

文章编号: 0253-2239(2009)03-0602-06

基于扩展 Benes 结构的光交叉连接节点中 串扰积累特性分析

管爱红 张红梅 王玉华 傅洪亮

(河南工业大学信息学院, 河南 郑州 450001)

摘要 无论是光路交换还是光突发交换,都离不开有光开关矩阵组成的光交叉连接节点(OXC)。OXC 节点是组建波分复用光网络的基本单元,OXC 节点引入的串扰成为限制其投入实用的主要原因。理论分析了基于扩展 Benes (DB)结构和改进扩展 Benes(GMDB)结构的三种典型 OXC 结构中的带内串扰,结果表明基于 DB 结构和 GMDB 结构的 OXC 节点可以完全消除低于二阶的各类串扰。数值模拟了基于两种结构的 OXC 节点中带内串扰的积累特性,发现基于 GMDB 结构的 OXC 节点能大大降低串扰引起的功率代价,实验测量了 8×8 DB 结构和 GMDB 结构中串扰的影响,实验结果证实了 GMDB 结构的低串扰特点。同时与基于 DB 结构的 OXC 节点相比,基于 GMDB 结构的 OXC 节点对光开关串扰系数的要求放宽了 5 dB,大大降低了对光开关隔离度的要求。

关键词 光通信;光交叉连接;带内串扰;功率代价

中图分类号 TN 929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20092903.0602

Analysis of the Accumulation of Crosstalk in Optical Cross-Connects Based on the Benes Networks

Guan Aihong Zhang Hongmei Wang Yuhua Fu Hongliang

(College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract Optical cross-connects (OXCs) are key elements in all-optical WDM networks. OXC nodes generally consist of demultiplexers (DMUXs), space switching networks and multiplexers (MUXs). These nonideal devices give rise to signal leakage to the unintended channels and lead to the generation of crosstalk. Optical crosstalk imposes a major limit to the practical implementation of optical cross-connects. Intraband crosstalk characteristics of OXC composed by dilated Benes (DB) network and generally modified dilated Benes (GMDB) network are studied. Results show that OXC composed by DB and GMDB network can remove first order crosstalk successfully. At the same time, the power penalty induced by intraband crosstalk is studied by numerical simulation. Compared with DB network, GMDB network can eliminate crosstalk effectively. Simulations have been followed by experimental measurements. Experiments have confirmed and highlighted the beneficial effect of realizing OXCs architectures with GMDB networks. The crosstalk level of optical devices required in GMDB network is about 5 dB lower than that in DB network to keep the power penalty below 1 dB at the bit error rate of 10^{-9} .

Key words optical communications; optical cross-connect; intraband crosstalk; power penalty

1 引 言

近年来,随着通信需求的快速增长,密集波分复用(DWDM)网络获得了极大的发展,但是主干道的传输速率虽然已经很高,节点中的交换目前仍然是电的交换,需要进行光-电-光的转换,这不仅增加了成本,

而且使整个传输过程无法实现全光透明传输。光交叉连接节点(OXC)是将来实现光交换的重要技术,目前已成为一个研究的热点,OXC 通常由解复用器(DMUX)、复用器(MUX)以及光开关矩阵(SW)组成,由于这些器件的非理想特性,使得输入信号的一

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 河南工业大学博士基金(2007BS011)资助项目。

作者简介: 管爱红(1973—),女,博士,主要从事光纤通信和光电子器件方面的研究。

E-mail: guanaihonghust@yahoo.com.cn

部分功率泄漏到其他本不应该去的信道中,从而引起串扰^[1~6]。串扰可分为带间串扰和带内串扰,带间串扰指串扰信号的频率落在主信号频带外,这种串扰可以用滤波器滤出,对信号的影响不大;带内串扰指串扰信号的频率落在主信号的频带内,这种串扰用滤波器无法滤出,会在网络中大量积累,使系统的误码率增加,信噪比下降,严重影响网络的扩展性能,所以提高 OXC 的性能,消除带内串扰尤为重要。

在大多数分析串扰的文献中^[7~9],都没有具体给定光开关矩阵结构,仅仅考虑了 $N \times N$ 光开关矩阵引起的一阶串扰,随着光交换规模的扩大,光开关矩阵引起的串扰增加,光开关矩阵引起的各阶串扰都不能忽略,所以这些分析都是不充分的。本文分析了基于扩展 Benes(DB)结构^[10]和改进扩展 Benes(GMDB)结构^[11]的 OXC 节点中的各阶串扰,在此基础上对由多个节点组成的系统中串扰引起的串扰功率代价进行了数值模拟,比较了两种结构中带内串扰的积累特性,同时比较了基于 DB 结构和 GMDB 结构的 OXC 节点对单个器件串扰系数的要求,理论分析的结果得到了实验验证。

2 光交叉连接节点的拓扑结构

图 1~图 3 给出了三种典型的 OXC 节点拓扑结构,OXC 节点由 DMUX,SW,MUX 组成,每一根连到 DMUX 的光纤复用 N_λ 个波长,由 DMUX 解复用至 N_λ 个光纤输出,经 SW 交换之后由 MUX 和其他 $N_\lambda - 1$ 个波长复合之后输出, N_f 表示连接到节点的光纤链路数, N_λ 表示每根光纤复用的波长数。

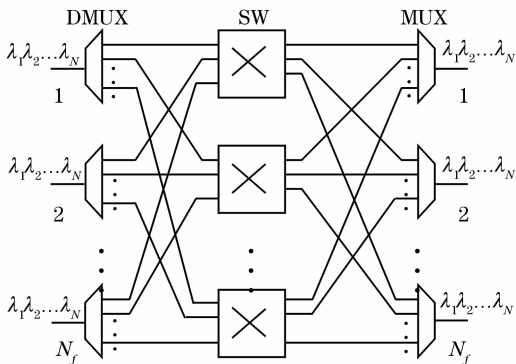


图 1 结构一可以处理 N_f 条光纤链路每条链路上复用 N_λ 个波长的 OXC,光开关矩阵交换相同波长信号

Fig.1 OXC1 node topology with N_f input fibers, each carrying N_λ wavelengths, where signals with same wavelength are grouped and ronted in each switching architecture

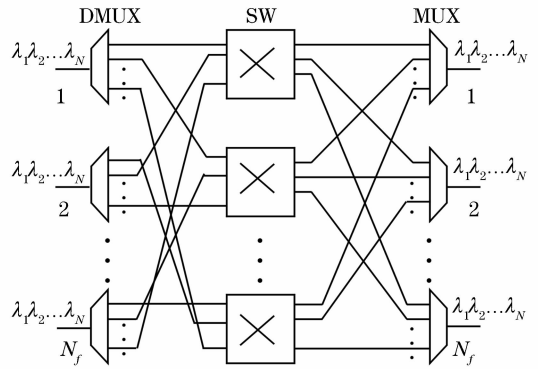


图 2 结构二可以处理 N_f 条光纤链路每条链路上复用 N_λ 个波长的 OXC,光开关矩阵交换不同波长信号

Fig.2 OXC2 node topology with N_f input fibers, each carrying N_λ wavelengths, where signals with different wavelength are grouped and routed in each switching architecture

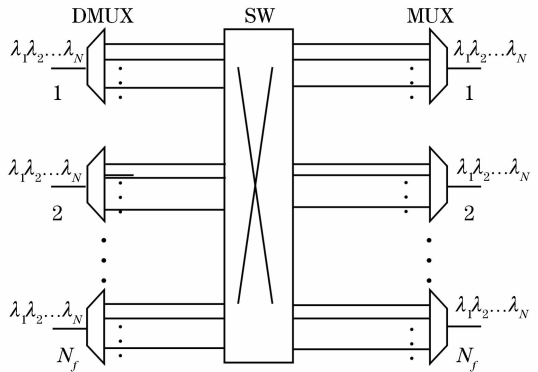


图 3 结构三可以处理 N_f 条光纤链路每条链路上复用 N_λ 个波长的一种典型的 OXC,仅使用一个 $N_f \times N_\lambda$ 的光开关矩阵

Fig.3 OXC3 node topology with N_f input fibers, each carrying N_λ wavelengths, where a signal $N_f \times N_\lambda$ switching architecture is used

结构一中相同的波长由同一个光开关矩阵实现交换,由于光开关的非理想耦合,将引起较大的带内串扰;结构二中当 $N_f \leq N_\lambda$ 时,每个光开关矩阵交换不同的波长,这时光开关矩阵不引起带内串扰;当 $N_f > N_\lambda$ 时至少有一个相同波长的信号在同一个光开关矩阵中进行交换。结构三只用一个 $(N_f N_\lambda \times N_f N_\lambda)$ 的光开关矩阵完成信道之间的交换。三种结构相比,结构一将引起较大的带内串扰,结构二引起的带内串扰最小,但控制算法相对复杂,结构三不具有模块化。

3 节点的串扰分析

一个 OXC 可能有三处会引发串扰:第一,DMUX 的非理想性,输入光纤的 N_λ 个波长经过

DMUX 后,每个波长都不可避免地携带其他 $N_\lambda - 1$ 个波长的信号;第二,在光开关矩阵中,不同的矩阵结构将引发不同程度的串扰;第三,MUX 的非理想性, N_λ 个波长复用时,DMUX 引起的带内串扰变成二阶带内串扰。光开关矩阵的结构有很多种,本文考虑由 DB 结构,GMDB 结构实现的光开关矩阵。

3.1 DB 结构

DB 结构是基于 Benes 结构为降低串扰而提出的,它通过器件的扩展以牺牲光开关的数目为代价,使串扰由低阶向高阶转换来达到降低串扰的目的。众多研究显示,DB 结构具有非常明显的优势:信噪比高,所需的直接耦合器数量少,衰减小,无阻塞。一个 $N \times N$ 的 DB 光交换结构由 $2 \text{ lb } N$ 级组成,每一级有 N 个光开关,图 4 是一个 4×4 的 DB 结构。经过 $N \times N$ 的 DB 结构信号受到的串扰为^[10]

$$P_{\text{noise}} = \chi_{\text{sw}}^2 \sum_{i=1}^{2k-1} i \cdot P = k(2k-1)\chi_{\text{sw}}^2 \cdot P, \quad (1)$$

χ_{sw}^2 为光开关的功率串扰系数, P 为输入光功率(假设 N 路信号幅度相同), $k = \text{lb } N$ 。

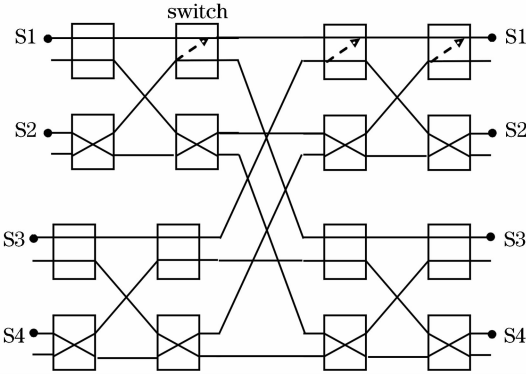


图 4 4×4 扩展 Benes 结构

Fig. 4 4×4 DB network

考虑第一条输入光纤中信道 λ_1 受到的串扰。结构一中, λ_1 经过 DMUX 泄漏到其他波长的部分只有在 MUX 复用时才与信号相遇,所以只有两者都有泄漏时才引起带内串扰,考虑三阶以下的串扰,OXC 节点的串扰系数为

$$C_{\text{node}} = k(2k-1)\chi_{\text{sw}}^2 + (N_\lambda - 1)\chi_{\text{dmux}}\chi_{\text{mux}}, \quad (2)$$

其中 $k = \text{lb } N_f$, χ_{mux} , χ_{dmux} 为 MUX,DMUX 的功率串扰系数。

对于结构二,当 $N_f \leq N_\lambda$ 时,每个 DB 结构交换不同的波长,所以 DB 结构本身不引起带内串扰,节点串扰系数为

$$C_{\text{node}} = k(2k-1)\chi_{\text{dmux}}\chi_{\text{sw}}^2 + k(2k-1)\chi_{\text{mux}}\chi_{\text{sw}}^2 + (N_\lambda - 1)\chi_{\text{dmux}}\chi_{\text{mux}}, \quad (3)$$

当 $N_f > N_\lambda$ 时,定义 $m = \text{int}[N_f/N_\lambda]$,通过合理的安排,每个 DB 结构中至多有 m 个相同的波长进行交换,当交换的矩阵足够大时,任意端口对串扰的贡献可近似为: $l_1 = k(2k-1)/(N_f-1)$,通过分析,节点的串扰系数为

$$C_{\text{node}} = (m-1)l_1\chi_{\text{sw}}^2 + (N_f - m)l_1\chi_{\text{sw}}^2\chi_{\text{dmux}} + (N_f - m)l_1\chi_{\text{sw}}^2\chi_{\text{mux}} + (N_\lambda - 1)\chi_{\text{dmux}}\chi_{\text{mux}}. \quad (4)$$

结构三中,光开关矩阵由一个 $(N_f \cdot N_\lambda) \times (N_f \cdot N_\lambda)$ 的 DB 结构组成,同结构二的分析,节点的串扰系数为

$$C_{\text{node}} = l'_1(N_f - 1)\chi_{\text{sw}}^2 + (N_\lambda - 1)\chi_{\text{mux}}\chi_{\text{dmux}} + l'_1 N_f(N_\lambda - 1)\chi_{\text{sw}}^2\chi_{\text{mux}} + l'_1 N_f(N_\lambda - 1)\chi_{\text{sw}}^2\chi_{\text{dmux}}, \quad (5)$$

式中 $k' = \text{lb}(N_f \cdot N_\lambda)$, $l'_1 = \left[\frac{k'(2k'-1)}{N_f \cdot N_\lambda - 1} \right]$ 。

3.2 GMDB 结构

为了获得更好的信噪比,Wojciech 提出了 GMDB 结构^[11],图 5 是一个 4×4 的 GMDB 结构,它是在不改变连接方式的情况下,通过调节端口的顺序,以组成尽可能多的 4×4 基本单元,在 4×4 基本单元中插入一些(ON-OFF)光开关来降低串扰。分析发现,除了第一个 4×4 基本单元之外,信号每经过一个 4×4 基本单元就有一个二阶串扰加进来,GMDB 结构共有 k 级基本单元组成, $k = \text{lb } N$,所以,一个 $N \times N$ 的 GMDB 结构引起的串扰功率为

$$P_{\text{noise}} = \chi_{\text{sw}}^2(k-1)P, \quad (6)$$

重复以上的分析,三种 OXC 节点的串扰系数分别为

$$C_{\text{node}} = \chi_{\text{sw}}^2(k-1) + (N_\lambda - 1)\chi_{\text{mux}}\chi_{\text{dmux}}, \quad (7)$$

$$C_{\text{node}} = (k-1)\chi_{\text{mux}}\chi_{\text{sw}}^2 + (k-1)\chi_{\text{dmux}}\chi_{\text{sw}}^2 + (N_\lambda - 1)\chi_{\text{mux}}\chi_{\text{dmux}}, \quad (8)$$

$$C_{\text{node}} = l_2 N_\lambda \chi_{\text{mux}}\chi_{\text{sw}}^2 + l_2 N_\lambda \chi_{\text{dmux}}\chi_{\text{sw}}^2 + (N_\lambda - 1)\chi_{\text{mux}}\chi_{\text{dmux}} + l_2(N_f - N_\lambda - 1)\chi_{\text{sw}}^2, \quad (9)$$

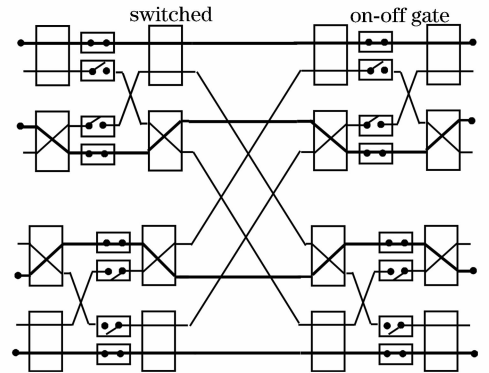


图 5 4×4 各级改进的扩展 Benes 结构

Fig. 5 4×4 GMDB network

$$C_{\text{node}} = l'_2(N_f - 1)\chi_{\text{sw}}^2 + l'_2 N_f(N_\lambda - 1)\chi_{\text{sw}}^2\chi_{\text{mux}} + l'_2 N_f(N_\lambda - 1)\chi_{\text{sw}}^2\chi_{\text{dmux}} + (N_\lambda - 1)\chi_{\text{mux}}\chi_{\text{dmux}}, \quad (10)$$

式中 $k = \text{lb } N_f, k' = \text{lb}(N_f \cdot N_\lambda), l_2 = \frac{k-1}{N_f-1},$

$l'_2 = \frac{k'-1}{N_f \cdot N_\lambda - 1},$ (7)式,(10)式分别为结构一、结构三

的节点串扰系数,(8)式,(9)式分别为结构二在 $N_f \leq N_\lambda, N_f > N_\lambda$ 时的节点串扰系数。

4 串扰的数值模拟

由于大多数系统都采用固定判决电平,所以这里只讨论这种情况。功率代价为^[12]

$$\begin{aligned} XP(\text{dB}) &= 10\lg\left(\frac{i_p}{i_0}\right) = \\ &= 10\lg\left(\frac{Q'}{Q}\right) - 5\lg(1 - 4Q'^2\sigma_{\text{RIN}}^2) \approx \\ &= -5\lg(1 - 4Q'^2\sigma_{\text{RIN}}^2), \end{aligned} \quad (11)$$

式中 i_p 表示有串扰时“1”码对应的光电流, i_0 表示没有串扰时“1”码对应的光电流,当要求系统的误码率为 10^{-9} 时, $Q = 6, Q' = 5.9, \sigma_{\text{RIN}}^2$ 为归一化的串扰功率,在此就是节点的串扰系数。一路光信号从发射端到接受端中间要经过多个 OXC 节点,光信号经过的 OXC 节点的个数称为节点数,能串联的 OXC 节点数是衡量 DWDM 网络扩展性的主要指标之一,当多个节点串联时带内串扰发生积累,经过 N_n 个节点之后,总串扰系数为

$$C_{\text{total}} = N_n C_{\text{node}}. \quad (12)$$

图 6~9 分别为不同 N_f, N_λ 情况下三种 OXC 节点中串扰引起的功率代价和串连节点数的关系。比较图 6(a),图 7(a),图 8(a)发现,对于由 DB 结构实现的三种 OXC 结构,结构一引起的功率代价随串连的节点数 N_n 增加得最快,其次是结构三,结构二中功率代价随串连节点数增加最慢,这是因为结

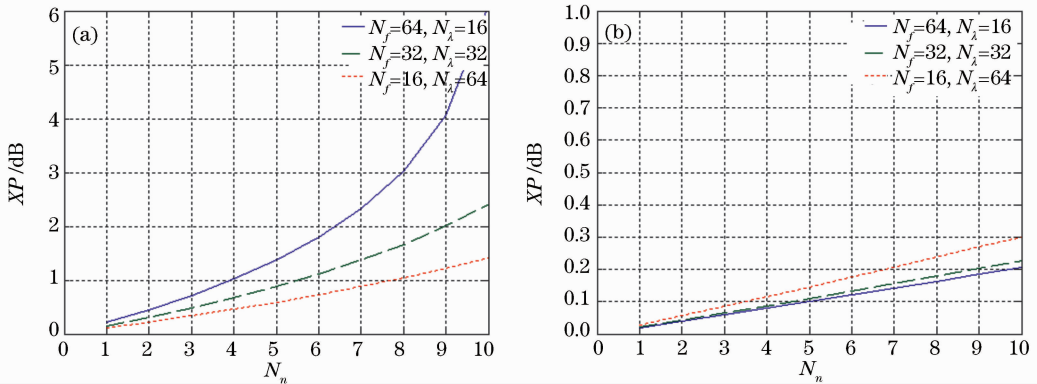


图 6 结构一在 $\chi_{\text{dmux}} = \chi_{\text{mux}} = -30$ dB, $\chi_{\text{sw}} = -25$ dB 的条件下系统功率代价和串连节点数的关系图。(a) DB 结构;(b) GMDB 结构

Fig. 6 System penalty versus node number N_n in OXC1 with $\chi_{\text{dmux}} = \chi_{\text{mux}} = -30$ dB, $\chi_{\text{sw}} = -25$ dB. (a) DB network; (b) GMDB network

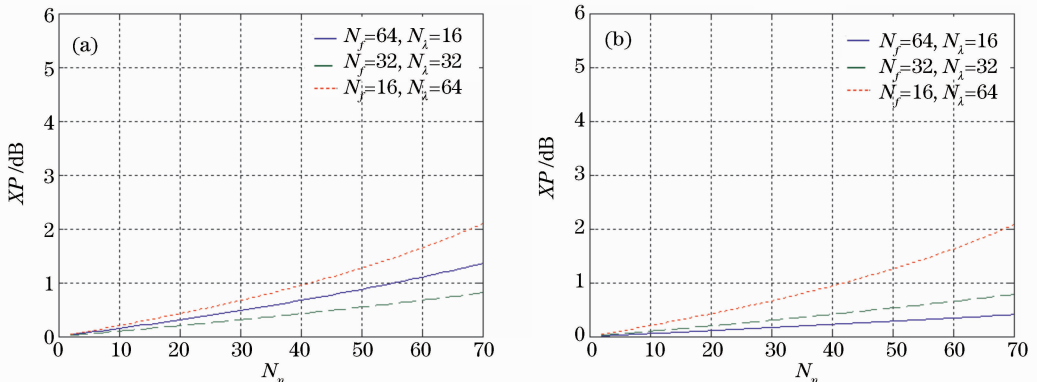


图 7 结构二在 $\chi_{\text{dmux}} = \chi_{\text{mux}} = -30$ dB, $\chi_{\text{sw}} = -25$ dB 的条件下系统功率代价和串连节点数的关系图。(a) DB 结构;(b) GMDB 结构

Fig. 7 System penalty versus node number N_n in OXC2 with $\chi_{\text{dmux}} = \chi_{\text{mux}} = -30$ dB, $\chi_{\text{sw}} = -25$ dB. (a) DB network; (b) GMDB network

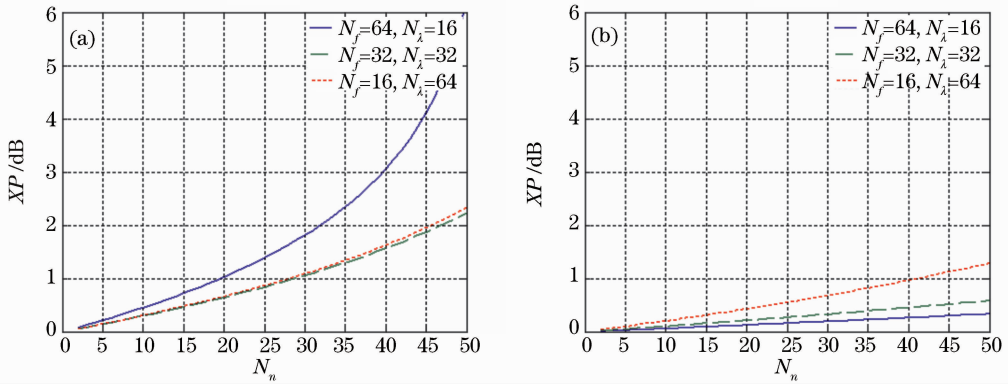


图 8 结构三在 $\chi_{\text{dmux}} = \chi_{\text{mux}} = -30$ dB, $\chi_{\text{sw}} = -25$ dB 的条件下系统功率代价和串连节点数的关系图。(a) DB 结构; (b) GMDB 结构

Fig. 8 System penalty versus node number N_n in OXC3 with $\chi_{\text{dmux}} = \chi_{\text{mux}} = -30$ dB, $\chi_{\text{sw}} = -25$ dB. (a) DB network; (b) GMDB network

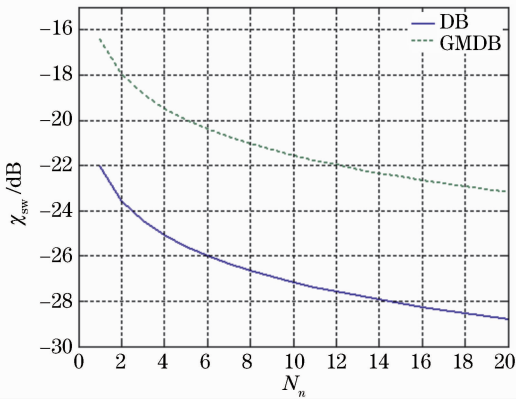


图 9 在系统功率代价 $XP = 1$ dB, $N_f = 64, N_\lambda = 16$, $\chi_{\text{dmux}} = \chi_{\text{mux}} = -30$ dB 的条件下, 结构一对 χ_{sw} 的要求和串连节点数的关系

Fig. 9 Calculation χ_{sw} versus the node number N_n in OXC1 with $XP = 1$ dB, $N_f = 64, N_\lambda = 16, \chi_{\text{dmux}} = \chi_{\text{mux}} = -30$ dB

构一中, 同一个光开关矩阵交换相同的波长, 结构三中, N_f 个相同的波长在同一个光开关矩阵交换, 所以这两种结构中, 光开关引起的带内串扰占主导地位, 而结构二中同一个光开关矩阵交换不同的波长, 所以光开关矩阵引起的带内串扰较小, 三种结构中 DMUX, MUX 对引起的带内串扰是相同的。比较图 6, 图 8 中 (a), (b) 可以看出, 在结构一和结构三中, 采用 GMDB 结构时系统的功率代价远远小于采用 DB 结构时系统的功率代价, 这是由于结构一和结构三中, 光开关交换相同波长, 引起的二阶串扰较大, GMDB 结构能有效减少二阶串扰的个数, 从而减小串扰功率代价。比较图 7(a), (b), 当 $N_f = 64, N_\lambda = 16$ 时, 结构二采用 GMDB 结构对串扰性能的改进明显, $N_f = 32, N_\lambda = 32$ 和 $N_f = 16, N_\lambda = 64$

时, 结构二的抗串扰性能没有改进, 这是因为结构二中, 当 $N_f \leq N_\lambda$ 时, 光开关矩阵交换不同的波长, 光开关矩阵本身不引起带内串扰, DMUX, MUX 对引起的二阶串扰占主导地位, 所以采用 GMDB 结构对系统的功率代价改进不明显。

图 9 比较了结构一中采用 DB 结构和 GMDB 结构, 在功率代价为 1 dB 的情况下, 对光开关串扰系数的要求与串连节点数的关系。从图中可以看出, 随着串连节点的增加, GMDB 结构对光开关的要求相对于 DB 结构放宽大约 5 dB, 这表明光交换结构的选择对消除串扰尤为重要。

5 实验研究

实验比较了基于 DB 结构和 GMDB 结构的结构一中带内串扰的影响, 实验中采用的 DB 结构和 GMDB 结构为 8×8 , 由于复用器和解复用器引起的串扰一样, 实验仅仅比较 8×8 的 DB 结构和 GMDB 结构中串扰的影响, 通过比较实验结果可以比较基于 DB 结构和 GMDB 结构的结构一中带内串扰的影响。

实验中用 Oplink 公司生产的机械式光开关来搭建光开关矩阵, 2×2 光开关的串扰系数为 -20 dB, 1×1 开/关门的消光比为 -50 dB。实验框图如图 10 所示, 信号发生器产生的光信号首先经过 EDFA1 放大, 并经可调滤波器滤除 ASE 噪声后, 由一个 1×8 的耦合器分为 8 路, 8 路信号分别输入 8×8 的 DB 和 GMDB 结构, 光开关矩阵输出的信号经 EDFA2 又一次放大以及滤波之后, 由误码仪和示波器进行测试。实验所用光源被 2.5 Gb/s 的 NRZ 码直接调制, 两个 EDFA 的增益为 25 dB, 噪声

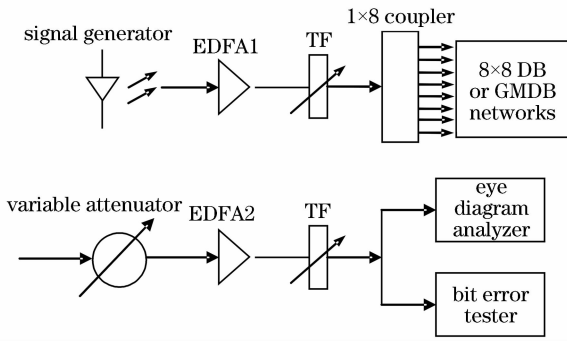


图 10 实验框图

Fig. 10 Experimental setup

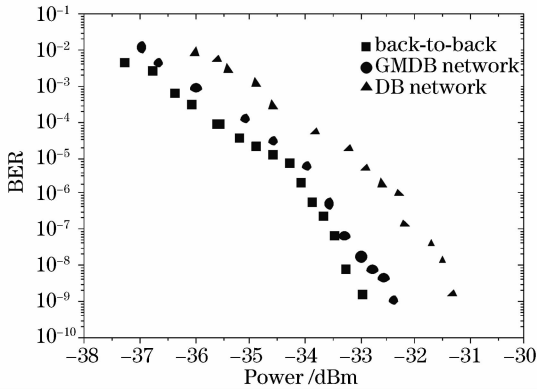


图 11 固定判决门限下误码率与接受光功率的关系

Fig. 11 BER measured with a fixed decision-threshold setting

指数为 5~6 dB。

图 11 给出了经过 8×8 的 DB 和 GMDB 结构信号的误码率与接受光功率的关系,同时给出纯信号误码率曲线作为参考,图中 Back-to-Back 表示纯信号,DB network 经过 Benes 结构之后信号的眼图几乎闭合,因此在 Benes 结构中串扰严重降低了信号的质量;经过 DB 结构信号眼图发生部分闭合;但是经过 IDB 结构以及 GIDB 结构之后信号的眼图与纯信号的眼图相比几乎没有发生闭合,通过比较眼图可以得到这样的结论:IDB 结构和 GIDB 结构可以有效地减少串扰的影响。

6 结 论

理论分析了基于 DB 结构和 GMDB 结构的三种典型 OXC 结构中的带内串扰,结果表明基于 DB 结构和 GMDB 结构的 OXC 节点可以完全消除低于二阶的各类串扰。数值模拟了基于两种结构的

OXC 节点中带内串扰的积累特性,发现基于 GMDB 结构的 OXC 节点能大大降低串扰引起的功率代价,实验测量了 8×8 的 DB 结构和 GMDB 结构中串扰的影响,实验结果证实了 GMDB 结构的低串扰特点。同时与基于 DB 结构的 OXC 节点相比,基于 GMDB 结构的 OXC 节点对光开关串扰系数的要求放宽了 5 dB,这大大降低了对光开关隔离度的要求,说明在器件性能有限的基础上,可以通过设计适当的光开关矩阵结构来减小串扰的影响。

参 考 文 献

- 1 Chai Teck Yoong, Cheng Tee Hiang, Ye Yabin *et al.*. Inband crosstalk analysis of optical cross-connect architectures [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2):688~701
- 2 Gyselings Tim, Morthier Geert, Baets Roel. Crosstalk analysis of multiwavelength optical cross connects [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(8):1273~1283
- 3 Giliner Lars, Larsen Claus Popp, Gustavsson Mats. Scalability of optical multiwavelength switching networks; crosstalk analysis [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(1):58~67
- 4 Miao Qingyuan, Hu Zhenhua, Wang Tao *et al.*. Scalable optical switch array based on semiconductor optical amplifier [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4):288~292
- 5 缪庆元,胡振华,王涛等. 基于半导体光放大器的可扩展型光开关矩阵[J]. 激光技术, 2003, **27**(4):288~292
- 6 Dong Zuoren, Xia Zhiping, Qin Shibo *et al.*. Analyses and experimental study of a $N \times N$ optical switch using two-facet reflective mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 234~238
- 7 董作人,夏志平,秦世博等. 基于双面反射镜的 $N \times N$ 光开关的特性分析和实验研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 234~238
- 8 Guan Aihong, Zhang Dexian, Sun Junqiang. SOA induced crosstalk in WDM network and its mitigation techniques[J]. 光学学报, 2008, **28**(8): 1445~1449
- 9 管爱红,张德贤,孙军强. 半导体光放大器引起的串扰及其抑制技术[J]. 光学学报, 2008, **28**(8): 1445~1449
- 10 Shen Yunfeng, Lu Kejie, Gu Wanyi. Coherent and incoherent crosstalk in WDM optical networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5):759~764
- 11 Cheng Zhenjie, Yu Chongxiu. Intraband crosstalk in WDM network [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(1):21~26
- 12 程振杰,余重秀. WDM 网中同频串扰的研究[J]. 光子学报, 2001, **30**(1):21~26
- 13 Zhou Jingyu, Cadeddu Roberto, Emillio Casaccia *et al.*. Crosstalk in multiwavelength optical cross-connect networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):1423~1435
- 14 Padmanabhan Krishnan, Netravai Arunn. Dilated network for photonic switching [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1987, **35**(12): 1357~1365
- 15 Wojciech Kabacinski. Modified dilated Benes networks for photonic switching [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1999, **47**(8): 1253~1259
- 16 Takahashi Hiroshi, Oda Kazuhiro, Toba Hiromu. Impact of crosstalk in arrayed-waveguide multiplexer on $N \times N$ optical interconnection [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):1097~1105