

引用格式: TANG Yu, WU Baojian, YAN Wei, et al. Crosstalk Coherence in Optical Switching Chips[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052418

汤宇, 武保剑, 严伟, 等. 光交换芯片中串扰的相干特性研究[J]. 光子学报, 2023, 52(10):1052418

光交换芯片中串扰的相干特性研究

汤宇, 武保剑, 严伟, 文峰, 邱昆

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

摘要:以马赫-曾德尔干涉仪光开关单元组成的 4×4 Benes 光交换芯片为例, 研究了光交换芯片中的相干问题。理论推导了光交换芯片输出端口与输入端口之间光场的变换关系, 揭示了信号和串扰的产生规律, 分析了光开关状态对串扰相干强度的影响。仿真研究表明: 相干串扰对信号插损的影响可以忽略; 在不同光开关组合状态下, 光交换芯片的串扰波动可达 7 dB。根据相干光束之间的相位关系, 提出一种等效去除光交换芯片中串扰相干性的方法。另外, 对串扰大小对通信误码率的影响进行了实验评估。

关键词:光交换芯片; 相干效应; Benes 结构; 马赫-曾德尔干涉仪; 串扰

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235210.1052418

0 引言

随着信息技术的快速发展、网络通信的普及以及“光进铜退”策略的实施, 对于具备低时延和高速率的光交换节点的需求日益增长。传统的光-电-光(Opto-Electro-Opto, O-E-O)交换方式存在着“电子瓶颈”的限制, 延迟大、功耗高。全光交换的基本概念是完全在光域从源到目的传输数据信号, 具有信号格式、比特率、协议透明等诸多优点^[1]。因此, 人们利用大规模全光交换开关矩阵, 在光传输层构建动态、灵活的网络结构^[2]。

波分复用全光交换节点可基于硅基波导光开关阵列来实现^[3-5], 具有体积小、功耗低、切换速度快等优势^[5-7], 因而在未来的空分复用全光交换节点中也有应用潜力^[8-12]。硅基光交换芯片中, 光波导大多设计为单模, 且光波导长度往往小于信号光的相干长度, 很容易满足光的相干条件。2014年, LU Liangjun 等^[13]在测量由马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)构建的 4×4 Benes 光开关阵列传输谱线时, 发现有部分串扰谱线表现为周期性震荡, 分析表明, 这是由于两束功率相近的串扰光束发生干涉引起的, 交换芯片串扰最大时往往发生在干涉谱线震荡的峰值。类似的相干现象也会出现在更大规模的单模光交换芯片^[14, 15]以及 2×2 少模光交换芯片中^[16]。目前, 针对光交换芯片串扰问题, 主要聚焦于光开关单元的优化方面, 而相干效应对交换芯片性能的影响研究较少^[17]。

本文研究光交换芯片中的相干现象, 以 2×2 MZI 光开关单元构建的 4×4 Benes 光开关阵列为例, 理论推导了光交换芯片输出端口与输入端口之间的光场变换关系, 仿真相干效应对光交换芯片的插损和串扰性能的影响。通过控制光开关单元之间连接波导的相移方式可以使得输出相干光束之间的相位正交, 从而达到等效去除交换芯片中串扰相干效应。本文的研究结果可为硅基光交换芯片的设计和串扰抑制提供参考。

1 光开关阵列的传输模型

1.1 MZI 光开关单元

光开关单元是光开关阵列的基本单元, 也是光交换芯片中串扰的重要来源。多个 2×2 光开关单元采用

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62171078)

第一作者: 汤宇, 846497786@qq.com

通讯作者: 武保剑, bjwu@uestc.edu.cn

收稿日期: 2023-07-11; 录用日期: 2023-08-30

<http://www.photon.ac.cn>

拓扑结构构成 $n \times n$ 光开关阵列^[3]。由多模干涉仪 (Multimode Interference, MMI) 构成的 2×2 MZI 光开关单元, 结构如图 1 所示, 它由两个 3 dB MMI 和上下两臂的移相器构成。实际中, 光开关设计的不理想或由于加工工艺的不完美, 会导致光泄露到非目标端口, 形成串扰。对于 MZI 型光开关单元来说, 串扰来源可归结为三个方面: 1) 两个 MMI 分光不均匀; 2) 上下两臂的相位在调制时存在误差; 3) 上下两臂的损耗不一致^[13]。

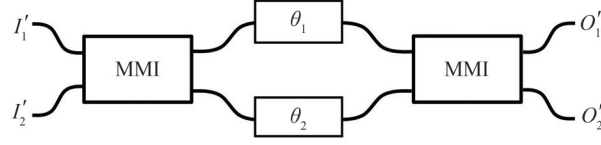


图 1 基于 MZI 的 2×2 光开关单元结构

Fig. 1 Structural diagram of 2×2 MZI optical switch

实际中, 可通过不断地微调 MZI 上下臂的移相器来降低调相误差, 在两臂同时添加移相器的方式可避免它们的损耗不同^[14]。因此, 这里只考虑 MMI 器件分光不均匀带来的开关性能劣化。设前后两个 MMI 器件的分光误差分别为 Δ_1 和 Δ_2 , 则它们的光场传输矩阵可分别表示为

$$\begin{cases} \mathbf{t}_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\Delta_1} & i\sqrt{1+\Delta_1} \\ i\sqrt{1+\Delta_1} & \sqrt{1-\Delta_1} \end{bmatrix} \\ \mathbf{t}_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\Delta_2} & i\sqrt{1+\Delta_2} \\ i\sqrt{1+\Delta_2} & \sqrt{1-\Delta_2} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

显然, 当 $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$ 时, 即不存在分光误差, 对应于理想的 3 dB 耦合器。若上下两臂波导的相移分别为 θ_1 和 θ_2 , 并且它们有相同的光场透射系数 R , 则整个光开关单元输出光场 O' 与输入光场 I' 的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} O'_1 \\ O'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\Delta_2} & i\sqrt{1+\Delta_2} \\ i\sqrt{1+\Delta_2} & \sqrt{1-\Delta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R e^{i\theta_1} & 0 \\ 0 & R e^{i\theta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\Delta_1} & i\sqrt{1+\Delta_1} \\ i\sqrt{1+\Delta_1} & \sqrt{1-\Delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

当 $\theta_2 = \theta_1$ 时, 光开关单元处于交叉 (Cross) 状态, 即 $I'_1 \rightarrow O'_2, I'_2 \rightarrow O'_1$; 当 $\theta_2 = \theta_1 + \pi$ 时, 光开关单元处于直通 (Bar) 状态, 即 $I'_1 \rightarrow O'_1, I'_2 \rightarrow O'_2$ 。

为了简化表示, 将光开关单元的状态用 m 表示, 当 $m=0$ 时, 表示 Cross 状态; 当 $m=1$ 时, 表示 Bar 状态。省略公共因子 $e^{i\theta_1}$, 则式 (2) 重新表示为

$$\begin{bmatrix} O'_1 \\ O'_2 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} m a_1 + (1-m) b_0 & -i m b_1 + i(1-m) a_0 \\ i m b_1 + i(1-m) a_0 & -m a_1 + (1-m) b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, a_0, a_1, b_0, b_1 分别表示为

$$\begin{cases} a_0 = \frac{\sqrt{1+\Delta_2} \sqrt{1-\Delta_1} + \sqrt{1-\Delta_2} \sqrt{1+\Delta_1}}{2} \\ a_1 = \frac{\sqrt{1-\Delta_1} \sqrt{1-\Delta_2} + \sqrt{1+\Delta_1} \sqrt{1+\Delta_2}}{2} \\ b_0 = \frac{\sqrt{1-\Delta_1} \sqrt{1-\Delta_2} - \sqrt{1+\Delta_1} \sqrt{1+\Delta_2}}{2} \\ b_1 = \frac{\sqrt{1+\Delta_2} \sqrt{1-\Delta_1} - \sqrt{1-\Delta_2} \sqrt{1+\Delta_1}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

显然, $a_i^2 + b_i^2 = 1, \lim_{\Delta_1 \rightarrow 0, \Delta_2 \rightarrow 0} a_i = 1, \lim_{\Delta_1 \rightarrow 0, \Delta_2 \rightarrow 0} b_i = 0 (i=1, 2)$ 。由式 (3) 可知, a_i 和 b_i 与光开关单元的插损和串扰相关。为了方便分析, 假设交叉与直通状态的插损和串扰近似相同, 即 $a_0 \approx a_1 = a, b_0 \approx b_1 = b$ 。若用 $(a_b)_{ij}$ 表示相应光开关处于 Bar 状态 ($m_{ij}=1$) 时取 a , 处于 Cross 状态 ($m_{ij}=0$) 时取 b , 用 \bar{a} 和 \bar{b} 分别表示 $-a$ 和 $-b$, 则式 (3) 可进一步简写为

$$\begin{bmatrix} O_1' \\ O_2' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} (a_b)_{ij} & i(\bar{b}_a)_{ij} \\ i(b_a)_{ij} & (\bar{a}_b)_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1' \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (5)$$

对 $a_0 \approx a_1 = a, b_0 \approx b_1 = b$ 时分光误差 Δ_1 和 Δ_2 的对应范围进行分析。由式(4)给出 $a_0 - a_1$ 与 $b_0 - b_1$ 的二维图,如图2所示。由图2可知,若要求 a_0 与 a_1, b_0 与 b_1 相差不大于0.01,则要求的分光误差仅取决于 Δ_1 参数,即 $|\Delta_1| \leq 0.01$,等价于第一个 MMI 耦合效率变化为 $50\% \pm 0.5\%$ 。

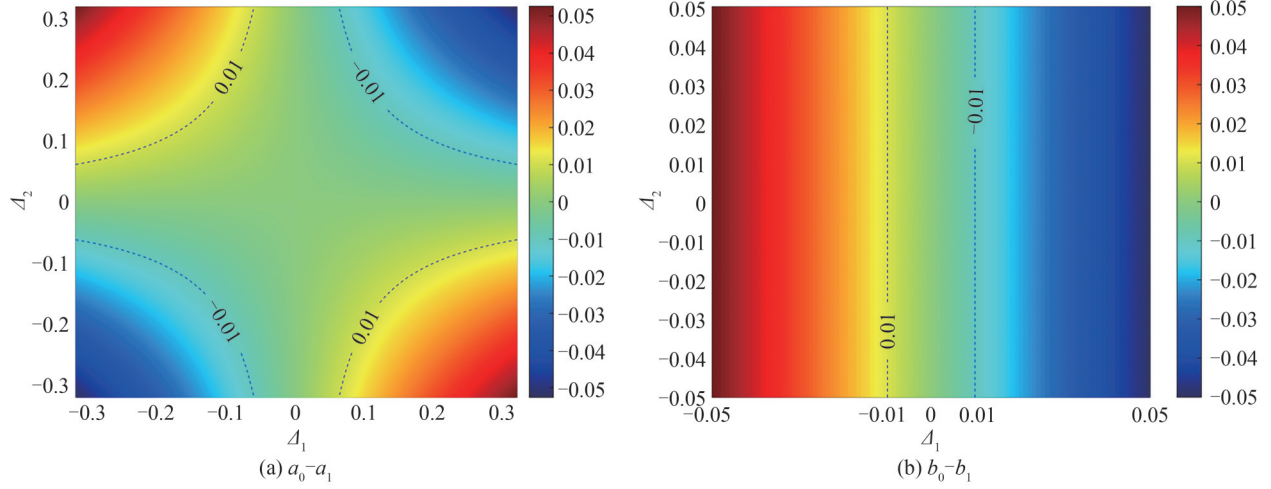


图2 a_i 和 b_i 对分光误差的依赖性

Fig. 2 Dependences of a_i and b_i on the beam splitting errors

1.2 光交换芯片的传输矩阵

以 4×4 Benes 光开关阵列为例进行分析,如图3所示,从左至右由三级光开关组成,每级光开关包括上下两个光开关单元,用 m_{ij} 表示,每级光开关的传输矩阵用 S_j 表示为

$$S_j = \begin{bmatrix} s_{11}^{(j)} & s_{12}^{(j)} & 0 & 0 \\ s_{21}^{(j)} & s_{22}^{(j)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_{33}^{(j)} & s_{34}^{(j)} \\ 0 & 0 & s_{43}^{(j)} & s_{44}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $j=1,2,3$ 表示光开关的级序。

每级开关之间的连接矩阵分别表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{21} = \begin{bmatrix} \exp(i\theta_1') & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp(i\theta_3') & 0 \\ 0 & \exp(i\theta_2') & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(i\theta_4') \end{bmatrix} \\ L_{32} = \begin{bmatrix} \exp(i\theta_1'') & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \exp(i\theta_3'') & 0 \\ 0 & \exp(i\theta_2'') & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(i\theta_4'') \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (7)$$

式中, $\theta_1' \sim \theta_4'$ 和 $\theta_1'' \sim \theta_4''$ 分别表示相邻光开关单元之间连接波导引入的相移,这里忽略了连接波导的传输损耗。于是, 4×4 开关阵列的输出光场 O 和输入光场 I 满足关系

$$\begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ O_3 \\ O_4 \end{bmatrix} = S_3 \cdot L_{32} \cdot S_2 \cdot L_{21} \cdot S_1 \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

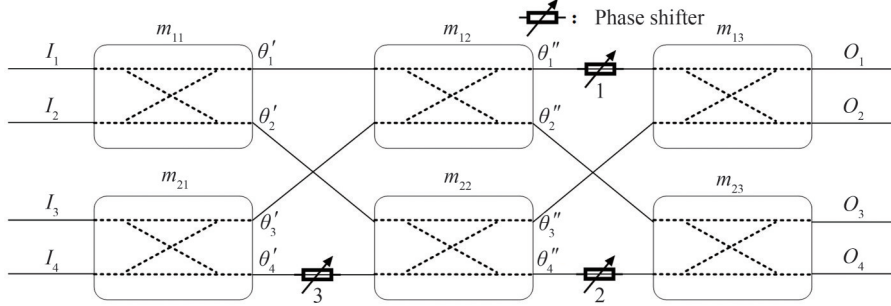


图3 Benes拓扑结构的4×4光开关阵列
Fig. 3 4×4 Benes optical switch array

假设6个光开关单元具有相同的性能,由式(5)~(8)可知

$$\begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ O_3 \\ O_4 \end{bmatrix} = R^3 I_1 \begin{bmatrix} (a_b)_{11}(a_b)_{12}(a_b)_{13} \exp [i(\theta_1' + \theta_1'')] - (b_a)_{11}(a_b)_{22}(\bar{b}_a)_{13} \exp [i(\theta_2' + \theta_3'')] \\ i(a_b)_{11}(a_b)_{12}(b_a)_{13} \exp [i(\theta_1' + \theta_1'')] + i(b_a)_{11}(a_b)_{22}(\bar{a}_b)_{13} \exp [i(\theta_2' + \theta_3'')] \\ i(a_b)_{11}(b_a)_{12}(a_b)_{23} \exp [i(\theta_1' + \theta_2'')] - i(b_a)_{11}(b_a)_{22}(\bar{b}_a)_{23} \exp [i(\theta_2' + \theta_4'')] \\ -(a_b)_{11}(b_a)_{12}(b_a)_{23} \exp [i(\theta_1' + \theta_2'')] - (b_a)_{11}(b_a)_{22}(\bar{a}_b)_{23} \exp [i(\theta_2' + \theta_4'')] \end{bmatrix} +$$

$$R^3 I_2 \begin{bmatrix} i(\bar{b}_a)_{11}(a_b)_{12}(a_b)_{13} \exp [i(\theta_1' + \theta_1'')] + i(\bar{a}_b)_{11}(a_b)_{22}(\bar{b}_a)_{13} \exp [i(\theta_2' + \theta_3'')] \\ (\bar{a}_b)_{11}(a_b)_{22}(\bar{a}_b)_{13} \exp [i(\theta_1' + \theta_1'')] - (\bar{b}_a)_{11}(a_b)_{12}(b_a)_{13} \exp [i(\theta_2' + \theta_3'')] \\ -(\bar{b}_a)_{11}(b_a)_{12}(a_b)_{23} \exp [i(\theta_1' + \theta_2'')] + (\bar{a}_b)_{11}(b_a)_{22}(b_a)_{23} \exp [i(\theta_2' + \theta_4'')] \\ i(\bar{a}_b)_{11}(b_a)_{22}(\bar{a}_b)_{23} \exp [i(\theta_1' + \theta_2'')] + i(\bar{b}_a)_{11}(b_a)_{12}(\bar{b}_a)_{23} \exp [i(\theta_2' + \theta_4'')] \end{bmatrix} +$$

$$R^3 I_3 \begin{bmatrix} i(a_b)_{21}(\bar{b}_a)_{12}(a_b)_{13} \exp [i(\theta_3' + \theta_1'')] - i(b_a)_{21}(\bar{b}_a)_{22}(\bar{b}_a)_{13} \exp [i(\theta_4' + \theta_3'')] \\ -(a_b)_{21}(\bar{b}_a)_{12}(b_a)_{13} \exp [i(\theta_3' + \theta_1'')] - (b_a)_{21}(\bar{b}_a)_{22}(\bar{a}_b)_{13} \exp [i(\theta_4' + \theta_3'')] \\ (a_b)_{21}(\bar{a}_b)_{12}(a_b)_{23} \exp [i(\theta_3' + \theta_2'')] - (b_a)_{21}(\bar{a}_b)_{22}(\bar{b}_a)_{23} \exp [i(\theta_4' + \theta_4'')] \\ i(a_b)_{21}(\bar{a}_b)_{12}(b_a)_{23} \exp [i(\theta_3' + \theta_2'')] + i(b_a)_{21}(\bar{a}_b)_{22}(\bar{a}_b)_{23} \exp [i(\theta_4' + \theta_4'')] \end{bmatrix} +$$

$$R^3 I_4 \begin{bmatrix} -(\bar{b}_a)_{21}(\bar{b}_a)_{12}(a_b)_{13} \exp [i(\theta_3' + \theta_1'')] - (\bar{a}_b)_{21}(\bar{b}_a)_{22}(\bar{b}_a)_{13} \exp [i(\theta_4' + \theta_3'')] \\ i(\bar{a}_b)_{21}(\bar{b}_a)_{22}(\bar{a}_b)_{13} \exp [i(\theta_3' + \theta_1'')] - i(\bar{b}_a)_{21}(\bar{b}_a)_{12}(b_a)_{13} \exp [i(\theta_4' + \theta_3'')] \\ i(\bar{b}_a)_{21}(\bar{a}_b)_{12}(a_b)_{23} \exp [i(\theta_3' + \theta_2'')] + i(\bar{a}_b)_{21}(\bar{a}_b)_{22}(\bar{b}_a)_{23} \exp [i(\theta_4' + \theta_4'')] \\ (\bar{a}_b)_{21}(\bar{a}_b)_{22}(\bar{a}_b)_{23} \exp [i(\theta_3' + \theta_2'')] - (\bar{b}_a)_{21}(\bar{a}_b)_{12}(b_a)_{23} \exp [i(\theta_4' + \theta_4'')] \end{bmatrix} + \quad (9)$$

上述输出光束中含有 a^3 项为所需的目标信号,称为主路信号,含有 a^2b 、 ab^2 和 b^3 的项分别称为一阶、二阶和三阶串扰。

2 光交换芯片中串扰的相干性分析

2.1 相干光束的光强波动

仍以上述4×4 Benes结构为例,由式(9)可知:

1)单端口输入时,每个输出端口均由两束光(两项)组成,分别来自两个光开关路由,每束光的光强受到三个光开关单元的调控;

2)当4个输入端口同时输入时,每个输出端口都会出现8束光,包括1个主路信号(aaa)、3个一阶串扰(aab 、 aba 、 baa)、3个二阶串扰(abb 、 bab 、 bba)以及1个三阶串扰(bbb)。

假设来自不同输入端口的光束不相干,则每个输出端口分别有四对相干光束,它们的相互组合关系与中间级光开关 m_{12} 和 m_{22} 所处的状态有关,如表1所示。

表1 光束相干导致的光强波动
Table 1 Intensity fluctuation of coherent light beams

State of m_{12} and m_{22}	Coherent light beams		Intensity fluctuation
Identical	Main path signal (aaa)	Side path signal (bab)	$a^6 \pm 2a^4b^2$
Identical	1st-order crosstalk (aab)	1st-order crosstalk (baa)	$2a^4b^2 \pm 2a^4b^2$
Identical	1st-order crosstalk (aba)	3rd-order crosstalk (bbb)	$a^4b^2 \pm 2a^2b^4$
Identical	2nd-order crosstalk (abb)	2nd-order crosstalk (abb)	$2a^2b^4 \pm 2a^2b^4$
Different	Main path signal (aaa)	Side path signal (bbb)	$a^6 \pm 2a^3b^3$
Different	1st-order crosstalk (aab)	2nd-order crosstalk (bba)	$a^4b^2 \pm 2a^3b^3$
Different	1st-order crosstalk (aba)	2nd-order crosstalk (bab)	$a^4b^2 \pm 2a^3b^3$
Different	1st-order crosstalk (baa)	2nd-order crosstalk (abb)	$a^4b^2 \pm 2a^3b^3$

表1中,第2、5行表示主路信号会与二阶串扰(bab)或三阶串扰(bbb)形成同源的相干光束,相应的串扰也称为旁路信号。旁路信号与主路信号的光强之比分别在 $(b/a)^4$ 和 $(b/a)^6$ 量级,因此其对信道插损的影响可以忽略。表1中第2-9行均为发生相干的信道串扰。以两个一阶串扰的干涉情况为例,两束一阶串扰的光场振幅均为 a^2b ,当两束串扰的相位差分别为 $0, \pi/2, \pi$ 时,相干叠加光场振幅分别为 $2a^2b, \sqrt{2}a^2b, 0$,对应的光强分别为 $4a^4b^2, 2a^4b^2, 0$,即光强波动范围为 $2a^4b^2 \pm 2a^4b^2$ 。

类似分析可知,当光开关单元 m_{12} 与 m_{22} 状态相同时,若忽略小量(即 a^2b^4 项),则三对串扰的光强分别为 $2a^4b^2 \pm 2a^4b^2, a^4b^2, 0$ 。因此总串扰光强的波动范围为 $3a^4b^2 \pm 2a^4b^2$,即相干导致串扰可提升至1.67倍(约2.22 dB),可降低为0.33倍(约-4.77 dB)。相干导致串扰有近5倍(约7 dB)的波动,此时光开关处于“强相干”状态。该结论得到了下文仿真结果的印证。相比而言,当光开关单元 m_{12} 与 m_{22} 状态不同时,相干导致的光强波动均为小量,此时对应为“弱相干”状态。可见,应使该 4×4 光交换芯片尽可能工作在“弱相干”状态。

2.2 相干光束之间的相位关系

通常不同光信道之间是不相干的,也就是来自光交换芯片同一输入端口的光束之间才会发生相干。由式(9)可知,单一端口输入时,四个输出端口各有两束光。仅考虑端口 I_1 (或 I_2) 输入时,四个输出端口中两束相干光束之间的相位差分别为

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = \theta'_1 + \theta''_1 - \theta'_2 - \theta''_3 + \frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{2} \\ \Delta\theta_2 = \theta'_1 + \theta''_1 - \theta'_2 - \theta''_3 + \frac{\pi}{2} \mp \frac{\pi}{2} \\ \Delta\theta_3 = \theta'_1 + \theta''_2 - \theta'_2 - \theta''_4 + \frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{2} \\ \Delta\theta_4 = \theta'_1 + \theta''_2 - \theta'_2 - \theta''_4 + \frac{\pi}{2} \mp \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中,“ \pm ”取决于光开关单元状态和输入端口。由式(10)可知, $\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_4$ 取决于连接波导引起的相移以及光开关状态, $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 或者($\Delta\theta_3$ 和 $\Delta\theta_4$)的取值总是相差 π 相位。

下面讨论两种特殊的相位状态:1)当 $\theta''_1 = \theta''_4 = \pi/2$,其余波导相位都为0时, $\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_4$ 在所有光开关状态下均为 $\pi/2 + k\pi$ (k 为整数);从光强的角度来说,它们之间的作用等效于完全非相干情形,这里称为“去相干”状态;2)当所有连接波导引起的相移都为0时, $\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_4$ 的取值要么为0,要么为 π ,此时相干现象最为明显。上述分析表明,若适当控制光开关单元之间的连接波导相移,可以避免串扰光束的相干相长,或实现串扰光束的相干相消。当仅考虑端口 I_3 (或 I_4) 输入时,也有同样的规律,但此时 $\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_4$ 依赖于不同的连接波导。

输入信号光的波长会影响连接波导引入的相移,进而影响相干光束之间的相位差,这也是光交换芯片串扰谱线出现周期性震荡的原因。根据式(10)可知,如果每级开关之间的连接波导的光程设计为等长,则串扰谱线将不再震荡。

2.3 交换需求与相干强弱的关系

无阻塞 4×4 光交换芯片,可支持 $4! = 24$ 种交换需求。交换需求可根据输入信号依次到达的输出端口顺序表示,如交换需求 $I_1 \rightarrow O_4, I_2 \rightarrow O_3, I_3 \rightarrow O_2, I_4 \rightarrow O_1$,简记为“4 321”。表2列出了所有交换需求对应的光开关单元 m_{12} 和 m_{22} 状态,其中第一行的交换需求总是对应串扰“强相干”情形。

表2 不同交换需求下串扰相干的强弱
Table 2 Crosstalk coherence for different switching requests

Switching requests	State of m_{12} and m_{22}
1 234, 1 243, 2 134, 2 143, 3 412, 3 421, 4 312, 4 321	Identical (strongly coherent)
1 324, 1 342, 1 423, 1 432, 2 314, 2 341, 2 413, 2 431	Different (weakly coherent)
3 124, 3 142, 3 214, 3 241, 4 123, 4 132, 4 213, 4 231	Different (weakly coherent)

3 芯片性能仿真与串扰影响实验

3.1 插损与串扰的相干特性仿真

对于 4×4 Benes 结构的光交换芯片,有 $2^6 = 64$ 种光开关状态组合,再加上连接波导相移的不同,组合状态更为复杂,难以直接用理论加以分析。本文采用仿真方法评价光交换芯片的插损和串扰性能。为了便于描述,以输入端口来定义信道,即输入端口 $I_1 \sim I_4$ 分别对应信道1~4。显然,每个信道的路由随光开关状态变化。光信号经过光交换芯片到达目标输出端口,其插入损耗(IL)定义为输入端口的光功率 P_{in} 与目标输出端口的光功率 P_{out} 之比,通常以dB为单位,即

$$IL = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (11)$$

就某个给定信道而言,目标输出端口中还可能存在其他信道信号的光功率 P_{XT} ,它与该信道的输出信号光功率 P_{out} 之比定义为串扰(XT),用dB表示为

$$XT = 10 \log_{10} \frac{P_{XT}}{P_{out}} \quad (12)$$

为方便分析,令所有光开关单元有完全相同的性能,并忽略连接波导损耗。根据文献[14]中给出的 2×2 光开关单元参数:在1 550 nm波长处,光开关单元在开、关状态下的功率透射率分别为0.929(-0.32 dB)、0.000 316(-35 dB),即

$$\begin{cases} Ra = \sqrt{9.29 \times 10^{-1}} \approx 0.9638 \\ Rb = \sqrt{3.16 \times 10^{-4}} \approx 0.0178 \end{cases} \quad (13)$$

结合 $a^2 + b^2 = 1$ 可分别计算出 R 、 a 、 b 参数的具体取值。

在上述参数下,遍历所有光开关状态,四个信道的插损如图4(a)所示。仿真中, θ_1'' 与 θ_4'' 在 $0 \sim \pi$ 范围内以

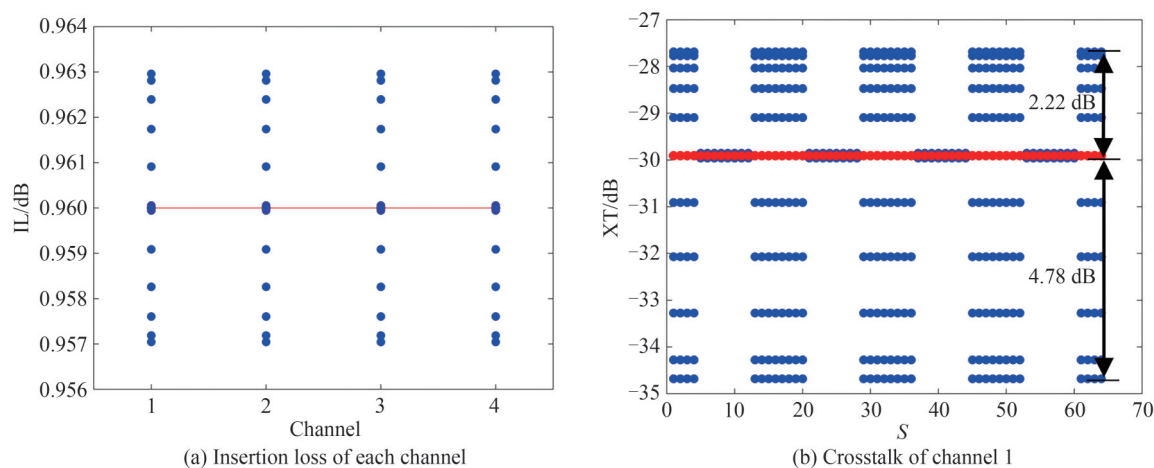


图4 4×4 光交换芯片的性能仿真

Fig. 4 Performance simulation of the 4×4 optical switching chip

0.1 π 的间隔进行取值。由仿真结果可知,相干效应对信道插损的影响很小,因此分析中可以忽略旁路信号的作用。不考虑相干时,信道插损与光开关单元状态无关,各信道的插损均为0.96 dB。

计算4个输入端口的信号功率相同时,各信道的串扰值。图4(b)是64种光开关组合状态和不同相移状态下信道1的串扰(其他信道相同),其中光开关组合状态S按下列方式编号

$$S = 2^5 m_{11} + 2^4 m_{21} + 2^3 m_{12} + 2^2 m_{22} + 2^1 m_{13} + 2^0 m_{23} + 1 \quad (14)$$

图4(b)中红色点连线对应于串扰不相干的情形。由仿真结果可知,相较于非相干情形,串扰相干效应会导致串扰有时增大2.22 dB,有时减小4.78 dB,串扰变化范围有7 dB,这与上述理论分析结果一致。与插损类似,不考虑相干效应时,串扰也与光开关单元状态无关,此时的串扰约有一30 dB。由于波导长度在制作时难免存在一些偏差,导致实际串扰取值具有一定的随机性。

3.2 串扰对误码率的影响实验

为了定量评估串扰对光信号传输质量的影响,搭建了如图5所示的实验测试系统。两路发射机(TX1和TX2)分别发送速率为100 Gb/s的双偏振-正交相移键控(Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying, DP-QPSK)信号,其中TX1为信号,中心频率固定为193.4 THz, TX2当作“串扰”,中心频率可调整。两路光经可调光衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)衰减后进入一个2 \times 2硅基光开关。光开关处于直通状态,此时插损约为2 dB,串扰约为一20 dB。光开关输出的信号和“串扰”由接收机(RX1)接收和数据解调,并完成误码率(Bit Error Rate, BER)的测试,实验中,调节VOA1,将信号接收光功率固定为一25 dBm,调节VOA2控制串扰功率大小。分别将TX2中心频率设置为193.4 THz和193.395 THz,即串扰和信号的中心频率差 Δf 分别为0(同频串扰)和5 GHz(异频串扰)。输入到接收机的串扰大小和对系统BER的影响如图6所示,图中只给出了纠后无误码的实验数据。由图6从中可以看出:1)信号BER随着串扰的增加而增大,当串扰增加至-10 dB时,DP-QPSK信号纠错后出现误码;2)在相同串扰下,同频串扰对信号BER的影响略大于异频串扰情形。当然,BER的大小也与光接收机的接收光功率密切相关。

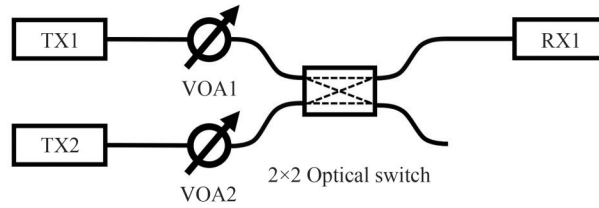


图5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

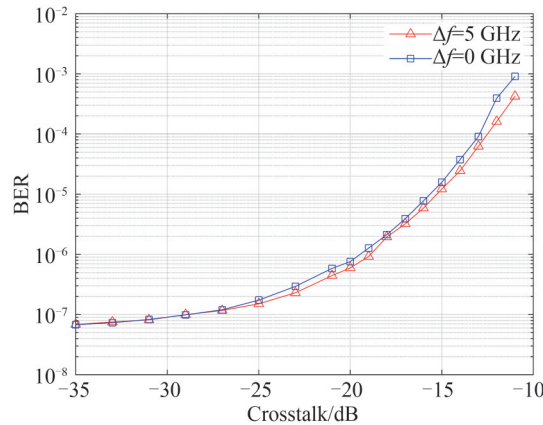


图6 误码率随串扰的变化曲线

Fig. 6 Curves of BER versus crosstalk

4 光交换芯片的等效去相干方法

串扰光束间的相干效应会引起光交换芯片的串扰增加,导致信道性能不均衡。两束光相遇时,若它们的相位差为 $\pi/2 + k\pi$ (k 为整数),则总光强等效于完全不相干结果,从而达到去相干目的。根据式(10),考虑制作工艺误差,假设 4×4 Benes 光交换芯片中八段连接波导引起的相移未知,调节三段连接波导的相移(如 $\theta'_4, \theta''_1, \theta''_4$)即可达到去相干效果,连接波导中的移相器可以基于热光效应来实现,它具有低损耗、易于加工的特点^[14]。

以三个移相器分别添加在三段直波导的方案为例,如图3所示。针对不同的输入端口,分别调节移相器,依次使各输出端口去相干。具体调节过程为:1)调节移相器1,根据式(10)可使 I_1 (或 I_2)端口输入时, O_1 和 O_2 端口的相干光相位差 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 为 $\pi/2 + k\pi$;2)调节移相器2,可使 I_1 (或 I_2)端口输入时, O_3 和 O_4 端口的相干光相位差 $\Delta\theta_3$ 和 $\Delta\theta_4$ 为 $\pi/2 + k\pi$;3)调节移相器3,可使 I_3 (或 I_4)端口输入时,所有输出端口的相干光相位差为 $\pi/2 + k\pi$ 。这样,所有输入端口都有信号时,输出端口总处于去相干状态,此时 O_1 与 O_2 (或 O_3 与 O_4)的输出光功率有很好的均衡性,而且对光开关状态的依赖性最小,参见图3(b)。当然,通过调节移相器,还可以使某些“强相干”光交换状态的串扰进一步降低。

类似的分析方法也可以用于更大规模的光交换芯片,此时组成光交换芯片的光开关单元级数会更多,传输矩阵数目也会增加;同时,还需借助相应的光开关路由算法进行计算^[18]。根据串扰的相干强弱,对光开关单元的状态进行分类,并使光开关单元尽可能工作在“弱相干”状态;也可以通过设计连接波导长度,抑制串扰的相干效应影响。

5 结论

以 2×2 MZI光开关单元组成的 4×4 Benes光交换芯片为例,分析了不同光开关状态下相干现象对各个信道插损、串扰性能的影响。就24种交换需求来说,有16种为“弱相干”状态,有8种为“强相干”状态。相干现象对信道的插损性能的影响可以忽略。在“强相干”的状态下,相干现象导致各个信道的串扰波动约为7 dB,相较于不考虑相干效应最大可增加2.22 dB,最多可减少4.78 dB。提出控制光开关单元之间连接波导相位的方式,使得输出端口相干光束的相位正交,等效去除光交换芯片的相干效应,从而均衡各个信道在各个开关状态下的串扰,避免最劣化的情形出现。

参考文献

- [1] Ji Yuefeng, ZHANG Jiawei, ZHAO Yongli, et al. Prospects and research issues in multi-dimensional all optical networks[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(10): 101301.
- [2] JENSEN R A, PARSONS N, KUNJAPPA R. Switching All-optical: past, present and future [C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2023. 046104.
- [3] ZHOU Linjie, LU Liangjun, GUO Zhanzhi, et al. Development status and key technologies of integrated optical switches[J]. Study on Optical Communication, 2019, 45(1): 9-26.
周林杰, 陆梁军, 郭展志, 等. 集成光开关发展现状及关键技术(特邀)[J]. 光通信研究, 2019, 45(1): 9-26.
- [4] SEOK T J, LUO Jiangheng, HUANG Zhilei, et al. Silicon photonic wavelength cross-connect with integrated MEMS switching[J]. APL Photonics, 2019, 4:100803.
- [5] SUN Xiaoqiang, LIU Songyue, LI Pengfei, et al. Review on silicon-based optical switch and switch array [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2):207-217.
孙小强, 刘崧岳, 李鹏飞, 等. 硅基光开关及阵列研究进展[J]. 半导体光电, 2022, 43(2): 207-217.
- [6] RIZAL C S, NIRAULA B. Compact Si-based asymmetric MZI waveguide on SOI as a thermo-optical switch[J]. Optics Communications, 2018, 410: 947-955.
- [7] CHEN Kai, DUAN Fei, YU Yonglin. Performance-enhanced silicon thermo-optic Mach-Zehnder switch using laterally supported suspended phase arms and efficient electrodes[J]. Optics Letters, 2019, 44(4): 951-954.
- [8] MAROM D M, BLAU M. Switching solutions for WDM-SDM optical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(2): 60-68.
- [9] JIA Hao, YANG Shanglin, ZHOU Ting, et al. WDM-compatible multimode optical switching system-on-chip [J]. Nanophotonics, 2019, 8(5): 889-898.
- [10] LI Juhao, HU Tao, REN Fang, et al. Mode-division-multiplexing passive optical network based on low-crosstalk few-mode fiber and components[C]. Asia Communications and Photonics Conference, 2016.

- [11] REN Fang, LI Juhao, WU Zhongying, et al. All-fiber optical mode switching based on cascaded mode selective couplers for short-reach MDM networks[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(4): 046104.
- [12] WU Zhongying, LI Juhao, GE Dawei, et al. Demonstration of all-optical MDM/WDM switching for short-reach networks[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21609-21618.
- [13] LU Liangjun, ZHOU Linjie, LI Zuxiang, et al. Broadband 4×4 nonblocking silicon electrooptic switches based on Mach-Zehnder interferometers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1-8.
- [14] ZHAO Shuoyi, LU Liangjun, ZHOU Linjie, et al. 16×16 silicon Mach-Zehnder interferometer switch actuated with waveguide microheaters[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): 202-207.
- [15] LU Liangjun, ZHAO Shuoyi, ZHOU Linjie, et al. 16×16 non-blocking silicon optical switch based on electro-optic Mach-Zehnder interferometers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9295-9307.
- [16] YANG Lin, ZHOU Ting, JIA Hao, et al. General architectures for on-chip optical space and mode switching[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 180-187.
- [17] ZHAO Yuanli, WU Baojian, LIAO Mingle, et al. Crosstalk analysis of optical switching chips with DQPSK signal transmission experiment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 113001.
赵元力, 武保剑, 廖明乐, 等. 光交换芯片的串扰分析与DQPSK信号传输实验[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 113001.
- [18] ZHANG Jinhua, WU Baojian, QIU Kun, et al. Routing algorithm of dilated Benes optical switching integrated chip[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 43(2): 1-8.
张金花, 武保剑, 邱昆, 等. 扩张型Benes光交换集成芯片路由算法[J]. *光通信技术*, 2019, 43(2): 1-8.

Crosstalk Coherence in Optical Switching Chips

TANG Yu, WU Baojian, YAN Wei, WEN Feng, QIU Kun

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: With the rapid development of information and communication technology, optical switching is more desirable for communication networks with low latency and high data rates than traditional Opto-Electro-Opto (O-E-O) operating. The latter easily suffers from the so-called “electronic bottleneck”, and then high latency and power consumption. All-optical switching can steer data signals to the destination ports in the optical domain, and possesses the transparency of signal format, bit rate, and protocol. Silicon-based optical switching chips have been employed to realize Wavelength-Division Multiplexing (WDM) network nodes, with small size, low power consumption, and fast switching speed, which are also expected to be suitable for future Space-Division Multiplexing (SDM) all-optical switching nodes. In these chips, the connection paths are usually shorter than the coherent length of light, and the coherent effect between two beams from the same light source will take place, resulting in the power fluctuation of optical signals or crosstalk increase.

In the paper, we focus on the 4×4 Benes optical switching chip, composed of 2×2 Mach-Zehnder Interferometer (MZI) optical switches, in which the optical couplers are realized by Multimode Interference (MMI) devices. The transmission matrix method is used to deduce the transfer function of input to output optical fields for the optical switches and the whole chip. Here, we take into account the crosstalk coherence caused by the imperfect 3 dB MMIs in the MZI optical switches.

Based on coherence theory, the assumption is made that the optical fields of only coherent light beams can be added. In other words, the transmission matrix model is suitable for single-port input cases in calculations. For multi-port inputs, optical intensities are calculated separately for each input port to avoid superimposing the optical fields of different sources during calculations. By analyzing the expression of the transmission matrix, it can be observed that if the states of middle switches are the same, the coherence effects have a significant impact on the crosstalk performance of the switching array. This switch state can be referred to as a “strongly coherent” switch state. On the other hand, if the states of middle switches are different, this switch state can be referred to as a “weakly coherent” switch state. Furthermore, for a 4×4 non-blocking optical switch array, there are 24 different switching requirements. By examining the corresponding switch states for each switching requirement, it is found that 8 of the switching requirements

consistently correspond to strongly coherent switch states, while the remaining 16 switching requirements consistently correspond to “weakly coherent” switch states. In other words, if the switching requirement is determined, it is not possible to avoid the occurrence of strong coherent phenomena by selecting an appropriate switch state.

For the given parameters of the MZI optical switch element, and the influence of crosstalk coherence on the insertion loss and crosstalk performance for the optical switching chip are simulated. It is shown that, 1) the change of the insertion loss is negligible for each channel; 2) under strongly coherent switch states, channel crosstalk can increase by a maximum of 2.22 dB due to coherence effects, and it can be reduced by up to 4.78 dB, resulting in fluctuations of up to 7 dB, to the disadvantage of data transmission. Furthermore, the impact of crosstalk on Bit Error Rate (BER) was assessed through the experiment. Assuming that the initial phase shift introduced by the connected waveguides is random, according to the phase dependency of coherence, we propose a scheme to effectively eliminate crosstalk coherence in the optical switching chip by using three phase shifters nested on the connection waveguides. The analysis process or method presented here is also applied to large-scale optical switching chips or network nodes in the presence of crosstalk.

Key words: Optical switching chip; Coherence effect; Benes structure; Mach-Zehnder interferometer; Crosstalk

OCIS Codes: 060.1155; 060.5060; 060.6718