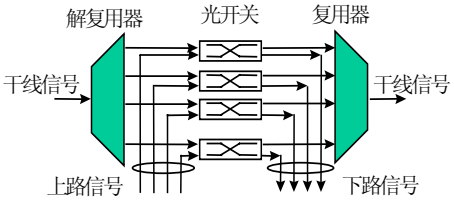


图 1-1、 基于解复用器和开关的 OADM

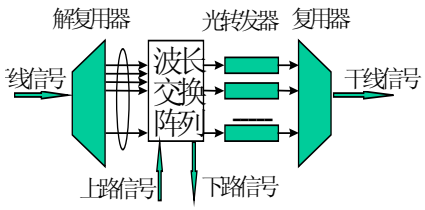


图 1-2、基于解复用器和开关阵列的 OADM

在这种方案中分波器可以是普通的解复用器（如多层介质膜类型）或阵列波导光栅(AWG)等，波长交换单元一般采用开关或开关阵列，合波器可以采用耦合器或复用器，因此整个 OADM 的串扰水平主要决定于解复用器。目前解复用器可以做到的隔离度可以达到 25dB 甚至更好（通道间隔 0.8nm），因此可以满足系统要求。图 1-1 和图 1-2 是两个实现的具体方案。图 1-1 采用分/合波器与光开关阵列方案，相当于一个简化的 OXC。这种方案的优点在于结构简单，功能强大，上路/下路信号可以是四个波长的任意组合。对上下话路的控制比较方便容易。特别是在图 1-2 所示的情况中，8×8 的光交叉矩阵(OSM)是光波长具有无阻塞交叉功能，而且采用了光转发器(Transponder)，任意波长的各种业务都可以插入。但此类方案也存在一些不足。其一就是光开关的时延问题，现在的机械光开关的响应速度在毫秒(ms)量级，铌酸锂($LiNbO_3$)开关的响应速度也是在微妙(μs)量级，如果上下话路做实时的交换，势必会造成数据的大量丢失，否则就要暂停节点的业务。其二是因为采用的器件本身的损耗比较大，因此使得整个 OADM 节点的损耗很大（如图 1-1 的方案中功率的损耗>5dB）。

1.2.3.2、耦合单元+滤波单元+合波器

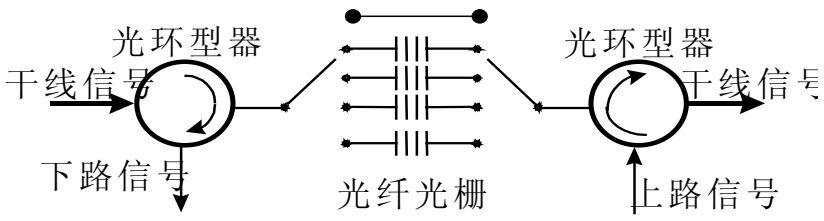


图 1-3、基于光栅和开关的 OADM

在该类方案中，耦合单元是个一般性的概念，根据具体实现的 OADM 的方案不同而有一定的差别，一般为普通的耦合器(Coupler)或光环行器(Optical

Circulator)等，滤波单元有光纤光栅(FBG)、珐-泊腔(F-P)或带通滤波器等，合波器为普通的耦合器或复用器。这类方案的 OADM 性能主要取决于滤波单元的性能，就目前的器件水平，光纤光栅的隔离度可以做到 20dB 以上（通道间隔 0.8nm），而 F-P 腔隔离度性能更好，甚至可以达到 40dB。但是前者温度性能比较好，特别是可以很容易做到温度补偿，而后者的波长随温度的漂移比较大。图 1-3、图 1-4 和图 1-5 给出了此类方案的三个典型例子。

在图 1-3 的方案中[17]，采用光纤光栅方案，可以在 4 个波长中选择下路/上路任意一个波长。由于光纤光栅具有很好的边带抑制比和良好的反射效率（适当设计光栅的作用长度、调制包络等），所以这种结构的 OADM 具有插入损耗小、结构简单、相干串扰小（在并联结构下，实际上可忽略同频相干串扰）等优点。这个方案同样可以根据开关和光栅来任意选择上下话路的波长，但开关的使用带来和第一类方案相同的缺点。因此对图 1-3 的方案进行简化，也就是不使用开关，只做单个光栅的固定单波长的上下路就有很好的性能，整个光路在上下路的过程中是没有断路的，几乎没有延时，缺点是无调谐能力。

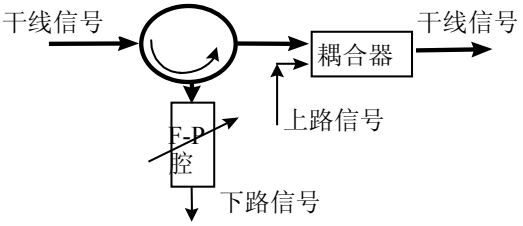


图 1-4、采用 F-P 腔的 OADM

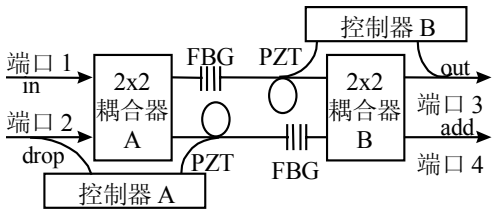


图 1-5、基于光纤光栅的全光纤 OADM

图 1-4 是采用 F-P 腔的方案。这个方案一个突出的优点在于 F-P 腔的连续可调谐性，因此可根据需要上下路任意波长。不足之处就是法-珀腔对温度的不稳定性。法-珀腔是很传统的光滤波器件，只要改变其腔长即可改变法-珀腔的工作波长。法-珀腔的腔长通常由一压电晶体控制。现在法-珀腔的性能可以做到在通道（波长）间隔为 0.8nm 时，有 40dB 的 光隔离度。法-珀腔的温漂较大，这主要是因为压电晶体的温度稳定性不好。法-珀腔在使用时必须有波长控制伺服系统以稳定法-珀腔的工作波长，甚至需要基准波长源。这样显然会使系统变得复杂，稳定性变差，不利于实际系统的使用。

图 1-5[18]的特点在于它是一种全光纤的 OADM。整个结构相当于一个 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)，两个相同波长的光纤布拉格光栅(FBG)位于 MZI 的两个臂上，PZT 用来通过电信号来调制光信号的相位。控制器 A、B 实质上是个锁相环电路，以此来控制干涉仪的相位误差，进行端口间的交换。控制器通过锁定干涉仪到干涉极大和极小来选择上下路的波长。当锁定在条纹极小值时下路端口的隔离度为 22dB，下路波长对输入端口的回反损耗小于 0.5dB，其他波长大约为 30dB。当锁定在极大值时下路端口的隔离度为 17dB，下路波长对输入端口的回反损耗受限于隔离度，即为 17dB，其他波长仍为 30dB。上下话路的延迟大约为 35μs。

1.2.3.3、基于声光可调谐滤波器（AOTF）的 OADM

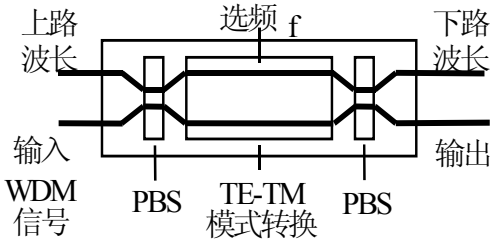


图 1-6、基于 AOTF 的 OADM

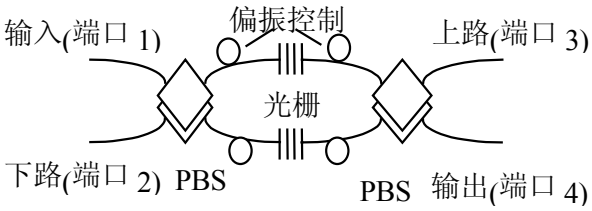


图 1-7、基于 PBS 和 FBG 的 OADM

声光可调谐滤波器（Acoustic-Optic Tunable Filter， AOTF）结构的 OADM 原理见图 1-6。AOTF 是现在研究的热点之一。AOTF 是利用铌酸锂晶体的声光效应制成的。干线的 WDM 光信号λ_1 λ_2 λ_3 … λ_n 进入 AOTF 后，经过偏振分束器（PBS）分成 TE 模和 TM 模光后，分别进入模式转换单元。模式转换单元是由频率为 f 的选频声波控制的。选频 f 针对不同的干线波长可以进行调谐。比如下路λ_1，选频 f 调到一个相应的频率，当 WDM 信号经过模式转换单元时，λ_1 的 TE、TM 模发生转换，TE 模变为 TM 模，TM 模变成 TE 模，经下一个 PBS 后从下路端口输出下路到本地，其他的波长和上路波长经模式转换单元后没有变化，从输出端口输出到干线。AOTF 本身具有很好的特性，包括宽的调谐带宽、高的调谐速度以及高的隔离度等，但是它有个偏振敏感性的问题。AOTF 在 1550nm 波段最大可调谐宽度达 25nm，其调谐速度达 2us。基于 AOTF 的 OADM 在波长间隔为 0.8nm 时，其隔离度可达到 35dB。另外，从 AOTF 的原理中可见，该器件是偏振敏感的。解决偏振敏感问题是 AOTF 得以实际应用的关键。如 AOTF 能很好的解决极性敏感问题，它将成为最理想的 OADM 光学器件。但到目前为止，世界上尚无偏振不敏感的 AOTF 商品出售。[5]

图 1-7[19][20]是这种方案的一种变形简化的形式。在这种方案中，上下路波长是固定不可调谐的，对相邻波长的隔离度(1550 波段，间隔 0.8nm，每通道 2.5Gb/sWDM 系统)为 22dB，透过波长的泄漏小于-30dB。[4]

1.2.3.4、基于波长光栅路由器(WGR，AWG)的 OADM

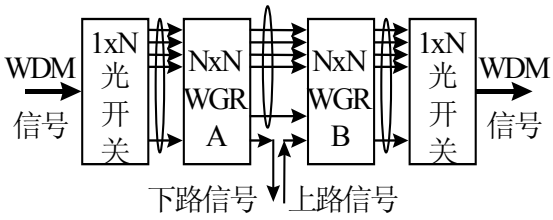


图 1-8、基于 WGR 的 OADM

WGR(Wavelength Grating Router,波长光栅路由)是一种光栅型的波长路由器，具有双向性，即一个方向输入为解复用方式，则另一个方向输入为复用方式。基于波长光栅路由器(WGR)的 OADM 如图 1-8。[21]有些文献也称 WGR 为 AWG（Arrayed Waveguide Grating,阵列波导光栅）。其特性可参考文献[22]。这种方案的一种简化方式就是 WGR B 和后面的 1×N 光开关用一个 N×1 的耦合器来代替。这种方案能做到的相邻通道的隔离度为 25dB(间隔 1.6nm)。同样也可以用这种方案同时下路多路波长。还有人采用 WGR 与 2×2 的光开关组

合实现的 OADM，但相邻通道的隔离度低于 20dB(1.6nm)。

OADM 因其良好的性能、简单的结构、相对低的成本以及灵活的组网方式，一直吸引着人们的注意力。虽然现在很难做到象 SDH 设备那样在不同等级上灵活的交叉和分插，但在目前的情况下，为实现对传统的点到点的 WDM 干线做中间的上下业务，OADM 仍然是一种很好的选择。而且在未来的全光的 WDM 网络中，OADM 将会有其更大的应用范围。

1.2.4、OADM 结构新动态

从最新的 OFC98，OFC99，OFC'2000 上可以看出对 OADM 结构和特性的研究的最新动态有关于双向 OADM、热调节聚合布拉格光栅 OADM、磁应力调节布拉格光栅 OADM、取样布拉格光栅 OADM、AWG 型 OADM 以及集成 OADM 等的研究。

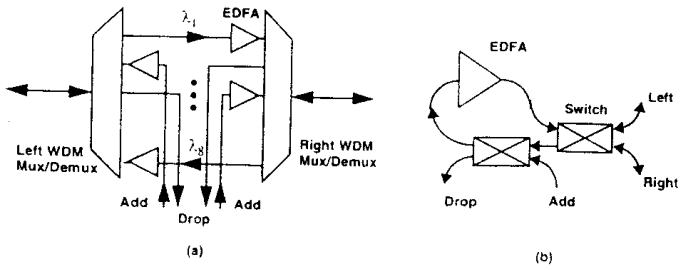
1.2.4.1、双向 OADM（B-ADM、BADA）

由于大部分的 OADM 都是单向的，即光信号必须只能在一个方向上分插。如果信号可以在两个方向上分插，对于双向传输只需要一根光纤，正如双向环中的单根光纤一样。对于单向环，信号必须通过所有节点以达到上行节点。由于信号可以通过较少数目的节点来抵达一些节点，所以双向环可以增加吞吐量。

波分复用（WDM）系统的分插复用器（OADM）对于实现 WDM 自愈环（SHR）网络是一个关键器件。以前，WDM SHR 网络是用单向 OADM 实现的。然而，这些网络需要 4 条光纤通路：2 条用于工作环，2 条用于保护环。如果使用双向 OADM 代替单向 OADM 这些光纤通路的数目就会减半。

1.2.4.1.1、Keang-Po Ho 等人提出的双向 OADM

最早的双向 OADM 是在 OFC97 上，由 Keang-Po Ho 等人提出的[23]。



1 Fig. 1. Achitecture of bidirectional eight-wavelength WADM. (b) cture of the switch fabric at each wavelength port.

图 1-9、Keang-Po Ho 等人提出的 BADM

图 1-9 显示了该双向 OADM 的结构。该 BADM 包括两个 8 波长 WDM 复用/解复用器（MUX）对，与 MONET 计划中的设计相似。WDM-MUX 通道跨度 1.6nm。该 BADM 中，在 WDM MUX 之前，每个通道有一个 EDFA 将功率放大到饱和 EDFA 功率。不需要增益均衡。图 1-9（b）示出了每个波长端的开关结构。每个波长结构有两个光开关。第一个光开关控制信号的方向，第二个光开关控制信号是进行分插还是直接通过 BADM。信号可以从每个方向分插或直通。但是，

同一波长的信号不能同时在同一个方向分插。

总之，Keang-Po Ho 等人提出并研究了一个有 80Gbit/S 能力的 8 波长双向 OADM。利用波分复用器，该 BADM 有双向的分插能力。背向传输光没有产生功率代价。

1.2.4.1.2、C.H.Kim 等人提出的双向 OADM

C.H.Kim 等人通过利用一对 WDM 复用器，分立掺铒光纤放大器（EDFA）和每通道两个光交叉开关，实现了一个双向 OADM[24][25]。与以前报道的使用一个复用器的双向放大器相比，该双向放大器抑制了由瑞利背向散射、光反射和 WDM 复用器串扰引起的相对强度噪声。当该 BADA 模块用于双向传输和 WDM 信号的分插复用时，对于接收器灵敏度没有功率代价。该 BADA 框图如图 1-10。

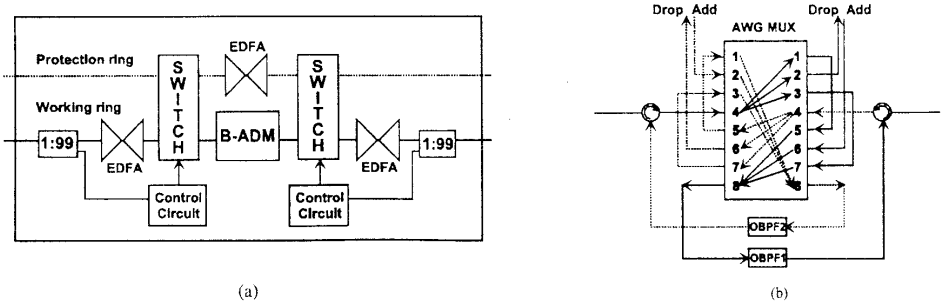


Fig. 1. (a) Node configuration of proposed bidirectional self-healing ring network.
(b) Schematic diagram of bidirectional WDM add/drop multiplexer (B-ADM).

图 1-10、C.H.Kim 等人提出的 BADM

在 OFC99 上，C.H.Kim 等人将上述 BADA 模块用于双向 WDM SHR 网络，得到了可以自动恢复传输错误的网络节点。[24]如图 1-10。当光纤断开后，控制电路通过监测工作环 EDFA 输入端的信号检测到传输错误，将相应开关（与断开的光纤相邻）从工作环打到保护环上。热光聚合物开关的开关时间和插入损耗分别是 1.5ms 和 3.5dB。保护环上的 EDFA 补偿光纤和器件损耗。在误码率为 10^{-9} 时，最大功率代价小于 0.5dB。BADA 内的带通滤波器被证实对于减少由于瑞利背向散射和光反射所引起的 RIN 噪声非常有效。实际上，没有观察到接收器灵敏度因为 RIN 所引起降低。因此，网络的可升级性由 ASE 噪声的积累所限制。C.H.Kim 估计当节点间距 80km 时，网络可以有 14 个节点。

1.2.4.1.3、Y.Zhao 等人提出的双向 OADM

Y.Zhao 等指出了 Keang-Po 等的双向 OADM 的缺陷是每个通道需要一个 EDFA，2 个光开关，致使波长增多时费用增大。Y.Zhao 等同时指出了 Kim 等利用一个 AWG 复用器实现的 B-ADM 的缺陷是其波长通道数受到限制，两个法珀腔（FP）滤波器必须带宽足够宽以通过所有波长频道。而且，当带宽增大时，滤波器减少瑞利背向散射和 AWG 带间串扰的能力就削弱了。因而，Y.Zhao 等提出了单纤双向环形网(Single Fiber Bi-Directional Ring Networks, SFBDRN)的一个新型 B-ADM[26]。它可解决以上问题。而且费用低廉，且可很好地同步分/插信号。其结构如图 1-11。

modules.

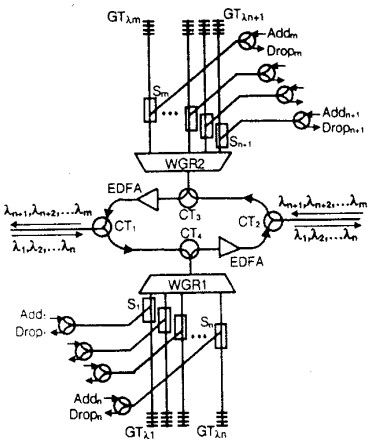


Fig.1 B-ADM Schematic structure. CT--circulator; GT--fiber grating; S--1×2 switch; WGR--waveguide grating router; EDFA—erbium-doped fiber amplifier.

图 1-11、Y.Zhao 等人提出的 BADM

在该模块中，WGR 的每一个波长信道与一个光纤光栅匹配，两个 1x2 开关的一条臂是直通信道。光纤光栅反射强，带宽窄，其作用是充当一个特高消光比的无损耗波长选择镜。开关的另一条臂与环行器相连，以实现网络信号的分/插功能。两个 EDFA 都是单向工作，以补偿两个模块的损耗。

该模块可以工作在两个不同的情况。当两个 WDM 回波信号光频带不同时，由光纤通路中的前向（背向）信号产生的瑞利背向散射和光反射可以完全被 WGR 和光纤光栅所滤除。WGR 带间串扰也会降低 SFBDRN 的传输性能。然而，该影响同样可以很容易地被光纤光栅所消除。因而，在 SFBDRN 节点中使用该模块，灵敏度代价将很低。另一方面，由于 EDFA 单向工作，故没有瑞利背向散射和光反射以及 WGR 带间串扰，EDFA 可以工作在高增益状态以支持长距离传输。从而网络规模可以被扩展。

对于双向环网络，自愈是很重要的，Y.Zhao 提出的 B-ADM 可以很容易地实现自愈。例如，当模块工作在带宽不重叠模式（情况 1）时，在一段光纤通路中发生了传输错误（例如光纤断裂），要传输的信号可以被分出，然后进行波长转换，再插入到背向与之匹配的波长信道中用以恢复传输路径。当模块工作在带宽重叠模式（情况 2）时，不需要波长转换。分出的信号可以直接插入到它们相应的背向的波长信道中用以恢复传输路径。

1.2.4.2、热调节聚合物布拉格光栅 OADM

光聚合物有潜力在一块平面衬底上制作复杂但是可行的密集波分复用（DWDM）光路。Louay Eldada 等人制作并且测试了一种聚合物技术，利用该技术可以在单模信道波导中产生合乎质量的光栅。通过将这些光栅波导与环行器连接，可以制成高性能的光分插复用器（OADM）[27]。聚合物的折射率随温度的大范围变动使得温度可以在一个大波长范围内调节滤波器信道，从而提供了电信产业结构革命的可能性。

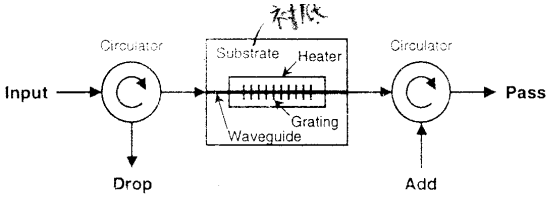


Fig. 1. OADM configuration consisting of a grating printed in an integrated single-mode polymeric waveguide and two three-port circulators.

图 1-12、热调节聚合布拉格光栅 OADM

图 1-12 所示的简单的设备做为一个窄带热可调 OADM[27]，在合理的温度范围内（20℃～80℃）可以覆盖 15nm 的波长窗口。使用两个这种器件级联可以覆盖整个掺铒光纤放大器的带宽。

与高级平面聚合物波导技术相兼容的基于布拉格光栅的 OADM，其反射效率可达 99.997%。变迹法被用于消除旁瓣，并且保证对称性以避免包层模式的耦合。可以达到 20nm 的调节范围。

1.2.4.3、磁应力调节布拉格光栅 OADM

波长调谐机理例如温度允许 OADM 在重构时间要求不太快的情况下对于诸于租用波长的应用可重构。对于需要更快速的重构，例如允许光路根据通信要求动态地建立和释放，更高级的可调滤波器技术就是必要的了。由于磁调节机理的门栓特性，新型磁调节光纤布拉格光栅（FBG）器件使得低损耗的快速可重构 OADM 节点成为可能。

L.E.Adams 等设计的磁调节 FBG 原理如下[28]。FBG 的一端与一个固定结构设备相连，另一端与一个可变磁体相连。当该磁体可编程磁化后，以一种可控制的方式轴向移动，光纤光栅便产生了一个预置的可开关的应力，从而引起布拉格反射波长的可开关的移动。

通过调节控制电流产生的磁场，FBG 在大约 4nm 的范围内连续可调节。磁应力对于移位 FBG 的中心波长是一有效的机械方法，而不会产生滤波响应中的相位或幅度畸变。测量的开关时间约为 2ms。

1.2.4.4、取样布拉格光栅 OADM

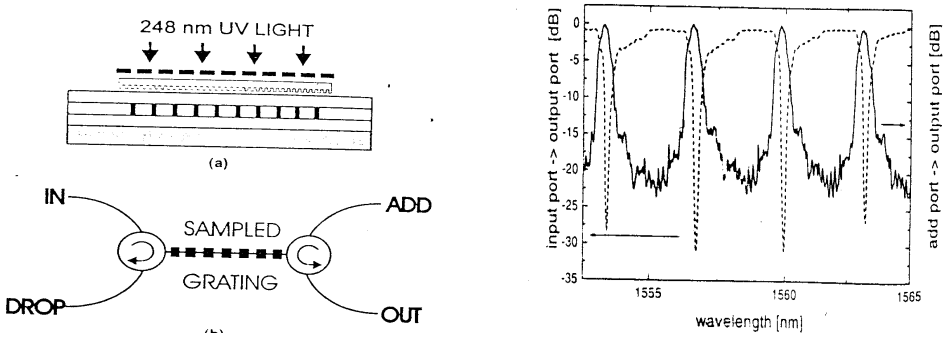


图 1-13、取样布拉格光栅 OADM

文献[29][30][31]报道了紫外线写的取样光栅在光纤和波导中的应用。取样光

栅的反射谱包括一系列峰值，波峰的间隔与取样周期成反比。

该布拉格光栅 OADM 可以用于多波长光分插复用。制作工艺可以通过控制幅度掩膜的周期、长度和占空比来控制频率间隔，每个峰的宽度和回旋曲线。中心波长可以由相位的掩膜周期时间，波导的有效折射指数来决定。

OADM 的性能主要由取样布拉格光栅的性能来决定。Jorg Hubner[31]等实现的 OADM 的带间串扰是-30dB，在 200GHz 间距信道的 WDM 系统中带内串扰是-20dB，在 100GHz 间距信道系统中带内串扰是-17dB。

1.2.4.5、集成 OADM

集成 OADM[32][33][34][35]有体积小的优点，但是由于制造工艺的原因，器件性能往往不是很好，往往有大于 20dB 的插入损耗和大于-10dB 的串扰。

文献报告的集成 OADM 有集成 InP 基底 OADM[33]，集成硅基底（silica-based）OADM[34]，不透热集成硅基底（silica-based）OADM [35]。

1.2.5、对 OADM 节点研究的想法

1.2.5.1、衡量一个 OADM 的标准：

1.2.5.1.1、可重新配置，易于重组。

全光网的优点有全光网络的可扩展性，网络可重组性，网络可靠性、可用性和可维护性。而 OADM 是全光网的一个关键节点。为了在加入新的网络节点时不影响原有网络的结构和原节点设备，为了在网络扩容时对原有网络的改动最少，为了可以根据通信业务的需求动态地改变网络结构并充分利用网络资源，为了在发生光纤折断或节点损坏等故障时可重新组构、迅速连通和恢复通信，对 OADM 的要求是应该易于重新配置，易于重组。这项要求对于实际应用十分重要。

1.2.5.1.2、波长可调节性（调谐能力）

波长可调节性（调谐能力）,上下路波长的灵活性,是否具有波长转换能力。

光分插复用器（OADM）对于实现可重新配置的 WDM 网络而言是一个关键技术器件。因而，为了达到 OADM 灵活的功能，对于波长可调节滤波器元素提出了越来越高的要求。波长调节机理，例如温度调节，使得 OADM 在慢速情况下可重新配置，例如租用一个波长。对于需要更快速的重新配置，例如允许光通路根据输入通信需求而动态地建立或取消，就需要更先进的可调滤波器技术。例如可用新型磁可调光纤布拉格光栅（FBG）器件实现快速可重新配置 OADM 节点。[28]

1.2.5.1.3、相干串扰小，插入损耗小

由于串扰的存在，在接收端会造成多路径信号的叠加串扰，由于光的相干叠加，会对收端造成很严重的噪声，这种串扰就称为同频相干串扰。在全光网络中，同频相干串扰往往是对网络规模和流量的最重要的限制之一。

承担全光网中信息的交换/上下路任务的光节点，如 OADM 与 OXC，由于其

中某些器件的非理想特性，同样会引起相干串扰，而且在网络拓扑结构比较简单的情况下，这甚至是最主要的串扰来源。

另外，OADM 中环行器、复用/解复用器等的插入损耗对于全光网的性能也有较大的影响。

因此，为了全光网工作性能，应尽量使 OADM 中的相干串扰和插入损耗小。

1.2.5.1.4、响应速度，交换速度快。

随着通信越来越高的流量、速度要求，全光网的路由转换应该有很快的速度。作为全光网的关键器件，OADM 的波长分插也应该有很快的速度。对于没有使用光开关的 OADM，比如由环行器和布拉格光栅组成的 OADM，响应速度、交换速度一般是比较快的。对于有光开关的 OADM，光开关的时延问题就是很重要的了。

1.2.5.1.5、可升级性，生存能力强

随着通信技术的发展，还提出了对网络的保护、自愈等要求。已经有研究者对于 OADM 在自愈环（SFR）中的应用进行了研究。[26]OADM 的设计应该尽可能的考虑适应网络保护和自愈的能力。

1.2.5.1.6、经济适用

OADM 的设计除了考虑性能之外，还应该尽可能经济。这是市场和用户的要求。OADM 即使性能很好，如果费用昂贵，也会影响它的应用和推广。

1.2.5.2、改进 OADM 性能的思路

1.2.5.2.1、结构优化

通过优化 OADM 的配置、路由、物理拓扑设计和波长分配方案来优化 OADM 的性能。

1.2.5.2.2、器件优化

通过选用性能优越的光器件，来优化 OADM 的性能。

1.3、阵列波导光栅（AWG）概述

波分复用器是波分复用(WDM)系统中的关键器件，AWG 复用器可能是最有前途的一种。

基于阵列波导光栅（Arrayed-Waveguide Grating，AWG）的集成光 NxN 波分复用器在光波分复用系统中是关键器件。该复用器由一个阵列波导光栅、输入输出（I-O）波导和聚焦板波导组成。阵列波导光栅包括连接两个板的整齐排列的波导，且相邻的波导长度相差一个常数。长度的差导致了与波长有关的波前倾斜，因此输出板中的光聚焦是与波长有关的；阵列波导光栅作用相当于衍射光栅。注意阵列波导光栅工作在高阶衍射级，因此尽管其体积很小（在厘米量级），波长分辨率仍小于纳米。此外，该复用器还有另外一个有意思的一点，由于阵列波导是传输型的光栅，它可以支持复输入和复输出波导。众所周知，这实现了波长选择 NxN 连接[40]。

AWG（波导阵列光栅）的出现曾被誉为光电子器件上的一个重大突破[3]，

它提供了多端口同时分波/合波功能，非常适合用于光信号交换。而且，它有简单的平面结构组成，具有低成本大规模生产和实现光电集成的潜力[41]。阵列波导最初是 1988 年荷兰的 M.K.Smit 提出的[42]，然后 1991 年由 AT&T 贝尔实验室的 C.Dragone 在其基础上加上两个星型耦合器形成了 AWG 的雏形[43]。之后立即受到了广泛的重视。日本 NTT 公司，美国马里兰大学，AT&T Bell Labs 等对 AWG 的成熟起了非常重要的作用。曾经，AWG 存在几个关键问题没有很好解决---温度稳定性、损耗大、串扰较大，而且具有微弱的偏振敏感性。而这几年，这些问题已经得到了很好的解决。尤其从 OFC98，OFC99，OFC00，对 AWG 的研究有渐入火热之势，对 AWG 都开辟有专栏文章。而且，文献中已经有很多 AWG 在各方面的应用，例如，光交叉互连（Optical Cross Connect，OXC）[44]，光分插复用（Optical Add/Drop Multiplexer，OADM）[45]，光谱仪（Optical Spectrum Analyzer，OSA)[46]，梳状滤波器（Comb Filter）[47]，通道选择滤波器（Channel Selection Filter）[48]，可调滤波器（Tunable Filter）[49]，波长分割计（lambda-partitioner）[50]，多频率激光器（Multifrequency Laser）[51]，以及双向 WDM 无源光网络（Passive optical networks, PON）[52]等。

1.3.1、AWG 传输特性及原理

本节我们将详细介绍复用器理论，特别是与输入端输出端及自由光谱范围有关的频率关系，以及通带带宽、自由频谱范围（Free Spectrum Range, FSR）等概念。我们将发现复用器的频谱传输响应与高斯通带滤波器的响应相同。

1.3.1.1、AWG 传输特性

AWG 可以分成两类，第一类是非周期性 AWG，第二类是周期性 AWG，其路由表分别见表 1-1、表 1-2。

表 1-1、复用器的频率分配

（列：输入；行：输出；无周期性分配）

\	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
-8	f_{16}	f_{15}	f_{14}	f_{13}	f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_{9}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}
-7	f_{15}	f_{14}	f_{13}	f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_{9}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}
-6	f_{14}	f_{13}	f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_{9}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}
-5	f_{13}	f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_{9}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}
-4	f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_{9}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}
-3	f_{11}	f_{10}	f_{9}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}
-2	f_{10}	f_{9}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}
-1	f_{9}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}
0	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}
1	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}
2	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{-9}
3	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{-9}	f_{-10}
4	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{-9}	f_{-10}	f_{-11}
5	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{-9}	f_{-10}	f_{-11}	f_{-12}
6	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{-9}	f_{-10}	f_{-11}	f_{-12}	f_{-13}
7	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{-9}	f_{-10}	f_{-11}	f_{-12}	f_{-13}	f_{-14}

表 1-2、复用器的频率分配

（列：输入；行：输出；周期性分配）

\	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
-8	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}
-7	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}
-6	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}
-5	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}
-4	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}
-3	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}
-2	f_{-6}	f_{-7}	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}
-1	f_{-7}	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}
0	f_{-8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}
1	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{8}
2	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{8}	f_{7}
3	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{8}	f_{7}	f_{6}
4	f_{4}	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}
5	f_{3}	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}
6	f_{2}	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}
7	f_{1}	f_{0}	f_{-1}	f_{-2}	f_{-3}	f_{-4}	f_{-5}	f_{-6}	f_{-7}	f_{8}	f_{7}	f_{6}	f_{5}	f_{4}	f_{3}	f_{2}

NxN AWG 复用器的通过波长λn 与输入端口 i、输出端口 j 通常有如下关系（我们以后称之为 AWG 的路由公式）：$n = i + j - k$ 或 $n = -(i + j - k)$（非周期性 AWG），$n = i + j - k \bmod N$ 或 $n = -(i + j - k) \bmod N$（周期性 AWG），其中 $1 \le i, j \le N$，k 是与 AWG 标号顺序和 AWG 路由特性有关的常数，而是否有负号是根据 AWG 标号是递增还是递减。例如表 1-1 的 AWG 路由公式为：$n = -i - j$，表 1-2 的 AWG 路由公式为：$n = -i - j \bmod N$。通常 AWG 的路由公式都可以通过选择合适的标号而化成 $n = i + j - k \bmod N$ 的形式。

为了有典型意义，本论文工作都是基于周期性 AWG，路由公式都采用 $n = i + j - k \bmod N$ 形式。该路由特性（以及周期 AWG 的周期性）是非常重要的特性。可以说，就是该特性可以称为“革命”。麻省理工学院的 Richard A. Barry 博士论文对该特性进行了很详尽的论述。该特性是数学上有名的“拉丁路由”（Latin Route）。[53]必须注意 AWG 是可逆器件，即关于输入输出对称，表现在路由表上是关于主对角线对称，表现在路由公式上是 i, j 可以互换。该特性对于实际应用是另一非常重要特性。文献中有许多双向使用 AWG 的实例。

1.3.1.2、AWG 原理

A. 波导结构（layout）和基本方程

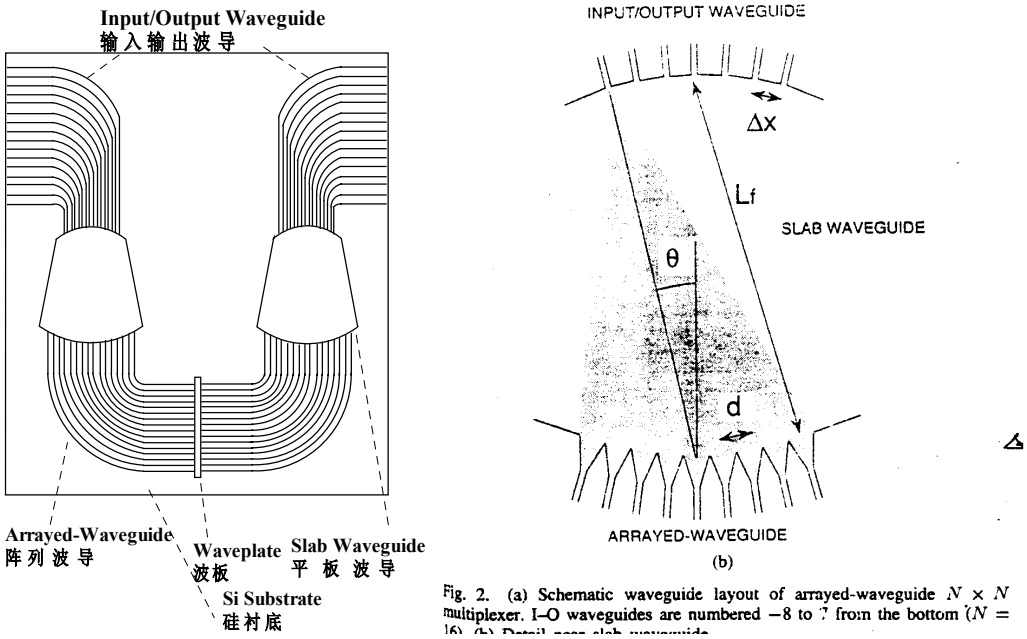


Fig. 2. (a) Schematic waveguide layout of arrayed-waveguide $N \times N$ multiplexer. I–O waveguides are numbered −8 to 7 from the bottom ($N = 16$). (b) Detail near slab waveguide.

图 1-14、AWG 原理示意图（左）及平板波导细部图（右）

图 1-14 示出了复用器的结构原理图。它包括 N 个输入波导，N 个输出波导，两个聚焦平板波导，和阵列波导光栅，所有这些都是集成在同一个衬底上的。I-O 波导终端和阵列波导终端的位置是基于罗兰环（Rowland）结构，该结构可用于凹反射光栅单色仪。每个阵列波导的孔径对着中间的 I-O 波导的终端，并且被扩大以减少平板通道耦合损耗。阵列波导的数目足够多，以使所有在平板中衍射的光功率可以被搜集起来。这意味着阵列波导的数值孔径比 I-O 波导大，且输出平板的衍射光与输入波导的衍射光汇聚到相同的圆点大小。也就是阵列波导和两个平板波导的组合构成了一个 1：1 影像系统。相应的，某个输入波导出口端的光场（单个频率）以很小的变形传输到恰当的输出波导。

阵列波导光栅包括连接两个平板的整齐排列的波导。相邻波导的长度相差一个常数△L。平板波导的焦距表示为 L_f。该结构产生一个与波长有关的相移，阵列波导工作相当于一个凹衍射光栅。根据相位匹配条件，光栅方程由下式给出：

$$n_s d\sin\theta_i + n_c\Delta L + n_s d\sin\theta_0 = m\lambda \qquad (1)$$

其中，$\theta_i = i\cdot\Delta x/L_f$，$\theta_0 = j\cdot\Delta x/L_f$，$n_s$ 和 n_c 分别是平板和通道波导的有效折射系数，θ_i 和 θ_0 分别是在输入和输出平板的衍射角。d 是阵列波导光栅的间距，m 是光栅的衍射级，λ 是波长。i 和 j 分别是输入和输出波导的标号。△x 是输入和输出波导沿着平板波导边的间距。这里我们定义中心波长为 λ_0，它满足：

$$n_c\Delta L = m\lambda_0 \qquad (2)$$

对于路径（i，j）=（0，0），它是直通波长，从中心输入波导到中心输出波导。本节中，输入和输出波导根据它们的通过波长而标号。比 λ_0 长的波长在标正号的端口输出（见表 1-1、表 1-2）。

通过对式（1）进行微分可以得到衍射角和频率 f 之间的关系，即角散射。在 $\theta_i=\theta_0=0$ 附近，结果是：

$$\frac{d\theta}{df} = -\frac{m\lambda^2}{n_s dc}\frac{n_g}{n_c} \qquad (3),\qquad n_g = n_c - \lambda\frac{dn_c}{d\lambda} \qquad (4)$$

其中 c 是真空中的光速，n_g 被视为通道波导的群折射率。复用器的频率通道间隔由下式给出：

$$\Delta f = \frac{\Delta x}{L_f}\left(\frac{d\theta}{df}\right)^{-1} = \frac{\Delta x}{L_f}\left(\frac{m\lambda^2}{n_s dc}\frac{n_g}{n_c}\right)^{-1}[Hz] \qquad (5)$$

B. 周期设置

众所周知，对于图 1-15 所示的 NxN 连接，逻辑上仅需要 N 个频率。为了

实现此点，必须利用阵列波导的周期性。每一路径通过频率有周期性，这些通过频率的间距被称为自由光谱范围（FSR）。如果 FSR=N△f，我们可以用 N 个频率实现 NxN 连接。例如，表 1-1 示出了 f_{-14} 是路径（7，7）的通过频率，但 f_{-14}+FSR 同样是路径（7，7）的通过频率。因此，f_2 可以替代 f_{-14}。基于此规律，表 1-1 可以修改为表 1-2。仅仅使用了 f_{-7} 到 f_8，因此频率的数目是 N。其它如从 f_0 到 f_{15} 的频率分配也是可行的。

这里我们详细讨论了 FSR，因为它必须被设计为恰好等于 N△f。对于阶 m+1，（1）被修改为：

$$(n_s+\Delta n_s)d\sin\theta_i+(n_c+\Delta n_c)\Delta L+(n_s+\Delta n_s)d\sin\theta_o=(m+1)\frac{c}{f+FSR} \qquad (6)$$

其中，n_s+△n_s 和 n_c+△n_c 是在 f+FSR 处，平板波导和通道波导各自的有效折射率。折射率的改变由下式给出：

$$\Delta n_c=\frac{dn_c}{df}FSR=-\frac{c}{f^2}\frac{dn_c}{d\lambda}FSR \quad (7a); \quad \Delta n_s=\frac{dn_s}{df}FSR=-\frac{c}{f^2}\frac{dn_s}{d\lambda}FSR \qquad (7b)$$

从（1），（6）和（7），推出 FSR 如式（8a）：

$$FSR=\frac{c}{\left(n_c-\lambda\frac{dn_c}{d\lambda}\right)\Delta L+\left(n_s-\lambda\frac{dn_s}{d\lambda}\right)(d\sin\theta_i+d\sin\theta_o)}[Hz] \qquad (8a)$$

在推导式（8a）时，我们假设了 FSR 相对地比 f 小，且将 f（f+FSR）近似为 f^2。因为△L>>（$d\sin\theta_i+d\sin\theta_o$），可以将 $n_s-\lambda dn_s/d\lambda$ 近似为 n_g，从而给出 FSR 的简化表达式：

$$FSR=\frac{c}{n_g(\Delta L+d\sin\theta_i+d\sin\theta_o)}[Hz] \qquad (8b)$$

项（$d\sin\theta_i+d\sin\theta_o$）表示 FSR 依赖于输入输出端口。对于对角线上的端口如（0，0），（1，-1），和（2，-2）等，$\theta_i+\theta_o=0$，则 FSR＝$c/n_g\Delta L$。

在一个实际的 AWG 复用器中，由自由光谱范围 FSR=N△f 确定的理想周期性不一定保持，因为 FSR 不是固定的的而是略微依赖于输入输出端口。这是由于波导色散引起的；自由光谱范围与从输入端口 i 到输出端口 j 的路径的关系由下式决定[54]：

$$FSR\approx FSR_0\left[1-\{(i+j)-(N-1)\}d\frac{\Delta\theta}{\Delta L}\right], \qquad (8c)$$

其中 FSR_0 是中心端口路径间的自由光谱范围，d 和△L 分别表示阵列波导之间的间距和路径差异，△θ 是相邻两个输入输出波导之间的衍射角间距。式（5）表明 FSR 与 i+j 的值有关。它每个端口间的相对差异为 d（△θ/△L），在 Osamu Ishida 的一个实验 AWG 复用器中为 $5x10^{-4}$。[53]

C.频率响应

复用器的频率响应对于确定其应用可行性是一个很重要的参数。每一束输入光在输入平板里衍射，通过阵列波导，聚焦在输出平板，然后耦合到一个输出波导。聚焦位置与光频率有关，因此，频率响应可通过输入到输出波导的聚焦光的耦合系数得到。聚焦光的模场模式与输出波导的传输模几乎相同。这里，可以假设它们是高斯的[40]。两个高斯场的耦合系数由简单的高斯形式的函数给出如下：

$$\exp\left\{-\left(\frac{x}{\omega_0}\right)^2\right\}, \qquad (9)$$

其中，x 是两个场之间的间距，ω_0 是它们的孔径。间距 x 与相对通过频率的频偏 δf 成正比，即

$$x=\frac{\Delta x}{\Delta f}\delta f\ [\mathrm{m}], \qquad (10)$$

比值△x/△f 是角色散和聚焦长度的乘积的线性色散。相应地，频率响应为：

$$T(\delta f)=\exp\left\{-\left(\frac{\Delta x\delta f}{\omega_0\Delta f}\right)^2\right\}, \qquad (11)$$

从该式中可得，复用器的频率响应与高斯通带滤波器的频率响应相同。由（11）式得出半高全宽（FWHM）如下：

$$FWHM=\frac{2\sqrt{\ln 2}\omega_0\Delta f}{\Delta x}\ [\mathrm{Hz}], \qquad (12)$$

Dragone 和 Adar 通过数值计算得到了相同的频率响应[43]。在本节中，传输函数 T（δf）被描述为复指数项的总和。这等于输入波导场的傅立叶变换。如果场是高斯的，传输函数将是高斯的，因为高斯函数的傅立叶变换是高斯的。虽然看起来与 Dragone 和 Adar 的方程不同，但是我们的（11）式是他们的方程的特殊情况，并且给出了更简单、更有用的用来估计复用器的频率响应的符号。

1.3.2、AWG 基本功能和应用

图 1-15 示出了 AWG 是如何实现四种基本功能的。第一和第二种应用是简单的复用和解复用功能。第三种是分插复用（OADM），该功能同时实现了解复用和复用，打开相应的环路，可以分插一个或多个频率。第四种功能是 NxN 完全交叉连接（OXC），输入到左边的每个频率复用的信号根据频率而分开连接到不同的右边端口。以前报道的 WDM NxN 网络中的 N 个解复用器，N 个复用器和 N^2 根光纤被一个复用器所取代了。该用法最早由 Saleh 提出。

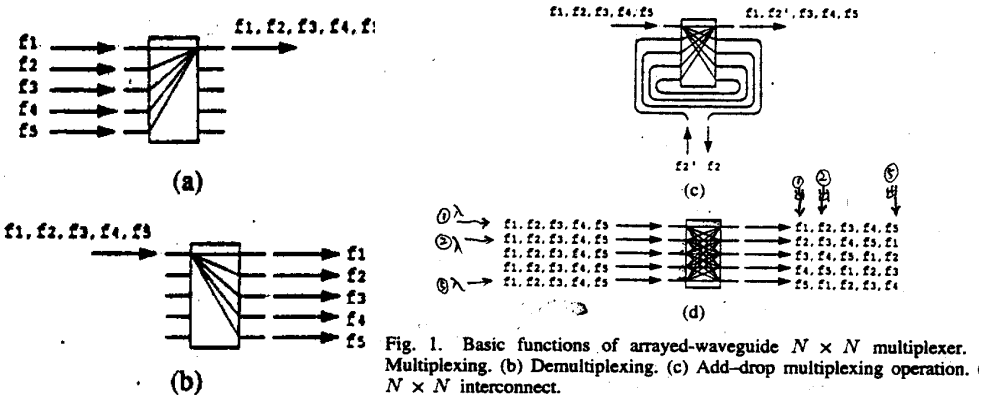
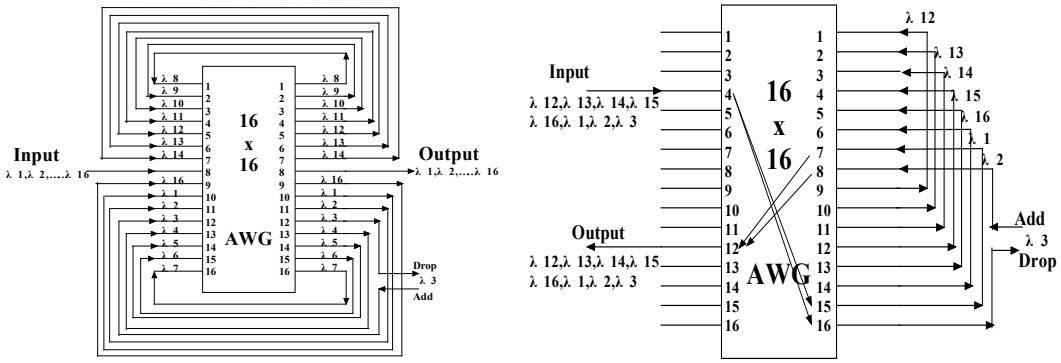


Fig. 1. Basic functions of arrayed-waveguide $N \times N$ multiplexer. Multiplexing. (b) Demultiplexing. (c) Add–drop multiplexing operation. $N \times N$ interconnect.

图 1-15、AWG 基本功能

AWG 通常有两种基本配置方案。一种是 Loopback Path Configuration (环回路径配置)方案，另一种是 Foldback Path Configuration (折返路径配置)方案。环回路径是指从 AWG 左（右）侧输入的波在右（左）侧输出后再将它连接到左（右）侧，最终从右（左）侧输出。而折返配置是指从 AWG 左（右）侧输入的波在右（左）侧输出后将它连接到输出同侧某端口，最终是从左（右）侧输出。（分别见图 1-16 左图和右图）



AWG 的环回路径（Loopback Path）配置　　AWG 路径（Foldback Path）配置

图 1-16、AWG 基本配置方法

1.3.3、AWG 性能理论分析

A. 串扰（Crosstalk）对误码率（BER）的影响

这里，我们将讨论 N 通道解复用操作中由于串扰所引起的误码率恶化。我们 P_s 和 P_c 分别是选定通道和消光通道的光功率。复用器的串扰定义为：$R_c=P_c/P_s$。

我们假定系统是强度调制和直接检测（IM-DD）。严格地说，在一个 IM-DD 系统中，占、空情况下的噪声是不相同的，但是我们是在讨论由串扰引起的误码率的恶化，不需要细致地论述误码性能。因此，我们简单地假设占空情况下的噪声分布都是高斯的并且定义误码率为：

$$BER = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{2\sqrt{2}}\right), \quad (13)$$

BER 由 Q 值决定。例如，当 Q=12 时，BER 为 10^{-9}。Q 由 P_s/σ 定义，而 σ^2 是接收机有效噪声的偏差。

串扰被视为另外一种有两个电平（P_c 和 0）的噪声。它的偏差是每个通道 $P_c^2/4$。根据中心极限定理，产生串扰的 N-1 个异步混合信号的偏差为（N-1）$P_c^2/4$。因此在 N 通道传输中，噪声和串扰的偏差是 σ^2+（N-1）$P_c^2/4$。为了即使在有串扰时也使得 BER 恒定，Q 值必须有相同的值，即：

$$Q = \frac{P_s}{\sigma} = \frac{P_s}{\sqrt{\sigma^2 + \frac{N-1}{4}\left(P_s' R_c\right)^2}} \quad (14)$$

其中，P_s' 是用来补偿串扰噪声所增加的信号功率。相应地，由于串扰所引起的功率代价是

$$PP \equiv 10\log\frac{P_s'}{P_s} = -5\log\left(1 - \frac{N-1}{4}Q^2 R_c^2\right)[dB] \quad (15)$$

B. 最大比特率

如果比特率是 622Mb/s，没有由于复用器带宽所引起的脉冲变形，因为带宽是 30GHz。对于更高的比特率传输，例如 10GHz 或者更高，我们必须考虑光脉冲通过复用器的最大比特率。如果光源是通过一个理想强度调制器按 NRZ 格式调制的，“010101…”的数字样式的光功率由一时间 t 的正弦函数的级数给出如下：

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\frac{4}{\pi}\left(\sin 2\pi\frac{R}{2}t + \frac{1}{3}\sin 2\pi\frac{3R}{2}t + \frac{1}{5}\sin 2\pi\frac{5R}{2}t + \cdots\right) \quad (16)$$

其中 R 是比特率。级数中的第一项代表眼图开口。其余项是谐波项，它们使得脉冲成矩型。在最大比特率下，谐波项是可忽略的，因为它们将是在通带之外。在通过复用器之后，眼图开口由下式给出：

$$\frac{4}{\pi}\exp\left\{-\left(\frac{\Delta x R/2}{\omega_0 \Delta f}\right)^2\right\} \quad (17)$$

指数项来自（11）式中的传输系数。这里，我们定义最大比特率为眼图开口为 80%或 1dB 时的比特率。从（12）式，以及（17）式中等于眼图开口的 0.8 的条件，得到最大比特率为 FWHM 的 0.82 倍。

1.3.4、AWG 曾经存在的问题及解决情况

曾经，AWG 存在几个关键问题没有很好解决——损耗大、串扰较大、温度稳定性差、而且具有微弱的偏振敏感性。但是经过众多研究者的不懈努力，这些问题已经得到了很好的解决。

如果基于硅波导，复用器可以达到低的插入损耗(3-4dB)[55][56]。Yasuyuki 等人成功的将 0－85℃范围内 0.95nm 的波长漂移抑制到 0.05nm，也就是说，可以不需要温度控制而直接使用在实际的 WDM 系统中。[57]极化敏感问题，即 TE 模和 TM 模之间的传输波长移动，可以通过采用波板的技术实现[58]。尽管有几种可以消除极化敏感的问题，波板技术是最有前途的，因为它可以完全消除 TE-TM 位移，而不管波导双折射程度有多大。由插入到阵列波导中的波板所带来的附加损耗已经通过采用聚酰亚胺薄膜波板而大幅度的减少到 0.4dB。Y.Inoue 等人制作的 AWG 将由 TE/TM 模式转换所引起附加损耗减少到 0.26dB。[57]这些技术导致了极化不敏感、低至 3dB 的低插入损耗的实用复用器的出现。早在 1995 年，K. Okamoto 等人就报道了 64x64 通道的 AWG。[59]OFC2000 上，Y.Hibino 等人报道了 256 通道的 AWG，其插入损耗为 4.4dB，串扰为-33dB。[60]可见，至今为止，AWG 的制造技术已经非常成熟了。

1.3.5、我们实验所用 AWG 的特性

1.3.5.1、传输特性

表 1-3、标准 16x16 周期 AWG 传输特性

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16
2	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1
3	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2
4	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3
5	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4
6	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5
7	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6
8	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7
9	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8
10	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9
11	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10
12	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11
13	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12
14	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13
15	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14
16	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15

NxN 周期性 AWG 的输入输出端口与波长的关系是 $n = i + j - k \bmod N$，其中，n 表示第几个波长（从 1 到 N），i 是输入端口的标号，j 是输入端口的标号，k 是与 AWG 有关的常数。

通常 NxN 周期性 AWG 路由公式是：$n = i + j - 1 \bmod N$，即 k=1。即在第 i 个口输入，第 j 个口输出的波长是第 n=$i + j - 1 \bmod N$ 个波长。通常 16x16 周

期性 AWG 的路由公式为 $n = i + j - 1 \bmod 16$，路由表如表 1-3 所示。

但是，实际的 AWG 的输入输出端口与波长的关系应该通过实验测得。这里，作者提出了一种确定 AWG 输入输出端口与波长的关系的方法。该方法简单易行且完全适用所有 AWG 的测量。

首先确定 AWG 的工作波长，将 ASE 噪声从 R1 端口输入，分别在 L1－L16 端口测得各个波长值。由于 AWG 有周期性，即相隔周期为 FSR 的波长会在同一个口输出，但是只有主 FSR 内的波长损耗最小，所以我们取同一个端口的输出波长中损耗最小的。这样得到 16 个波长值即为 AWG 的主 FSR 内的波长，我们称其为工作波长(当然工作波长可以由生产厂家告知)。我们的 AWG 当工作温度在 33.8℃时，工作波长是符合 ITU—T 标准的中心波长。我们利用如下的配置（图 1-17）测出了我们的 AWG 的输入输出端口与波长的关系。

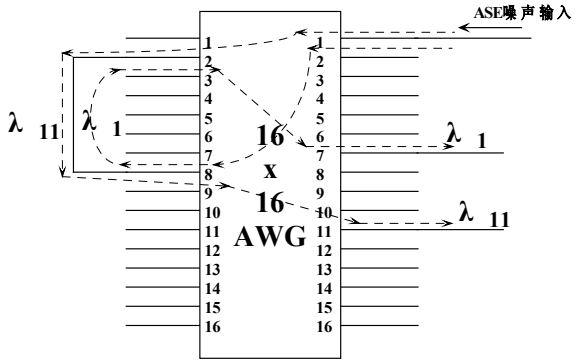


图 1-17、测量 AWG 输入输出端口波长和波长关系的方案

我们测量我们实验用的 AWG，用 ASE 噪声在右端口 1 输入，将左端口的端口 2 和端口 8 联接。发现在右端口 7 有波长 1 输出，右端口 11 有波长 11 输出。因此我们可以推导出表达式 $n = i + j - k \bmod N$ 中的 k=8，而 N＝16，所以我们的 AWG 的输入输出端口与波长的关系是 $n = i + j - 8 \bmod 16$。

从而得到我们的 16x16 周期 AWG 的传输矩阵如表 1-4：

表 1-4、我们的 16x16 周期 AWG 传输特性

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9
2	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10
3	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11
4	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12
5	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13
6	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14
7	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15
8	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16
9	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1
10	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2
11	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3
12	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4
13	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5
14	f7	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	fis	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6
15	f8	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7
16	f9	f10	f11	f12	f13	f14	f15	f16	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8

1.3.5.2、温度特性

ASE 噪声输入 AWG 的输入端口 1,测量在 AWG 的输出端口 1 的波长情况。通过往 AWG 上吹热风而使其温度提高。AWG 的温度可以通过测量其测温电阻的阻值而得到。我们测得的 AWG 的温度特性曲线如图 1-18。

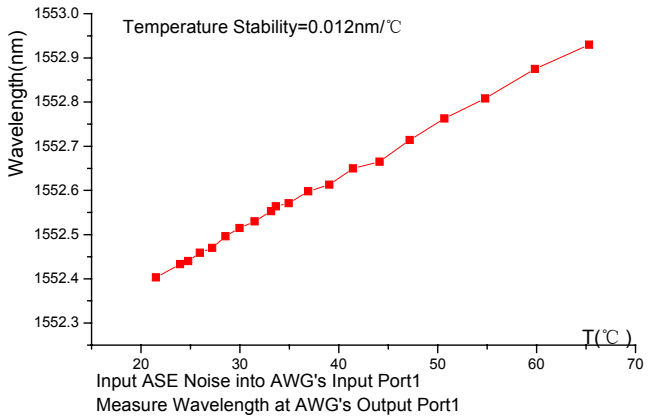


图 1-18、实验所用 AWG 的波长温度特性曲线

由该温度特性曲线可以看出，在温度变化为△T＝43.8052℃的范围内，波长漂移度为Δλ＝0.527nm，所以可以确定我们实验所用 AWG 的波长温度稳定性为Δλ/△T= 0.012nm/℃。

【参考文献】

1、王伟中，全光通信网及其发展，现代电信科技，1998 年第 5 期，P_{11}-P_{17}
2、屠青，全光网络技术的进展，电信技术，1999 年第 1 期，P_{10}-P_{12}
3、赵刚，全光网中的 OADM（光分插复用器）/同源相干串扰及若干问题的研究，北京大学硕士学位论文
4、北京大学，清华大学，北京邮电大学，全光通信实验网中期验收报告
5、王洪波，基于光纤光栅的全光网节点研究，北京大学硕士学位论文
6、M.W.Chbat, et al, Recent progress in the Optical Pan-European Network project (ACTS/OPEN), OFC98, ThP1
7、Manfred Rocks, et al, Evolution of optical transport and edge networks in Germany, OFC98,TuK
8、ECOC’96，MoA.2.2
9、Phill Sporton, Telstra’s optical fiber network in Australia, OFC98, TuK2
10、M.Oscar Van Deventer, et al ,Efficient Planning of Optical Network Upgrades, Ofc97,TuL4
11、Wu-Jhy Chiu, Lightwave Transmission Networks in Taiwan, Ofc97, TuL5
12、Wolfgang Mader, et al, Results of the PHOTON and MOON field Trials, OFC99, ThP3
13、William C.Marra, Applying Undersea Technologies to Project, OFC99, TuQ1
14、B.Hui and M.Maeda, SuperNet and NGI,OFC99,TuP2
15、张佰成、吴德明、徐安士、王楚，全光通信网技术
16、【全光通信实验网】软课题报告，北京大学、清华大学、北京邮电大学，1998 年 4

月 17 日
17、S.K.Liaw, System demonstration of wavelength-tunable multiple-ITU-WDM-channel add/drop multiplexer using an optical-switch pair and fiber Bragg gratings,OFC98,WM39
18、G.Nykolak, et al, All-Fiber Active Add-Drop Wavelength Router, IEEE Photonics Technology Letters,VOL.9.No.5,May 1997
19、Se Yoon Kim, et al, Highly Stable Optical Add/Drop Multiplexer Using Polarization Beam Splitters and Fiber Bragg Gratings, IEEE Photonics Technology Letters,VOL.9.No.8, August 1997
20、Se Yoon Kim, et al, Highly Stable Optical Add/Drop Multiplexer Using Polarization Beam Splitters and Fiber Bragg Gratings, OFC97,TuJ3
21、B.Glance, Wavelength-Tunable Add/drop Optical Filter, IEEE Photonics Technology Letters,vol.8, No.2, February 1996
22、Hiroshi Takahashi, Transmission Characteristics of Arrayed Waveguide NxN Wavelength Multiplexer，Journal of Lightwave Technology, vol.13, No.3, March 1995
23、Keang-Po Ho, et al, Performance of an eight-wavelength bidirectional WDM add/drop multiplexer with 80-Gbit/s capacity,OFC97,TuR1
24、C.H.Kim et al, Bidirectional WDM Self-Healing Ring Network Based on Simple Bidirectional Add/Drop Amplifier Modules,OFC99,TuL6
25、C.H.Kim et al, A Novel Bidirectional Add/Drop Amplifier(BADA), IEEE Photonics Technology Letters, Vol 10, No.8, August 1998,P_{1118}-P_{1120}
26、Y.Zhao, et al, A Novel Bi-Directional Add/Drop Module for Single Fiber Bi_directional Self-Healing Wavelength Division Multiplexed Ring Networks ,OFC99,TuL7
27、Louay Eldada, et al , Thermally tunable polymer Bragg grating OADMs,OFC99,ThH1
28、L.E.Adams, et al , Dynamic mesurements of Magnetically_strain tuned FBG for fast reconfigurable add/drop,OFC99,TuJ8
29、B.J.Eggleton, et al, Electron. Lett.30, 1620(1994)][M.Ibsen, et al, Electron. Lett.31, 37(1995)
30、M.Ibsen, et al, Electron. Lett.32, 2233(1996)
31、Jorg Hubner, et al, Low cross talk planar multichannel add-drop multiplexer based on sampled Bragg gratings, OFC98,WM58
32、C.G.M.Vreeburg, et al, Compact Integrated InP-Based Add-drop Multiplexer, ECOC’96,ThD.3.4
33、C.G.M.Vreeburg，et al，Compact Integrated InP-based Add-drop Multiplexer, ECOC’96, ThD.3.4
34、K.Okamoto, et al, 16 channel optical add/drop multiplexer using silica-based arrayed-waveguide gratings, Electronics Letters, 27th April 1995,vol 31,No.9
35、Yasuyuki Inoue, et al, Athermal silica-based arrayed waveguide grating(AWG) multiplexer, ECOC’97, Th3B
36、II.Rouda, et al, Transient effects in wavelength add-drop multiplexer chains, OFC99,TuR2
37、M.I.Hayee and A.E.Willner, Fiber transmission penalties due to EDFA power transients resulting from fiber nonlinearity and ASE noise in add/drop multiplexed WDM networks,OFC99,ThU2
38、B.Oratega,et al, Analysis of the Backreflected Signal in an All-fiber Bandpass Bragg Transmission Filter, IEEE Photonics Technology Letters, vol.10, No.8, August 1998
39、Turan Erdogan, Fiber Grating Spectra, Journal of Lightwave Technology, vol.15, No.8, August 1997
40、Hiroshi Takahashi, Kazuhiro Oda, et al, Transmission Characteristics of Arrayed Waveguide NxN Wavelength Multiplexer, Journal of Lightwave Technology, Vol.13, No.3, March 1995, pp447-454
41、Haifeng Li, Photonic integrated eight-wavelength 2x2 WDM cross-connect switch using

phased-array waveguide grating multiplexers, OFC'97 Technical Digest, pp8-9
42、M.K.Smit, New focusing and dispersive planar component based on an optical phased array, Electron.Lett., vol.24, pp.385-386,1988.
43、C.Dragone, An NxN Optical Multiplexer Using a Planar Arrangement of Two Star Couplers, IEEE Photon. Tech. Lett., VOL.3, NO. 9, Sept. 1991, pp812-814
44、Hiroshi Takahashi, Kazuhiro, et, al, Impact of Crosstalk in an Arrayed-Waveguide Multiplexer on NxN Optical Interconnection, Journal of Lightwave Technology, Vol.14, No.6. June 1996, pp1097-1105
45、H. Takahashi, et al, Anticrosstalk arrayed-waveguide add-drop multiplexer with foldback paths for penalty free transmission, Electron. Lett, Vol. 30, pp. 2053-2055, 1994
46、K. Takada, H. Yamada, K. Okamoto, Optical Spectrum Analyzer Using Cascaded AWG's with Different Channel Spacings, IEEE Photonics Technology Letters, VOL.11, NO.7, July 1999, pp.863-864
47、M.Zirngibl, et al, Digitally Tunable Channel Dropping Filter/Equalizer Based on Waveguide Grating Router and Optical Amplifier Integration, IEEE Photonics Technology Letters, VOL.6, NO. 4, Apr. 1994, pp513-515
48、O. Ishida, FDM-channel selection filter using arrayed-waveguide grating multiplexer with input and output switches, Electron. Lett, Vol. 30, pp. 2154-2155, 1994
49、M.Zirngibl, et al, Digitally Tunable Channel Dropping Filter/Equalizer Based on Waveguide Grating Router and Optical Amplifier Integration, IEEE Photonics Technology Letters, VOL.6, NO. 4, Apr. 1994, pp513-515
50、Haifeng Li, et al, Multiwavelength integrated 2x2 optical cross-connect switch and lambda-partitioner with 2xN phased-array waveguide grating in self-loopback configuration, OFC'98 Technical Digest, pp79-80
51、L.Moller, et al, Mode Stabilization Technique for the Multifrequency Laser, OFC'2000 Technical Digest, TuL4, pp187-189
52、D.K.Jung, Spectrum-Siliced Bidirectional WDM PON, OFC'2000 Technical Digest, WJ6, pp160-162
53、 Richard A.Barry and Pierre A.Humblet , Latin Routers , Design and Implementation , Journal of Lightwave Technology,VOL.11, NO.5/6, May/June 1993 ,PP891-899
54、Osamu Ishida, et al, Loss-Imbalance equalization in Arrayed-Waveguide-Grating (AWG) Multiplexer Cascades, Journal of Lightwave Technology,VOL.13, NO.6, June 1995, pp1155-1163
55、H.B.Thompson, et al, An original low-loss and pass-band flattened SiO_2 on Si planar wavelength demultiplexer, OFC'98 Technical Digest, pp77
56、 M.R.Amersfoort, et al, Low-Loss Phased-Array Based 4-channel Wavelength Demultiplexer Integrated with Photodetectors, IEEE Photonics Technology Letters, VOL.6, NO. 1, Jan 1994, PP62-64
57、 Yasuyuki, Inoue, et al, Athemal silica-based arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexer, ECOC'97, Sept. 1997, TH3B, pp33-36
58、 Y. Inoue, et al, Polarization Mode Converter with Polyimide Half Waveplate in Silica-Based Planar Lightwave Circuits, IEEE Photonics Technology Letters, VOL.6, NO. 5, May 1994, pp626-628
59、K. Okamoto, et al, Fabrication of 64x64 arrayed-waveguide grating multiplexer on silicon, Electronics Letters, Feb. 1995, Vol.31, No.3, pp184-186
60、 Y.Hibino, et al, Fabrication of silica-on-Si waveguide with higher index difference and its application to 256 channel arrayed-waveguide multi/demultiplexer, OFC'2000 Technical Digest, WH2, pp127-129

第一章、概述 1

【导论】 1

1.1、全光网(AON)简介 1

1.1.1、为什么要全光联网 1

1.1.2、全光网优点 2

1.1.3、世界全光网发展概况 2

1.2、光分插复用器（OADM）概述 3

1.2.1、OADM 简介 3

1.2.2、OADM 分类 4

1.2.3、OADM 常见结构 4

1.2.4、OADM 结构新动态 8

1.2.5、对 OADM 节点研究的想法 12

1.3、阵列波导光栅（AWG）概述 13

1.3.1、AWG 传输特性及原理 14

1.3.2、AWG 基本功能和应用 18

1.3.3、AWG 性能理论分析 19

1.3.4、AWG 曾经存在的问题及解决情况 21

1.3.5、我们实验所用 AWG 的特性 21

【参考文献】 23

第二章、基于 AWG 的 BADM 方案设计和实验研究

【导论】

光分插复用器（Optical Add/Drop Multiplexer—OADM）对于实现 WDM 自愈环（Self-Healing Ring—SHR）网络是一个关键器件。目前大部分的 OADM 都是单向的，即光信号必须只能在一个方向上分插。以前，WDM SHR 网络是用单向 OADM 实现的。这种网络需要 4 条光纤通路：2 条用于工作环，2 条用于保护环。如果换用双向 OADM(Bidirectional OADM—BADM)这些光纤通路的数目就会减半。单向环中信号必须通过所有节点以达到上行节点，而双向环中节点间联络相比方便得多，路由配置也要灵活得多。因此 BADM 对于自愈和保护有重要意义。

本章分析了双向 OADM 的设计及在保护和自愈环中的应用，分析了各种流行的 OADM 结构，并且进行了单向 OADM 的双向化扩展。每一种单向 OADM(单工方式)被扩展成 BADM，其中部分扩展成半双工模式，部分扩展成全双工模式。这些 BADM 在 WDM 自愈环中将是很重要有效的器件。其中，设计的 AWG 型全双工 BADM 具有极好的对称性、可扩充性、传输性能以及波长利用率，利用该原理，对于任意 2Nx2N AWG，我们可以实现有 N-1 个上行信号和 N-1 个下行信号的全双工 BADM，因此该结构对于双向传输有极高的价值。然后，进行了一些有典型意义的双向 OADM 实验，包括光栅型 BADM 模拟实验（半双工），AWG 型（环回路径配置和折返路径配置）半双工 BADM 传输模拟实验，AWG 型（环回路径配置和折返路径配置）双工 BADM 之传输实验,比较了这些不同类型的 BADM 之各自优缺点。本章还分析了 AWG 的两种基本配置，即环回路径（loopback path）配置和折返路径(foldback path)配置，用于双向 OADM 传输实验时各自性能的对比。发现两种配置在损耗性能方面差不多，但是后者的串扰性能远远比前者好。

2.1、双向 OADM 的设计及在保护和自愈环中的应用

2.1.1、双向 OADM（Bidirectional OADM, BADM）的提出

从 97 年开始，由 Keang-Po Ho 等人开始提出双向 OADM（BADM）的概念。他的双向 OADM 是在对基于*分波器+波长交换单元+合波器*结构的 OADM 进行扩展后实现的(图 1-9)。之后，C.H.Kim 和 Y.Zhao 等相继提出了各自的双向 OADM 结构。并且研究了它们在双纤双向自愈环中的应用。[1][2][3][4]C.H.Kim 提出的双向自愈环的节点配置如图 1-10。[1][2]

在 OFC'99 上，C.H.Kim 等人将其 BADA 模块用于双向 WDM SHR 网络，得到了可以自动恢复传输错误的网络节点。如图 1-10。当光纤断开后，控制电路通过监测工作环 EDFA 输入端的信号检测到传输错误，将相应开关（与断开的光纤相邻）从工作环打到保护环上。保护环上的 EDFA 补偿光纤和器件损耗。

该配置中一个关键器件就是双向 OADM（BADM）。本文将依据常见的 OADM 结构，分别分析并实行双向化的扩展。这些 BADM 对单纤双向环形网(Single Fiber Bi-Directional Ring Networks, SFBDRN)有很重要意义。

2.1.2、OADM 及 BADM 的分类

现有 OADM 方案主要有如下几种基本形式：1).分波器+波长交换单元+合波器；2).耦合单元+滤波单元+合波器；3).基于声光可调谐滤波器(AOTF)；4).基于波长光栅路由器(WGR，AWG)；5).集成 OADM。具体实施方案可能有所不同，但一般都是各种演化形式。

考虑到双向 OADM（BADM）的优点，希望能够更进一步的研究。本文对现有常见 OADM 结构进行了分析，尽可能将单向 OADM 改换成 BADM 结构。集成 OADM 不在本文扩展之列，因为这是微电子领域的工作。

在扩展之前，先说明几点：

1、单向 OADM 结构在通讯方式上来说，可以理解成单工方式，即只能由节点 A 发信号到 B，反之不行。以下称之为单工 OADM。

2、对称、可互易的 OADM，从 A 发信号到 B 和从 B 发信号到 A 在波长路由、传输特性等方面完全相同。但从 A 发信号到 B 时，不能从 B 发信号到 A；反之亦然。因此是半双工方式。这时，或是使用了选择方向的光开关，或是上行信号和下行信号交替工作。上行和下行信号光波长可以相同，因为同时只有上行或下行信号的其中一路存在。以下称这种 OADM 为半双工 OADM。

3、实际通信中全双工方式对于双方的信息交流最方便。最符合通信要求的 OADM 应该是全双工的。但是在光通信全双工工作时，如果上行信号和下行信号的波长一样或接近，就会产生严重的干扰，甚至破坏通信。因此，设计的双向 OADM 必定是上行信号和下行信号分别采用不同的光波长，即波长和通信方式存在矛盾。以下称这种 OADM 为全双工 BADM。

2.1.3、常规 OADM 的双向化扩展

1).分波器+波长交换单元+合波器

如图 1-1。这种 OADM 结构本身就是一个半双工 OADM 结构。以网络的观点来看，它是一个可互易的网络。

在 OFC'97 上 Keang-Po Ho 等人曾经提出了采用光开关实现的半双工双向 OADM 结构，他是对分波器+波长交换单元+合波器结构的 OADM 进行扩展而实现的。如图 1-9。

2).耦合单元+滤波单元+合波器

如图 1-3。该 OADM 很明显是单向 OADM 结构（单工），因为环行器是不可逆器件，三端口环行器由 1 输入的光路径是 1→2，而由 2 输入的光路径是 2→3，很明显不互易。以网络的观点，它是一个非互易的网络。

由此，可以设计基于环行器和光纤光栅的双向 OADM(B-ADM)如图 2-1(以上行、下行信号均传输两路波长为例，上行信号传输 λ1 和 λ2 波长，下行信号传输 λ3 和 λ4 波长。上行臂和下行臂上的光栅组合方式可以有很多种方式，比如采用光开关加光栅的各种组合结构，可以按要求实现对任意一路或几路波长的分插复用)。

该 B-ADM 的优点是：它是由全光纤型，没有光开关，没有较大的时延；隔离度取决于环行器的隔离度，上行、下行支路的彼此干扰不大；上行臂和下行臂上的光栅组合方式可以有很多种方式，可以按要求实现对任意一路或几路波长的分插复用，并且可以通过对光栅和光开关的组合扩展实现对上行和下行信号的波长数扩展。

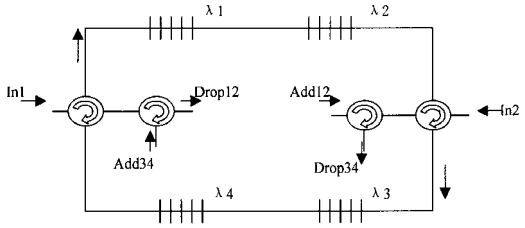


图 2-1、环行器和 FBG 型全双工 BADM

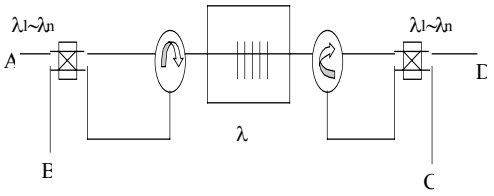


图 2-2. 光开关结构的半双工 BADM

采用光开关可以实现如下一种基于环行器和光栅的半双工 OADM（图 2-2）。类似的采用光开关的半双工 OADM 结构在 OFC‘97 上曾经由 Keang-Po Ho 等人提出过，他是对分波器+波长交换单元+合波器结构的 OADM 进行扩展而实现的（图 1-9）。

该 BADM 工作原理如图 2-3、图 2-4 所示。

图 2-3 表明，光开关都处于直通状态时，端口 A、B、C、D 分别是 in、drop、add、out 端口。主光纤上信号传输是从 A 到 D。

图 2-4 表明，光开关都处于交叉状态时，端口 A、B、C、D 分别是 out、add、drop、in 端口。主光纤上信号传输是从 D 到 A。

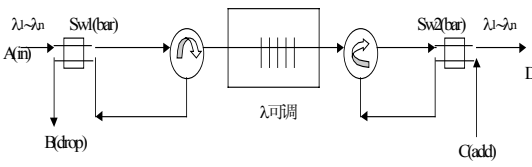


图 2-3.光开关均为 Bar 干线信号 A→D

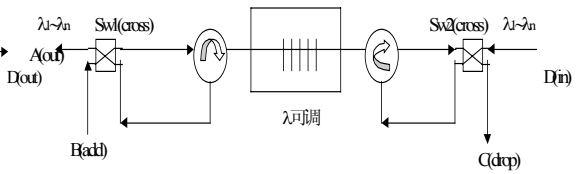


图 2-4.光开关均为 Cross 干线信号 D→A

该方案结构简单易行、功能强大（可实现双向分插信号，节约一半光纤）、可以实现模块化（对于任意结构耦合单元+滤波单元+合波器的 OADM 都可以利用如图的光开关结构将它改变为 BADM）、波长选择灵活（光栅可以采取阵列结构以及连续可调（热调节等）光栅结构）等优点。

该 BADM 结构（图 2-2）有普遍性，因为所有耦合单元+滤波单元+合波器类的 OADM 都可以用这种光开关结构改变成半双工 BADM。我们可以采

用不同的布拉格光栅组来满足不同的波长要求。例如，如果将布拉格光栅替换成一个热可调节聚合物布拉格光栅[5]或者一个光栅阵，就可实现波长连续可调或各种离散可调的半双工 BADM。

3).基于声光可调谐滤波器(AOTF)的 OADM

如图 1-6。这种 OADM 结构本身就是一个半双工 OADM 结构。以网络的观点来看，它是一个可互易的网络。如果选频可以使两个或多个波长从输入口输入实现模式转换后都是从下路口输出，则这两个（多个）波长分别可以做为上路和下路波长。这种情况是可以实现全双工通信的。

4).基于波长光栅路由器(WGR，AWG)

WGR(Wavelength Grating Router,波长光栅路由)是一种光栅型的波长路由器，具有双向性，即一个方向输入为解复用方式，则另一个方向输入为复用方式。有些文献也称 WGR 为 AWG（Arrayed Waveguide Grating,阵列波导光栅）。

基于波长光栅路由器(WGR)的 OADM 如图 1-8[6]。该结构本身也是一个半双工 OADM 结构。以网络的观点来看，它是一个可互易的网络。

一种简化方式就是 WGR B 和后面的 1×N 光开关用一个 N×1 的耦合器来代替。这样的 OADM 结构则不是双向的了。

利用 AWG，可以实现很多种类型的 OADM 结构。C.H.Kim 和 Y.Zhao 等分别提出了使用 AWG 的双向 OADM 结构，并且研究了它们在双纤双向自愈环中的应用。[1][2][4]

作者设计实现了如图 2-5 的全双工 BADM 结构。该 BADM 的原理是 loop-back path 配置（环回路径配置）。Y.Tachikawa 等人 1993 年利用该配置将常规 AWG 型的 OADM(图 1-8)改变为利用环回路径配置的新型基于 AWG 的 OADM，开创了基于 AWG 的 OADM 的一个新方案[11]。之后又在 1996 年对环回路径配置的应用进行了系统的分析[12]。将基于 AWG 的 OADM 结构提上了一个新的台阶。但是以前的环回路径配置都是单向使用的。而作者设计的图 2-5 是在其基础上进一步改进为全双工 BADM。

该结构中，上行信号波长为λ1，λ3，λ5，λ7；下行信号波长为λ2，λ4，λ6，λ8。该结构可以实现对波长λ2~λ8 的任意分插复用。如果在第一条支臂加上光开关、环行器和光纤光栅（中心波长λ1），可以实现同时对λ1 的分插复用。但结构就复杂了许多，因此，可以根据实际情况进行取舍。可以同时对λ1~λ8 进行分插复用的全双工双向 OADM 如图 2-6。

这两种 BADM 的优缺点与分波器＋波长交换单元＋合波器结构的 OADM 类似。但是功能比后者更加强大，即它可分插复用的波长数更加多，功能更加强大，配置更加灵活，而且对于器件的端口利用率是非常高的。

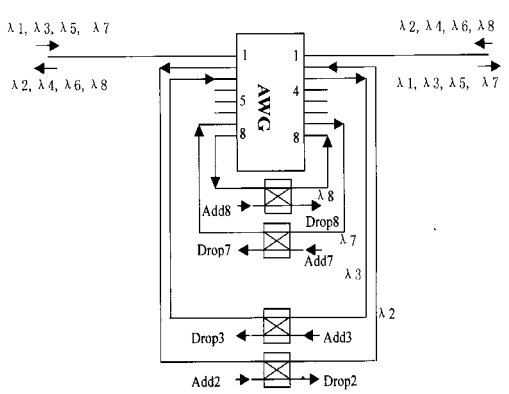


图 2-5.环回配置双工 BADM（分插 7 波长）

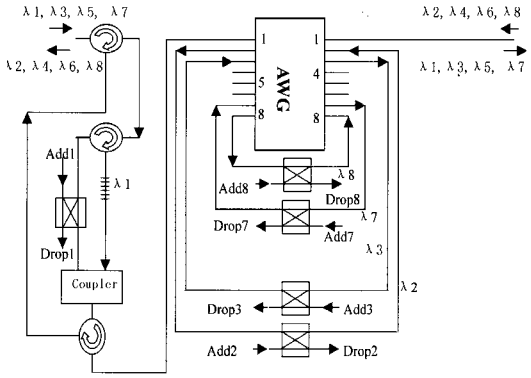


图 2-6.环回配置双工 BADM（分插 8 波长）

作者又利用 fold-back path 原理（折返路径配置）设计了一种全双工双向 OADM，如图 2-7。H.Takahashi 等人 1994 年提出了 AWG 的折返路径配置，用于 OADM，证明了折返路径配置的 OADM 串扰情况将比环回路径配置的 OADM 性能好，开创了基于 AWG 的 OADM 的又一个新方案[13]，将基于 AWG 的 OADM 结构提上了又一个新的台阶。同样，其设计的 OADM 也是单向的。而本节提出的全双工 BADM 配置是一种普遍性的配置。利用该原理，对于任意 2Nx2N AWG, 我们可以实现有 N-1 个上行信号和 N-1 个下行信号的全双工 BADM。

图 2-7 中，下行信号波长为λ1、λ2、λ3，上行信号波长为λ5、λ6、λ7。该双工 BADM 工作原理如下（参考表 1-3）：当下行信号λ1, λ2, λ3 到达 AWG 的左端口 1(L1),AWG 右端口输出分别为 R1(λ1), R2(λ2), R3(λ3)。它们可以或者被分插或者直通。然后，R1(λ1)被连接到 R5, R2(λ2)到 R6, R3(λ3)到 R7。这样，λ1, λ2, λ3 就将在 L5 汇合，并通过环行器输出。对于上行信号，原理类似。

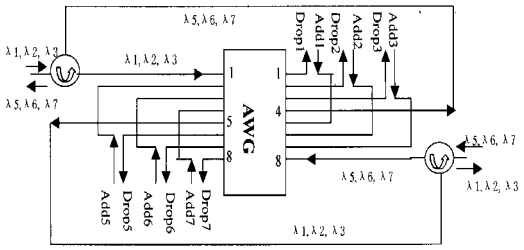


图 2-7、AWG 结构的双工 BADM（分插 6 波长）

该配置是一种普遍性的配置。利用该配置，对于任意 2Nx2N AWG, 我们可以实现有 N-1 个上行信号和 N-1 个下行信号的全双工 BADM。另外由于仅仅使用了 AWG 和环行器，没有使用光开关，所以对于分插复用波长不存在时延问题。该结构有一切全光纤型 OADM 的优点。比前面设计的基于环回配置的全双工 OADM 在结构、性能等方面更加显示出优越性。

2.2、双向 OADM 实验

本部分将对前面理论设计的 BADM 进行实验，并且将对各种 BADM 方案的优缺点根据实验结果情况进行分析和对比。

2.2.1、光栅型半双工 BADM 模拟实验

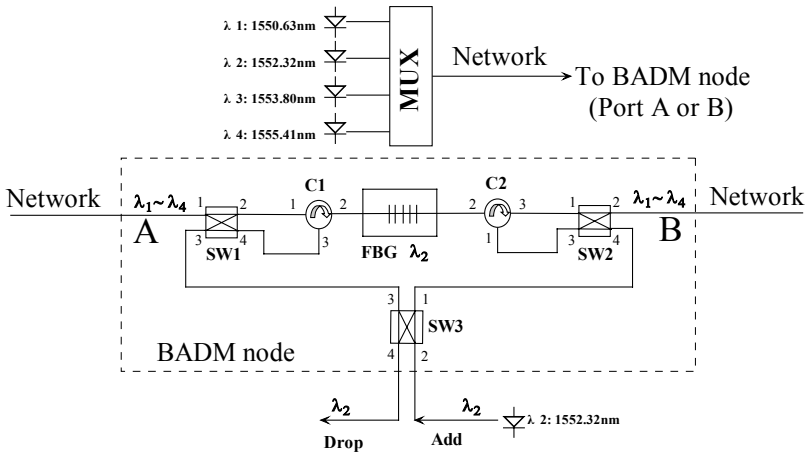


图 2-8、光栅型半双工 BADM 实验

光栅型半双工 BADM 原理如图 2-2。根据该原理进行模拟实验如图 2-8。

1、首先测光栅传输特性。ASE 噪声输入时测得光纤光栅的输出如图 2-9：

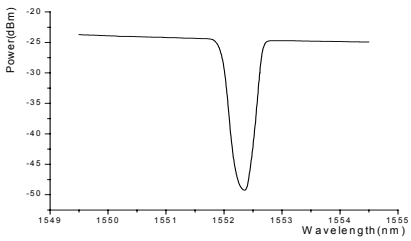
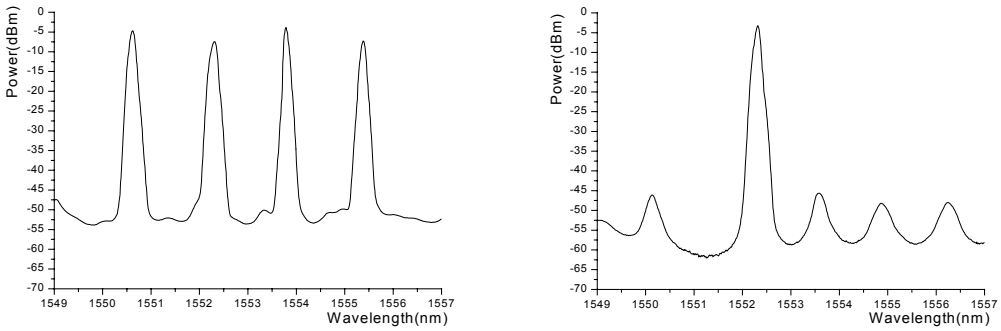
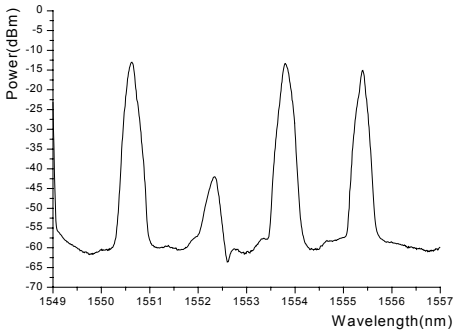


图 2-9、光栅传输特性（波谷 1552.33nm，透射衰减约 25dB）

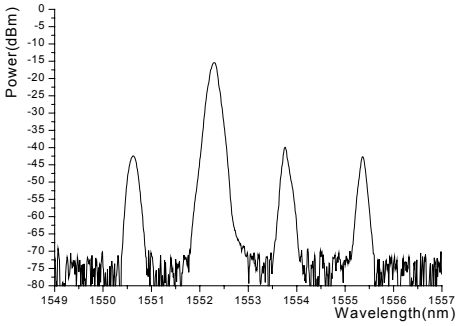


A、干线信号(λ1-λ4)输入　　B、Add 信号(λ2)输入

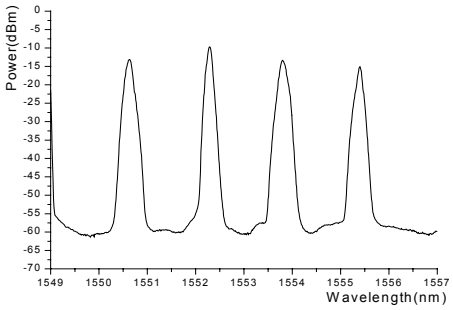
图 2-10、从 Network 来的干线信号输入和节点的 Add 信号输入



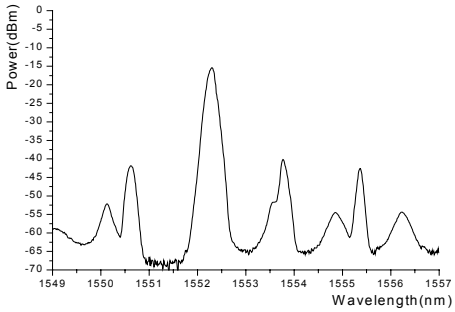
a)、A→B（无 Add 信号λ2 输入）Out 端



b)、A→B（无 Add 信号λ2 输入）Drop 端



c)、A→B（有 Add 信号λ2 输入）Out 端

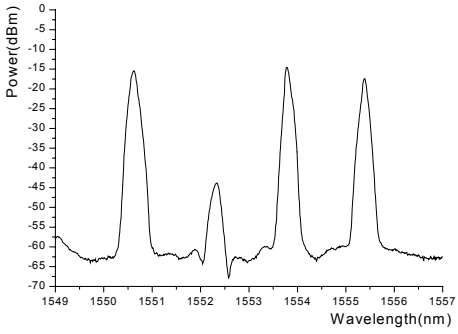


d)、A→B（有 Add 信号λ2 输入）Drop 端

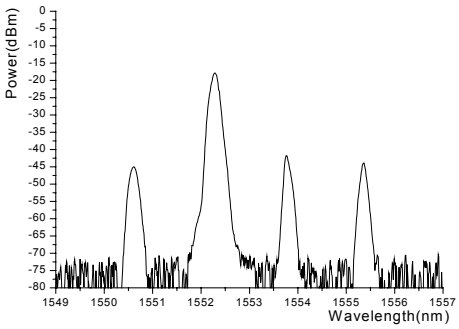
图 2-11、BADM 从左到右传输的特性（A→B）

2、从 Network 来的干线信号输入和节点的 Add 信号输入如图 2-10。

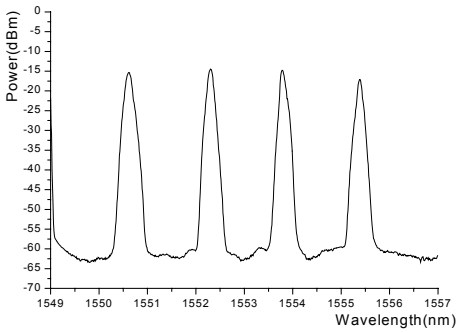
3、测 BADM 从左到右传输的特性（A→B）。此时 SW1，SW2，SW3 都为直通(Bar)状态。从 Network 来的信号在 BADM 节点的 A 端输入。A 为 BADM 的 In 端口，B 为 Out 端口。分 Add 端有 Add 信号和无 Add 信号λ2 输入两种情况分别测量 Out 端口和 Drop 端口的输出情况。见图 2-11。



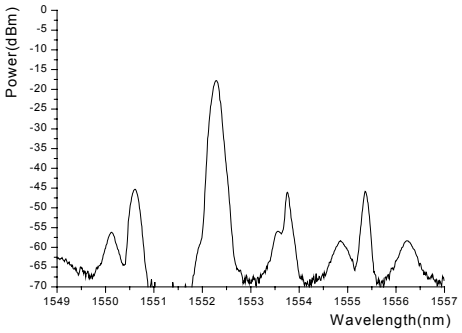
a)、B→A（无 Add 信号λ2 输入）Out 端



b)、B→A（无 Add 信号λ2 输入）Out 端



c)、B→A（有 Add 信号λ2 输入）Out 端



d)、B→A（有 Add 信号λ2 输入）Drop 端

图 2-12、BADM 从右到左传输的特性（B→A）

4、测 BADM 从右到左传输的特性(B→A)。此时 SW1，SW2，SW3 都为交叉(Cross)状态。从 Network 来的信号在 BADM 节点的 B 端输入。B 为 BADM 的 In 端口，A 为 Out 端口。分 Add 端有 Add 信号和无 Add 信号λ2 输入两种情况分别测量 Out 端口和 Drop 端口的输出情况。见图 2-12。

分别对比图 2-11 和图 2-12 的 a)、b)、c)、d)，可以发现对应的图波形几乎一样，仅有微小区别。因此可以断定我们的 BADM 传输特性的对称性非常好；而各端口的异频串扰值都小于-30dB，所以我们的 BADM 总体性能是相当好的。

2.2.2、AWG 型 OADM 之双向传输实验

本部分我们将进行 AWG 型（环回路径配置和折返路径配置）半双工 BADM 之传输实验，以及 AWG 型（环回路径配置和折返路径配置）双工 BADM 之传输实验。分析了 AWG 的两种基本配置，即环回路径（loopback path）配置和折返路径(foldback path)配置，用于双向 OADM 传输实验各自性能的对比，发现两种配置在损耗性能方面差不多，但是后者的串扰性能远远比前者好。

2.2.2.1、半双工双向传输实验

2.2.2.1.1、loopback 配置半双工 BADM 传输模拟实验

我们设计的 AWG 环回路径配置半双工 BADM 模拟实验配置如图 2-13。该实验中，光开关 SW1，SW2，SW3 可以分别处于直通（Bar）和交叉（Cross）状态，以选择 BADM 的主信号传输方向（A←→B）和是否进行分插复用（Add/Drop）。光开关 SW1—SW3 的状态和 BADM 的工作情况关系如下：

SW1	SW2	SW3	BADM 工作方向	分插复用波长情况
Bar	Bar	Bar	A→B	Pass
Bar	Cross	Bar	A→B	Add
Cross	Bar	Cross	B→A	Pass
Cross	Cross	Cross	B→A	Add

下面我们将光开关的 Bar 状态记为 0，Cross 状态记为 1。测得在各个方

向传输时 Out 端口和 Drop 端口的输出波形如图 2-15。以下波形图中，细线表示 λ 10 波长来自 In 端口，粗线表示 λ 10 波长来自 Add 端口。

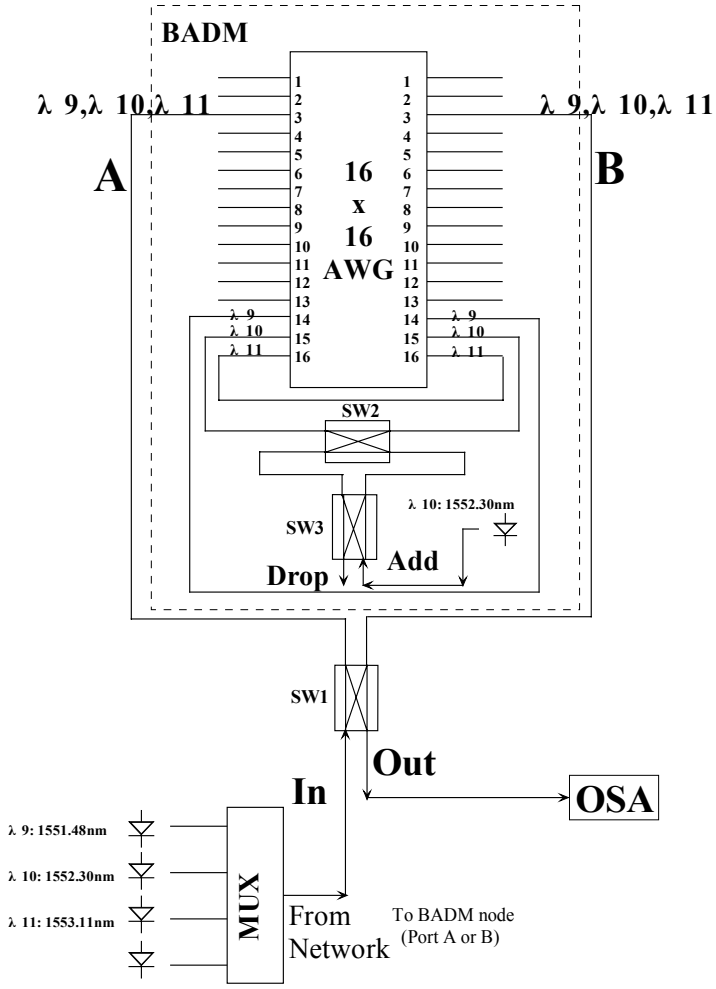


图 2-13、AWG 环回路径配置半双工 BADM 实验

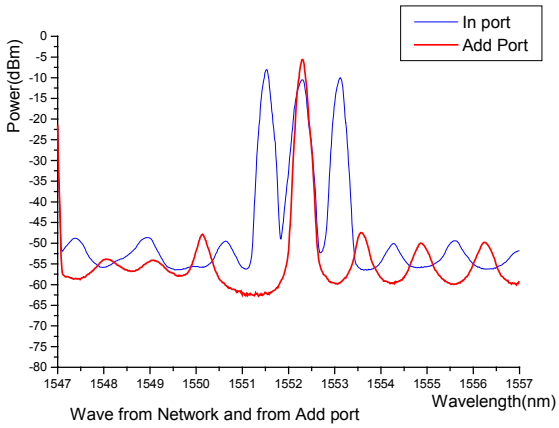
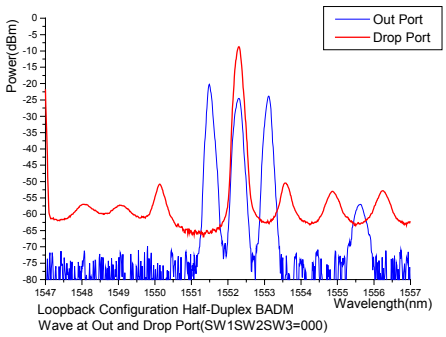
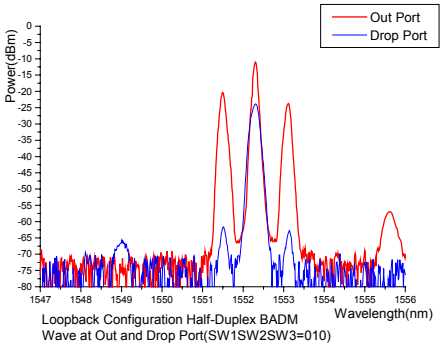


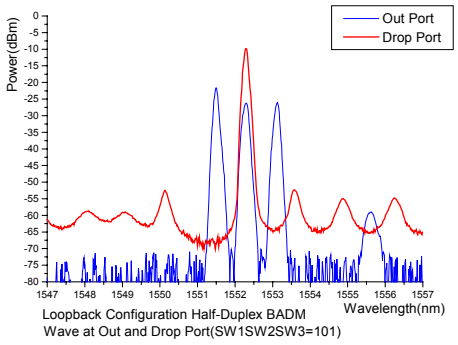
图 2-14、In 端口输入波长和 Add 端口输入波长



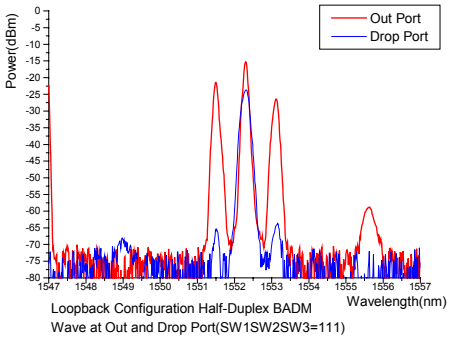
SW1SW2SW3＝000



SW1SW2SW3＝010



SW1SW2SW3＝101



SW1SW2SW3＝111

图 2-15、光开关不同情况下 Loopback 配置各个端口波长输出情况

2.2.2.1.2、foldback 配置半双工 BADM 传输模拟实验

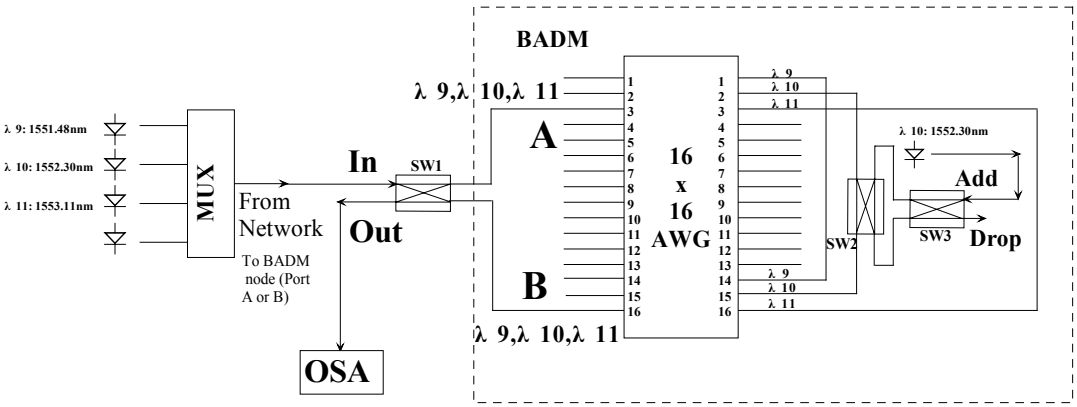
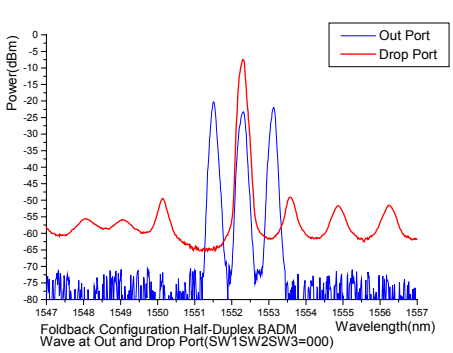
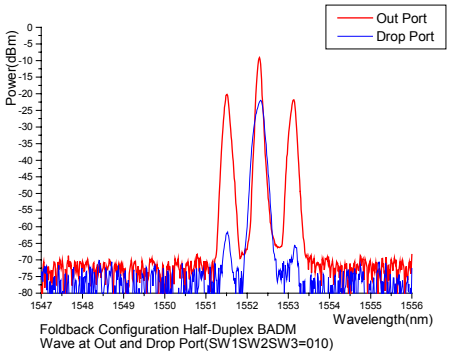


图 2-16、AWG 折返路径配置半双工 BADM 实验

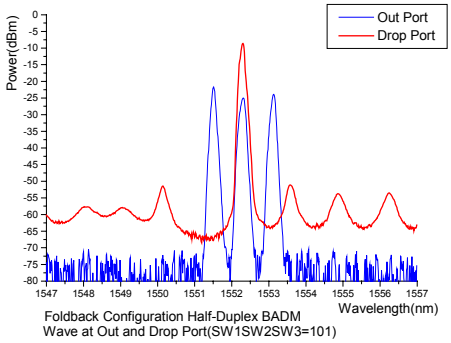
我们设计的 AWG 折返路径配置半双工 BADM 模拟实验配置如图 2-16。该实光开关 SW1—SW3 状态和 BADM 工作情况的关系以及输入波长均同上实验。测得在各个方向传输时 Out 端口和 Drop 端口的输出波形如图 2-17。



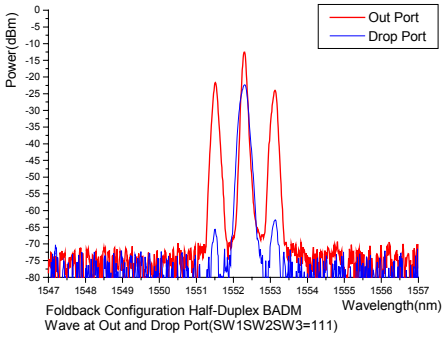
SW1SW2SW3＝000



SW1SW2SW3＝010



SW1SW2SW3＝101



SW1SW2SW3＝111

图 2-17、光开关不同情况下 Foldback 配置各个端口波长输出情况

2.2.2.1.3、loopback 配置和 foldback 配置半双工 BADM 实验比较

Foldback 配置半双工 BADM 与 Loopback 半双工 BADM 的性能对比如表 2-1。我们可以发现 Foldback 配置半双工 OADM 比 Loopback 半双工 OADM 的性能稍微优越。

表 2-1、Foldback 与 Loopback 配置半双工 OADM 的性能对比

SW1SW2SW3	SW1	SW2	SW3	损耗差(dB)	λ 9	λ 10	λ 11
000	Bar	Bar	Bar	Out 端口	0.36	*1.32*	1.79
				Drop 端口		*0.89*	
010	Bar	Cross	Bar	Out 端口	1	*1.9*	2.04
				Drop 端口		*1.89*	
101	Cross	Bar	Cross	Out 端口	0.21	*1.24*	2.28
				Drop 端口		*0.93*	
111	Cross	Cross	Cross	Out 端口	0.37	*2.84*	2.57
				Drop 端口		*1.36*	

可见在对于每个端口的各个波长，Foldback 配置的半双工 OADM 的损耗都比 Loopback 配置的半双工 OADM 的损耗要小。总体平均是 1.44dB。

我们可以说前者比后者的损耗性能大约要好 1.4dB 左右。

2.2.2.2、双工双向传输实验

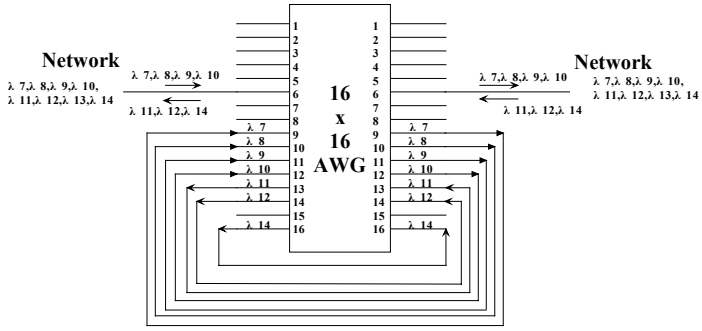


图 2-18、loopback 配置双向传输实验原理

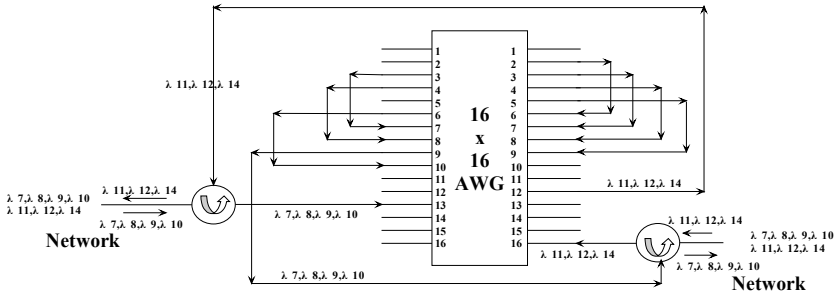


图 2-19、foldback 配置双工 BADM 传输实验原理

AWG 环回配置和折返配置的 OADM 分插复用波长极其方便，只需在适当的环路断开光纤，然后如图 2-5，图 2-7 进行波长分插复用。AWG 型 BADM 分插复用的效果可以从前面的半双工 BADM 模拟实验看出，由于实验激光源数目的限制，图 2-18、图 2-19、图 2-20 中也就没有画出 Add/Drop 通道，我们的双向传输实验将侧重于双向传输效果。foldback 配置双向传输实验不考虑环行器将两路光纤的波合并到一根光纤，而 loopback 配置双向传输实验考虑如图 2-26 加上环行器。这么做是为了便于实验测量。

2.2.2.2.1、loopback 配置双工 BADM 传输实验

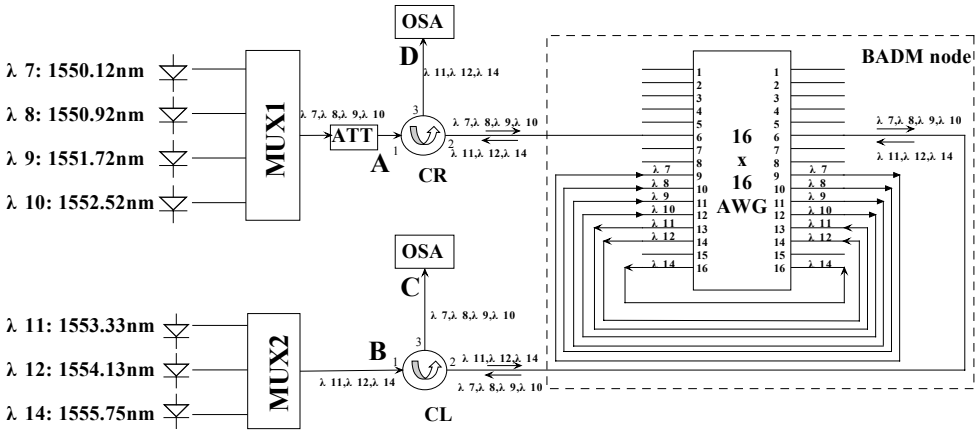
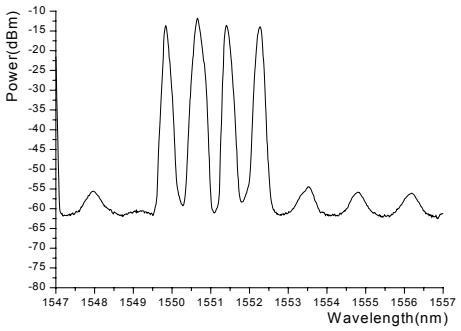
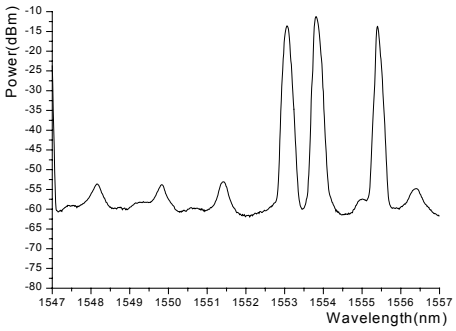


图 2-20、loopback 配置双工 BADM 传输实验光路

1、做为正向波传输的λ7－λ10 是通过一个 4X2 耦合器实现复用的，复用后的波通过衰减器（衰减 3dB）后接到右环行器（CR）的端口 1（CR1）。做为反向波传输的λ11，λ12，λ14 是通过一个 8X2 耦合器实现复用的，复用后的波接到左环行器（CL）的端口 1（CL1）。正向波λ7－λ10 的传输是从右环行器的 CR1→右环行器的 CR2→AWG 的 L6→ AWG 的 R6→左环行器的 CL2→左环行器的 CL3，即 CR1→CR2→L6→R6→CL2→CL3，简记为 A→C。反向波λ11，λ12，λ14 的传输是从左环行器的 CL1→左环行器的 CL2→AWG 的 R6→AWG 的 L6→右环行器的 CR2→右环行器的 CR3，即 CL1→CL2→R6→L6→CR2→CR3，简记为 B→D。

该实验的环行器仅仅是为了测量方便而添加的，在实际应用中是不需要的。环行器之间的光纤是主光纤，主光纤内传输的波是正向波和反向波同时存在，传输方向相反。在 CL3（C）和 CR3 端口（D）的输出波分别为正向波和反向波。输入到 A、B 端的正反向波形如图 2-21。

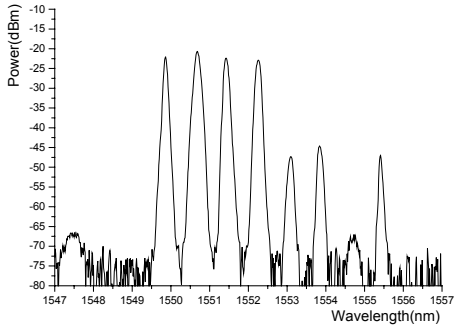


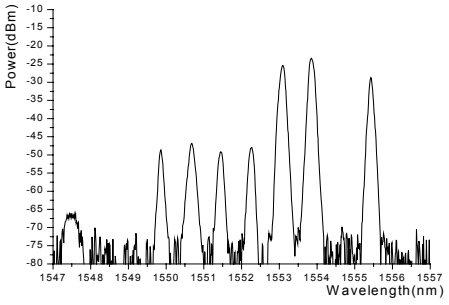


A 端输入波（正向输入）　　B 端输入波（反向输入）

图 2-21、BADM 正反向输入端输入波形

2、测量双向传输情况。正反向波同时存在时，C、D 端输出波波形如图 2-22。





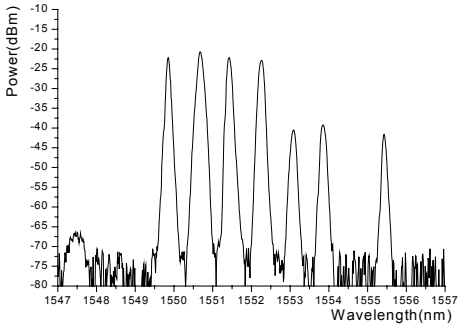
双向传输 C 端输出（正向输出端）　　双向传输 D 端输出（反向输出端）

(正向波损耗-8.71dB，反向波串扰-33.53dB)　　(反向波损耗-12.90dB，正向波串扰-35.11dB)

图 2-22、双向传输时正反向输出端口波形

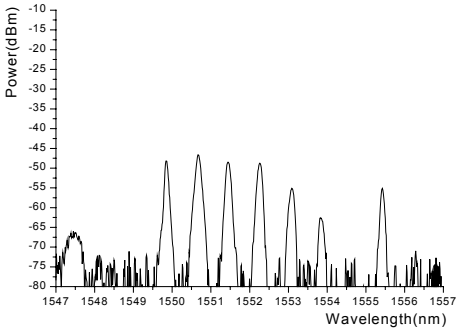
3、双向传输中，去掉环路 L13－R13，L14－R14, L15－R15, L16－R16，即

去除反向波的主要传输路径，在两个环行器的输出端口 CL3 和 CR3 测得波形如图 2-23。该步骤是为了测量反向波对正向波的影响。



C 端输出（正向输出端）

(正向波损耗-8.68dB，反向波串扰-26.76dB)

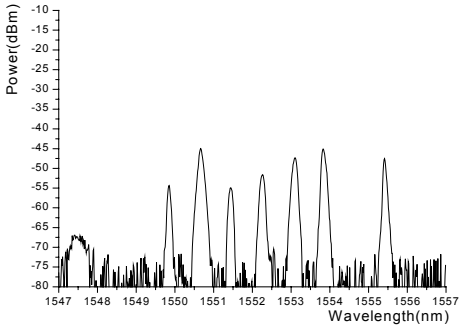


D 端输出（反向输出端）

(反向波串扰-45.23dB，正向波串扰-34.99dB)

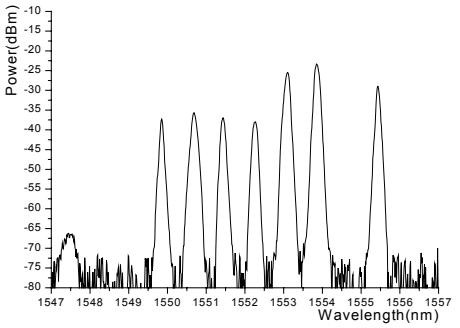
图 2-23、双向传输时断开反向波传输主要路径正反向输出端口波形

4、双向传输中，去掉环路 L9－R9，L10－R10, L11－R11, L12－R12，即去除正向波的主要传输路径，在两个环行器的输出端口 CL3 和 CR3 测得波形如图 2-24。该步骤是为了测量正向波对反向波的影响。



C 端输出（正向输出端）

(正向波串扰-38.25dB，反向波串扰-34.39dB)



C 端输出（反向输出端）

(反向波损耗-12.89dB，正向波串扰-23.69dB)

图 2-24、双向传输时断开正向波传输主要路径正反向输出端口波形

5、测量前后 AWG 温度漂移 0.11℃。将环路 L15－R15 去掉，几乎没有影响。即可以推断其它非主要环路对系统的影响不是很明显。

2.2.2.2.2、foldback 配置双工 BADM 传输实验

1、 做为正向波传输的λ7－λ10 是通过一个 4X2 耦合器实现复用的，做为反向波传输的λ11，λ12，λ14 是通过一个 8X2 耦合器实现复用的。为了实现输入的 7 个波的功率大体均衡，将λ7－λ10 的合波接到一个衰减器。正向波的传输是 A→C（AWG 的 L13→L9），反向波的传输是 B→D（AWG 的 R16→R12）。输入到 AWG 的正向反向波形分别如图 2-26。

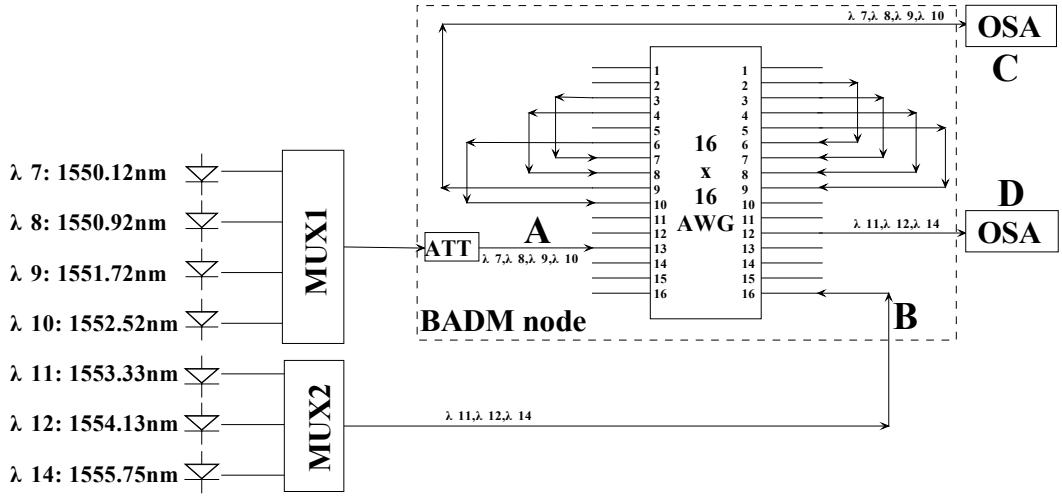
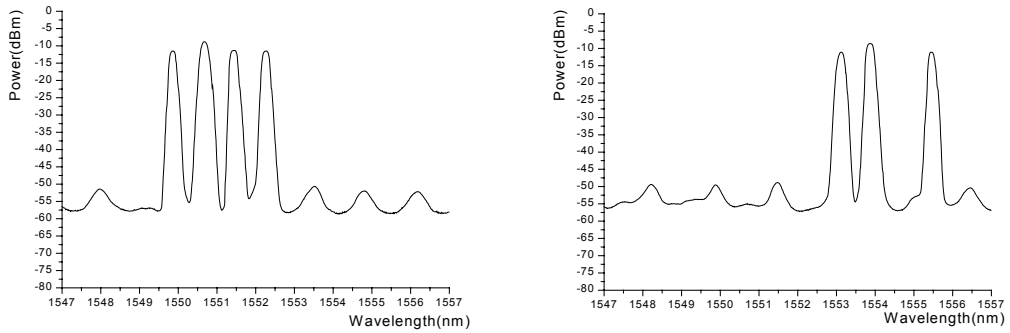


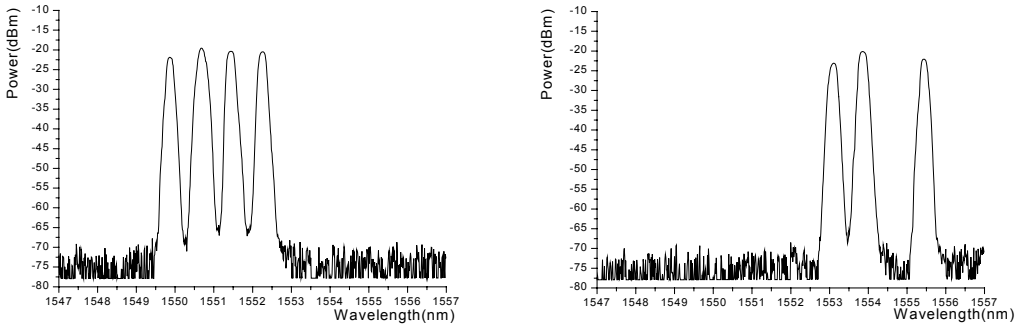
图 2-25、foldback 配置双工 BADM 传输实验光路



A 端输入波（正向输入）　　B 端输入波（反向输入）

图 2-26、BADM 正反向输入端输入波形

2、 测量单向传输仅正向波存在，无反向波时的情况。在 L9 端口（C 端）的输出波波形如图 2-27 左图。测得各个波的平均损耗为**-9.87**(dB)。

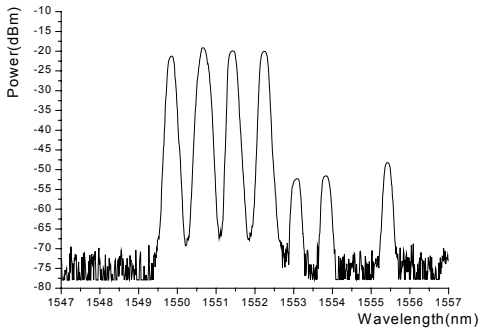


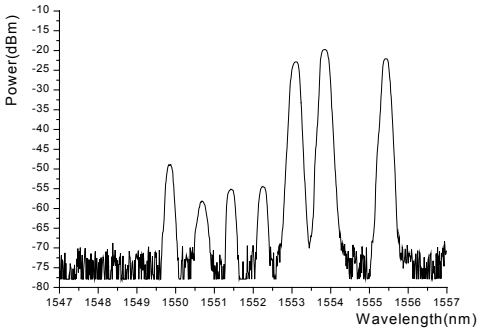
C 端输出（仅正向波存在）　　D 端输出（仅反向波存在）

图 2-27、BADM 单向传输时输出波形

测量单向传输仅反向波存在，无正向波时的情况。在 R12 端口（D 端）的输出波波形如图 2-27 右图。测得各个波的平均损耗为**-11.38**(dB)。

3、 测量双向传输时的情况。正向波λ7－λ10 的传输是从 AWG 的 L13→ L9（A→C），反向波λ11，λ12，λ14 的传输是从 AWG 的 R16→R12（B→D），然后各自通过环行器环到主光纤中去，主光纤内传输的波就是正向波和反向波同时存在，传输方向相反的。此时，在 C 和 D 端的输出波波形分别如图 2-28 左图（正向波）和右图（反向波）。



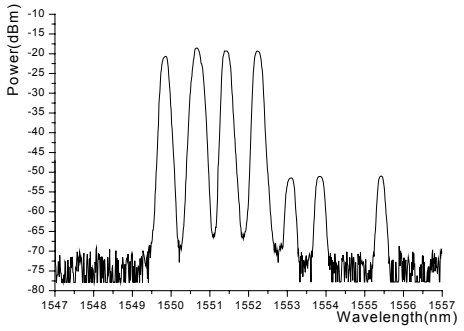


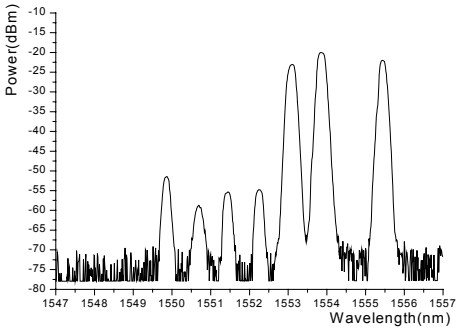
双向传输 C 端输出（正向输出端）　　双向传输 D 端输出（反向输出端）

(正向波损耗-9.30dB，反向波串扰-39.91dB)　　(反向波损耗-11.22dB，正向波串扰-43.46dB)

图 2-28、双向传输时正反向输出端口波形

4、 双向传输中，如果断开 L3, L4, L6, 即去除反向波的主要路径，在 R12 端口没有波形输出，在 L9 端口测得波形如图 2-29 左图；如果断开 R2, R3, R4, R5，即去除正向波的主要路径，在 L9 端口没有波形输出，在 R12 端口测得波形如图 2-29 右图。该步骤是为了测量反向波对正向波的影响和正向波对反向波的影响。





双向传输 C 端输出（断开反向波主要路径）　　双向传输 D 端输出（断开正向波主要路径）

(正向波损耗-8.80dB，反向波串扰-40.81dB)　　(正向波损耗-11.39dB，反向波串扰-44.47dB)

图 2-29、双向传输时分别断开正反向波传输主要路径时正反向输出端口波形

5、 实验前后 AWG 温差 0.25℃。波长平均漂移-0.03nm，功率损耗平均漂移-1.72dB。

2.2.2.2.3、loopback 配置和 foldback 配置双工 BADM 实验比较

在 BADM 中，传输损耗/串扰的原因有：①AWG 路径，②环行器泄漏，

③背向反射（忽略）。Foldback 实验损耗/串扰有①③项。Loopback 实验损耗/串扰有①②③项。而对于我们的环行器，测量得通过端口损耗最大不超过 1.46dB（一般都是 0.5dB 左右，仅有左环行器 CL 端口 1 到端口 2 的损耗为 1.46dB），隔离端口的串扰最大不超过-40dB。所以我们可以忽略环行器的影响而认为我们直接的对比反映了各自 AWG 路径配置本身的特性。

两种双工 BADM 性能对比分析，比较两种配置损耗和串扰情况如表 2-2。

表 2-2、Foldback 与 Loopback 配置双工 OADM 的性能对比

	仅输入单向激光源				输入双向激光源			
	仅正向波激光源		仅反向波激光源		正向波输出端口		反向波输出端口	
	正向损耗	反向串扰	反向损耗	正向串扰	正向损耗	反向串扰	反向损耗	正向串扰
Foldback	-9.87	\	-11.38	\	-9.30	-39.91	-11.22	-43.46
Loopback	未测	未测	未测	未测	-8.72	-33.53	-12.90	-35.11
Fold-Loop					*-0.58*	-6.38	1.68	-8.35
	仅正向主要路径				仅反向主要路径			
	正向波输出端口		反向波输出端口		反向波输出端口		正向波输出端口	
	正向损耗	反向串扰	反向串扰	正向串扰	反向损耗	正向串扰	正向串扰	反向串扰
Foldback	-8.80	-40.81	\	\	-11.39	-44.47	\	\
Loopback	-8.68	-26.76	-45.23	-34.99	-12.89	-23.69	-38.25	-34.39
Fold-Loop	*-0.12*	-14.05	-34.77	-45.01	1.50	-20.78	-41.75	-45.61

【注】：上表中，/ 表示隔离度相当高，即输出端无波形。可以认为有-70dB, -80dB 以上的隔离度，或者说可以认为无串扰。红色带下划线的斜体字表示该项的 Foldback 配置比 Loopback 配置的性能差，可以发现该两项都差别很小，或者说该两项性能是差不多的。而且完全可能有其它偶然因素而不是 Foldback 配置本身引起该结果，因此不能就此断定 Foldback 配置该两项性能比 Loopback 配置差。

由表 2-2，发现 Foldback 配置与 Loopback 配置在正反向波的损耗性能方面差不多，但是 Foldback 配置的串扰性能远远比 Loopback 配置强。当 OADM 工作方式是全双工双向方式时，正反向波存在，Foldback 配置 BADM 的正反向波互相的串扰比 Loopback 配置要小 6－8dB 以上；当 OADM 工作方式是单工单向方式时，仅仅正向或者反向波存在，Foldback 配置 BADM 的正反向波之间的串扰比 Loopback 配置要小 14－20dB 以上。

此外，利用 AWG 实现的 OADM 比以前的 OADM 结构（也包括我们前面所实现的光栅型半双工 BADM）至少有如下几个明显优点：

1、结构简单，仅仅需要一个 AWG 即足够了。

2、路由灵活。可以容易分插 1－N-1 路波长。而以前的 OADM 配置或者是分插的波长固定或者是分插的波长数目受限制。

3、全双工双向工作。可以两个方向同时传输和分插复用波长，而互相之间的干扰很小。而以前的 OADM 配置往往是只能单向进行分插复用的。因此我们所实现的基于 AWG 的 BADM 对于环路保护和自愈有重要意义。

【参考文献】

1、C.H.Kim et al, Bidirectional WDM Self-Healing Ring Network Based on Simple Bidirectional Add/Drop Amplifier Modules, OFC99, TuL6
2、C.H.Kim et al, A Novel Bidirectional Add/Drop Amplifier (BADA), IEEE Photonics Technology Letters, VOL10, No.8, August 1998,P_{1118}-P_{1120}
3、Keang-Po Ho, et al, Performance of an eight-wavelength bidirectional WDM add/drop multiplexer with 80-Gbit/s capacity, OFC97, TuR1
4、Y.Zhao, et al, A Novel Bi-Directional Add/Drop Module for Single Fiber Bi-directional Self-Healing Wavelength Division Multiplexed Ring Networks, OFC99, TuL7
5、Louay Eldada, et al, thermally tunable polymer Bragg grating OADM's, OFC99, TuH1
6、B.Glance, Wavelength-Tunable Add/drop Optical Filter, IEEE Photonics Technology Letters, vol.8, No.2, February 1996
7、Hiroshi Takahashi, et al, Transmission Characteristics of Arrayed Waveguide NxN Wavelength Multiplexer, Journal of Lightwave Technology, VOL 13, No.3, March 1995.
8、M.Fukui, et al, Electronics Letters, 28th Sept. 1995, P1757
9、C.C.Wang, et al, OFC97， TuO4
10、Osamu Ishida, et al, IEEE Photonics Tech. Lett., Oct.94, P1219
11、Y. Tachikawa, et al, Arrayed-Waveguide Grating add-drop multiplexer with loop-back optical paths, Electronics Letters, Nov. 1993, Vol.29, No.24, pp2133-2134
12、Yoshiaki. Tachikawa, et al, Arrayed-Waveguide Grating multiplexer with Loop-Back Optical Paths and Its Applications, Journal of Lightwave Technology,VOL.14, NO.6, June 1996, pp977-983
13、H. Takahashi, et al, Anticrosstalk arrayed-waveguide add-drop multiplexer with foldback paths forpenalty free transmission, Electronics Letters, Nov. 1994, Vol.30, No.24, pp2053-2055

第二章、基于 AWG 的 BADM 方案设计和实验研究 26

【导论】 26

2.1、双向 OADM 的设计及在保护和自愈环中的应用 26

2.1.1、双向 OADM（Bidirectional OADM, BADM）的提出 26

2.1.2、OADM 及 BADM 的分类 27

2.1.3、常规 OADM 的双向化扩展 27

1).分波器+波长交换单元+合波器 27

2).耦合单元+滤波单元+合波器 27

3).基于声光可调谐滤波器(AOTF)的 OADM 29

4).基于波长光栅路由器(WGR，AWG) 29

2.2、双向 OADM 实验 31

2.2.1、光栅型半双工 BADM 模拟实验 31

2.2.2、AWG 型 OADM 之双向传输实验 33

2.2.2.1、半双工双向传输实验 33

2.2.2.1.1、loopback 配置半双工 BADM 传输模拟实验 33

2.2.2.1.2、foldback 配置半双工 BADM 传输模拟实验 35

2.2.2.1.3、loopback 配置和 foldback 配置半双工 BADM 实验比较 36

2.2.2.2、双工双向传输实验 37

2.2.2.2.1、loopback 配置双工 BADM 传输实验 37

2.2.2.2.2、foldback 配置双工 BADM 传输实验 39

2.2.2.2.3、loopback 配置和 foldback 配置双工 BADM 实验比较 41

【参考文献】 43

第三章、基于 AWG 的 OADM 串扰模型研究

【导论】

AWG 已经广泛应用于复用器、解复用器、滤波器、OXC、以及 OADM 等。

斯坦福（Stanford）大学的 S.M.Gemelos 等人 1999 年对基于 AWG 的 OADM 的异频串扰情况和其对接收机的数字信噪比（SNR）Q 的影响进行了研究[1]。理论分析了阵列波导光栅（AWG）中串扰对有 m 分插复用信道、n 直通信道的 N 通道光分插复用器（OADM）的性能影响。证明了当 N 或 m 增加时，异频串扰将引起 OADM 性能的降低，表明网络规模将被 AWG 的串扰限制。如果在 OADM 的输出端加一个光滤波器，那么数字 Q 就与 N 和 m 无关，且与理想滤波情况相差仅十分之几 dB.

本章对 S.M.Gemelos 等人的模型进行了同频串扰方面的分析。并且将其模型进一步推广到有 k 个空闲信道的情况。得出了 OADM 各个端口（Out 端口，Drop 端口，Pass 端口）的各个波长（Add/Drop 波长以及直通波长等）的同频串扰表达式。发现两种模型表达式基本相同，仅仅是端口标号有微小区别。并且分析了两种典型情况下 OADM 各个端口各个波长的同频串扰曲线，这两种情况分别相当于 OADM 没有进行功率均衡和进行了功率均衡的情况。得出了一些有意义的典型结论：1）同频串扰仅与环回路径的数目 n 有关，与 N 及 m，k 无关，但有约束关系：N=m+n+1。2）各个端口特定波长的串扰值随 n 增加而增加。3）Pass 通道各波长串扰值与 In 端口和 Add 端口输入的信号的功率值的大小没有关系，仅与 AWG 本身的串扰、损耗及环回路径数目有关系，而 Add/Drop 波长两种情况下的曲线是各不相同的。然后通过实验证明了这些结论。实验与理论的偏差原因是我们的理论没有考虑 AWG 的损耗不均衡特性。本章的实验同时说明了 AWG 的损耗不均衡特性不但对传输的损耗有影响，同时对传输中的串扰也有严重影响。这些结论在目前的文献中尚没有报道。

3.1、基于 AWG 的 OADM 串扰模型理论研究

3.1.1、模型 1 同频串扰情况

我们可以利用单个 AWG 构成可分插复用 m 个波长的 OADM 结构如图 3-1（模型 1）。OADM 的输入（In）和输出（Out）端口分别为 AWG 的 L1 和 R1 端口。该 OADM 模型工作波长有 λ1 到 λN 共 N 个波长，可以对 λ2—λ_{m+1} 等 m 个波长进行分插复用，λ_{m+2}—λN 等 n 个波长通过 AWG 的环回路径从 Out 端口 R1 输出，λ1 直接从 In 端口输出到 Out 端口。m、n、N 之间的关系为：m+n+1=N。

下面我们理论分析阵列波导光栅（AWG）中串扰对有 m 分插复用信道，n 直通信道的 N 通道光分插复用器（OADM）的性能影响，及串扰对网络规模的影响。

由模型 1 推出的结果可实用于 Add/Drop 通道和 Pass 通道的位置任意排

列的该种单个 AWG 组成的 OADM 结构。

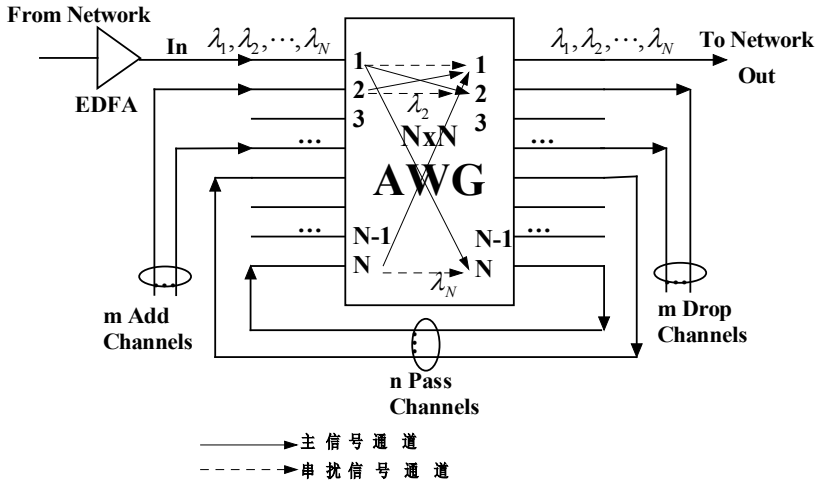


图 3-1、基于 AWG 的 OADM 串扰模型（模型 1）

在理论分析中，我们假设：

1)、从 EDFA 进入 AWG 的 N 个通道有相同的平均光功率 P_{IN}；

2)、EDFA 的增益是 G（或者以分贝表示为 10logG）；

3)、所有插入到网络中的 m 个通道有相同的平均光功率 P_A；

4)、AWG 的插入损耗是 L（或者以分贝表示为 10logL）；

5)、AWG 相邻通道的串扰是 S_1（或者以分贝表示为 $10\log S_1$）；

6)、AWG 不相邻通道的串扰是 S_2（或者以分贝表示为 $10\log S_2$）；

7)、串扰信号被视为与该串扰信号功率相同的噪声；

现在我们来研究模型 1 的同频串扰情况。我们考虑最坏的串扰情况，即假设所有的串扰项均与主信号同相，因此我们推导得的串扰表达式是串扰的上限表达式。我们的推导将考虑在 OADM 的各个端口（Out 端口，Drop 端口，Pass 端口）的各个波长（Add/Drop 波长以及直通波长等）的同频串扰表达式。（详细推导参见作者的文章“AWG 构成的 OADM 串扰模型研究之公式推导”）

A、考虑 OADM 节点的 Out 端口（即 AWG 的 R1 端口）的情况

1）. 以信号 λ2 为例讨论 Add/Drop 通道的情况。

我们推导得在 R1 端口总的 λ2 波长的光信号为（E 的上标（2）表示是对于波长 2，以下表示方法同）：

$$E^{(2)}=\sqrt{2}\cdot(\sqrt{LS_1P_{IN}}+\sqrt{LP_A}+n\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}})\exp\left(j2\pi\frac{c}{\lambda_2}t\right)$$

其中串扰信号为第 1、3 项，主信号为第 2 项。所以推导得在 OADM 的 Out 端口 R1 输出的 λ2 波长的串扰为：

$$R_c^{(2)} = 10\log\left(\frac{\sqrt{LS_1P_{IN}} + n\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}}}{\sqrt{LP_A}}\right)^2 = 10\log\left[(\sqrt{S_1} + n\sqrt{LS_2{}^2})^2 \cdot \frac{P_{IN}}{P_A}\right] \quad (A1)$$

2）. 以信号 λN 为例讨论 Pass 通道的情况

我们推导得在 R1 端口的总的 λN 波长的光信号为：

$$E^{(N)} = \sqrt{2}\cdot\left[\sqrt{LS_1P}_{IN} + (n-1)\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}} + \sqrt{L^2P_{IN}}\right]\exp\left(j2\pi\frac{c}{\lambda_N}t\right)$$

其中串扰信号为第 1、2 项，主信号为第 3 项。所以推导得在 R1 端口输出的 λN 波长的串扰为：

$$R_c^{(N)} = 10\log\left(\frac{\sqrt{LS_1P_{IN}} + (n-1)\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}}}{\sqrt{L^2P_{IN}}}\right)^2 = 10\log\left[\left(\sqrt{S_1} + (n-1)\sqrt{LS_2{}^2}\right)^2 \cdot \frac{1}{L}\right]$$

(A2)

3）.R1 端口的 λ1 波长

与 2）R1 端口的 λN 波长串扰分析类似，唯一的区别是主信号比后种情况少通过 AWG 一次，所以主信号功率 $P_a^{(1)} = LP_{IN}$。

所以，在 R1 端口的总的 λ1 波长的光信号为：

$$E^{(1)} = \sqrt{2}\cdot\left[\sqrt{LS_1P}_{IN} + (n-1)\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}} + \sqrt{LP_{IN}}\right]\exp\left(j2\pi\frac{c}{\lambda_N}t\right)$$

其中串扰信号为第 1、2 项，主信号为第 3 项。所以推导得在 R1 端口输出的 λ1 波长的串扰为：

$$R_c^{(1)} = 10\log\left(\frac{\sqrt{LS_1P_{IN}} + (n-1)\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}}}{\sqrt{LP_{IN}}}\right)^2 = 10\log\left[\left(\sqrt{S_1} + (n-1)\sqrt{LS_2{}^2}\right)^2\right]$$

$$= 10\log\left[\left(\sqrt{S_1} + (n-1)\sqrt{LS_2{}^2}\right)^2 \cdot \frac{1}{L}\right] + 10\log L \quad (A3)$$

即（A3）与（A2）式相差 10logL。可见对于 A2）和 A3）式知道了一个就知道了另外一个，为了方便，我们后面的曲线图中只画出了 A2）式。

B、考虑 OADM 节点的 Add/Drop 端口的输出情况。

以 Drop 端口 R2 的 Add/Drop 波长 λ2 为例，在 R2 端口 λ2 波长总的光信号为：

$$E^{(2)}=\sqrt{2}\cdot(\sqrt{LP_{IN}}+\sqrt{LS_1P_A}+n\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}})\exp\left(j2\pi\frac{c}{\lambda_2}t\right)$$

其中串扰信号为第 2、3 项，主信号为第 1 项。所以推导得在 R2 端口输出的λ2 波长的串扰为：

$$R_c^{(2)}=10\log\left(\frac{\sqrt{LS_1P_A}+n\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}}}{\sqrt{LP_{IN}}}\right)^2=10\log\left[\left(\sqrt{S_1\frac{P_A}{P_{IN}}}+n\sqrt{L}\cdot S_2\right)^2\right]\qquad(B)$$

C、考虑 OADM 节点的 Pass 端口的输出情况。

以 Pass 端口 R_N 的λN 波长为例。在 R_N 端口的总的λN 波长的光信号为：

$$E^{(N)}=\sqrt{2}\cdot\left[\sqrt{LP_{IN}}+(n-2)\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}}+\sqrt{L^2S_1{}^2P_{IN}}+\sqrt{L^2S_1P_{IN}}\right]\exp\left(j2\pi\frac{c}{\lambda_N}t\right)$$

其中串扰信号为第 2，3 项，主信号为第 1 项。所以推导得在 R_N 端口输出的λN 波长的串扰为：

$$R_c^{(N)}=10\log\left(\frac{(n-2)\sqrt{L^2S_2{}^2P_{IN}}+\sqrt{L^2S_1{}^2P_{IN}}+\sqrt{L^2S_1P_{IN}}}{\sqrt{LP_{IN}}}\right)^2$$

$$=10\log\left[\left((n-2)S_2+S_1+\sqrt{S_1}\right)^2\cdot L\right]\qquad(C)$$

表 3-1、模型 1 各端口各波长之同频串扰表达式

	Add/Drop 通道各波长的串扰（$i=2,3,\cdots,m+1$）	Pass 通道各波长的串扰（$i=m+2,\cdots,N-1,N$ 及 $i=1$）
Out 端口（R1）	$R_c^{(i)}=10\log\left[(\sqrt{S_1}+n\sqrt{LS_2{}^2})^2\cdot\frac{P_{IN}}{P_A}\right]$（A1 式）	$R_c^{(i)}=10\log\left[\left(\sqrt{S_1}+(n-1)\sqrt{LS_2{}^2}\right)^2\cdot\frac{1}{L}\right]$，$n\geq1;\ i=m+2,\cdots,N-1,N$（A2 式） $R_c^{(1)}=10\log\left[\left(\sqrt{S_1}+(n-1)\sqrt{LS_2{}^2}\right)^2\right]$，$n\geq1$;（A3 式）
Drop 端口（$R_{2,\cdots,m+1}$ 输出口）	$R_c^{(i)}=10\log\left[\left(\sqrt{S_1\frac{P_A}{P_{IN}}}+n\sqrt{L}\cdot S_2\right)^2\right]$（B 式）	
Pass 端口（$R_{m+k+2,\cdots,N}$ 输出口）		$R_c^{(i)}=10\log\left[\left((n-2)S_2+S_1+\sqrt{S_1}\right)^2\cdot L\right]$，$n\geq1$;（C 式）

以上考虑的全部是 $n\geq1$，即存在 pass 通道的情况。如果不存在 pass 通

道（n=0），直通波长中只有波长 1 可以直通，且不存在串扰路径。即由于环回路径所带来的串扰已经不存在，所以对于直通波长我们不考虑不存在 pass 通道（n=0）的情况。对于 Add/Drop 波长仅存在一条同频串扰路径，我们也只需在 A（1）式和 B 式中取 n=0 即可。

总结模型 1 各种情况如表 3-1。

3.1.2、模型 2 同频串扰情况

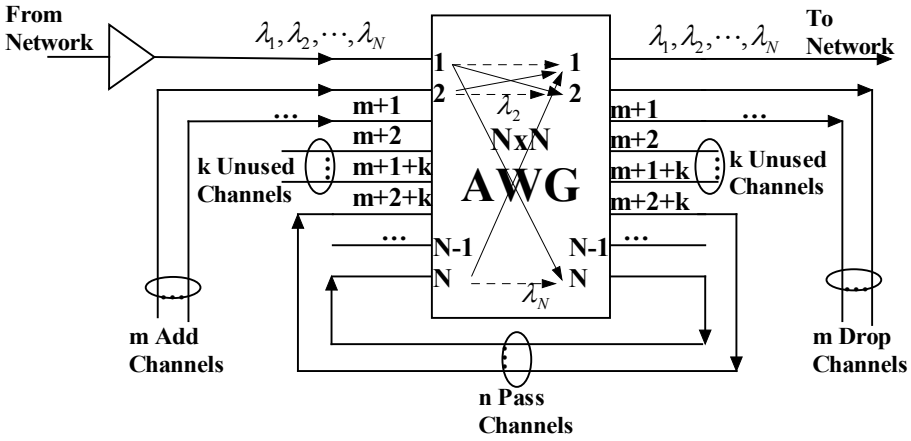


图 3-2、基于 AWG 的 OADM 串扰模型（模型 2）

对于第一个模型（模型 1）的推广，我们来理论分析阵列波导光栅（AWG）中串扰对有 m 分插复用信道，n 直通信道，k 个空闲通道的 N 通道光分插复用器（OADM）的性能影响，及串扰对网络规模的影响。我们来推导此时的某波长信号的串扰与 m、n、k 的关系式。我们发现前面推导的 $R_c^{(i)}$ 与 m、n 的关系式，由于有 m+n+1=N 的约束，所以实际上可以说 $R_c^{(i)}$ 只是 n 的函数，因为 n 确定后对于特定的 AWG 复用器，m 也就确定了。

而分析我们的第二个模型（模型 2），由于 $R_{m+2,\cdots,m+1+k}$ 端口是空闲的，不存在任何波长（忽略对串扰的回波损耗等），所以对于各波长 n 都没有串扰。由于 L1 串扰到 $R_{m+2,\cdots,m+1+k}$ 的各波长信号的串扰全部被分出，不会再环回到复用器对各信号产生串扰，而插入到 $L_{m+2,\cdots,m+1+k}$ 的各波长分别为 $\lambda_{m+2,\cdots,m+1+k}$，与复用器的其它工作波长全不相同，即对它们产生的是异源异频串扰，即这 k 个端口对于系统的影响可以忽略。因此我们可以将模型 2 等效为有 $N' = N - k = m + n + 1$ 个通道，其中 m 个 add/drop 通道，n 个 pass 通道的模型 1。所以可以应用模型 1 的结果，而由于模型 1 的 $R_c^{(i)}$ 仅与 n 有关，所以模型 2 的 $R_c^{(i)}$ 表达式与模型 1 的结果完全一样，唯一的区别是约束条件变成了 m+n+k+1=N。（详细的严格论证亦可参见作者的文章“AWG 构成的 OADM

串扰模型研究之公式推导”）

模型 2 各端口各波长的串扰值总结如表 3-2（除端口标号有区别外，表达式与上一情况完全相同）。

表 3-2、模型 2 各端口各波长之同频串扰表达式

	Add/Drop 通道各波长的串扰（$i=2,3,\cdots,m+1$）	Pass 通道各波长的串扰（$i=m+2,\cdots,N-1,N$ 及 $i=1$）
Out 端口（R1 输出口）	$R_c^{(i)}=10\log\left[(\sqrt{S_1}+n\sqrt{LS_2{}^2})^2\cdot\frac{P_{IN}}{P_A}\right]$（A1 式）	$R_c^{(i)}=10\log\left[\left(\sqrt{S_1}+(n-1)\sqrt{LS_2{}^2}\right)^2\cdot\frac{1}{L}\right]$，$n\geq 1;\ i=m+2,\cdots,N-1,N$（A2 式） $R_c^{(1)}=10\log\left[\left(\sqrt{S_1}+(n-1)\sqrt{LS_2{}^2}\right)^2\right]$，$n\geq 1$;（A3 式）
Drop 端口（$R_{2,\cdots,m+1}$ 输出口）	$R_c^{(i)}=10\log\left[\left(\sqrt{S_1\frac{P_A}{P_{IN}}}+n\sqrt{L}\cdot S_2\right)^2\right]$（B 式）	
Pass 端口（$R_{m+k+2,\cdots,N}$ 输出口）		$R_c^{(i)}=10\log\left[\left((n-2)S_2+S_1+\sqrt{S_1}\right)^2\cdot L\right]$，$n\geq 1$;（C 式）

3.1.3、同频串扰理论研究结论

我们根据表 3-1 或者表 3-2 做出两种情况（$P_A=P_{IN}$ 及 $P_A=L\cdot P_{IN}$）的各个端口各个波长的串扰曲线图如图 3-3 和图 3-4。模型 1 和模型 2 的曲线图完全相同，得出的结论也完全相同。所有的区别只是端口标号的区别及约束条件由 m+n+1=N 变为 m+n+k+1=N。

由于 A2 和 A3 式只相差常数项，所以两个式子中我们只画出了 A2 式。图中，黑方块（A1 式）表示 Out 端口的 Add/Drop 波长，红圆点（A2 式）表示 Out 端口的直通波长，绿正三角（B 式）表示 Drop 端口的 Add/Drop 波长，蓝倒三角（C 式）表示直通端口的直通波长。

第一种情况是 $P_A=P_{IN}$，该情形相当于在 OADM 的 Add 端口插入的信号功率与从 In 端口输入的该波长信号的功率相等。第二种情况是 $P_A=L\cdot P_{IN}$，该情形相当于在 OADM 的 Add 端口插入的信号功率与从 In 端口输入的该波长信号通过 AWG 的环回路径到达 AWG 左端口的功率相等。这两种情况都是有典型意义的例子。

由同频串扰公式表 3-1 和表 3-2 以及各端口各波长同频串扰理论曲线图 3-3 和图 3-4，我们可以得出如下的结论：

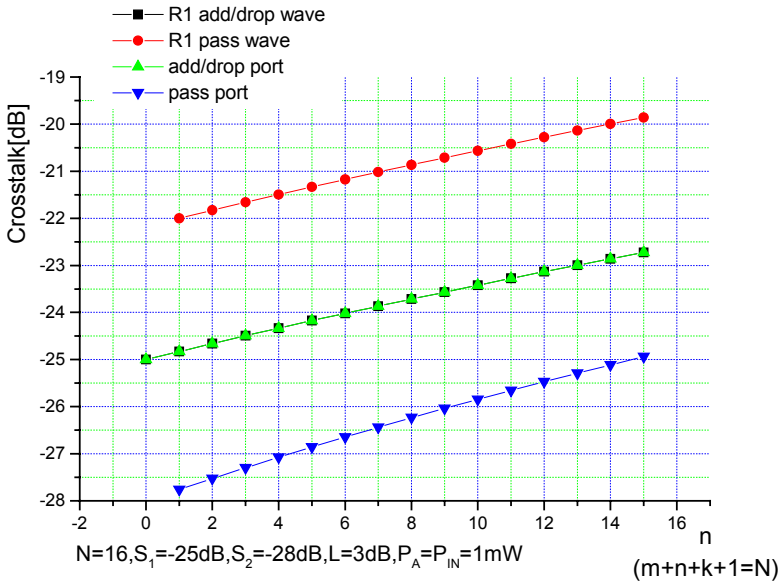


图 3-3、各端口各波长同频串扰理论曲线（$P_A=P_{IN}$）

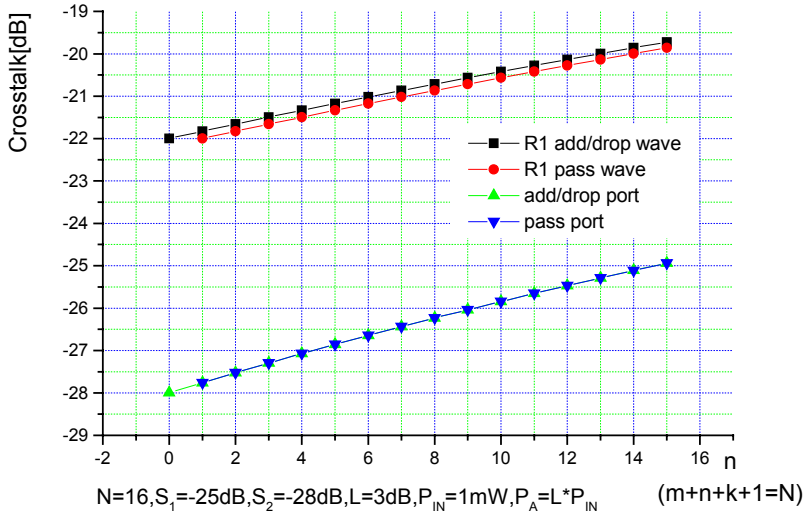


图 3-4、各端口各波长同频串扰理论曲线（$P_A=L*P_{IN}$）

1)、各个端口各个波长的串扰值的表达式仅与 n 有关，与 N 及 m 无关，即串扰仅与环回路径（Pass 通道）的数目有关。但 N、m、n 间存在约束关系：N=m+n+1。这很好理解，因为同源同频串扰的路径是由于环回路径产生的；对于 add/drop 通道，到达 drop 端口的信号被分出，而从 add 端口插入的波长来自另外的源，因而不会有通过 add/drop 通道产生的同源同频串扰。

2)、各个端口特定波长的串扰值随着 n 的增加而增加。这也很好理解，因为 n 的增加表示着环回路径的增加，从而产生串扰的路径增加，因此必然

导致对信号的串扰值增加。

3)、Pass 通道各波长的串扰值与 In 端口和 Add 端口输入的信号的功率值的大小没有关系，仅与 AWG 本身的串扰、损耗及环回路径数目有关系。但 Add/Drop 通道波长的串扰值是与 In 端口和 Add 端口输入的信号功率值有关的。因为，Pass 通道的各波长没有从外界插入的异源同频串扰，只有由其本身通过串扰路径而产生的同源同频串扰。而 Add/Drop 通道的同频串扰有两个来源，一个是来自网络（Network）中的要分插的波长，一个来自从节点插入的波长，所以对于同一端口的 Add/Drop 波长同时存在同源同频串扰和异源同频串扰。很明显异源同频串扰的值是与 In 端口和 Add 端口输入的信号功率值有关的。

4)、R1 端口的λ1 波长的同频串扰与 R1 端口的λN 波长的同频串扰的关系是前者比后者少-10logL，即（A3）＝（A2）＋10logL。因为它们串扰路径情况类似，唯一的区别是前者主信号比后种情况少通过 AWG 一次，即少-10logL。

5)、在第二种情况下，由于 $P_A = L \cdot P_{IN}$，相当于 add 端口插入的信号进行了功率均衡，使其功率等于当该通道是 Pass 通道时该端口输入的功率值。所以有如下有意义的结果：对于固定的配置 n，有 $A1 < A2 < B < C$，且 $A1 \approx A2$，$B \approx C$。即在 OADM 的 Out 端口 R1 输出的各波长的串扰值都大致均衡，而在 Drop 端口和 Pass 端口的各波长的串扰值大致均衡，而前者比后者要大，这是因为输出到 Out 端口的波长经过了 AWG 两次，而在 Drop 端口和 Pass 端口的各波长仅经过了 AWG 一次。在我们的理论推导中，对于 Add 波长的串扰比 Pass 波长的串扰多存在一条串扰路径 L1—>R_N—> L_N—>R1，而该路径对于 Pass 波长是传递主信号，所以图中 Add 波长的串扰比 Pass 波长的串扰要左移一格 n=1。而实际上由于 AWG 本身的串扰 S 和损耗 L 以用倍数形式表示是很小的值，故 $\sqrt{LS}$ 是很小的值，因此 $n\sqrt{LS}$ 与 $(n-1)\sqrt{LS}$ 相差不大，所以存在约等于的关系 $A1 \approx A2$，$B \approx C$。可以预见，S 和 L 越小，该差别越小，因此，理想的极限是 S=0，L=0，则 A1=A2，B=C。这也是很符合直观的。

以上我们对单个 AWG 组成的 OADM 的同频串扰性能进行了分析和推导，得出了两种模型的同频串扰与分插复用通道数目、直通通道数目及空闲通道数目的关系。并且做出了两种有意义的情况下的各端口各波长的串扰曲线的对比图。得出了一些有意义的结论。

我们可以在以上的基础上进行以下的进一步考虑：

1)、实际中 AWG 各端口的插入损耗不均衡性。

2)、考虑 Drop 端口后用 PIN 检测后的电流强度与串扰的关系，及数字 SNR 与串扰的关系。

这些都可以做为下一步的工作。我们会从下一节的实验中发现 AWG 的各端口损耗不均衡性将对实际同频串扰值产生很严重的影响。

3.2、基于 AWG 的 OADM 串扰模型实验

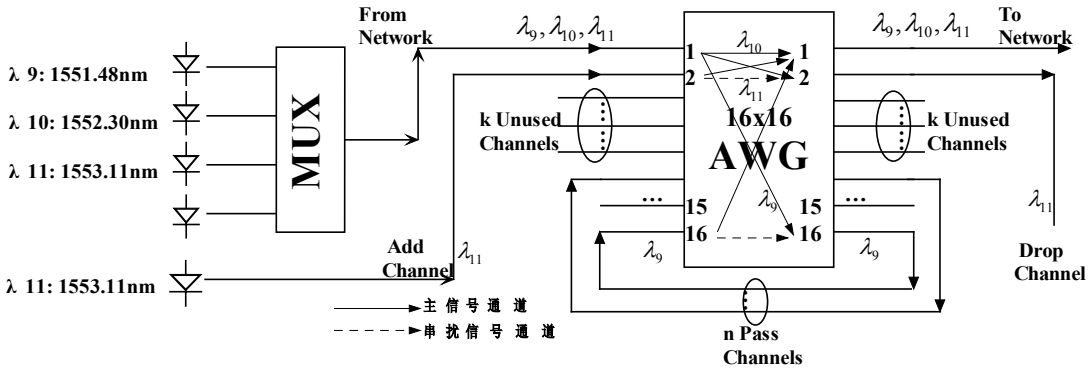
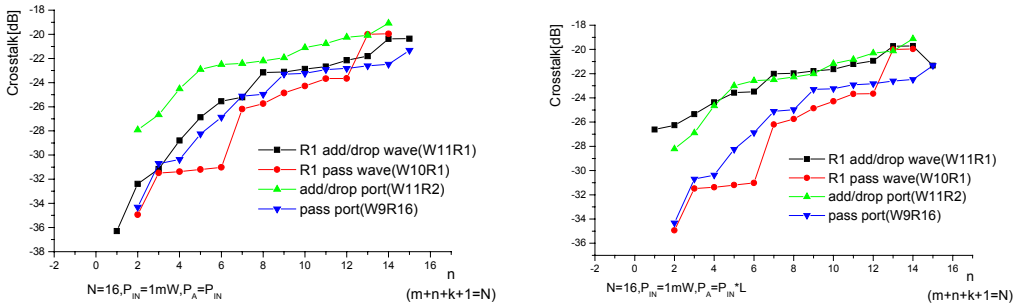
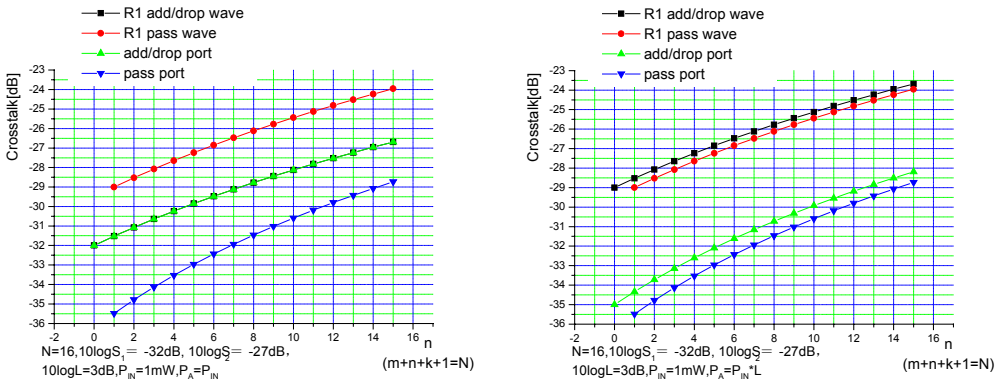


图 3-5、串扰模型实验图



a)、$P_A=P_{IN}$　　b)、$P_A=LP_{IN}$

图 3-6、各端口各波长同频串扰实验结果



a)、$P_A=P_{IN}$　　b)、$P_A=LP_{IN}$

图 3-7、由实验所测参数所得各端口各波长同频串扰曲线（标准 AWG）

我们通过实验得到两种情况下（即 $P_A = P_{IN}$ 和 $P_A = L \cdot P_{IN}$），各个端口各个波长的同频串扰情况如图 3-6。并且根据实验所得到的平均损耗，平均相

邻串扰，和平均非相邻串扰值所做出了这些参数情况下理论曲线如图 3-7。

我们将实验图和理论图对比，发现实验结果完全符合前面理论分析中的 1）－3）结论。但是由于实际的 AWG 的损耗值与每一个端口有关，且各个端口间的损耗值与平均损耗值之间的波动幅度大，且不确定。而理论分析中的损耗是采用同一个平均值。所以无法由我们的实验来证明我们前面理论推导中的 4）－5）结论。

正如在前面的理论推导中所指出，我们进一步的理论推导应该是考虑 AWG 的损耗不均衡曲线的，而这时的理论推导就要复杂许多。但是符合我们实验结果的理论推导仍然会有结论 1）－3），即：

1）、各个端口各个波长的串扰值的表达式仅与 n 有关，与 N 及 m 无关，即串扰仅与环回路径（Pass 通道）的数目有关。但是 N、m、n 之间存在着约束关系：N=m+n+1。

2）、各个端口特定波长的串扰值随着 n 的增加而增加。

3）、Pass 通道各波长的串扰值与 In 端口和 Add 端口输入的信号的功率值的大小没有关系，仅与 AWG 本身的串扰、损耗及环回路径数目有关系。这表现在我们的实验图中为，两种情况下 Pass 通道各波长的串扰曲线是一样的。但是 Add/Drop 波长两种情况下的曲线是各不相同的。

而实验结果的各曲线位置关系（同一配置下各值大小关系）并不完全符合我们理论推导的各曲线位置关系，其主要原因还是因为我们理论推导假设所有端口的损耗值都是平均损耗值，而实际我们 AWG 各端口间的损耗值不但与平均损耗值之间的波动幅度大且不确定，而且不完全符合 AWG 制造理论得到的损耗不均衡曲线（而是在基本符合损耗不均衡曲线的情况下某些端口损耗值略微偏离该曲线，其原因完全可能是 AWG 封装过程中，各个端口的匹配情况有所差异而引起的）。可见 AWG 的损耗不均衡性不仅仅会对传输的损耗带来严重影响，同时也给我们的串扰模型实验带来了很多不确定的影响。关于损耗不均衡曲线，我们在后面的研究中将会详细给出。

【参考文献】

1、S. M. Gemelos, et al, Impact of Crosstalk in an arrayed-Waveguide Router on an Optical Add-Drop Multiplexer, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 11,No. 3, Mar 1999, pp349-351

2、E.L. Goldstein, et al , Performance Implications of Component Crosstalk in Transparent Lightwave Networks, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.6,No.5,May 1994, pp657-660

3、P. J. Legg, et al, Inter-Channel Crosstalk Phenomena in Optical Time Division Multiplexed Switching Networks, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.6,No.5,May 1994 , pp661 663

4、E. L. Goldstein, L. Eskildsen, Scaling Limitations in Transparent Optical Networks Due to Low-Level Crosstalk, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.7 , No.1, Jan.1995, pp93-94

5、M.Shtaif, et al , Crosstalk in WDM Systems Caused By Cross-Phase Modulation in Erbium-Doped Fiber Amplifiers, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.10,No.12 Dec 1998, pp1796-1798

6、Abdullah A. Al-Orainy, Analysis of Crosstalk in WDM-Ring Networks, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.5, No.12, Dec. 1993, pp1445-1451

7、窦万峰等，Mathematica 3.0 软件使用指南，华中理工大学出版社，1999。

第三章、基于 AWG 的 OADM 串扰模型研究..... 44

【导论】..... 44
3.1、基于 AWG 的 OADM 串扰模型理论研究..... 44
3.1.1、模型 1 同频串扰情况..... 44
3.1.2、模型 2 同频串扰情况..... 48
3.1.3、同频串扰理论研究结论..... 49
3.2、基于 AWG 的 OADM 串扰模型实验..... 52
【参考文献】..... 53

第四章、基于 AWG 的 OADM 损耗不均衡度的补偿

【导论】

由于衍射效率不一致，目前制造的所有阵列波导光栅（AWG）复用器都存在 FDM 通道间损耗的不均衡性。在全光网中，这是致命的，因为不均衡会积累起来。每个复用器的损耗不均衡度的典型值是 2-3dB，从而 10 个复用器的级联时就会产生 20-30dB 的不均衡。通过理想设计极限得到均一的衍射效率是一种解决方法，但是在目前的波导制造工艺中永远不能达到。AWG 某配置的损耗不均衡度定义该配置情况下，最大的波长损耗值与最小的波长损耗值的差值。

本章讨论了如何采用移位原理对单个 AWG 组成的 OADM 的损耗不均衡度进行补偿，该原理同样可以应用于 AWG 级联情况。以一个损耗不均衡度不超过 2dB 的 NxN AWG（N＝16）为例，理论研究了两种基本配置（环回路径配置和折返路径配置）下，各种移位连接配置的均衡效果，发现当移位从δ=0（常规连接）依次增大到δ=N/2 时，损耗不均衡度将从 2dB 依次减小到 0.43dB，仅为均衡前的 21.4%。理论上，得出了损耗不均衡度与移位δ的关系是二次曲线的关系，以及移位原理所可能实现的最小损耗不均衡度的极限。且发现，该极限仅与 AWG 的端口数目 N 有关，而与 AWG 的损耗不均衡特性的参数α、β无关；并且不管对于单个 AWG 构成的 OADM 还是偶数个 AWG 级联的移位均衡配置，可能实现的最小损耗不均衡度都相同。这些结论都是以前没有报道过的。最后通过实验证明了理论推导。由于实验所用 AWG 的损耗不均衡度比较差（β较大），所以可以更加明显地看出移位连接用于基于 AWG 的 OADM 的均衡效果。

本节还首次比较了 AWG 两种基本配置损耗均衡的效果。如果传输波长数目不超过 N/2，折返配置的均衡效果比环回配置均衡效果最好的情况还稍好。但如果传输的波长数目超过 N/2，环回配置依然可以通过移位连接以实现损耗均衡，而折返配置就无能为力了。

4.1、基于 AWG 的 OADM 损耗不均衡度补偿理论研究

4.1.1、AWG 损耗不均衡度的产生及特性

由于衍射效率不一致，目前制造的所有阵列波导光栅（AWG）复用器都存在 FDM 通道间损耗的不均衡。在全光网中，这是致命的，因为不均衡会积累起来。每个复用器的损耗不均衡度的典型值是 2-3dB，从而 10 个复用器的级联时就会产生 20-30dB 的不均衡。通过理想设计极限得到均一的衍射效率是一种解决方法，但是在目前的波导制造工艺中永远不能达到。[1]

因此，有必要对如何均衡 AWG 的损耗不均衡度进行研究。

我们可以假定阵列波导光栅的衍射效率分布是高斯型的。这时，周期 NxN 复用器的传输损耗是输入端 i 和输出端 j 的函数：[1][2]

$$\alpha(i,j)=\alpha_0+\beta\left[\left(i-\frac{N+1}{2}\right)^2+\left(j-\frac{N+1}{2}\right)^2\right] \qquad (1)$$

其中， $\alpha(i,j)$[dB]表示从端口 Li 到端口 Rj 的 $f_{i+j-1 \bmod N}$通道的损耗， α_0[dB] 是中心端口 $L_{N+1/2}$ 和 $R_{N+1/2}$之间的损耗， β 是由 N 和归一化孔径决定的系数。由该式得出 AWG 的损耗与端口的关系如图 4-1。

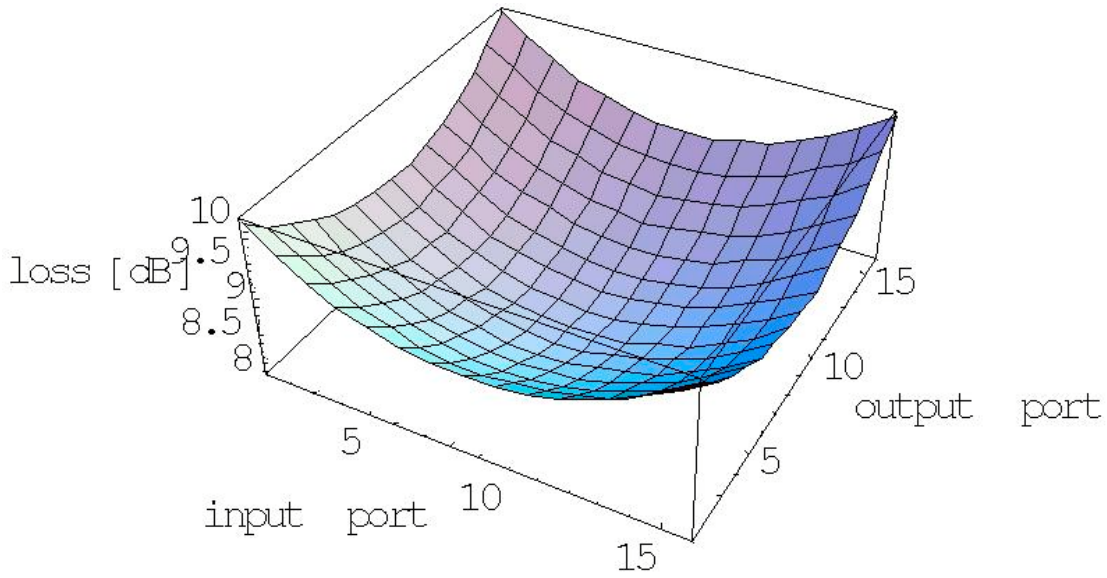


图 4-1、AWG 的损耗与端口关系图

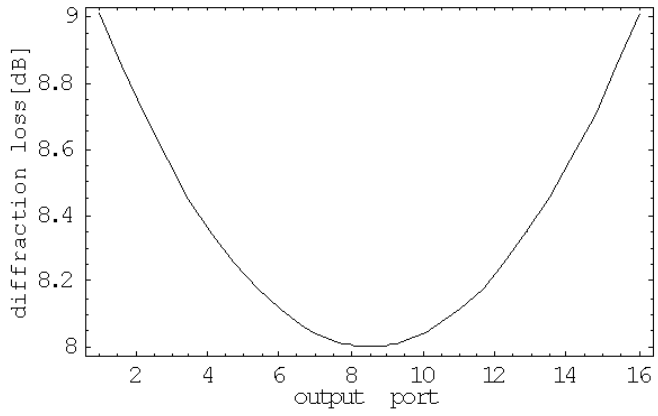


图 4-2、AWG 的损耗不均衡曲线（设从理想中心端口 N+1/2 端口输入）

AWG 某配置的损耗不均衡度定义该配置情况下，最大的波长损耗值与最小的波长损耗值的差值。

以下的理论分析将考虑这样一个标准 AWG， 其最大插入损耗不超过 10dB，插入损耗的不一致度不超过 2dB。而 16x16AWG 的最大插入损耗应为 $\alpha(1,16)$，最小插入损耗应为 $\alpha(8,8)$。即应有 $\alpha(1,16)-\alpha(8,8)\le 2dB$ 。由这些条

件我们确定（1）式的 α_0=8.0，β=0.01786。由此得到该 AWG 损耗不均衡曲线（设从理想中心端口 N+1/2 端口输入）如图 4-2。

由图 4-2 可以看出，如果从中心输入端口输入，则在中心输出端口输出的波的损耗值最小，而在边缘端口输出的波的损耗最大，且是对称的结构。由于 AWG 在实际使用中，往往是同时作为复用器和解复用器使用的，即是双向使用的，也就是说，对于同一个波长，往往要通过 AWG 两次。因此，我们可以这么考虑：如果尽量使 AWG 的所有工作波长中，先经过损耗大的路径的波第二次让它经过损耗较小的路径，而先经过损耗小的路径的波第二次让它经过损耗较大的路径。这样两次经过的路径的损耗和之间的差值就会减小。

4.1.2、loopback 配置损耗均衡研究

基于以上基本思想，我们先考虑常见 AWG 环回路径配置的 OADM 的损耗均衡。OADM 的信号可以在 AWG 的环回路径的任意一条上断开进行 add/drop（分插复用）。常见 AWG 环回路径配置的 OADM 结构如图 4-3。为了方便起见，我们的图中不画出 add/drop 的位置，因为 add/drop 的位置对于我们的损耗均衡研究并无影响。

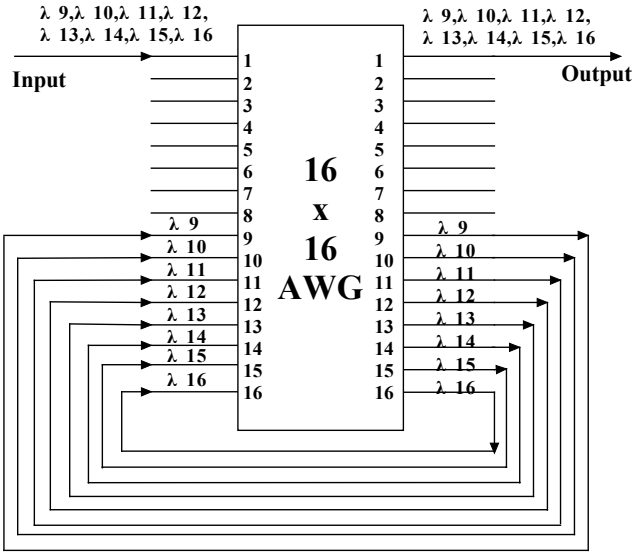


图 4-3、常见环回路径配置的 OADM 结构

我们考虑如图 4-3 的配置。该配置可以对 λ9—λ16 等 8 个波长任意进行分插复用。λ9—λ16 从端口 L1 输入，分别从 R9—R16 端口输出，其损耗值分别为 $\alpha(1,9)$—$\alpha(1,16)$，其值依次增加，即 $\alpha(1,9)<\alpha(1,10)<\cdots<\alpha(1,16)$。因此如果要求补偿损耗不均衡度的话，那么，在第二次通过的路径中，λ9—λ16 的损耗值应该由波长 9 至波长 16 依次减少，或者至少大体上依次减少，这样才能实现均衡。我们考虑如下的改进结构。将 R9—R16 端口分别与 L2—L9 端口，或 L3—L10 端口，或 L4—L11，……，或 L8—L15 连接，即，使环回路

径移位 δ。我们将上面的各种环回路径配置分别叫做配置 1（δ=7），配置 2（δ=6），配置 3（δ=5），……，配置 7（δ=1），将原来的常规配置称做配置 8（δ=0）。

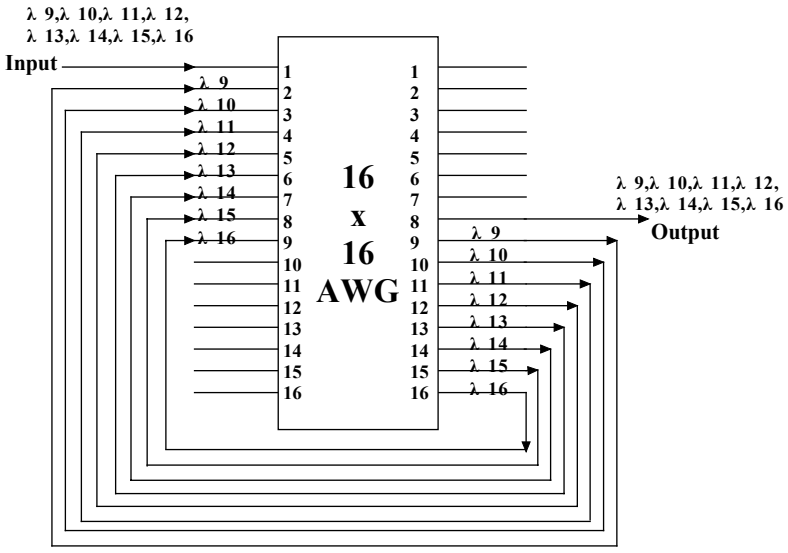


图 4-4、环回路径移位连接的 OADM

图 4-4 只示出了移位 δ=7 的情况，λ9—λ16 分别环回到 L2—L9 口输入，然后都从共同输出端口 R8 口输出。其它几种移位连接情况的波长传输路径依次为：λ9—λ16 分别环回到 L3—L10 口输入，然后都从 R7 输出（δ=6）；λ9—λ16 分别环回到 L4—L11 口输入，然后都从 R6 输出（δ=5）；……；λ9—λ16 分别环回到 L9—L16 口输入，然后都从 R1 端口输出（δ=0，亦即常规 loopback 环回路径连接）。

标准 AWG 复用器的通过波长 λn 与输入端口 i、输出端口 j 的关系为：$n = i + j - 1 \bmod N$，$1 \le i, j \le N$，即 $j=n-i+1 \bmod N$。对于 16x16 AWG，N=16。在我们的配置中，信号都是先从 L1 端口输入，即 $i=1$，因此对于波长 λn，从 L1 输入后，必定从 Rn 口输出（因为 $j=n-1+1 \bmod 16=n$），而波长 λn 在该路径上的损耗为 $\alpha(1,n)$。然后，λn 折返回左边的端口，端口号为 L(n-δ)，即输入波长为 λn，输入端口 $i=n-\delta$，那么算出 λn 将从右边的 $j=n-(n-\delta)+1 \bmod 16=\delta+1$ 端口输出，而波长 λn 在该路径上的损耗为 $\alpha(n-\delta,\delta+1)$。因此，波长 λn 总的损耗为 $\alpha(1,n)+\alpha(n-\delta,\delta+1)$。

我们直接求出各种配置下各波长的损耗情况，并且做出曲线如图 4-5、图 4-6。图 4-5 描述的是各波长从 L1 到 Rn 端口的损耗情况和各种配置下通过环回路径的损耗情况，图 4-6 表示的是各波长从 AWG 的输入到输出的总损耗情况。图 4-5 及图 4-6 同时画出了下面要讨论的 foldback 配置的均衡情况。我们由曲线图 4-5、图 4-6 可以看出，当移位 δ 越大，损耗均衡的结果越好。

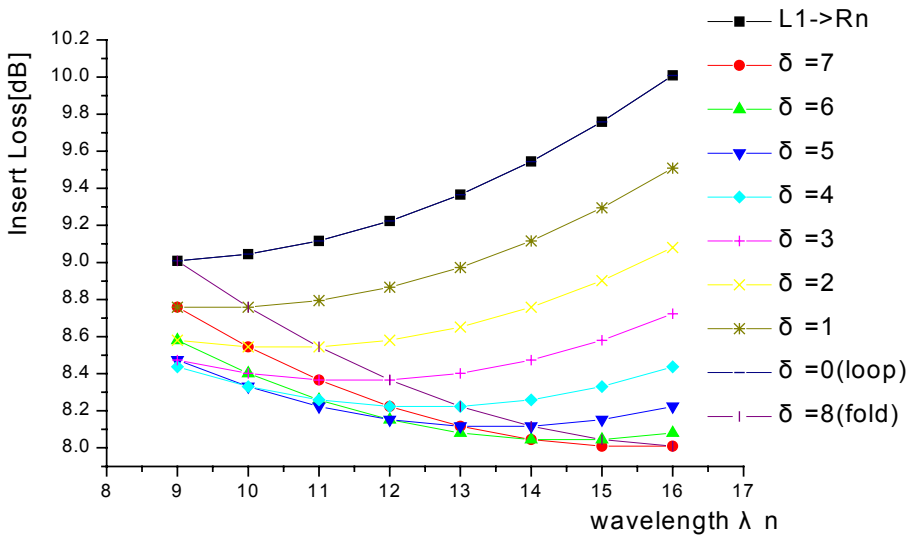


图 4-5、各波长从 L1 到 Rn 端口及各配置下通过环回路径的损耗情况

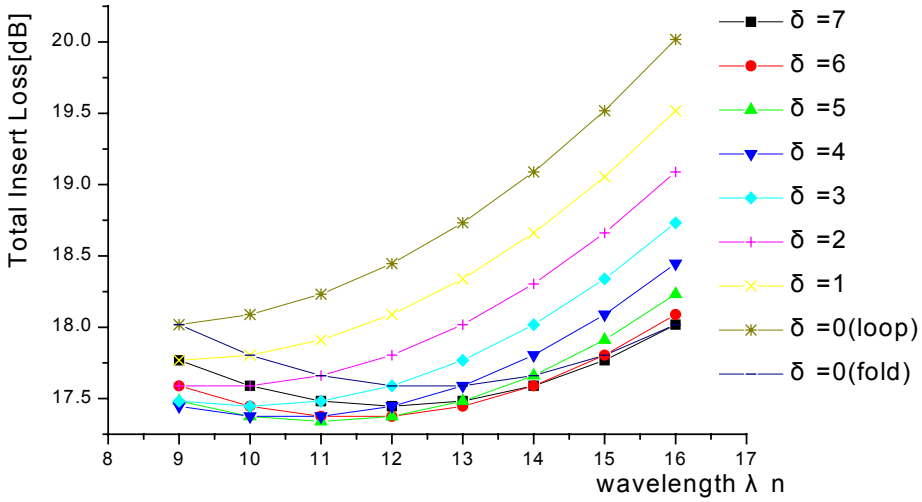


图 4-6、各波长从 AWG 的输入到输出的总损耗的情况

我们推导得该 OADM 的损耗不均衡度为：

$$\Delta\alpha_T = \beta\Delta f_T = \begin{cases} \beta[\frac{1}{2}(N-1)(N-1-2\delta)+\frac{1}{2}\delta^2], \delta\text{为奇。} \\ \beta[\frac{1}{2}(N-1)(N-1-2\delta)+\frac{1}{2}\delta^2]-\frac{1}{2}\beta, \delta\text{为偶。} \end{cases} \quad (2)$$

（详细推导见作者的文章“AWG 损耗不均衡度的均衡结果推导”）。将该结果

验证图 4-5，图 4-6 完全符合。可见，推导完全正确。

假设 N 是 4 的倍数，（2）式在 δ=N/2 时取得最小值。这很好理解，因为此时信号首先通过损耗最好的端口，然后通过最差的端口。

4.1.3、foldback 配置损耗均衡研究

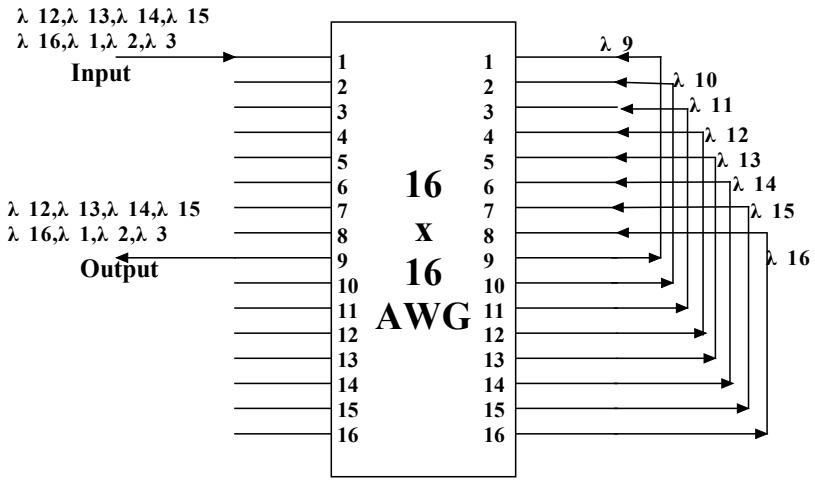


图 4-7、折返路径配置的损耗均衡方案

对于折返路径配置的情况，可见，同样可以实现如图 4-7 所示的损耗不均衡度的均衡配置方案。可以看出，对于使用了 8 个波长的情况，只有一种均衡方案，即 δ=8。很明显，该方案的均衡效果比环回路径配置的所有配置方案的效果都要好（详细证明见第五章）。直接计算的数据和下面的推导公式都可参见作者的文章“AWG 损耗不均衡度的均衡结果推导”。图象同时画在图 4-5 和图 4-6 中。

推导得的对于 NxN AWG 的该种折返配置的损耗不均衡度如下：

$$\Delta\alpha_T = \beta\Delta f_T = \beta\left[-\frac{N-1}{2} - 2\left(\left\lfloor\frac{3N+2}{4}\right\rfloor - \frac{N+1}{2}\right)\left(\left\lfloor\frac{3N+2}{4}\right\rfloor - \frac{2N+1}{2}\right)\right], \qquad (3)$$

如果 N 为 4 的倍数，则 $\left\lfloor\frac{3N+2}{4}\right\rfloor = \frac{3N}{4}$，则损耗不均衡度简化为：

$$\Delta\alpha_T = \beta\Delta f_T = \frac{N(N-4)}{8}\beta \qquad (4)$$

将 N=16 代入，得 $\Delta\alpha_T = 0.4285704$ 与直接计算的结果完全一致。可见我们该项推导也完全正确。

4.1.4、各配置损耗均衡的效果比较

图 4-8 给出了 N=16，β=0.01786 时情况。可以发现，移位越大，损耗均衡效果越好，而损耗不均衡度与移位 δ 的关系从(2)式可以看出是对于环回路径，损耗不均衡度从 2dB（δ=0，常规连接）减少到了 0.57dB（δ=7），对于折返路径配置，为 0.43dB（δ=8）。可见最好效果下，我们将损耗不均衡度优化了 1.5dB 以上，优化效果：

$$\frac{\text{均衡后}\Delta\alpha_{\mathrm{T}}}{\text{均衡前}\Delta\alpha_{T}}=21.4\%;\quad \frac{\text{均衡前}\Delta\alpha_{T}-\text{均衡后}\Delta\alpha_{\mathrm{T}}}{\text{均衡前}\Delta\alpha_{T}}=78.6\%。$$

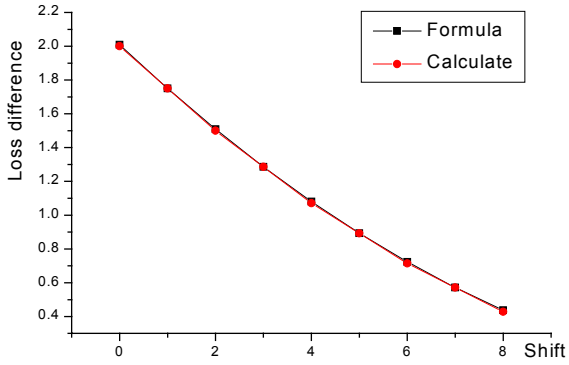


图 4-8、各种移位连接的损耗均衡效果对比

对于 NxN AWG（设 N 为 4 的倍数），环回路径配置损耗不均衡度最小的情况是（2）式取 δ=N/2，折返路径配置损耗不均衡度是（4）式，而

$$\frac{\Delta\alpha_T^f}{\min\Delta\alpha_T^l}=\frac{\frac{N(N-4)}{8}\beta}{\beta[\frac{1}{2}(N-1)(N-1-2\delta)+\frac{1}{2}\delta^2]-\frac{1}{2}\beta\Big|_{\delta=N/2}}=1$$

即折返路径配置的损耗不均衡度等于所有环回路径配置中可能的最小损耗不均衡度。而实际应用中，当同样使用 N/2 个连续波长时，由于环回路径配置的移位最多能够达到 N/2－1，所以折返路径配置的效果比环回路径配置最好的效果还要好。同样可以证明当使用的连续波长数目不超过 N/2 时，该结论依然成立。

但是如果使用的连续波长数目 m>N/2,则折返路径配置就无能为力了，因为 AWG 同一侧的端口数仅为 N。但是移位的环回路径配置依然可以使用，以上理论分析的均衡效果依然成立，唯一的限制是 δ≤16-m-1。

4.1.5、AWG 级联的损耗均衡方案

我们可以将移位原理推广到 m（$m \geq 2$）个 AWG 级联结构的损耗均衡。当 m=2 和 m=4 时，均衡配置分别如图 4-9、图 4-10、图 4-11。

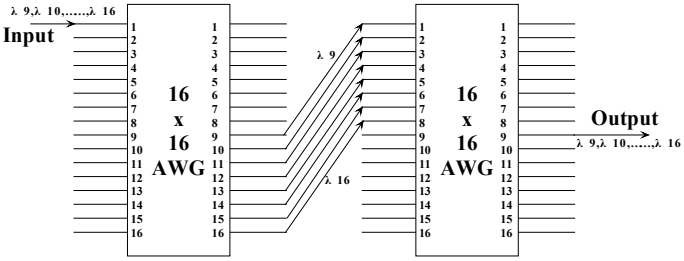


图 4-9、m=2 个 A W G 级联的损耗均衡方案

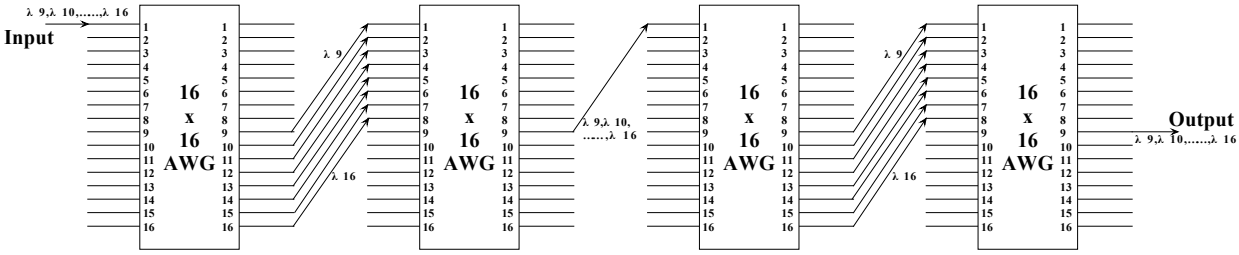


图 4-10、m=4 个 A W G 级联的损耗均衡方案 1 （移位配置 1）

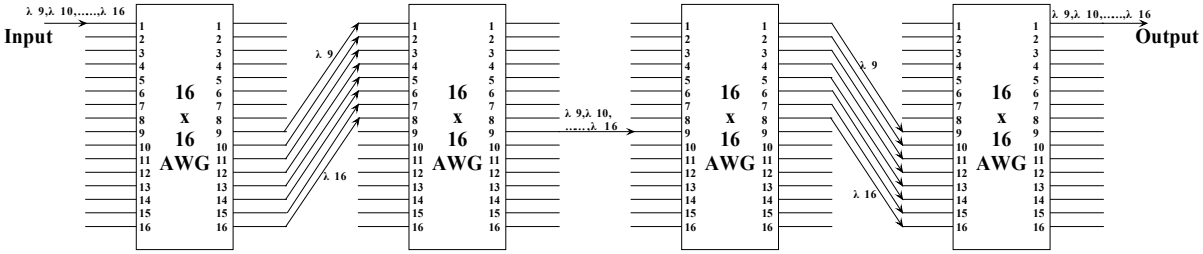


图 4-11、m=4 个 A W G 级联的损耗均衡方案 2 （移位配置 2 ）

m=4 的移位配置有两种方案（图 4-10、图 4-11），显然第二种方案（图 4-11）更好些。因为它是完全对称的结构。对于双向传输更加合适。我们可以估计对于四个 AWG 级联的情况，损耗不均衡度为：0.43×2=0.86dB，而如果不进行损耗均衡配置，则信号通过四个 AWG 后总的损耗不均衡度为 2×2=4dB。可见我们将损耗不均衡度优化了大于 3dB，优化效果：

$$\frac{\text{均衡后}\Delta\alpha_{\mathrm{T}}}{\text{均衡前}\Delta\alpha_{T}}=21.4\%;\quad \frac{\text{均衡前}\Delta\alpha_{T}-\text{均衡后}\Delta\alpha_{\mathrm{T}}}{\text{均衡前}\Delta\alpha_{T}}=78.6\%。$$

实际上我们很容易证明利用我们的移位原理所可能实现的最小损耗不均衡度（或者说极限）为：

$$\frac{\text{均衡后最小}\Delta\alpha_{\mathrm{T}}}{\text{均衡前}\Delta\alpha_{T}}=\frac{1}{4}\cdot\frac{N(N-4)}{(N-1)^{2}} \qquad (5)$$

只需将(4)式（最好均衡效果）除以(2)式取 δ=0（最大损耗不均衡度）就可以得到(5)式。(5)式 N＝16 时为 21.4%。对于(5)式，我们有以下结论：

1)、很容易证明，不管是对单个 AWG 构成的 OADM，还是对 m=2，m=4，…，m=2k(k 为正整数)的均衡配置，可能实现的最小损耗不均衡度都是一样的，都由(5)式给出。

2)、可能实现的最小损耗不均衡度只与 AWG 的端口数目 N 有关，而与 AWG 的损耗不均衡特性参数 α 、β 无关。

4.2、AWG 构成的 OADM 损耗不均衡的补偿实验

4.2.1、实验所用 AWG 损耗不均衡度的测量

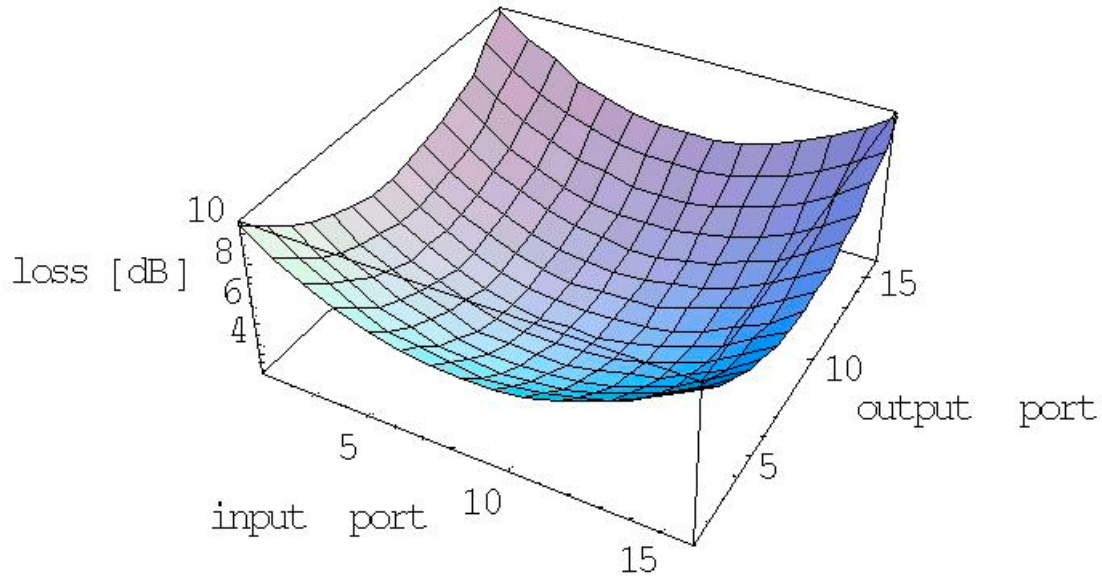


图 4-12、实验用 AWG 损耗不均衡曲线（端口标号转换成标准形式）

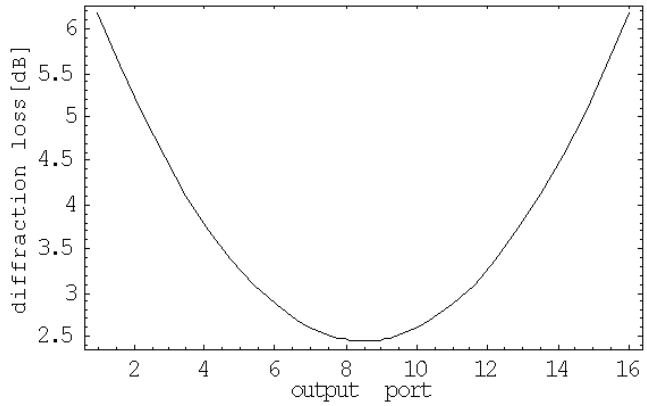


图 4-13、实验用 AWG 损耗不均衡曲线（端口标号转换成标准形式，理想中心端口 8.5 输入）

根据实际测量我们实验用 AWG 的性能参数（第四章串扰模型实验中测 λ9，λ10，λ11 串扰特性时同时测出了各种损耗情况），我们可以近似得出(1)

式中的α_0＝2.45，β＝0.08394。如果将我们的 AWG 转换成标准 AWG，我们的损耗不均衡度应该如式(6)和图 4-12、图 4-13 表示：

$$\alpha(i,j)=\alpha_0+\beta\left[\left(i-\frac{N+1}{2}\right)^2+\left(j-\frac{N+1}{2}\right)^2\right], \tag{6}$$

4.2.2、各种损耗均衡方案及实验

我们的损耗均衡实验方案如图 4-14。由于实验激光源数目的限制，我们只能实现 7 个波长，其中波长 13 没有使用。这对实验结果影响并不大。实验结果可以很好地对比环回配置和折返路径配置的损耗特性对比。

图 4-14 中合波信号由 AWG 左端口 L6 输入，λ7～λ14 将分别从 R9～R16 分波输出，然后分别环回到 L9～L16，最后信号合波在 R6 端口输出。我们把这种配置（L6→R9～R16→L9～L16→R6）称为对称配置，记做δ’＝0。

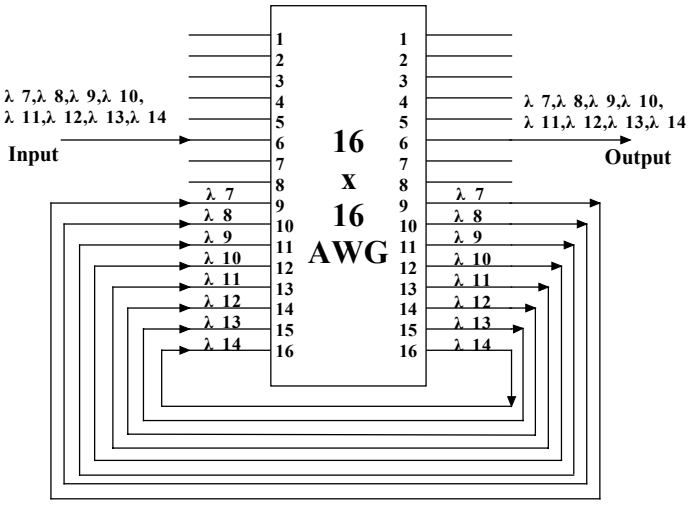


图 4-14、损耗均衡实验之对称配置

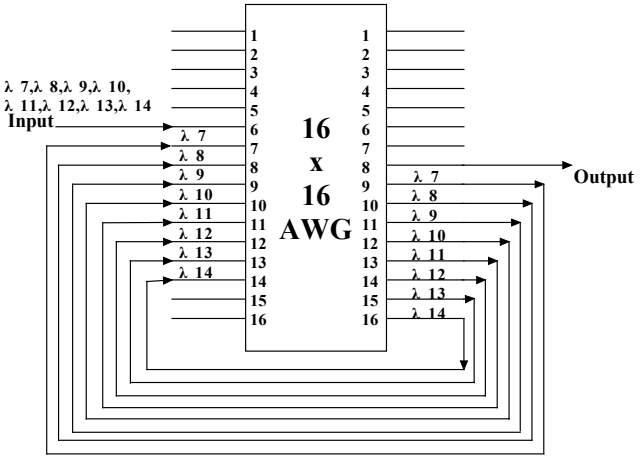


图 4-15、损耗均衡实验之环回移位配置示例

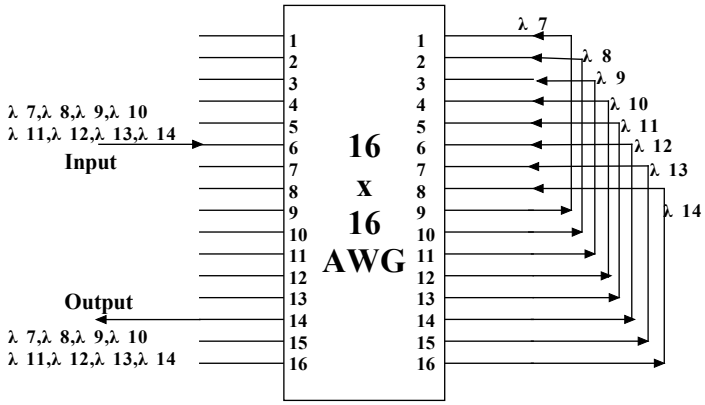


图 4-16、损耗均衡实验之折返配置

其它几种可能的移位联接方式分别如下：L6→R9～R16→L7～L14→R8（配置 1，δ’＝－2），L6→R9～R16→L8～L15→R7（配置 2，δ’＝－1），L6→R9～R16→L9～L16→R7（配置 3，δ’＝0），L6→R9～R16→L10～L1→R5（配置 4，δ’＝1），L6→R9～R16→L11～L2→R4（配置 5，δ’＝2），L6→R9～R16→L12～L3→R3（配置 6，δ’＝3），L6→R9～R16→L13～L4→R2（配置 7，δ’＝4），和 L6→R9～R16→L14～L5→R1（配置 8，δ’＝5）。

图 4-15 示出了环回移位配置 1（δ’＝－2），图 4-16 示出了折返配置。

之所以图 4-14 只是称为对称配置，且记为 δ’＝0，而不叫标准 Loopback 配置（δ＝0），是因为在后面的分析中我们会发现：如果将我们实验所用的 AWG 转换成标准路由表的 AWG，该配置实际相对于标准 AWG 构成的标准 Loopback（δ＝0）实际是一种移位了的配置（δ＝7）。这是由于我们 AWG 的路由表（表 1-4）与标准 AWG 的路由表（表 1-3）不同所引起的。表 1－4 相当于表 1－3 左移 7 位（同时应用周期性）。

为了分析测量误差带来的影响，实验进行了两次测量。第一次测量得到的数据处理如表 4-1。第二次测量数据将在实验结果分析中直接给出。

表 4-1、各配置各波长损耗情况

损耗(dB)	λ 7	λ 8	λ 9	λ 10	λ 11	λ 12	λ 14	MAX	MIN	MAX-MIN
配置1(δ’=-2)	-6.72	-6.49	-7.04	-5.24	-6.82	-8.37	-9.50	-5.24	-9.50	4.26
配置2(δ’=-1)	-6.97	-6.74	-7.06	-6.01	-7.24	-8.96	-9.11	-6.01	-9.11	3.10
配置3(δ’=0)	-7.04	-7.29	-7.04	-6.22	-7.18	-8.73	-10.23	-6.22	-10.23	4.01
配置4(δ’=1)	-6.85	-6.29	-7.16	-6.46	-7.23	-8.78	-15.69	-6.29	-15.69	9.40
配置5(δ’=2)	-7.54	-7.24	-7.20	-7.05	-8.19	-9.21	-15.60	-7.05	-15.60	8.55
配置6(δ’=3)	-8.03	-7.54	-8.35	-8.03	-8.90	-13.47	-14.79	-7.54	-14.79	7.25
配置7(δ’=4)	-9.86	-9.36	-11.05	-13.80	-12.83	-12.99	-15.36	-9.36	-15.36	6.00
配置8(δ’=5)	-8.93	-8.34	-8.76	-8.76	-11.83	-13.14	-13.77	-8.34	-13.77	5.43
Foldback配置	-10.18	-8.56	-8.38	-6.64	-7.41	-8.48	-9.25	-6.64	-10.18	3.54

由于我们的 AWG 的输入输出端口和波长编号的关系是：

$n = i + j - 8 \bmod N$。而标准 AWG 的输入输出端口和波长编号的关系是：$n = i + j - 1 \bmod N$。即它们相差为 7。因此将我们的 AWG 的输入输出路由表向左移位 7 列（或者向上移位 7 行），并且应用周期性即得标准的 AWG 的路由表。如果将我们的 AWG 转化成标准输入输出路由的 AWG，我们以上实验中的移位 δ’并不是直接对应我们理论分析中的 δ。应当找出 δ’和 δ 的对应关系，因为我们的理论分析是对标准 AWG 而言的。我们所做实验（图 4-14）转换成标准形式应该如图 4-17 所示。

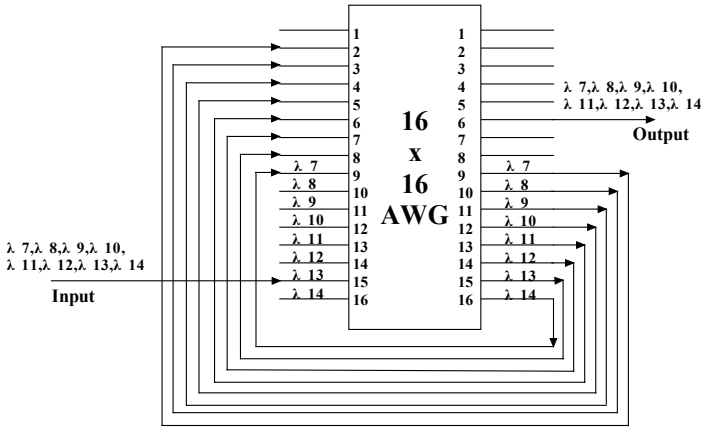


图 4-17、对称配置（图 4-14）对应标准 AWG 之配置

可以推出将我们的实验转换成标准 AWG 的图 4-17 后，我们实验的移位 δ’与标准 AWG 的移位 δ’’的关系如下表。

δ’	-2	-1	0	1	2	3	4	5	8（fold）
δ’’	9	8	7	6	5	4	3	2	8

我们的理论推导中使用的波长是从第 1 输入端口输入的，而我们的实验转换成标准 AWG 移位后的波长是从第 15 端口输入的，因此这时的移位 δ’’与理论推导模型所用的 δ 应该有 δ=15-δ’’-1 mod N/2 的关系，之所以对 N/2 取模是因为在输入 N/2 个连续波长的情况下，最大的移位数是不可能超过 N/2 的，因此应该对 N/2 取模。而我们的 N＝16，所以 δ=15-δ’’-1 mod 8。而 δ’’与 δ’的关系已经如上表所列出来了，因此可以推导出 δ 和 δ’的关系如下表。

δ	0	1	2	3	4	5	6	7	8
δ’	1	2	3	4	5	-2	-1	0	8（fold）

我们应该关于 δ 作图以与我们的理论进行对比。

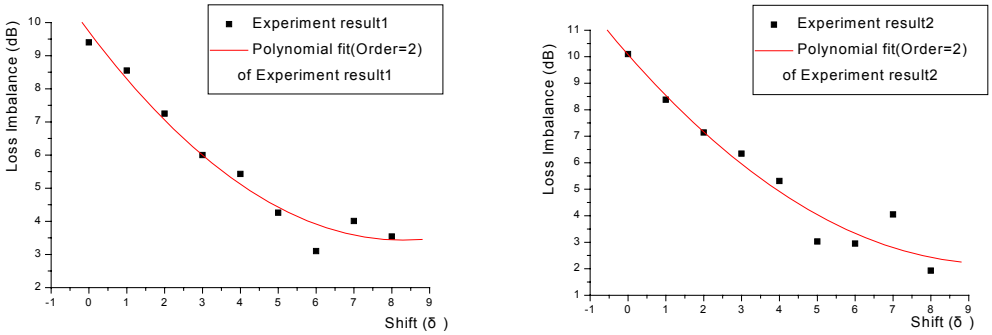
4.2.3、实验结果分析

表 4-2 是我们实验中两次测量不同配置(δ)下损耗不均衡度情况的结果。根据该表作出损耗不均衡度与 δ 的关系如图 4-18。

表 4-2、损耗均衡实验两次测量结果

第一次测量	δ	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	损耗不均衡度(dB)	9.4	8.55	7.25	6	5.43	3.54	4.26	3.1	4.01
第二次测量	δ	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	损耗不均衡度(dB)	10.1	8.38	7.14	6.34	5.31	3.03	2.95	4.05	1.93

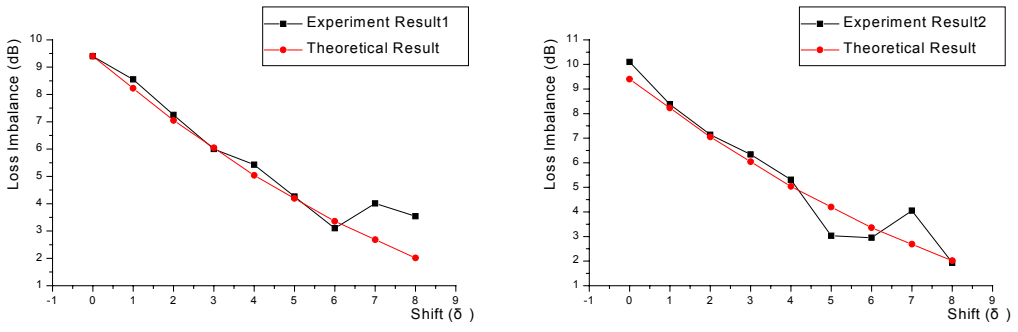
由(2)式可以发现，损耗不均衡度与 δ 的关系应该是二次曲线，所以图 4-18 同时作出对这些离散数据的拟合二次曲线。其中第一次拟合函数为 Y=9.71939-1.51591*X+0.09136*X^2，拟合平均方差 0.97097，标准方差 0.44391；第二次拟合函数 Y=10.07824-1.62821*X+0.08403*X^2，拟合平均方差 0.94501，标准方差 0.7436。



a)、第一次实验结果　　b)、第二次实验结果

图 4-18、实验结果及拟合曲线

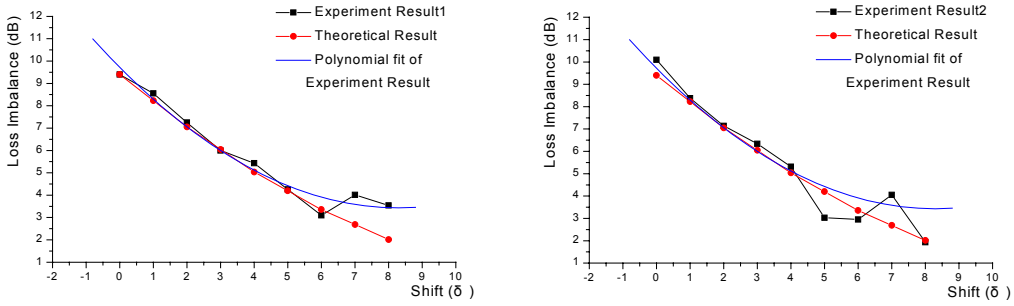
我们发现两次测量的数据大体趋势一致。但当 δ 较大（ δ ＝5，6，7，8）时，测量误差就表现出来了。因为光纤接头插拔本身所允许的误差在 0.5dB 内，所以系统误差必然会反映在测量我们很多组相差不超过 2－3dB 的数据中。但是比较图 4-18a 和 b,仍然可以说，我们的实验很成功地反映了各种配置的效果。



a)、理论与实验结果 1 对比　　b)、理论与实验结果 2 对比

图 4-19、实验结果及拟合曲线

根据前面得出的我们 AWG 的损耗不均衡特性公式中的参数值 α_0 = 2.45， β = 0.08394，以及损耗均衡移位配置的理论分析公式(2)(3)，得出了对于我们的 AWG 进行损耗均衡实验各种配置的理论结果，将该理论结果与实验结果对比如图 4-19。可以发现我们的理论与实验结果符合得很好。同样可以发现当 δ 较大（ δ =5，6，7，8）时，理论与实验偏离较大，但如前分析，我们仍然有理由相信这是由测量误差所引起的。



a)、第一次实验　　b)、第二次实验

图 4-20、实验结果、拟合曲线与理论对比

图 4-20 同时画出了实验结果、拟合曲线和理论结果。我们得出结论这三者之间吻合得很好。我们仍然有理由相信 δ 较大时三者之间的偏差是由测量误差所引起的。这样我们就通过实验证明了我们的理论推导。

【参考文献】

1、Osamu Ishida, et al, Loss-Imbalance equalization in Arrayed-Waveguide-Grating (AWG) Multiplexer Cascades, Journal of Lightwave Technology, Vol.13, No.6, June 1995, pp1155-1163
2、Hiroshi Takahashi, Kazuhiro Oda, et al, Transmission Characteristics of Arrayed Waveguide NxN Wavelength Multiplexer, Journal of Lightwave Technology, Vol13, No.3, Mar 1995, pp447-454
3、Michael C. Parker, et al, A novel active holographic arrayed-waveguide grating for WDM subsystems, OFC'2000 Technical Digest, WE6, pp77-79
4、M.K.Smit, New Focusing and Dispersive Planar Component Based on an Optica Phased Array, Electronics Letters, Mar. 1988, Vol.24, No.7, pp385-386
5、C.Dragone, An NxN Optical Multiplexer Using a Planar Arrangement of Two Star Couplers, IEEE Photon. Tech. Lett., VOL.3, NO. 9, Sept. 1991, pp812-814
6、窦万峰等，Mathematica 3.0 软件使用指南，华中理工大学出版社，1999。
7、张宜华，精通 MATLAB 5，清华大学出版社，1999

第四章、基于 AWG 的 OADM 损耗不均衡度的补偿 54

【导论】 54

4.1、基于 AWG 的 OADM 损耗不均衡度补偿理论研究 54

4.1.1、AWG 损耗不均衡度的产生及特性 54

4.1.2、loopback 配置损耗均衡研究 56

4.1.3、foldback 配置损耗均衡研究 59

4.1.4、各配置损耗均衡的效果比较 60

4.1.5、AWG 级联的损耗均衡方案 61

4.2、AWG 构成的 OADM 损耗不均衡的补偿实验 62

4.2.1、实验所用 AWG 损耗不均衡度的测量 62

4.2.2、各种损耗均衡方案及实验 63

4.2.3、实验结果分析 65

【参考文献】 67

第五章、基于 AWG 的 OADM 基本配置串扰特性比较

【导论】

环回路径配置和折返路径配置是 AWG 的两种基本配置。日本 NTT 公司 Y.Tachikawa 等 1993 年提出了环回路径配置。开创了基于 AWG 的 OADM 的新方案，将结构由常规配置改进到环回路径配置[1]。1996 年对环回路径配置的应用进行了系统的分析[2]。NTT 的 H.Takahashi 等 1994 年提出了折返路径配置，开创了基于 AWG 的 OADM 的又一新方案[3]。理论分析了当 AWG 串扰为固定值时，折返路径配置一般比环回路径配置在串扰等方面优越。这些结论都可以从前几章的实验中得到证明。

本论文前几章的工作除了证实了 H.Takahashi 等人的结论，还在其它方面（如 BADM 传输的损耗方面，以及损耗均衡的效果方面）证明了折返配置比环回配置优越。因此，前几章许多结果是对 AWG 基本配置性能对比问题的有益补充。

本章进一步系统全面地研究了这两种配置串扰性能的比较。理论分析了当 AWG 本身的串扰值从－80dB 与 0dB 之间变化时，两种基本配置的直通波长和分插复用波长的串扰性能对比。得出了以下有意义的结论：1)、环回路径配置的串扰与 AWG 本身的串扰值相当，而折返路径配置的串扰值通常比 AWG 本身串扰值小很多。2)、只需 AWG 本身的串扰小于-6dB，foldback 路径的串扰特性就比 loopback 路径的串扰特性要好，而这一点一般都是满足的（但是当 AWG 本身串扰大于－6dB 时，折返路径配置是不如环回路径配置的。这一点以前所有的文献中都没有说明。或者说以前的报道应该是本章推导的一个特殊情况）。3)、AWG 本身的串扰越小，折返路径配置相对于环回路径配置对串扰的抑制越明显。4)、对于相同的 AWG 本身的串扰值，环回路径配置分插复用波长的串扰值与直通信号的串扰略有区别（与 Add 功率和干线功率的比有关）；但是，折返路径对于分插信号和直通信号，其串扰特性几乎相同，或者说，其串扰特性是一致的（Uniform）。

因此本节的理论研究是 H.Takahashi 等人理论很有意义的扩展和补充。

5.1、基本定义

AWG 有两种基本配置，即 loopback path（环回路径）配置和 foldback path（折返路径）配置。环回路径是指从 AWG 左（右）侧输入的波在右（左）侧输出后再将它连接到左（右）侧，最终从右（左）侧输出。而折返配置是指从 AWG 左（右）侧输入的波在右（左）侧输出后将它连接到输出同侧某端口，最终是从左（右）侧输出。（分别见图 5-1 和图 5-2）

AWG 的波长标号 λn 与输入端口 i、输出端口 j 的关系为：$n = i + j - 1 \bmod N$，定义第 i 个端口到第 j 个端口波长 λn 的输出信号与输入信号的比值为：

$$\frac{P_{out}^{(n)}}{P_{in}^{(n)}}=\begin{cases}\alpha_{i,j}^{(n)}, n=i+j-1 \bmod N, \text{传输率} \\ \beta_{i,j}^{(n)}, n\neq i+j-1 \bmod N, \text{泄漏}\end{cases} \quad (1)$$

则必有：

$$0\le\alpha_{i,j}^{(n)}\le 1,\quad 0\le\beta_{i,j}^{(n)}\le 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{N}\left[\alpha_{i,j}^{(n)}+\beta_{i,j}^{(n)}\right]=1 \quad (3)$$

如果 AWG 性能对称，则有：$\alpha_{i,j}^{(n)}=\alpha_{j,i}^{(n)}$，$\beta_{i,j}^{(n)}=\beta_{j,i}^{(n)}$ (4)

如果 AWG 各端口性能一致，即 $\beta_{i,j}^{(n)}=\beta$，$\alpha_{i,j}^{(n)}=\alpha$，$0\le\beta,\alpha\le 1$ (5)

则有：$\alpha+(N-1)\beta=1$ (6)

而 AWG 的串扰值为：$R_c=\frac{\beta}{\alpha}$（或对数形式 $10\log\frac{\beta}{\alpha}$） (7)

5.2、环回配置直通通道和分插复用通道串扰分析

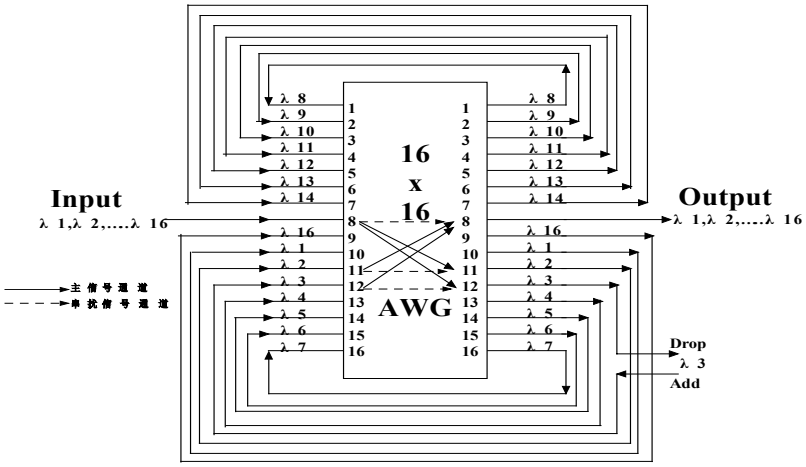


图 5-1、AWG 的 loopback path（环回路径）配置

对于环回路径配置，如图 5-1。现在分析 OADM 中存在的所有串扰路径。Pass 通道的串扰情况如下：以波长 2 为例，主信号 L8→R11→L11→R8，串扰包括其它波长对波长 2 的串扰（L8→非 R11 端口→R8（异频串扰））、波长 2 本身的串扰（L8→R8，L11→R11，及串扰到其它通道的波长 2 在 R8，R11 上的串扰（同源同频串扰））。Add/Drop 通道的串扰：以波长 3 为例，主信号 L8 到 R12 分出，插入到 L12 到 R8，串扰包括其它波长对波长 3 的串扰（L8→非 R12 端口→R8）、波长 3 本身的串扰（L8→R8，L12→R12（异源同频串扰），及串扰

到其它通道的波长 3 在 R8，R12 上的串扰(同源/异源同频串扰))，可见对于 Add/Drop 通道和 Pass 通道，串扰的类型和性质不相同，因此，可以猜想串扰特性不一致（non-Uniform)。

因为β是非常小的值(因为α<1 但是接近于 1，所以根据(6)式有β<<1)，所以 β^2 将接近于 0。在以下的分析中，我们将忽略连续泄漏超过两次的路径，即忽略β的二次项和高次项。这对我们的理论分析将带来极大方便，但是带来的误差将非常小。下面考虑的都是在 OADM 的 Out 端口的情况。

1)、对于直通通道（Pass Channel)，以波长λ2 为例，传输率为 $\alpha_{8,11}^{(2)}$，路径 L8→R8 泄漏为 $\beta_{8,8}^{(2)}$，L11→R11 泄漏为 $\beta_{11,11}^{(2)}$。则串扰为：

$$R_c = \frac{\beta_{8,8}^{(2)} + \alpha_{8,11}^{(2)}\beta_{11,11}^{(2)}\alpha_{11,8}^{(2)}}{\alpha_{8,11}^{(2)}\alpha_{11,8}^{(2)}} = \frac{\beta_{8,8}^{(2)}}{\alpha_{8,11}^{(2)}\alpha_{11,8}^{(2)}} + \beta_{11,11}^{(2)} \qquad (8)$$

设 AWG 性能对称，即满足（4）式 $\alpha_{i,j}^{(n)} = \alpha_{j,i}^{(n)}$， $\beta_{i,j}^{(n)} = \beta_{j,i}^{(n)}$，则

$$R_c = \frac{\beta_{8,8}^{(2)}}{(\alpha_{8,11}^{(2)})^2} + \beta_{11,11}^{(2)} \qquad (9)$$

如果 AWG 各端口性能一致，即满足（5）式，则

$$R_c = \frac{\beta}{\alpha^2} + \beta = \beta(1 + \frac{1}{\alpha^2}) \qquad (10)$$

2)、对于分插通道（Add/Drop Channel)，以波长λ3 为例，传输率为 $\alpha_{8,12}^{(3)}$，路径 L8→R8 泄漏为 $\beta_{8,8}^{(3)}$，L12→R12 泄漏为 $\beta_{12,12}^{(3)}$。由于λ3 在 AWG 的 R12 端口分出，再从 L12 口插入，串扰为异源同频串扰。串扰值与插入的信号功率有关，如果插入的信号与分出的信号功率相等，则串扰为：

$$R_c = \frac{\beta_{8,8}^{(3)}}{\alpha_{8,12}^{(3)}} \qquad (11)$$

（11）式中，不含泄漏项 $\beta_{12,12}^{(3)}$。如果满足（5）式，则

$$R_c = \frac{\beta}{\alpha} \qquad (12)$$

对比（10）式和（12）式，可以证明 $\frac{\beta}{\alpha} \le \beta\left(1 + \frac{1}{\alpha^2}\right)$。（因为 $\alpha - 1 \le 0$，

$-\alpha^2 \le 0$，所以 $\frac{\beta}{\alpha} - \beta\left(1+\frac{1}{\alpha^2}\right) = \frac{\beta}{\alpha^2}\left[(\alpha-1)-\alpha^2\right] \le 0$ ）所以分插复用通道的串扰特性比直通通道的串扰特性要好。该结果可以直观看出，因为直通通道的串扰是同源同频串扰，而分插复用通道的串扰是异源同频串扰。

5.3、折返配置直通通道和分插复用通道串扰分析

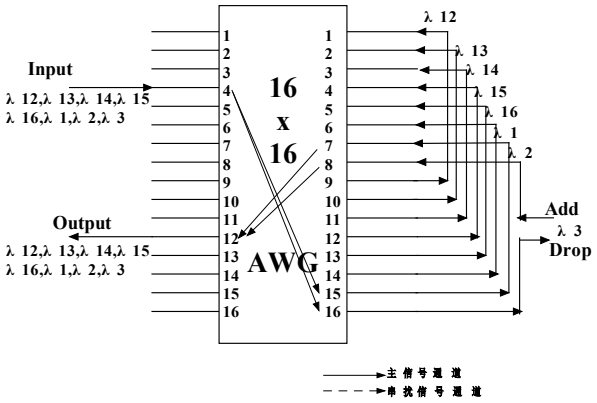


图 5-2、AWG 的 foldback path（折返路径）配置

对于折返路径配置，如图 5-2，Pass 通道的串扰：以波长 2 为例，主信号 L4→R15→R7→L12，串扰包括其它波长对波长 2 的串扰（L4→非 R15 的其它端口→非 R7 端口→L12，异频串扰）、波长 2 本身的串扰（L4→非 R15 的其它端口→非 R7 端口→L12，同源同频串扰）；Add/Drop 通道的串扰：以波长 3 为例，主信号 L4 到 R16 分出，插入到 R8 到 L12，串扰包括其它波长对波长 3 的串扰（L4→非 R16 端口→非 R8 端口→L12，异频串扰）、波长 3 本身的串扰（L4→非 R16 端口→非 R8 端口→L12，同源同频串扰）。可见对于 Add/Drop 通道和 Pass 通道，串扰的类型和性质相同，因此，可以猜想串扰特性必定一致（Uniform）。

我们同样忽略连续泄漏超过两次的路径，即忽略 β 的二次项和高次项。

1）、对于直通通道（Pass Channel），以波长 λ 2 为例，串扰为：

$$R_c = \frac{\sum_{j\neq 15, j=9,10,\cdots,16} \beta_{4,j}^{(2)} \beta_{j-8,12}^{(2)}}{\alpha_{4,15}^{(2)} \alpha_{7,12}^{(2)}} \qquad (13)$$

如果满足（5）式，则 $R_c = \frac{7\beta^2}{\alpha^2}$ （14）

2）、对于分插通道（Add/Drop Channel），以波长 λ 3 为例，由于 λ 3 在 AWG 的 R16 端口分出，再从 R8 口插入，串扰为异源同频串扰。串扰值与插入的信号功率有关，如果插入的信号与分出的信号功率相等，则串扰为：

$$R_c = \frac{\sum_{j=9,10,\cdots,15} \beta_{4,j}^{(3)} \beta_{j-8,12}^{(3)}}{\alpha_{8,12}^{(3)}} \qquad (15)$$

如果满足（5）式，则 $R_c = \frac{7\beta^2}{\alpha}$ （16）

对比（14）式和（16）式，因为 $0 \le \alpha \le 1$，所以 $\frac{7\beta^2}{\alpha} \le \frac{7\beta^2}{\alpha^2}$，即分插复用通道的串扰特性比直通通道的串扰特性要好。该结果可以直观看出，因为直通通道的串扰是同源同频串扰，而分插复用通道的串扰是异源同频率串扰。

如果在插入比分出的信号衰减 $\alpha^{(3)}$，则可以使所有波长的串扰特性一致（Uniform）。而该种一致性在 loopback 配置中无法实现。

5.4、AWG 基本配置各通道串扰关系

表 5-1 给出了两种配置下各自通道的串扰特性对比。

表 5-1、AWG 基本配置各通道串扰关系

	直通通道（Pass Channel）	分插复用通道（Add/Drop Channel）
loopback 配置	$R_c = \frac{\beta}{\alpha^2} + \beta = \beta(1+\frac{1}{\alpha^2})$，记为 $R_c^{L,P}$	$R_c = \frac{\beta}{\alpha}$，记为 $R_c^{L,A}$
foldback 配置	$R_c = \frac{7\beta^2}{\alpha^2}$，记为 $R_c^{F,P}$	$R_c = \frac{7\beta^2}{\alpha}$，记为 $R_c^{F,A}$

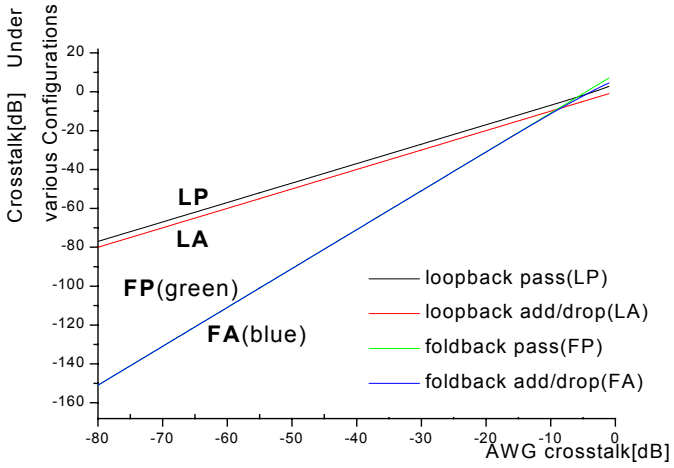


图 5-3、不同配置的串扰与 AWG 本身串扰的关系

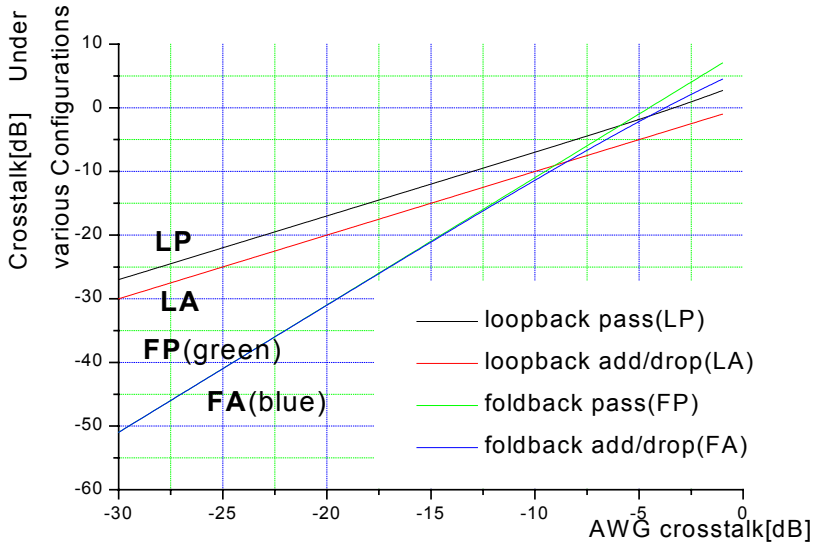


图 5-4、不同配置的串扰与 AWG 本身串扰的关系

图 5-3、图 5-4 是不同配置的串扰与 AWG 本身的串扰的关系图。我们定义 AWG 的串扰为（7）式。一般$0 \le \beta < \alpha \le 1$，所以，应该考虑 AWG 的串扰小于 0 的情况。我们考虑 AWG 本身的串扰范围从-80dB 变化到-1dB，该范围是足够大的。-80dB 的串扰可以看为几乎没有串扰，而-1dB 的串扰却是非常大。我们将图 5-3 从-30dB 到-1dB 的图形扩大画为图 5-4。因为我们实验用 AWG 的串扰值在-25dB 左右。

从图 5-3 可以看出，对于相同的 AWG 本身的串扰值，四种配置的串扰曲线关系是（FA<FP<LA<LP）。我们还可以发现：1）、环回路径配置的串扰与 AWG 本身的串扰值相当，而折返路径配置的串扰值通常比 AWG 本身串扰值小很多。2）、只需 AWG 本身的串扰小于-6dB（LP 曲线与 FP 曲线的交点为$\alpha = -4 + \sqrt{23}$，此时 AWG 串扰为-5.91dB），foldback 路径的串扰特性就比 loopback 路径的串扰特性要好。而这一点是非常容易满足的，一般都是满足的。而且 AWG 本身的串扰越小，改善越明显。当 AWG 的串扰为-10dB 时，折返路径的串扰为-11dB，将串扰抑制了 1dB；而当 AWG 的串扰-15dB 时，折返路径的串扰为-21dB，串扰就被抑制了 6dB；当 AWG 的串扰为-20dB 时，折返路径的串扰为-31dB，串扰则抑制了 10dB。3）、可以看出，如果 AWG 的串扰特性越好，折返路径对串扰的抑制越明显。4）、对于相同的 AWG 本身的串扰值，环回路径配置分插复用波长的串扰值与直通信号的串扰略有区别（与 Add 功率和干线功率的比有关）；而且，折返路径对于分插信号和直通信号，其串扰特性几乎相同（在图上表现为两根串扰曲线几乎重叠），即可以说，其串扰特性是一致的（Uniform）。

【参考文献】

1、Y. Tachikawa, et al, Arrayed-Waveguide Grating add-drop multiplexer with loop-back optical paths, Electronics Letters, Nov. 1993, Vol.29, No.24, pp2133-2134

2、Yoshiaki. Tachikawa, et al, Arrayed-Waveguide Grating multiplexer with Loop-Back Optical Paths and Its Applications, Journal of Lightwave Technology, VOL.14, NO.6, June 1996, pp977-983

3、H. Takahashi, et al, Anticrosstalk arrayed-waveguide add-drop multiplexer with foldback paths for penalty free transmission, Electronics Letters, Nov. 1994, Vol.30, No.24, pp2053-2055

4、M.Fukui, et al, 10 channel X 10Gbit/s WDM add/drop multiplexing/ transmission experiment over 240km of dispersion-shift fibre employing unequally-spaced arrayed-waveguide-grating ADM filter with fold-back configuration, Electronics Letters, Sept. 1995, Vol.31, No.20, pp1757-1759

5、Osamu Ishida, et al, Multichannel Frequency-Selective Switch Employing and Arrayed-Waveguide Grating Multiplexer with Fold-Back Optical Paths, IEEE Photon. Tech. Lett., VOL.6, NO. 10, Oct. 1994, pp1219-1221

6、K.Y.Liou, et al, A24-Channel WDM Transmitter for Access Systems Using a Loop-back Spectrally Sliced Light-Emitting Diode, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.10, NO2, FEB.1998,pp270-272

7、Haifeng Li, et al, Multiwavelength integrated 2x2 optical cross-connect switch and lambda-partitioner with 2xN phased-array waveguide grating in self-loopback configuration, OFC'98 Technical Digest, pp79-80

第五章、基于 AWG 的 OADM 基本配置串扰特性比较..... 68

【导论】..... 68
5.1、基本定义..... 68
5.2、环回配置直通通道和分插复用通道串扰分析..... 69
5.3、折返配置直通通道和分插复用通道串扰分析..... 71
5.4、AWG 基本配置各通道串扰关系..... 72
【参考文献】..... 74

攻读硕士学位期间完成的论文：

1. Henghua Deng, Deming Wu, Anshi Xu, *Research on Loss-imbalance Equalization on AWG-based OADM*, International Symposium on Optic and Optoelectronic Inspection and Control (OEIC CHINA 2000, by The International Society for Optical Engineering—**SPIE***)*, Beijing, P.R.China, Nov. 8-10, 2000, *Call Number: 4225-11, pp.48-52.*
2. Henghua Deng, Deming Wu, Anshi Xu, *Crosstalk Analysis of AWG-based OADM,* International Conference on Engineering and Technological Science *(ICETS2000*), Beijing, P.R.China, Oct.11-13, 2000, *SS220, pp.221-227.*
3. Henghua Deng, Deming Wu, Anshi Xu, *Crosstalk Contrast of AWG-based OADM with Loopback Paths and Foldback Paths,* International Conference on Engineering and Technological Science (ICETS2000), Beijing, P.R.China, Oct. 11-13, 2000, *SS221, pp.228-231.*
4. Henghua Deng, Deming Wu, Anshi Xu, *Design on Bidirectional Add/Drop Multiplexer in Bidirectional WDM Self-Healing Ring Networks*, *Proceedings of the 4th Annual Joint Workshop (on Modern Electronic Technologies and Applications)*, Workshop Organizing Committee by Peking University (China) & Kyungpook National University (Korea), Nov. 1999, *pp.106-111.*
5. Deming Wu, Henghua Deng, and Anshi Xu, *Research on Bidirectional OADMs(BADMs) Based on AWGs (invited)*, 2000 Japan-China Joint Meeting on Optical Fiber Science and Electromagnetic Theory (OFSET2000), Osaka Japan, December 4-6, 2000

致 谢

回顾在北京大学电子学系光通信国家重点实验室三年的研究生生活，我首先要向吴德明教授和徐安士教授两位导师表示真挚的感谢。两位导师勤奋严谨的治学态度和渊博的学术功底使我获益匪浅。当我提出一些“幼稚”和“出格”的想法时，能够从两位导师那里得到我最需要的支持与鼓励，能够在一个宽容和自由的学术环境中不断吸取营养，这一点将让我终生难忘。两位导师对我论文进展方面的大力关注和支持鼓励，对我论文工作提出的参考意见，是我能顺利完成学位论文的前提和保障。

感谢张肇仪教授、王子宇教授在我实验方面给予的支持和指导。他们丰富的经验和独到见解给我论文工作以有力支持。张老师对我实验条件的满足和关于实验的讨论使我的论文工作得以顺利进行。她对于实验的严谨态度，是我今后治学将永远遵循的原则。

感谢陶振宁博士在论文工作和实验上的最具体和极具价值的讨论和指导。在实验和理论分析两方面，陶师兄与我的讨论，是我许多方案和理论的来源，也使我纠正了不少错误，少走了不少弯路。感谢王勇博士以及戴恩光、陈章渊、殷洪玺、王大鹏四位博士后学者对我的指导和帮助。在我将要毕业的时候，对几位师兄的感谢之情难以言表。

我很荣幸，能够学习生活在一个精诚合作、蓬勃向上的集体中。感谢和陶振宁、王进、金鹏、辜帆，以及清华的宗磊，北邮的张杰、刘雪原等人在集体攻关国家 863 全光网课题时大家互相的帮助和鼓励。在这样一个紧密协作、共同奋斗的队伍中，除了极有价值的学术知识和实验经验以外，团结协作永不畏难的精神是我所收获的更宝贵财富。

感谢刘嘉老师、杨新梅老师对我的学习和论文工作的关心和照顾。

感谢实验室所有人员，在实验室几年融洽的生活给我留下了美好记忆，难忘我们融洽的合作和交流。

感谢所有关心、支持我的同学朋友和亲人！感谢对我的支持和鼓励。

评审委员会意见

论文研究了对 WDM 自愈环结构简化有重要意义的双向 OADM(BADM)节点，利用新型光器件 AWG 制作 BADM 是一种新的颇有潜力的方案。论文对上述问题的研究具有理论意义和实用价值。

论文设计了两种新型 BADM 结构，并且分别进行了实验研究和性能分析。其中提出的 AWG 型全双工双向 OADM 具有较强的性能优势，有很重要的应用前景。这些工作对 WDM 系统自愈和保护有重要参考价值。

论文还系统研究了基于 AWG 的 OADM 的同频串扰，并且用实验验证了其理论结果。并对 AWG 损耗不均衡性对系统性能的严重影响提出了补偿方案，成功地将原来 10dB 的不均衡性下降到 3dB。并将该补偿原理扩展到 AWG 级联情形，得出最好效果的极限表达式。最后论文对 AWG 的两种基本配置进行了性能对比。

论文理论叙述清楚，书写规范，理论计算和实验结果可信。论文工作表明邓恒华同学具有坚实的理论基础和系统的专门知识，有较强的独立开展科研工作的能力，在答辩中回答问题正确清楚。达到了硕士学位论文水平，经无记名投票，7 票一致建议授予硕士学位。