

光交换芯片的串扰分析与DQPSK信号传输实验

赵元力 武保剑 廖明乐 耿勇 邱昆

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

摘要 串扰和插入损耗是表征光交换芯片传输性能的重要参数。将串扰与插入损耗特性结合起来,提出一种分析光交换集成芯片串扰的理论模型,考虑了串扰对开关路由的依赖性。实验测量了基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的4×4拜尼兹结构的光交换集成芯片的串扰和插入损耗系数,以及不同开关路由状态下40 Gb/s差分四相相移键控(DQPSK)信号的传输性能,实验结果与理论分析基本一致。根据测得的串扰和插入损耗系数,计算了16×16光交换芯片串扰范围。

关键词 光通信;光子集成芯片;光开关阵列;串扰;插入损耗

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0113001

Crosstalk Analysis of Optical Switching Chips with DQPSK Signal Transmission Experiment

Zhao Yuanli Wu Baojian Liao Mingle Geng Yong Qiu Kun

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

Abstract Crosstalk and insertion loss are two important parameters for optical switching integrated chips. A new theoretical model of crosstalk in optical switching integrated chips, which is dependent on insertion loss and switch routing states, is put forward. As an example, the crosstalk and insertion loss coefficients of the optical switching integrated chip consisting of Mach-Zehnder interferometer (MZI)-based 4×4 Benes structure are measured by the 40 Gb/s differential quadrature phase shift keying (DQPSK) experiment under different switch routing states. The experimental results are consistent with the theoretical analysis. The crosstalk range for the 16×16 Benes-type optical switching chips is calculated according to the given crosstalk and insertion loss coefficients.

Key words optical communications; photonic integrated chips; optical switching array; crosstalk; insertion loss

OCIS codes 130.3120; 130.4815

1 引言

光纤通信的发展离不开传输和交换两大技术。联合使用波分复用技术与高阶光调制技术使光纤传输的容量大大提高,而现有全光交换技术尚不能达到光传送网的交换规模需求和光分组交换的交换速度要求。光交换芯片技术的发展也越来越受到重视^[1-2]。其中,基于载流子色散效应的硅基光开关单元具有纳秒量级的开关速度^[3],其加工工艺与互补金属氧化物半导体工艺(CMOS)兼容,特别适合用于制作高速调制器^[4]以及大规模光交换芯片。NIN微加热电阻的引入在一定程度上弥补了开关单元的工艺误差^[5-6],使得光交换芯片能够实现更优良的工作性能。与传统微环结构相比^[7],基于马赫-曾德尔干涉结构(MZI)的光子交换芯片具有较大的带宽和波长不相关性,能够很好地容忍温度抖动所带来的误差,对芯片驱动电路的控制精度要求适中,因而其具有良好的应用前景^[8-9]。

收稿日期: 2015-07-13; 收到修改稿日期: 2015-08-13

基金项目: 国家863计划(2012AA011304)、国家自然科学基金(61271166)、教育部创新团队发展计划

作者简介: 赵元力(1991—),男,硕士研究生,主要从事光交换集成芯片方面的研究。E-mail: fariszhaol@163.com

导师简介: 武保剑(1970—),男,博士,教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: bjwu@uestc.edu.cn(通信联系人)

在光交换芯片中,除了交换功能外,串扰和插入损耗也是评价光子交换芯片传输性能的重要参数。对于同一波长平面的光交换而言,光交换芯片的串扰主要包括带内的相干或非相干串扰。研究表明,当光信噪比(OSNR)劣化大于1 dB或者存在更多干扰时,多径相干串扰的光信噪比劣化很小^[10]。总体而言,串扰和插入损耗取决于光交换芯片的设计和加工工艺水平^[11-12],也依赖于光交换状态所对应的光开关单元状态-直通状态或者交叉状态(Bar或Cross状态)。值得注意的是,载流子吸收效应会引起额外损耗,开关过程中会破坏MZI两臂上光强的对称性,使得Cross状态下开关单元的损耗和串扰性能劣化^[13-15]。

本文综合考虑光交换芯片的串扰与插入损耗特性,提出了一种分析光交换集成芯片串扰的理论模型,光交换芯片的串扰是所有主信号路由开关单元串扰的加权和。实验测量了4×4拜尼兹结构的光交换芯片,研究了在不同开关路由状态下的串扰以及40 Gb/s差分四相移键控(DQPSK)信号的误码性能,研究表明误码率(BER, R_{BE})与串扰数目、串扰电平大小和开关路由状态等有关。根据测量拟合出来的开关单元串扰系数和损耗系数,计算了由7级光开关单元组成的光交换芯片在全Cross和全Bar两个极端交换状态下的最大或最小串扰范围。

2 理论分析

为了便于描述,图1(a)给出了双臂驱动的2×2 MZI开关单元的基本结构^[6],由2个3 dB多模干涉器(MMI)所构成的MZI的上下两臂各有一个热光NIN驱动电极和电光PIN驱动电极,它们分别利用硅的热光效应来弥补制作工艺误差导致的两臂不对称性,并利用硅的自由载流子色散效应快速控制开关状态的切换。这里通过热光补偿后的开关单元处于初始工作状态,即直通状态(Bar状态),如图1(b)所示;而电光调节驱动下的开关单元状态为交叉状态(Cross状态),如图1(c)所示。

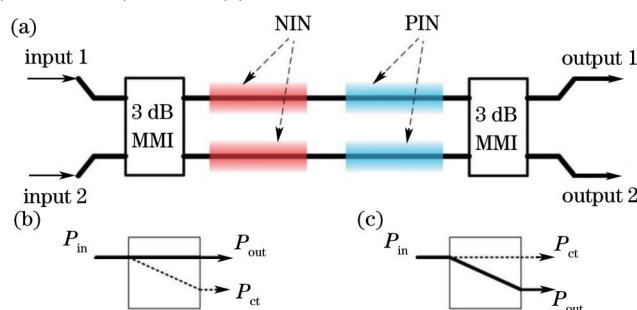


图1 2×2 MZI开关单元的基本结构和功能。(a) 2×2 MZI开关单元; (b) 直通状态; (c) 交叉状态

Fig.1 Basic structure and functions of the 2×2 MZI switch unit. (a) 2×2 MZI switch unit; (b) bar state; (c) cross state

在光交换芯片中,光信号每经过一个非理想的2×2开关单元传输时,另外一路的光信号也会串扰过来。对于同一波长平面的交换情形,两路光信号的频率相近或相同时,会引起带内串扰,这里按非相干串扰加以分析,忽略多径相干串扰^[16]。如图1(b)和(c)所示,对于每个光开关单元,将输出光功率与输入光功率之比定义为损耗系数 $\alpha = P_{out}/P_{in}$,将串扰光功率与输入光功率的比值定义为串扰系数 $\beta = P_{ct}/P_{in}$ 。通常,光开关单元的Bar状态和Cross状态下损耗系数和串扰系数是不完全一样的。在光交换芯片中,两路光信号每经过一级开关单元,光功率都会衰减,同时还会串扰到另一路输出端口中,形成主信号和串扰两种分量;其中串扰光会随着主信号光一起经过后续的开关单元,并再次串扰到其他光路中或由其他光路串入新的干扰。显然,在多端口输入条件下,分析大规模光交换芯片中串扰的演化过程将变得十分复杂。为解决此问题,提出一种基于递推方法的串扰模型,用于分析任意交换规模芯片中任意光交换状态或开关路由下的串扰大小。

在光交换芯片的第n级开关单元处,主信号和串扰的光功率变化关系如图2所示。设从第n-1级开关单元输出的主信号光(M)及其相伴的串扰光一起进入第n级开关单元。在第n级开关单元处,另一输入端口的信号光(S)也会串扰进来,与原来的串扰光叠加到一起,对主信号光形成新的串扰^[16]。

经第n级开关单元后串扰的光功率为

$$P_{ct}^n = \alpha_n P_{ct}^{n-1} + \beta_n P_s^{n-1}, \quad (1)$$

式中 P_{ct}^{n-1} 表示经过第n-1级开关单元后的串扰光功率, α_n 和 β_n 分别为第n级开关单元的损耗系数和串扰系数, P_s^{n-1} 表示从第n-1级开关单元输出的信号光的功率。这里把光开关单元之间的波导连接视为理想连接,

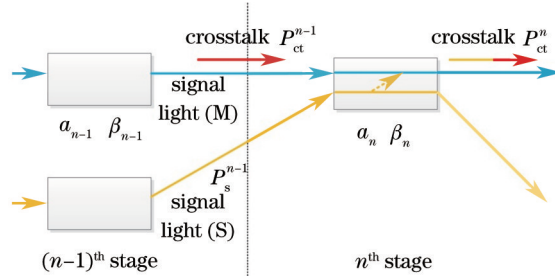


图2 主信号和串扰的光功率变化关系

Fig.2 Power relationship of the main signal and the crosstalk

即不考虑直波导、交叉波导等对串扰和信号功率的影响。由(1)式可以看出,每经过一级开关单元,串扰光功率都会有所损耗,同时又会有新的串扰光叠加进来。

根据(1)式的递推关系,主信号光经过 n 级开关单元后输出串扰光的光功率可以表示为

$$P_{ct}^n = \beta_n P_s^{n-1} + \alpha_n \beta_{n-1} P_s^{n-2} + (\alpha_n \alpha_{n-1}) \beta_{n-2} P_s^{n-3} + \cdots + (\alpha_n \alpha_{n-1} \cdots \alpha_2) \beta_1 P_s^0 + (\alpha_n \alpha_{n-1} \cdots \alpha_1) P_{ct}^0, \quad (2)$$

式中 P_s^0 和 P_{ct}^0 分别为输入到光交换芯片的信号光功率和串扰光功率。通常初始串扰光功率 $P_{ct}^0 = 0$, 并且光交换芯片各个端口输入的信号光功率均为 P_0 。于是,(2)式可以表示为

$$P_{ct}^n = \sum_{k=1}^n [\alpha_{k+1,n}^{(M)} \beta_k P_s^{k-1}], \quad (3)$$

式中 $\alpha_{k+1,n}^{(M)} = \prod_{p=k+1}^n \alpha_p$ 表示主信号光从第 $k+1$ 级光开关单元到第 n 级光开关单元的路由损耗系数。

为了得到串扰功率的最终表达式,需要给出 P_s^{k-1} , 它表示从第 $k-1$ 级开关单元输出的信号光功率。严格来讲,这里的信号光功率应该包含串扰功率在内,取决于具体的开关路由和开关单元的工作状态。由于串扰系数非常小,为了简化分析,忽略更高阶串扰,则

$$P_s^{k-1} \approx \alpha_{1,k-1}^{(S)} P_0 = \prod_{q=1}^{k-1} \alpha^q P_0, \quad (4)$$

式中 $\alpha_{1,k-1}^{(S)} = \prod_{q=1}^{k-1} \alpha^q$ 表示其他信号光从第 1 级光开关单元到第 $k-1$ 级光开关单元的路由损耗系数。将(4)式代入(3)式,可得主信号光从第 n 级开关单元输出的串扰光功率为

$$P_{ct}^n \approx P_0 \sum_{k=1}^n [\alpha_{1,k-1}^{(S)} \beta_k \alpha_{k+1,n}^{(M)}]. \quad (5)$$

根据串扰的定义,主信号光从第 n 级开关单元输出的串扰大小为

$$C(n) = 10 \lg \left[\frac{P_{ct}^n}{\alpha_{1,n}^{(M)} P_0} \right] \approx 10 \lg \left[\frac{\sum_{k=1}^n [\alpha_{1,k-1}^{(S)} \beta_k \alpha_{k+1,n}^{(M)}]}{\alpha_{1,n}^{(M)}} \right] = 10 \lg \left[\sum_{k=1}^n (w_{k-1} c_k) \right], \quad (6)$$

式中 $w_{k-1} = \alpha_{1,k-1}^{(S)} / \alpha_{1,k-1}^{(M)}$ 为其他信号光相对于主信号光的相对路由损耗系数, $c_k = \beta_k / \alpha_k$ 为第 k 级光开关单元的串扰。由(6)式可以看出,光交换芯片的串扰是所有主信号路由开关单元串扰的加权和,权重系数就是相应的相对路由损耗系数。显然,该串扰计算模型依赖于主信号光的开关路由以及光开关单元的工作状态,根据(6)式可计算给定光交换状态的所有开关路由的串扰值。

3 实 验

根据上述串扰分析模型,对封装完好的 4×4 光子交换芯片进行了测试,其中光交换芯片是 3 级拜尼兹型无阻结构,由 6 个 2×2 MZI 开关单元 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 、 S_{13} 、 S_{23} 组成^[5],并采用自主开发的驱动电路分别控制单臂 NIN 和 PIN 驱动电极,如图 3 所示。调节 NIN 驱动电压可使每个开关单元的初始工作状态为 Bar 状态,在此基础上施加 PIN 驱动电压可使光开关单元切换到 Cross 状态。结合前面分析,通过测量不同交换状态下光交换芯片的串扰和插入损耗,可拟合得到光开关单元的平均损耗系数 α 和平均串扰系数 β 。

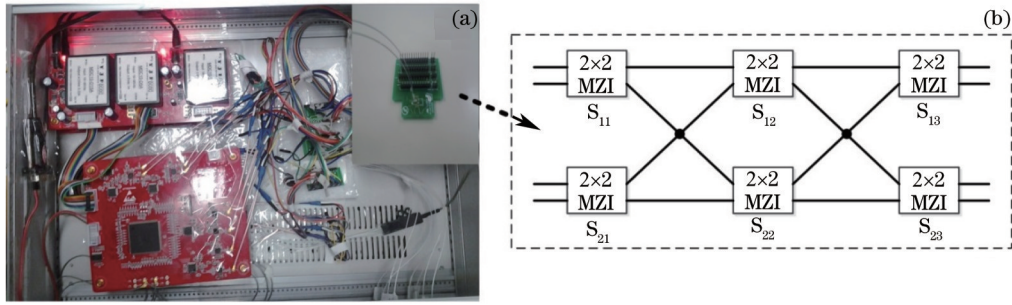


图3 4×4光子交换芯片及其驱动电路。(a)实物图;(b)4×4拜尼兹型无阻塞拓扑结构

Fig.3 4 × 4 photonic switching chip and its drive circuit. (a) Real product; (b) 4 × 4 Benes non-blocking topology

实验搭建了一个光传送网(OTN)的光交换节点测试系统,4×4光交换芯片连同控制电路一起作为OTN核心节点,4个40 Gb/s的DQPSK光收发模块作为OTN边缘节点,如图4所示。光发射机的波长分别为1550.912,1550.914,1550.918,1550.920 nm,输入到光交换芯片的信号光功率均为13 dBm。这4个波长都在同一个ITU-T波长栅格内,用于模拟来自不同光源的同一个波长平面内的交换情形(无需波长转换),它们之间的串扰属带内串扰。光接收机采用DQPSK差分检测方式,并共享同一个波长窗口。因此,光收发模块的微小波长差异不影响串扰系数的测量。在计算机控制软件驱动下,交换芯片控制电路产生高精度(约1mV)电压来驱动4×4光交换芯片中光开关单元,使其能够在“Bar”和“Cross”之间切换。通过适当配置6个开关单元的工作状态,可实现光交换芯片任意输入端口到任意输出端的交换。通过光谱仪可对光交换输出信号进行光信噪比的测量,光收发模块也直接对误码率进行统计测试。

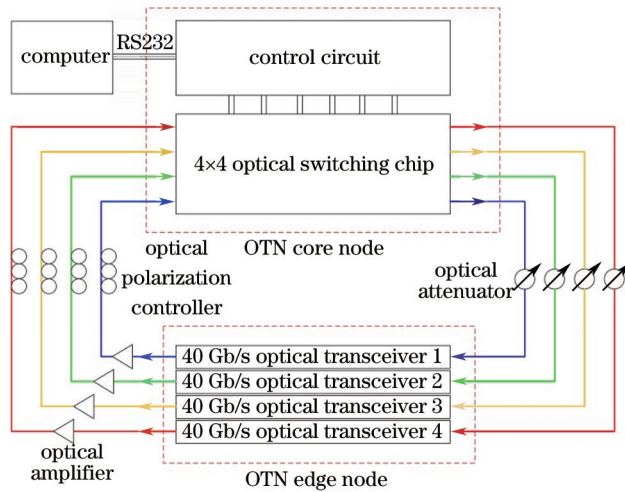


图4 4×40 Gb/s OTN光交换节点测试系统

Fig.4 4 × 40 Gb/s OTN testing system with an optical switching node

首先,固定所考察的主信号光的开关路由,主信号光从输入端口2输入,经光开关 S_{11}, S_{22}, S_{23} 后,交换到输出端口4输出。固定主信号光的路由不变,分别改变其他信号光的开关路由,使其经过的Cross状态的开关单元数目发生变化。若用0和1分别表示光开关单元的Bar状态和Cross状态,相应的平均损耗系数和平均串扰系数分别用 α_0, α_1 和 β_0, β_1 表示,对应实验所测试的6种交换状态如图5所示,相应的串扰和纠错前误码率的测试结果如图6所示。根据(6)式,不同开关配置状态下串扰表达式分别为

$$\begin{cases} C_{000100} = 10 \lg \left[\frac{(\alpha_0 \alpha_1 \beta_0 + 2\alpha_0^2 \beta_1)}{(\alpha_0^2 \alpha_1)} \right] \\ C_{000110} = 10 \lg \left[\frac{(\alpha_0 \alpha_1 \beta_0 + \alpha_0^2 \beta_1 + \alpha_0^2 \beta_0)}{(\alpha_0^2 \alpha_1)} \right] \\ C_{001100} = 10 \lg \left[\frac{(\alpha_0 \alpha_0 \beta_1 + 2\alpha_0 \alpha_1 \beta_0)}{(\alpha_0^2 \alpha_1)} \right] \\ C_{010100} = 10 \lg \left[\frac{(\alpha_0 \alpha_1 \beta_1 + 2\alpha_0 \alpha_1 \beta_0)}{(\alpha_0^2 \alpha_1)} \right] = C_{010110} = C_{011100} \end{cases} \quad (7)$$

根据图 6(a)中的实验结果和(7)式,可拟合计算出光开关单元的平均损耗系数和平均串扰系数分别为 $\alpha_0 = 0.499$, $\alpha_1 = 0.319$, $\beta_0 = 0.00081$, $\beta_1 = 0.01002$ 。经过换算能够得到信号光经过单个开关单元在 Bar 状态下的平均插入损耗为 3.02 dB,在 Cross 状态下的平均插入损耗为 4.96 dB。由图 6(a)的实验结果可知,当一路主信号光的开关路由不变,而其他信号光的开关路由变化时,串扰也会发生变化。当其他信号光所经过的 Cross 状态的开关单元数目增多时,其光功率损耗也会增加,串扰反而会减小。实验同时测量的误码率曲线如图 6(b)所示,误码率曲线与串扰的变化趋势也基本一致。

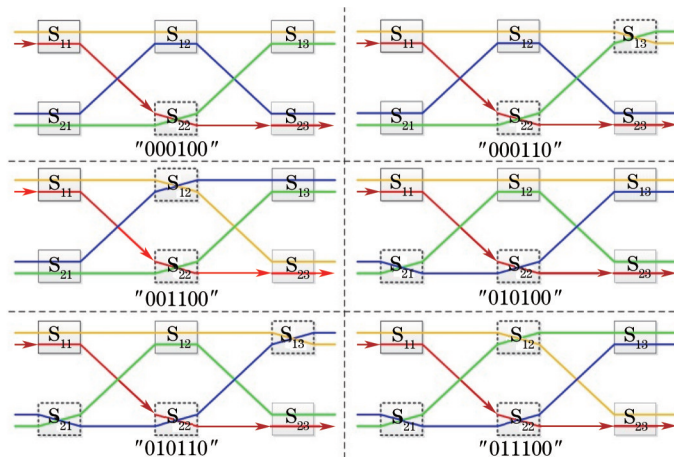


图 5 在端口 2 到 4 的交换状态下 6 种不同的开关配置状态

Fig.5 Six different switch configuration states under the switching condition from port 2 to 4

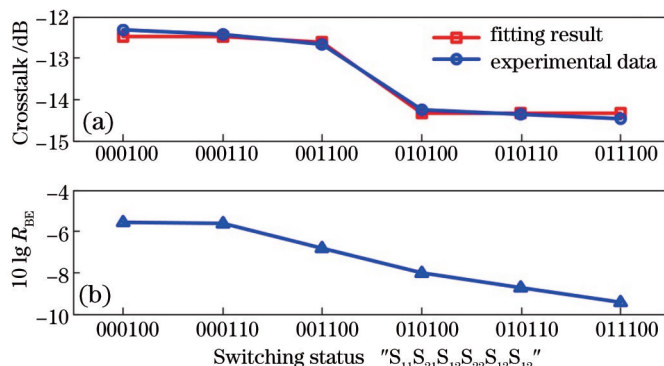


图 6 在端口 2 到 4 的交换状态下不同开关配置的串扰和误码率。(a) 串扰的实验和拟合结果; (b) 误码率的测量结果

Fig.6 Crosstalk and insertion loss under the switching conditions from port 2 to port 4.

(a) Experimental and fitting results of crosstalk; (b) measured BER

测试了光交换芯片在 24 种交换状态下 4 个输出端口的串扰值和误码率。从每种交换状态对应的所有光开关路由中选一种误码率性能最好的路由方式,如图 7(a)所示。其中,用 4 个数字的不同组合(如“1234”等)表示交换芯片的光交换状态,即代表 4 个输出端口与输入端口“1234”的对应关系。例如,光交换状态“3214”表示:输入 1 到输出 3、输入 2 到输出 2、输入 3 到输出 1、输入 4 到输出 4。用 4 个输出端口的最大串扰值和最大误码率作为每一种光交换状态的性能参数,如图 7(b)所示。若将所有光交换状态中的最大串扰作为评价整个交换芯片串扰的指标,则该 4×4 光交换芯片的最大串扰为 -9.06 dB。根据图 6(a)中的实验拟合参数,还可计算每一个光交换状态的串扰,经过理论计算发现理论结果与实验曲线大体趋势一致,如图 7(b)所示,但在细节上有所差异,两者的主要差别来源于理论的近似处理,因为实际光交换芯片中各个光开关单元的工作特性并不完全相同。尽管这种近似处理会带来一定误差,但却能够大大简化串扰的分析过程。

由图 7(b)可知,串扰和误码率之间具有一定的关联性,误码率与串扰数目、串扰电平大小以及开关路由状态等有关。从(6)式可以看出,当主信号光的开关路由给定时,相应路由开关的 c_k 也确定,相对路由损耗系数越小,最后的输出串扰就越小;此时,相对路由损耗系数 w_{k-1} 正比于其他信号光的路由损耗系数 $\alpha_{1,k-1}^{(S)}$ 。因

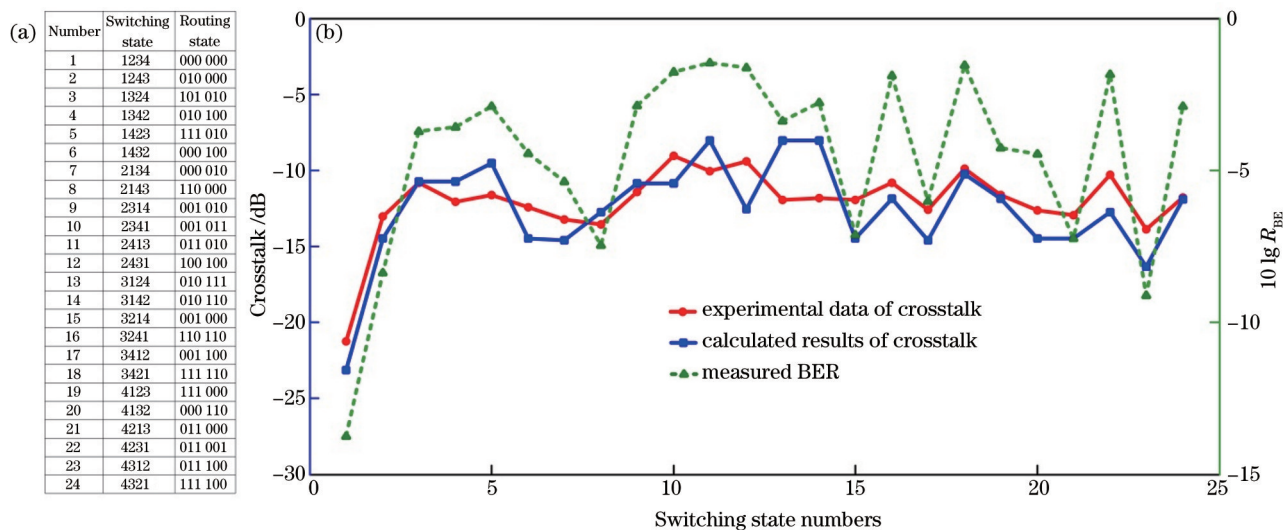


图 7 24 种光交换状态的串扰和误码率。(a) 光交换状态对应的光开关路由方式; (b) 串扰和误码率曲线

Fig.7 Crosstalk and BER under the 24 optical switching states.

(a) Optical switching states with routing ways; (b) experimental and calculated results of crosstalk and measured BER

此,对于路由由开关数目相同的情形,当其他信号光全部经过 Cross 状态(或 Bar 状态)开关时,串扰最小(或最大)。因此,对于 16×16 或者更大规模的交换芯片来说,这种串扰差异会更加明显。

对于 16×16 规模的拜尼兹型重排无阻塞光开关阵列结构,由 7 级光开关单元组成。根据上述串扰分析模型,由测得的串扰和插入损耗系数,可计算主信号光经过的路由开关分别为全 Cross 和全 Bar 状态时,最大或最小串扰随光开关级数的变化,如图 8 所示。其他交换状态下的串扰介于这两种极端情况之间。可见,选择光开关路由状态时,要兼顾光交换芯片的插入损耗和串扰。需指出的是,图 8 中的最大和最小串扰随光开关单元级数的变化曲线是基于现有的 4×4 光交换芯片的开关单元性能进行计算的。实际使用时,由于交换芯片可提供的开关路由组合状态远大于输入输出端口间的交换状态,需要避开这种全 Cross 状态(最恶劣的情况),将提出的串扰模型与相应的开关路由算法相结合,可优先选择既能满足交换需求又具有良好串扰性能的开关路由状态。当然,要构建更大规模的光交换芯片,进一步改善光开关单元的设计性能也是十分必要的。

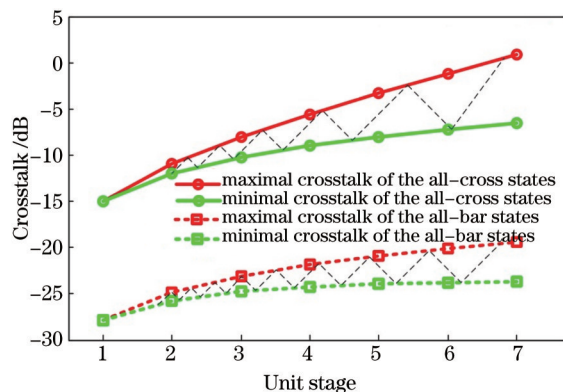


图 8 最大和最小串扰随光开关单元级数的变化曲线

Fig.8 Curves of maximal and minimal crosstalks with the stage number of optical switch units

4 结 论

提出了一种基于开关路由损耗的串扰分析模型,光交换芯片的串扰可由所有主信号路由开关单元串扰的加权 and 进行计算,其中权重系数就是相应的相对路由损耗系数。搭建了一个 40 Gb/s 的 OTN 光交换网络测试系统,对 4×4 规模硅基光交换芯片进行了测试,得到了光开关单元的平均损耗系数和串扰系数,Cross 开关状态下的插入损耗和串扰均大于 Bar 开关状态。测量了所有 24 种交换状态下不同开关路由的串扰和误码率,表明了实验结果与理论分析的一致性。研究表明,Cross 开关状态会使主信号光插入损耗增加,另一方面会使其他

信号光衰减而减小串扰。误码率的测试结果也表明,误码率与串扰电平之间不具有——对应关系,它与开关路由状态密切相关。因此,控制光交换芯片时,要合适的光开关路由状态来实现光交换芯片的功能。

致谢 感谢上海交通大学的周林杰、陈建平教授团队提供了 4×4 光交换集成芯片,感谢华为技术有限公司邱少锋高工提供的OTN测试环境。

参 考 文 献

- 1 A Shacham, K Bergman, L P Carloni. Photonic networks-on-chip for future generations of chip multiprocessors[J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(9): 1246-1260.
- 2 S J Ben Yoo. Optical packet and burst switching technologies for the future photonic internet[J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(12): 4468-4492.
- 3 J Van Campenhout, W M Green, S Assefa, *et al.*. Low-power, 2×2 silicon electro-optic switch with 110 nm bandwidth for broadband reconfigurable optical networks[J]. Opt Express, 2009, 17(26): 24020-24029.
- 4 Li Zhiyong, Xu Hao, Xiao Xi, *et al.*. Recent progress on research and development of electro-optical modulators on silicon substrates[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110009.
李智勇, 徐浩, 肖希, 等. 全硅基电光调制器研究动向和发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110009.
- 5 L Lu, L Zhou, X Li, *et al.*. Low-power 2×2 silicon electro-optic switches based on double-ring assisted Mach-Zehnder interferometers [J]. Opt Lett, 2014, 39(6): 1633-1636.
- 6 L Lu, L Zhou, Z Li, *et al.*. Broadband 4×4 nonblocking silicon electrooptic switches based on Mach-Zehnder interferometers[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-8.
- 7 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205006.
刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- 8 Liu Ke, Mou Sixuan, Huang Hui, *et al.*. Design and simulation of silicon-based rectangular Mach-Zehnder 2×2 thermo-optical switch [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 0213001.
刘克, 牟思璇, 黄晖, 等. 硅基矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关的设计与仿真[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0213001.
- 9 Yang Jian, Chen Weiwei, Wang Wanjun, *et al.*. A 4×4 MMI-MZ optical switch matrix on SOI based on carrier injection[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(1): 16-20.
杨建, 陈伟伟, 王皖君, 等. 基于载流子注入的SOI 4×4 MMI-MZ 光开关阵列[J]. 光电子·激光, 2013, 24(1): 16-20.
- 10 J J O Pires, L G C Cancela. Theoretical insights into the impact of coherent and incoherent crosstalk on optical DPSK signals[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(19): 2766-2774.
- 11 Wang Hao, Qu Pengfei, Tian Zijun, *et al.*. Optimal design for extinction ratio of SOI electro-optical switch[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(3): 375-378.
王皓, 瞿鹏飞, 田自君, 等. 一种提高SOI电光开关消光比的优化设计[J]. 半导体光电, 2015, 36(3): 375-378.
- 12 Zheng Chuantao, Ma Chunsheng, Yan Xin, *et al.*. Improved design of a polymer Mach-Zehnderelectro-optic switch with a wide spectrum of 110 nm[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 136-141.
郑传涛, 马春生, 闫欣, 等. 110 nm 宽频谱马赫-曾德电光开关的改进设计[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 136-141.
- 13 H Zhou, Y Zhao, W Wang, *et al.*. Performance influence of carrier absorption to the Mach-Zehnder-interference based silicon optical switches[J]. Opt Express, 2009, 17(9): 7043-7051.
- 14 D G Sun, Z Hu, S Abdul-Majid, *et al.*. Limitation factor analysis for silicon-on-insulator waveguide Mach-Zehnder interference-based electro-optic switch[J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(17): 2592-2600.
- 15 J Xing, Z Li, Y Yu, *et al.*. Low cross-talk 2×2 silicon electro-optic switch matrix with a double-gate configuration[J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4774-4776.
- 16 B C Lin, C T Lea. Crosstalk analysis for microring based optical interconnection networks[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(15): 2415-2420.

栏目编辑: 王晓琰