

基于波长和模式混合复用的片上光交换网络架构

郭鹏星^{1,2}, 周佳豪^{1,2}, 侯维刚^{1,2*}, 郭磊^{1,2}¹重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;²重庆邮电大学智能通信与网络安全研究院, 重庆 400065

摘要 为有效地提高片上光交换网络的交换容量及规模,提出了一种基于波长和模式混合复用的无阻塞片上光交换网络架构。首先设计了基于微环谐振器的波长和模式混合复用的 2×2 光开关,并采用Benes拓扑互连成大规模无阻塞的交换网络。此外,通过设计波长和模式选择及复用模块,使所有节点间能够并行传输数据,并支持多播通信。为了验证所提观点,利用Ansys Lumerical仿真平台模拟了一个支持2种模式和4种波长混合复用的 16×16 光交换网络。仿真验证了所提交换网络能够实现所有节点间多维复用信号的并行数据交换,且 16×16 网络的最大插入损耗小于2.1 dB,模间串扰小于-18.4 dB,网络最大和最小插入损耗差值小于0.5 dB,证明该交换网络具有良好的公平性。最后将所提结构与传统的基于单波长单模式以及多波长单模式的光交换网络进行对比,证明了所提结构可以在不增加波长成本的情况下提升交换网络的容量及节点的规模。

关键词 集成光学; 片上光交换网络; 无阻塞; 微环谐振器; 波长和模式混合复用; 多播通信

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230472

1 引言

作为新基建的基础设施,数据中心是承载各类信息技术的物理底座,在生物医学、航空航天等领域发挥着巨大作用。在数据中心,交换网络能够为机柜之间、服务器之间以及服务器内节点之间提供数据交互的物理通道,从而将不同的计算节点互连成为一个大型的计算系统,实现大规模的计算协同^[1-2]。得益于硅光集成技术的不断发展,光学交换网络已经从数据中心内机柜之间逐渐延伸到片上不同计算节点之间^[3-6]。此外,随着人工智能、云计算等新一代信息技术的发展,片上节点间需交换的数据量呈现爆发式增长。因此,构建大规模、大容量的片上光交换网络对促进新一代信息技术的发展有着巨大的科学意义和应用价值。

现阶段片上光交换网络的研究主要集中在基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)、基于微环谐振器(MRR)以及基于阵列波导光栅(AWG)的片上光交换网络架构^[7-14]。其中基于AWG的交换网络为了提高通信容量,通常将AWG与可调谐波长转换器(TWC)结合起来进行波长路由,但TWC能耗较高,不利于在一定能耗限制下实现大规模数据交换^[7]。此外,MZI具有较大的占地面积且其传输矩阵受到多个参数的影响,使传

输矩阵的校准也具有一定的挑战性^[8-9]。因此基于MZI的结构同样难以实现大规模、大容量的数据交换。

相对于基于AWG和MZI而言,基于MRR的片上光交换网络具有较小的占地面积以及支持波分复用(WDM)等独特的优势^[10-15]。Guo等^[10]提出了基于MRR辅助MZI的 16×16 光互连开关,由于没有避免使用MZI,使得这种光交换网络结构不利于在大幅缩小芯片面积的同时实现更高的集成密度。Nikolova等^[11]提出了基于两个MRR和两个交叉波导的 2×2 光开关,构建了一种 8×8 的Benes拓扑交换网络架构,并评估采用WDM技术扩展网络架构来提高网络通信带宽的可能性。其中WDM技术的利用可以使单波导通道中同时传输多个波长的信号,有效地提升通信的带宽。但由于通道带宽和系统复杂度的限制,只采用WDM技术所能提供的带宽容量也难以满足大规模交换网络的交换容量需求。

类似于WDM,模式复用(MDM)是在空间域将信号进行复用的技术,从而提升数据链路的带宽^[16-18]。波长和模式混合复用技术^[19-21]可以在一个波导中同时传输不同模式和波长的光信号,成倍地提高节点之间通信链路的带宽。Luo等^[19]提出一种由多模波导和MRR组成的片上波长和模式混合复用系统,该系统中

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-02-20; 录用日期: 2023-03-07; 网络首发日期: 2023-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(62071076, 62205043, 62222103, 62075024)、重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1334)、重庆市教委创新研究群体项目(CXQT21019)

通信作者: *houwg@cqupt.edu.cn

多模波导可支持 5 个空间模式的复用,每个 MRR 在整个 C 波段支持 87 个波分复用通道,并实现了 4.35 Tb/s 的总数据速率。Wang 等^[20]提出了一种由级联非对称方向耦合器构成的 4 通道模式复用器和两个双向工作的 16×16 AWGs 组成的波长和模式混合(解)复用器。该结构可以实现 64 通道混合(解)复用,各个通道串扰达到约 -14 dB。然而,现阶段基于波长和模式混合复用的方案主要集中于复用/解复用器结构的设计。对于所报道的互连方案,通常将单个节点生成的数据同时分配到不同的波长和模式,然后将多通道数据复用到单个波导中进行传输,以增加通道带宽。然而这种方式忽略了不同模式或者不同波长的多维复用信号之间的数据交换,虽然可以有效地提升交换容量,但所支持的交换节点的规模仍然受限。

基于此,本文提出一种基于波长和模式混合复用的片上光交换网络架构。该架构采用 Benes 拓扑作为核心交换单元,实现无阻塞特性。架构包括了波长分配模块、模式选择和复用模块、实现波长模式混合交换的 2×2 基本光开关单元,保证所提架构能够实现所有节点之间的多维复用信号进行并行数据交换,此外还可以实现多播的数据传输。为验证本文所提出的结构,使用光学仿真平台 Ansys Lumerical 以 25 Gbps 的数据传输率对一个两种模式、4 个波长复用的 16×16 的片上交换网络的性能进行了仿真验证。在不考虑光栅耦合损耗的情况下, 16×16 网络的最大插入损耗小于 2.1 dB,模间串扰小于 -18.4 dB。网络最大和最小插入损耗差值小于 0.5 dB,证明该交换网络具有良好的公平性。最后,利用所提交换网络结构与传统的基

于单波长单模式(SWSM)以及多波长单模式(MWSM)的光交换网络结构进行了插入损耗以及网络扩展性方面的仿真对比,验证了本文所提结构的良好性能。

2 交换网络结构设计

2.1 基于波长和模式混合复用的光交换网络架构

图 1 显示的是所提的基于波长和模式混合复用的片上光交换网络架构。该架构包括完成波长及模式选择和复用单元的发送模块、基于 2×2 光开关级联而成的 $N \times N$ Benes 光交换模块,以及基于 MRR 进行滤波的、内含模式/波长解复用单元的接收模块。其中发送模块包含 N 个双链路输入、单链路输出的波长-模式选择/复用模块,输入信号为两组波长复用的基模光信号,其中一组光信号经过模式转换为高阶模式信号后与另一组基模信号进行复用,并从一个端口输出。 $N \times N$ Benes 光交换模块是一种具有 N 输入、 N 输出的多级互连网络,其级数为 $2 \log_2 N - 1$,光开关模块总数为 $N \log_2 N - N/2$,其中每一个光开关模块都支持波长以及模式的交换。接收端包含 N 个模式-波长解复用模块,每个模块包含一个输入链路,用来对接收到的波长和模式复用的信号进行解复用。与传统的基于波长和模式混合复用的片上光交换网络不同,本文所设计的交换架构的主要特点是不仅可以用于波长和模式复用来提升带宽,还可以用于不同波长、模式之间的选择和转换,使所有的节点都能实现任意的波长及模式分配。因此,其不仅可以提高片上光互连网络的交换容量,还可以根据通信需求,将波长和模式分配给不同的节点,提升互连网络规模。

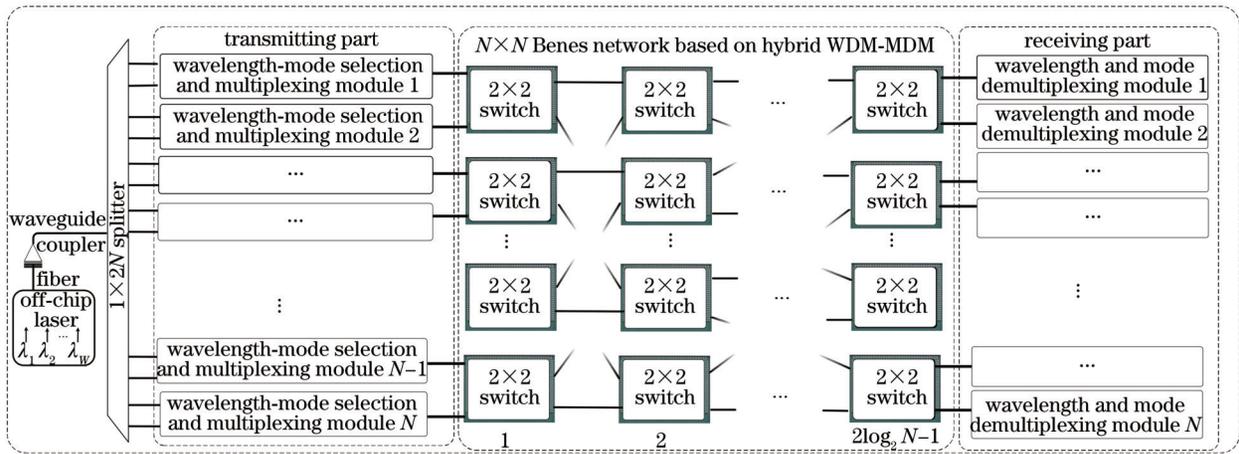


图 1 基于波长-模式混合复用的片上光交换网络架构

Fig. 1 On-chip optical switching network architecture based on hybrid wavelength-mode division multiplexing

2.2 基于波长和模式混合复用的发送和接收模块

在发送端,所有的处理器节点被分成 $2N$ 组,每组中包含 W 个节点,且每一组的输入都是由 W 个波长复用的 WDM 信号,如图 2(a) 所示。每个节点与一个

基于 MRR 的电光调制器阵列相连,实现电光的转换。每个组中需要打开的 MRR 的数量和所需要调制的波长由网络中工作节点数量和每个节点所携带的数据量来动态调整。例如在图 2(a) 中,与节点 W 相连的调制

器组中的谐振波长为 λ_1 和 λ_2 的 MRR 处于打开状态, 节点 W 处的数据将会加载到波长 λ_1 和 λ_2 上传输到输出端口。同理, 将节点 1 的数据加载到波长 λ_w 进行传输, 最后与该组中其他波长的信号复用从输出端口输出。此外, 当将某个节点的数据调制到多个波长通道上进

行同时传输后, 在接收端可以根据波长选择将信号分成多路传输到不同的接收节点中, 实现多播传输。在任何情况下, 每个组中不同节点的数据需要调整到不同的波长上以避免冲突。

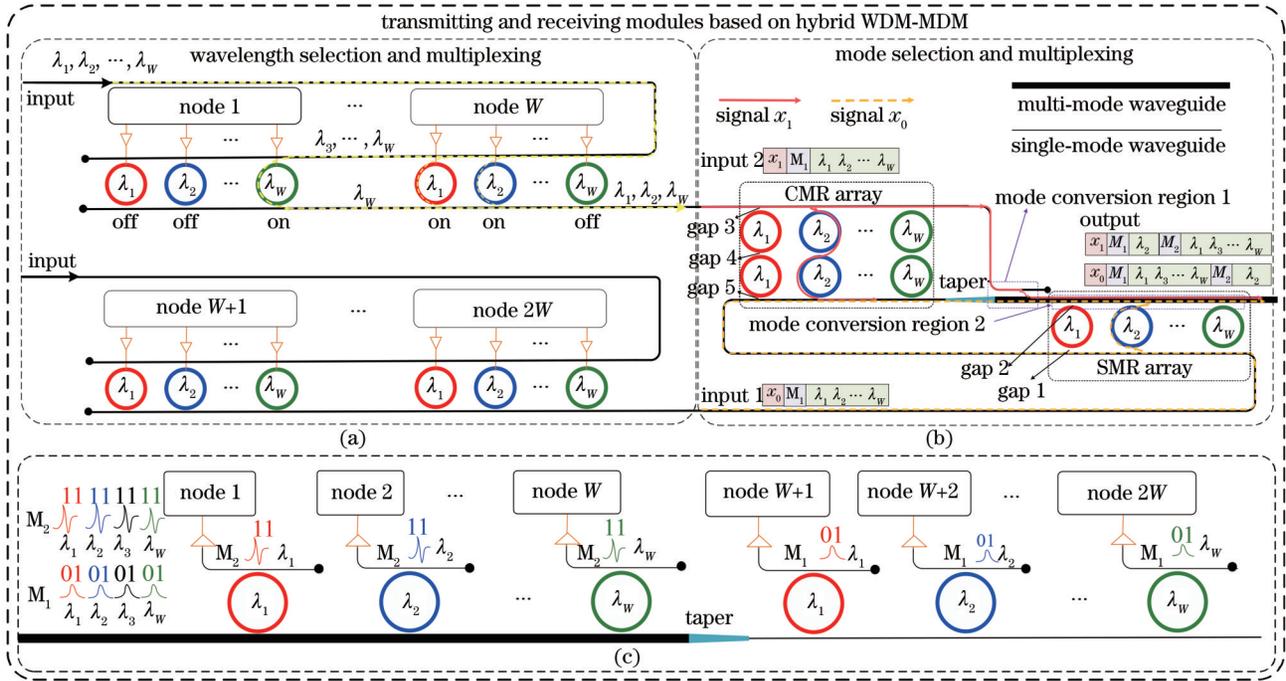


图 2 发送和接收模块结构。(a) 波长选择/复用模块; (b) 模式选择/复用模块; (c) 模式/波长解复用模块

Fig. 2 Structures of transmitting and receiving modules. (a) Wavelength selection/multiplexing module; (b) mode selection/multiplexing module; (c) mode/wavelength demultiplexing module

被调制的光信号从图 2(a) 所示的波长选择模块输出之后, 将会进入图 2(b) 所示的模式选择/复用模块 (MSM), 其作用是将输入的基模信号分别转换成不同的模式并进行复用后从一个端口输出。如图 2(b) 所示, 为了实现 2 个模式的复用, 该模块配置有 2 个输入端口, 分别与 2 组波长选择模块的输出端口相连。每个模式选择/复用模块有一个输出端口与交换模块中的 Benes 的输入端口相连。在 MSM 中具有两种通过锥形器互连的不同宽度的波导。其中, 单模波导 (single-mode waveguide) 只支持基模 (M_1), 而多模波

导 (multi-mode waveguide) 可以支持 M_1 和高阶模 (M_2) 两个模式。此外, 两个模式转换区域由单模波导和多模波导组成的非对称耦合波导构成, 根据耦合模理论, 单模波导和多模波导中的本征模式满足耦合模方程:

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 + \kappa_{12} a_2, \quad \frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 + \kappa_{21} a_1, \quad (1)$$

式中: a_1, a_2 分别为模式 M_1, M_2 的复振幅; β_1, β_2 分别为 M_1, M_2 的传播常数; κ_{12}, κ_{21} 分别为两个波导之间的交叉耦合系数, 假设两个波导中的模式光 $a_1(0), a_2(0)$ 在 $z=0$ 处发射, 则式 (1) 的解为

$$\begin{aligned} a_1(z) &= \left[a_1(0) \left(\cos \beta_0 z + j \frac{\beta_2 - \beta_1}{2\beta_0} \sin \beta_0 z \right) + \frac{\kappa_{12}}{\beta_0} a_2(0) \sin \beta_0 z \right] e^{-j[(\beta_1 + \beta_2)/2]z} \\ a_2(z) &= \left[\frac{\kappa_{21}}{\beta_0} a_1(0) \sin \beta_0 z + a_2(0) \left(\cos \beta_0 z + j \frac{\beta_1 - \beta_2}{2\beta_0} \sin \beta_0 z \right) \right] e^{-j[(\beta_1 + \beta_2)/2]z} \end{aligned}, \quad (2)$$

式中,

$$\beta_0 = \sqrt{\left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2\beta_0} \right)^2 + \kappa_{12} \kappa_{21}}. \quad (3)$$

假设初始时 $a_1(0) = 1, a_2(0) = 0$, 则 M_1 到 M_2 的耦合为

$\kappa_{21}/\beta_0 \sin \beta_0 z$ 。当单模波导中 M_1 信号的有效折射率与多模波导中 M_2 信号的有效折射率相同时, 即 $\beta_1 = \beta_2$, 达到相位匹配条件, 此时单模波导中 M_1 模式完全耦合到多模波导中并转换为 M_2 模式。此外, 锥形器 (taper) 处连接的单模波导输入的 M_1 模式, 由于 taper 的绝热

作用到达多模波导中依然保持 M_1 模式, 此时多模波导中存在的两种模式由于有效折射率不同, 两者不会发生耦合, 从而实现模式复用。

为了实现两个输入端口的信号都可以进行从 M_1 到 M_2 的转换, 需设计两个从单模波导到多模波导转换的模式转换区域。此外, 为了实现两个非接触波导之间的数据交换, 设计了基于单微环结构的开关阵列 (SMR) 和基于双环耦合结构的开关阵列 (CMR), 如图 2(b) 所示。SMR 阵列中微环与单模波导及多模波导的耦合间距不同, 分别为间距 1 (gap 1) 和间距 2 (gap 2)。在 CMR 阵列中, 单模波导与环、环与环之间形成三个耦合区域, 其间隔分别为间距 3 (gap 3)、间距 4 (gap 4) 和间距 5 (gap 5)。在模式转换区 1 和 2 内, 一旦满足前面所述的相位匹配条件, 窄波导基模信号可以激励宽波导中的高阶模, 实现从基模到高阶模的转变。因此, 当 SMR 和 CMR 中谐振波长为 λ_2 的 MRR 处于打开时, 从输入端口 1 输入的波长为 λ_2 的 M_1 模信号将会与 SMR 中波长为 λ_2 的 MRR 发生谐振并模式转换为高阶模 M_2 信号并从多模波导输出, 而其他波长的信号将会从 MRR 直通输出并经过锥形器进入多模波导中, 保持基模 M_1 不变。从输入端口 2 输入的波长为 λ_2 的 M_1 模信号将会与 CMR 中波长为 λ_2 的 MRR 发生谐振, 然后经过锥形器后到达输出端口, 且保持基模 M_1 不变, 而其他波长的信号将会从 CMR 中的 MRR 直通输出并经过模式耦合区 1 后转变为高阶模 M_2 信号并从多模波导输出。

在 MSM 中, 不管 MRR 处于关闭还是打开状态, 两个输入信号都将会复用到一个端口中输出, 实现模式复用。当 MRR 都处于打开状态时, 从端口 1 输入的 M_1 信号会变成 M_2 信号。当处于关闭状态时, 从输入端口 2 输入的 M_1 信号会变成 M_2 信号。因此, 可以通过控制 MRR 的开关状态来完成模式的转换、选择

及复用。

接收端含有 N 个接收模块, 每个模块的输入端与 Benes 网络的一个输出端口相连。其输入是一个多模、多波长的复用信号。每个模块内包含 $2W$ 个节点, 每个节点与一个特定波长的微环相连, 实现波长的解复用。在图 2(c) 中, M_2 模式的输入信号将会在与节点 1 到节点 W 相连的 MRR 处转换为基模 M_1 , 并经过光电转换后发送到相应的节点中。携带 M_1 模式的输入信号最终将会根据不同的波长传输到节点 $W+1$ 到节点 $2W$ 。为了减小控制复杂度, 接收端中所有的无源 MRR 都一直处于谐振状态实现被动滤波。在工作中根据目的节点所处的位置来确定发送节点所采用的模式和波长。

2.3 基于波长和模式混合复用的交换模块

经过 MSM 之后的光信号将会进入到交换网络的输入端口。本文中, 光交换模块采用 Benes 拓扑, 因为它被证明是非阻塞、可扩展的并有很高的交换效率^[9]。Benes 中的核心单元就是 2×2 光交换单元, 所以为了提高整个交换网络的交换容量, 首要的问题是增加 2×2 单元的交换能力。因此, 本文提出了一个基于波长和模式混合复用的 2×2 光开关模块, 如图 3 所示。该结构中每个输入端口包括两种模式和 W 种不同的波长, 因此支持 $2 \times W$ 输入数据通道任意组合的数据交换。该交换单元包含两个无源的模式 (解) 复用器和两个有源的单模 2×2 光开关单元。每个输入端口输入的 M_2 和 M_1 模式的光信号经过模式解复用器后被分别传输到 MR_Group 1 和 MR_Group 2 的输入端口中。每个输入端口输入 $2W$ 组波长和模式混合复用光学信号, 包括两个模式 (M_2 和 M_1) 和 W 个波长 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w$)。假设从端口 1 输入的信号为传输 M_1 模式的 ($01_2, 01_2, 01_2, 01_2$) 和传输 M_2 模式的 ($11_2, 11_2, 11_2, 11_2$), 从端口 2 输入的信号为传输 M_1 模式的 ($11_2, 11_2,$

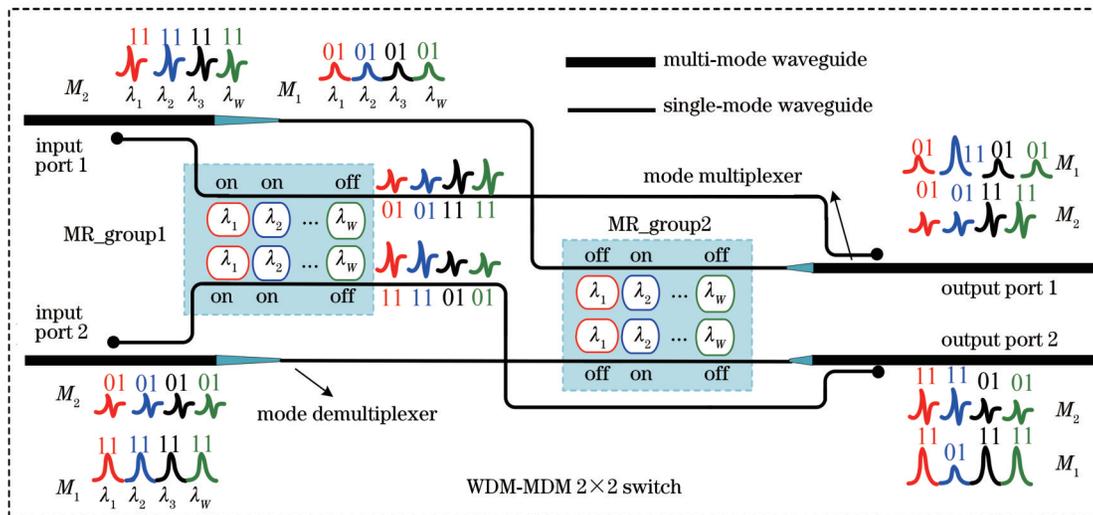


图 3 基于波长和模式混合复用的 2×2 片上光交换单元示意图

Fig. 3 Diagram of 2×2 on-chip optical switching block based on hybrid MDM-WDM multiplexing

11_2 , 11_2) 和传输 M_2 模式的 (01_2 , 01_2 , 01_2 , 01_2)。当 MR_Group 1 中谐振波长为 λ_1 和 λ_2 的 MRRs 以及 MR_Group 2 中谐振波长为 λ_2 的 MRR 处于谐振状态时,从输入端口 1 输入的 $M_1\lambda_2$ 、 $M_2\lambda_1$ 、 $M_2\lambda_2$ 这三组光信号将会从端口 2 输出,其余光信号会从端口 1 输出。从输入端口 2 输入的 $M_1\lambda_2$ 、 $M_2\lambda_1$ 、 $M_2\lambda_2$ 这三组光信号将会从端口 1 输出,其余光信号会从端口 2 输出。因此,通过对 MR_Group 1 和 MR_Group 2 中 MRR 的开关控制可以实现对不同波长信号的输出端口的选择。

为便于理解,这里假设了两类具有代表性的情况,即只有一个端口一个模式的输入通信请求和两个端口同时输入不同模式信号的通信请求。当只有一个输入请求时,最多只需要打开一个微环组,例如当输入端口 1 的 M_1 信号需要与输出端口 2 中的 M_1 模式对应的端口通信时,只需打开组 MR_Group 2 中的 MRR。对于

满负载通信时,当所有的 MRRs 都处于关闭状态时,从输入端口 1 和输入端口 2 输入的 $2W$ 组光信号将会分别从输出端口 1 和输出端口 2 输出。当所有的 MRRs 都处于打开状态时,从输入端口 1 和输入端口 2 输入的光信号将会分别从输出端口 2 和输出端口 1 输出。因此,一个 2×2 的光交换单元可以支持 $4W$ 组数据同时传输、交换,且互不影响,可有效提升交换节点的规模及交换网络的容量。

3 仿真分析

3.1 16×16 交换网络的传输频谱分析

为验证本文所提出的结构,在本节中,利用 ANSYS Lumerical Solutions^[22] 仿真平台对一个如图 4 所示的支持 2 种模式、4 种波长复用的 16×16 规模的交换网络的性能进行了仿真验证。

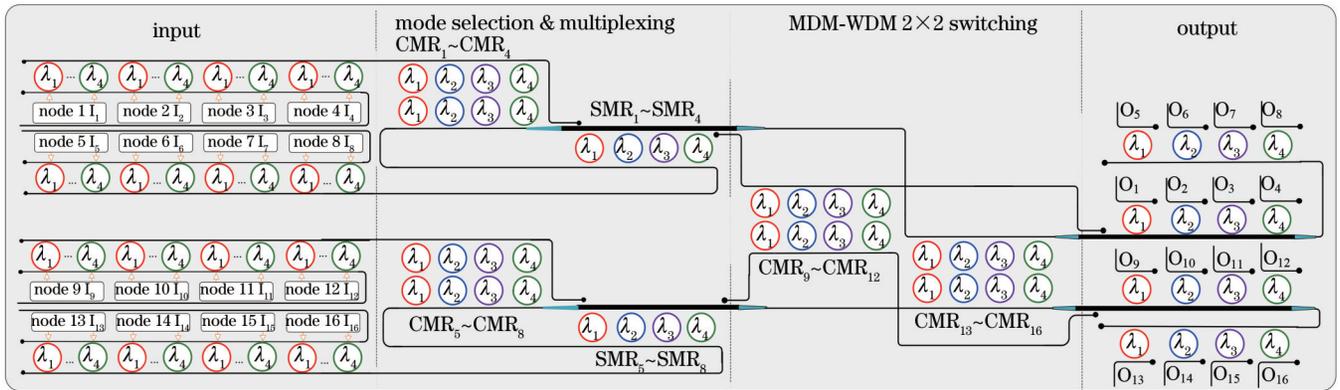


图 4 16×16 交换网络结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 16×16 switching network structure

仿真采用脊形波导结构,二氧化硅层厚度为 $3 \mu\text{m}$,硅波导高度为 $0.22 \mu\text{m}$,刻蚀厚度为 150 nm 。图 5(a) 显示的是不同宽度下波导的有效折射率,可以看出,在 $0.8 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 左右的宽度范围内该波导可以同时支持 TE_0 和 TE_1 两种模式。本文仿真采用的单模和多模波导的宽度分别为 $0.45 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 。微环的半径分别为 9.96 、 9.98 、 10.00 、 $10.02 \mu\text{m}$,对应 4 种不同谐振波长。模式选择和复用模块中的 5 个波导间隔分别为 0.25 、 0.20 、 0.20 、 0.47 、 $0.20 \mu\text{m}$ 。图 5 显示的是在上述仿真参数设置下的 SMR、CMR 以及非对称定向耦合器的场强分布及输出端口的透射谱线图。默认状态下,SMR 和 CMR 都处于谐振状态 (on-state)。对于 CMR,默认情况下,从输入端口输入的基模信号会耦合到下载端口 (drop) 输出,并保持基模不变。当对 CMR 施加电压时,其谐振波长会发生偏移,从输入端口输入的基模信号会从直通端口 (through) 输出,如图 5(b) 和 5(c) 所示。对于 SMR,默认状态下,从输入端口输入的基模 TE_0 信号会激发多模波导中的 TE_1 信号从 drop 端口输出,并伴随着小于 -15.3 dB 的模式串扰噪声,如图 5(d) 和 5(e) 所示。图 5(f) 显示的是非对称定

向耦合器中 TE_0 信号转换为 TE_1 时的场强分布,其中,耦合长度和间距分别为 $15 \mu\text{m}$ 和 $0.2 \mu\text{m}$ 。

在进行 16×16 网络级的仿真中,光栅耦合器的耦合损耗为 3.6 dB/facet ,波导传播损耗 1.5 dB/cm 。每个输入端口的光信号可以被调制到多个波长。例如,当输出端口分别为 $O_1/O_5/O_9/O_{13}$ 、 $O_2/O_6/O_{10}/O_{14}$ 、 $O_3/O_7/O_{11}/O_{15}$ 和 $O_4/O_8/O_{12}/O_{16}$ 时, I_1 的输入信号需要分别调制为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 。选择 I_1 作为输入端口,测量目标端口从 O_1 切换到 O_{16} 时 16 个输出端口的透射光谱,仿真结果如图 6 所示。当所有 MRRs 都处于关闭状态时,从 I_1 输入的波长为 λ_1 的信号,能够在 O_1 端口检测到最大的输出功率,且其他端口对 O_1 口的串扰噪声小于 -25 dB 。当 I_1 输入的波长为 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 时的信号时, O_2 、 O_3 和 O_4 端口能够分别检测到最大的信号功率。可以说明从 I_1 输入 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的光信号将分别传输到 O_1 、 O_2 、 O_3 和 O_4 端口。同理,当 $\text{CMR}_1 \sim \text{CMR}_4$ 打开时,从 I_1 输入 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的信号将分别从 O_5 、 O_6 、 O_7 和 O_8 输出。当 $\text{CMR}_9 \sim \text{CMR}_{12}$ 被打开时,从 I_1 输入的具有 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的信号将分别从 O_9 、 O_{10} 、 O_{11} 和 O_{12} 输出。当 $\text{CMR}_1 \sim \text{CMR}_4$ 和 $\text{CMR}_{13} \sim \text{CMR}_{16}$ 打开时,从 I_1 输入的

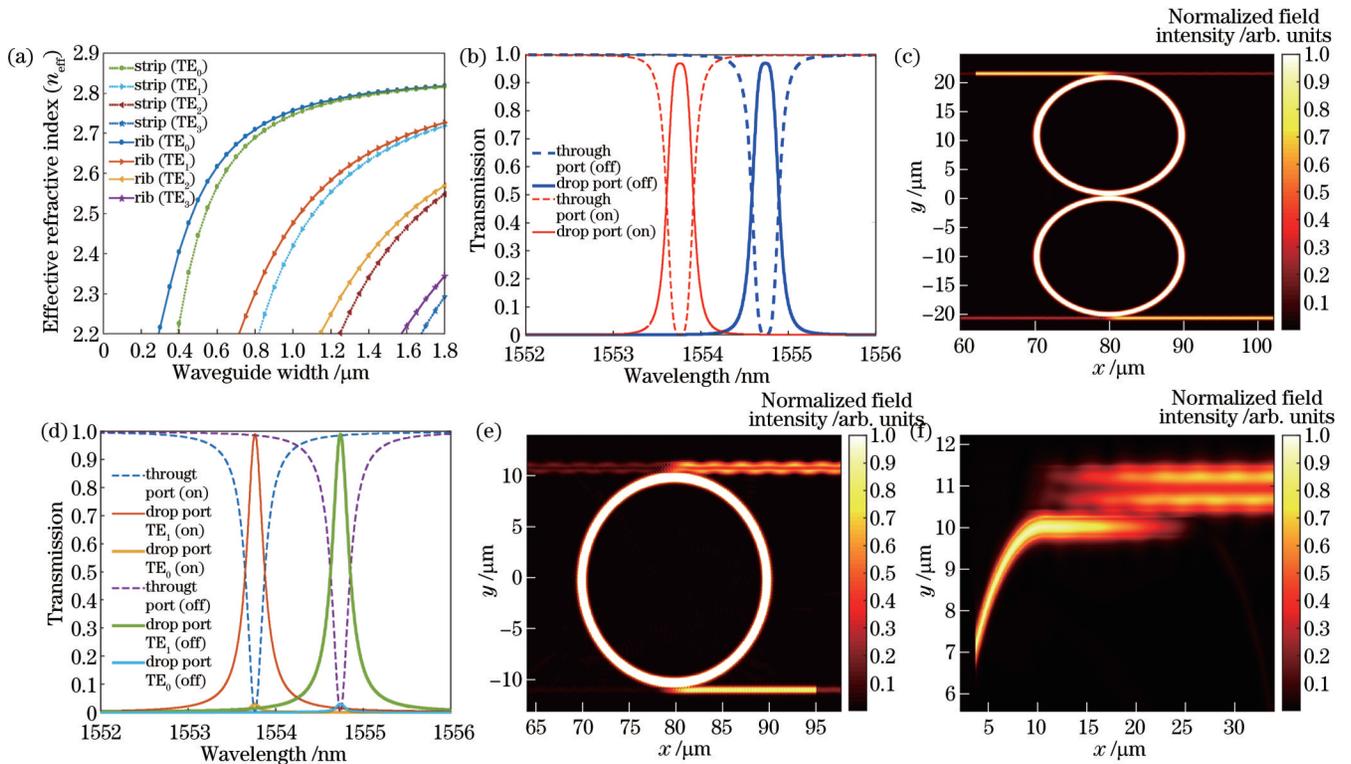


图 5 传输谱线和场强分布图。(a) 不同波导宽度下的有效折射率；(b)~(e) 半径为 $10\ \mu\text{m}$ 的 CMR 和 SMR 的 drop 和 through 端口的传输谱线和场强分布图；(f) 非对称定向耦合器的场强分布

Fig. 5 Transmission spectra and field intensity distributions. (a) Effective index values with different waveguide widths; (b)~(e) transmission spectra and field intensity distributions of drop and through ports of CMR and SMR with a radius of $10\ \mu\text{m}$; (f) field intensity distribution of asymmetric directional coupler

带有 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的信号将分别从 O_{13} 、 O_{14} 、 O_{15} 和 O_{16} 输出。从图 6 中可以看出, 每个子图中只有相应的输出端口具有最大的输出功率(最小的插入损耗)。在 16 组交换链路中, 路径 $I_1 \rightarrow O_{16}$ 具有最大的插入损耗, 约为 9.3 dB。路径 $I_1 \rightarrow O_1$ 具有最小的插入损耗, 约为 8.95 dB。最大和最小插入损耗的差值小于 0.5 dB, 说明交换网络具有良好的公平性。对于从 I_1 到 O_{1-4} 、 O_{9-12} 的传输路径, 输入 M_1 信号首先转换为 M_2 模式以便在网络中传输, 并对输出端口 O_{5-8} 和 O_{13-16} 造成模间串扰 (M_2 到 M_1 的串扰), 其中模式间串扰小于 -23.5 dB。对于从 I_1 到 O_{5-8} 、 O_{13-16} 的传输路径中输入 M_1 信号不需要模式转换, 但同样会对 O_{1-4} 、 O_{9-12} 造成小于 -18.4 dB 的模间串扰。

此外, 为了验证所提架构支持多播传输的可行性, 将 I_1 的输入信号同时调制到 4 个操作波长, 并以 O_3 、 O_5 、 O_{12} 、 O_{14} 作为输出信号观测端口。对相应微环阵列的操作分别为无操作、打开 CMR₁、打开 CMR₁₂、打开 CMR₂ 和 CMR₁₄。图 7 为所提架构在 4 个波长同时工作下的多播传输频谱图, 从图中可看出, 相应输出端口 O_3 、 O_5 、 O_{12} 、 O_{14} 的插入损耗均小于 10 dB, 且分别存在小于 -18.5 、 -17.3 、 -21.3 、 -16.2 dB 的模间串扰。因此, 所提交换架构能够实现多播通信, 并能提高频谱利用率, 实现更大规模和容量的交换网络。

3.2 16×16 网络交换性能仿真测试

为了演示所提结构的路由交换能力, 仿真测试了网络在单通道 25 Gbps 时的眼图性能。图 8 显示了在 16×16 交换结构中, 从 I_{1-4} 到 O_{1-16} 的眼图, 可以看出所有的状态有比较清晰的眼图效果, 因此理论上可以实现 400 Gbps 的带宽性能。不同的路径交换通过控制交换结构中的 CMR 和 SMR 的状态来实现。当所有 MRRs 处于关闭状态时, 从 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 输入到 I_1 到 I_4 的信号将分别从 O_1 到 O_4 端口输出, 从而得到了如图 8 所示的 $I_{1-4} \rightarrow O_{1-4}$ 的眼图。当 CMR₁~CMR₄ 打开时, 从 I_1 到 I_4 的信号分别从 O_5 到 O_8 输出, 得到图 8 第 2 行所示的眼图。当 CMR₉~CMR₁₂ 打开时, 从 I_1 到 I_4 的信号从 O_9 到 O_{12} 输出, 得到图 8 第 3 行所示 $I_{1-4} \rightarrow O_{9-12}$ 的眼图。当 CMR₁~CMR₄ 和 CMR₁₃~CMR₁₆ 打开时, 从 I_1 到 I_4 的输入信号分别从 O_{13} 到 O_{16} 输出, 如图 8 中第 4 行的眼图所示。此外, 还可以得到各开关路径的消光比 (ER)、上升时间 (RT) 和下降时间 (FT) 的结果。

由于 $I_{1-4} \rightarrow O_{5-8}$ 及 $I_{1-4} \rightarrow O_{9-12}$ 的通信服务均只打开一个微环阵列, 因此对比图 8 中的第 2、3 行眼图, 可以发现 O_5 到 O_8 检测到的眼图性能总体上要优于 O_9 到 O_{12} 检测到的眼图性能。这主要是因为 $I_{1-4} \rightarrow O_{5-8}$ 的通信服务采用的是基模 (TE_0) 进行传输, $I_{1-4} \rightarrow O_{9-12}$ 的通信服务采用的是基模 (TE_0) 进行传输, TE_1 比 TE_0 损耗

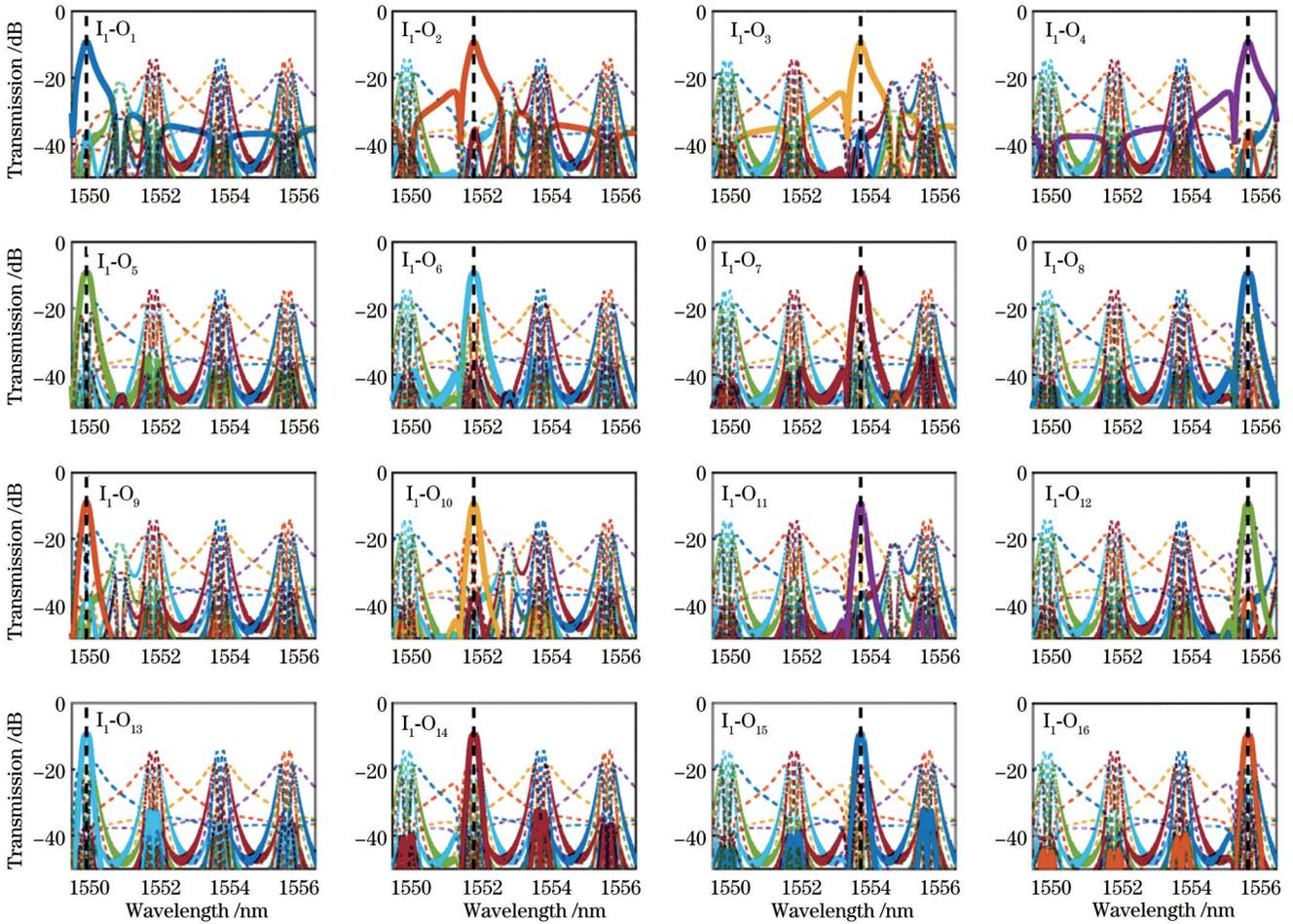


图 6 16×16 MDM-WDM 交换网络的传输光谱。输入端口为 I_1 ，输出端口从 O_1 切换到 O_{16}

Fig. 6 Transmission spectra of 16×16 MDM-WDM switching network. Input port is I_1 and output ports are switched from O_1 to O_{16}

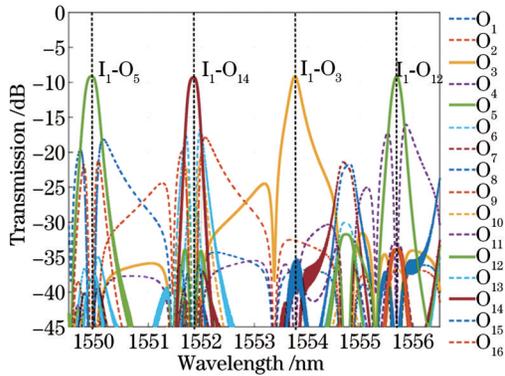


图 7 16×16 MDM-WDM 交换网络的多播传输频谱。输入端口为 I_1 ，输出端口为 O_3 、 O_5 、 O_{12} 、 O_{14}

Fig. 7 Multicast transmission spectra of 16×16 MDM-WDM switching network. Input port is I_1 and output ports are O_3 , O_5 , O_{12} , and O_{14}

此外, TE_1 需要在发送和接收端各进行一次模式复用, 在交换模块处进行一次解复用, 不可避免地存在一定的模式转换损耗。此外, 纵向对比图 8 中的 4 列眼图, 可以发现 O_1 到 O_4 检测到的眼图性能最优, 且 I_4 - O_4 的传输具有最大的 ER。这主要是由于来自 I_{1-4} → O_{1-4} 的通信服务不需要打开任何 MRR 单元, 因此由 I_{1-4} →

O_{1-4} 能够获得更优的网络性能, 这也意味着减少微环的打开数量可以有效地减小传输过程中的损耗对网络性能的负面影响。

3.3 网络插入损耗及可扩展性能分析

根据文献[23], 交换网络最大的插入损耗性能可以很好地反映交换结构的可扩展性, 小的插入损耗可以使网络能够接入更多的交换节点。因此, 在这部分中, 建立了一个理论分析模型来近似估计本文所提的光交换网络与传统的 SWSM 和 MWSM 光交换网络的插入损耗。为了公平比较, 采用图 9 所示的两种 2×2 光开关结构来表征 SWSM 和 MWSM 结构。

插入损耗主要来源于 2×2 开关单元以及它们之间的交叉波导。对于交换单元, 如图 3 所示, 输入信号经过多个基本的光器件到达输出端口。假设 $L_{i,j}^{m,w}$ 表示从第 i 个输入端口到第 j 个输出端口的携带 m 模式和 w 波长的信号的插入损耗。 L_{CMR_on} 、 L_{CMR_off} 、 L_{bend} 、 L_{MC} 、 L_{taper} 和 L_c 分别表示打开状态的 CMR、关闭状态下的 CMR、弯曲波导、模式转换器、锥形器和交叉波导的插入损耗系数。 N_{CMR_on} 、 N_{CMR_off} 、 N_{bend} 、 N_{MC} 、 N_{taper} 和 N_c 分别表示传输路径中对应光器件的个数。因此, $L_{i,j}^{m,w}$ 可以计算为

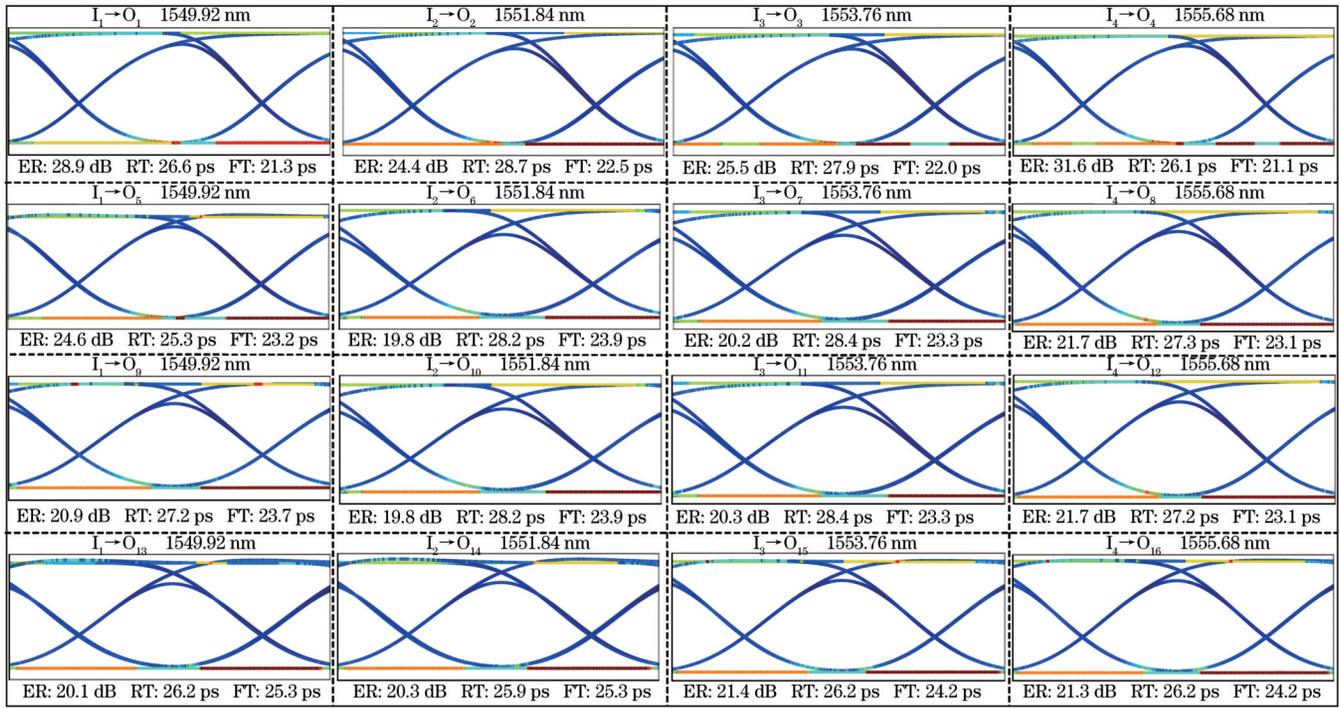


图 8 传输速率为 25 Gbps 时数据从 I_{1-4} 传输到 O_{1-16} 的眼图

Fig. 8 Eye diagrams for data transmission through optical links from I_{1-4} to O_{1-16} when transfer rate is 25 Gbps

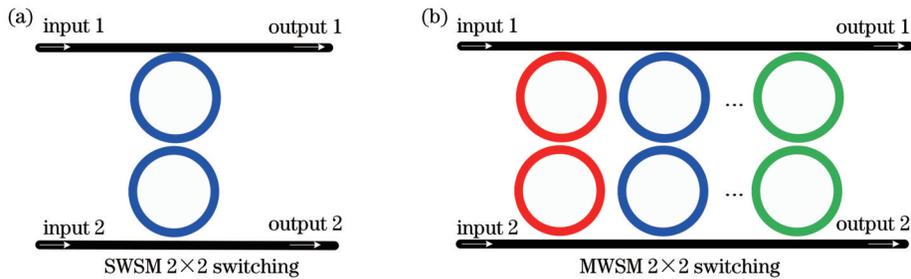


图 9 对比结构。(a) 基于 SWSM 的 2×2 交换单元；(b) 基于 MWSM 的 2×2 交换单元

Fig. 9 Structures for comparison. (a) SWSM-based 2×2 switching unit; (b) MWSM-based 2×2 switching unit

$$L_{i,j}^{m,w} = L_{\text{CMR}_{\text{on}}}^{N_{\text{CMR}_{\text{on}}}} \cdot L_{\text{CMR}_{\text{off}}}^{N_{\text{CMR}_{\text{off}}}} \cdot L_{\text{bend}}^{N_{\text{bend}}} \cdot L_{\text{MC}}^{N_{\text{MC}}} \cdot L_{\text{taper}}^{N_{\text{taper}}} \cdot L_c^{N_c} \quad (4)$$

对应的插入损耗为

$$l_{i,j}^{m,w} = 10 \lg L_{i,j}^{m,w} \quad (5)$$

对于一个完整的片上交换网络，一个光信号将通过光栅耦合器 (GCs)、多级交换单元、接收单元和交叉波导到达目标端口。由于很难跟踪来自每个光学器件的所有端口的信号，所以可使用一种近似的方法来评估所有信号的最大插入损耗。假设最小输出信号功率为

$$P_{\min} = P_{\text{in}} \cdot L_{\text{GC}} \cdot L_{\text{mod}}(\max) \cdot L_{\text{MSM}}(\max) \cdot L_{i,j}^{m,w}(\max)^{2 \log_2 N - 1} \cdot L_c^{2(N - \log_2 N - 1)} \cdot L_{\text{deMUX}}(\max) \quad (6)$$

式中： L_{GC} 为光栅耦合器的功率损耗系数； $L_{\text{mod}}(\max)$ 、 $L_{\text{MSM}}(\max)$ 、 $L_{i,j}^{m,w}(\max)$ 、 $L_{\text{deMUX}}(\max)$ 分别为调制器、MSM、 2×2 光开关、模式和波长解复用器的最大功率损耗系数。

图 10 显示了最大插入损耗的仿真结果。从图中可以看出，在同一网络规模下，基于 SWSM 的交换结

构的最大插入损耗远高于其他交换结构。这是因为在相同的网络规模下，基于 SWSM 的交换解决方案需要一个大规模的 Benes 网络来实现多个节点的互连。因此，数据传输需要通过更多的 2×2 个开关单元和相邻层级之间的交叉波导，从而增加了插入损耗。与基于 MWSM 的开关结构相比，本文所提结构可以在不增加波长成本的情况下有效地减少插入损耗，这一优势随着网络的规模扩大而变得更加明显。此外，相同的插入损耗下，本文所提的结构支持的节点数量大于传统的基于 SWSM 和 MWSM 的结构，这也说明本文所提结构在扩大网络规模方面具有明显的优势。另一方面，对于使用的相同数量的波长，如果使用 M 模式用于多路复用，所提交换架构中使用的 2×2 开关模块的数量将减少 $M(2 \log_2 N - 1) / [2 \log_2(N/M) - 1]$ 次。Benes 拓扑的控制复杂度将降低 $2^{2 \log_2 N - 1} / [2 \log_2(N/M) - 1]$ 次。

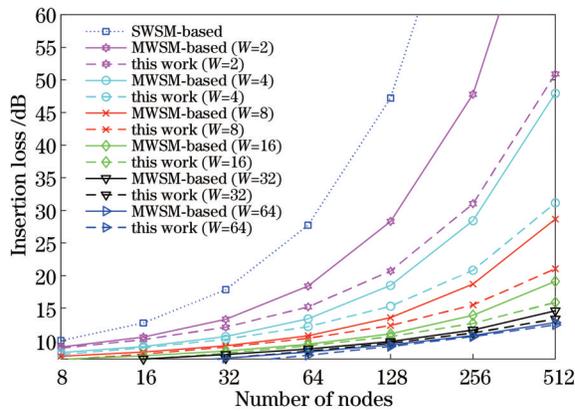


图 10 本文结构与传统的基于 SWSM 和 MWSM 的结构在不同网络规模下的最大插入损耗性能对比

Fig. 10 Maximum insertion loss performance comparison between this work and traditional SWSM-based and MWSM-based structures under different network scales

4 结 论

本文对多维复用的大规模、大容量片上光交换网络进行研究,提出了一种基于波长和模式混合复用的新型无阻塞片上光交换网络架构。该架构采用多波长、多模式的多维复用方式,并基于 MRR 实现波长和模式选择/复用以及波长和模式混合复用 2×2 光开关,提高了片上光交换网络的传输容量和通道数目。此外,为了实现无阻塞特性,采用 Benes 拓扑互连成大规模交换网络。为了验证上述所提架构器件级、网络级的交换和扩展性能,采用一个具有 2 模式、4 波长混合复用的 16×16 交换网络架构进行仿真模拟,结果证明,所提交换网络能够实现所有节点间多维复用信号的并行数据交换,且 16×16 网络的最大插入损耗小于 2.1 dB,模间串扰小于 -18.4 dB,最大和最小插入损耗差值小于 0.5 dB,证明该交换网络具有良好的公平性。此外,还仿真验证了所提结构可以实现多播传输。最后,对网络级最大插入损耗的分析表明,该结构比传统的基于 SWSM 和基于 MWSM 的结构具有更低的插入损耗,从而可以支持更多的节点交换。由于插入损耗主要来源于 2×2 开关单元以及它们之间的交叉波导,未来可以通过优化结构进一步降低插入损耗并提高波长复用及模式复用的规模,助力于大规模光数据中心交换网络的实现。

参 考 文 献

[1] Lu P, Zhang L, Liu X H, et al. Highly efficient data migration and backup for big data applications in elastic optical inter-data-center networks[J]. *IEEE Network*, 2015, 29(5): 36-42.
 [2] Wei W T, Gu H X, Wang K, et al. Improving cloud-based IoT services through virtual network embedding in elastic optical inter-DC networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(1): 986-996.

[3] Guo P X, Hou W G, Guo L, et al. Fault-tolerant routing mechanism in 3D optical network-on-chip based on node reuse [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2020, 31(3): 547-564.
 [4] Wang Z F, Xu J, Yang P, et al. High-radix nonblocking integrated optical switching fabric for data center[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(19): 4268-4281.
 [5] Suzuki K, Konoike R, Matsuura H, et al. Recent advances in large-scale optical switches based on silicon photonics[C]//2022 Optical Fiber Communication Conference (OFC), March 6-10, 2022, San Diego, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2022: W4B.6.
 [6] Parra J, Olivares I, Brimont A, et al. Toward nonvolatile switching in silicon photonic devices[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(6): 2000501.
 [7] 杨晓雪, 胡冰, 魏晓强, 等. 一种新型的高容量光互连架构[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1406002.
 Yang X X, Hu B, Wei X Q, et al. Novel architecture for high capacity optical interconnects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1406002.
 [8] Qiu C Y, Zhang C, Zeng H Y, et al. High-performance graphene-on-silicon nitride all-optical switch based on a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(7): 2099-2105.
 [9] Qiao L, Tang W J, Chu T. 32×32 silicon electro-optic switch with built-in monitors and balanced-status units[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-7.
 [10] Guo Z Z, Lu L J, Zhou L J, et al. 16×16 silicon optical switch based on dual-ring-assisted Mach-Zehnder interferometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 225-232.
 [11] Nikolova D, Rumley S, Calhoun D, et al. Scaling silicon photonic switch fabrics for data center interconnection networks [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1159-1175.
 [12] Guo P X, Hou W G, Guo L, et al. Potential threats and possible countermeasures for photonic network-on-chip[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(9): 48-53.
 [13] Huang Y S, Cheng Q X, Hung Y H, et al. Multi-stage 8×8 silicon photonic switch based on dual-microring switching elements[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 194-201.
 [14] Guo P X, Hou W G, Guo L, et al. Low insertion loss and non-blocking microring-based optical router for 3D optical network-on-chip[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 7901010.
 [15] Fu M C, Zheng Y, Li G Y, et al. Ultra-compact titanium dioxide micro-ring resonators with sub- $10\text{-}\mu\text{m}$ radius for on-chip photonics[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1416-1422.
 [16] Li C L, Liu D J, Dai D X. Multimode silicon photonics[J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(2): 227-247.
 [17] Han X, Xiao H F, Ren G H, et al. On-chip non-blocking optical mode exchanger for mode-division multiplexing interconnection networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(20): 6563-6571.
 [18] 吕元帅, 汪成根, 袁伟, 等. 基于相变材料的可重构模式复用光波导开关[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1723001.
 Lü Y S, Wang C G, Yuan W, et al. Reconfigurable mode multiplexer waveguide switch based on phase change material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1723001.
 [19] Luo L W, Ophir N, Chen C P, et al. WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-7.
 [20] 王健. 面向光互连的硅基片上复用器件的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
 Wang J. Silicon-based on-chip multiplexing devices for optical interconnects[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
 [21] 王健, 曹晓平, 张新亮. 片上集成多维光互连和光处理[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1206001.
 Wang J, Cao X P, Zhang X L. On-chip integrated multi-

- dimensional optical interconnects and optical processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1206001.
- [22] ANSYS-Lumerical[EB/OL]. [2022-11-09]. <https://www.lumerical.com>.
- [23] Chan J, Hendry G, Biberman A, et al. Architectural exploration of chip-scale photonic interconnection network designs using physical-layer analysis[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(9): 1305-1315.

On-Chip Optical Switching Network Architecture Based on Hybrid Wavelength and Mode Division Multiplexing

Guo Pengxing^{1,2}, Zhou Jiahao^{1,2}, Hou Weigang^{1,2*}, Guo Lei^{1,2}

¹*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

²*Institute of Intelligent Communication and Network Security, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*

Abstract

Objective Due to the limitation of electronic bottleneck, the traditional switching networks based on electrical devices are challenging to meet the needs of large-scale data exchange in the big data era. As an alternative, emerging silicon-based optical switching networks can effectively increase network capacity and reduce energy consumption. In addition, taking advantage of wavelength division multiplexing (WDM) or mode division multiplexing (MDM) technologies, multiple optical signals can be transmitted simultaneously in one optical link, effectively improving the optical interconnection density and communication bandwidth. However, the current optical switching network usually uses only WDM or MDM, which can only partially develop the parallel advantages of optics. Thus, we propose a novel on-chip optical switching network architecture based on hybrid wavelength and mode division multiplexing (WDM-MDM) technology. By inputting data of different wavelengths and modes into a single optical waveguide to achieve parallel transmission, the switching network's capacity multiplies. In addition, the proposed architecture enables data transmission between all nodes in parallel and supports multicast communication. The proposed architecture is expected to address the challenges of high-capacity switching requirements faced by data center networks by scaling the number of multiplexed wavelengths and modes.

Methods We propose an on-chip optical switching network architecture (Fig. 1) based on hybrid WDM-MDM technology. The architecture uses Benes topology as the core switching unit to achieve non-blocking features. Besides, we design a mode selection/multiplexing (MSM) module-based transmitting module [Figs. 2(a)-2(b)]. All nodes are divided into $2N$ groups at the transmitting module, with each containing W processor nodes. Each node is connected to a microring resonator (MRR)-based modulator array at the transmitter side to realize electro-optical conversion. The modulated optical signal is then transmitted to the MSM module. In the MSM module, one of the input fundamental mode signals will be converted into a higher-order mode signal. Then these two different mode signals will be multiplexed into a multi-mode waveguide and transmitted to the input port of the hybrid WDM-MDM switching unit of 2×2 (Fig. 3). The switching unit contains two passive mode multiplexers (demultiplexers) and two double-ring MRR-based single-mode optical switching units of 2×2 . Each input port in the hybrid WDM-MDM switching unit of 2×2 includes two modes and W different wavelengths, so it supports data exchange of any combination of $2W$ input data channels. Finally, we use Benes topology to cascade the proposed switching unit of 2×2 to form a large-scale hybrid WDM-MDM optical switching network.

Results and Discussions We use the ANSYS Lumerical Solutions simulation platform to conduct device-level and system-level modeling and hardware parameter optimization for a 2-mode, 4-wavelength-based scale switching network of 16×16 . The width of the single- and the multi-mode waveguide is $0.45 \mu\text{m}$ and $1 \mu\text{m}$; the radii of the MRRs are 9.96, 9.98, 10, and $10.02 \mu\text{m}$; the gaps 1-5 in CMR and SMR are 0.25, 0.2, 0.2, 0.47, and $0.2 \mu\text{m}$, and the coupling length and gap in mode conversion region 1 are 15 and $0.20 \mu\text{m}$, respectively. Figure 4 shows the transmission spectra and filed intensity distribution simulation results of the CMR switch, SMR switch, and asymmetric mode converter. Then, we analyze the transmission spectrum of the 16×16 switching network by choosing I_1 as the input port and measuring the transmission spectra of 16 output ports (Fig. 6). Among the 16 switching links, $I_1 \rightarrow O_{16}$ has the maximum insertion loss of about 9.30 dB, and the path $I_1 \rightarrow O_1$ has the minimum insertion loss of about 8.95 dB. The difference between the

maximum and minimum insertion loss is less than 0.5 dB, which indicates that the switching network has excellent fairness. The input signal of I_1 is also modulated to four operational wavelengths, and the output signal is observed at the corresponding output port (Fig. 7), which verifies that the switching architecture is capable of multicast communication. In addition, we simulate the eye diagram with a single channel of 25 Gbps data rate and obtain the extinction ratio, rise time, and fall time results (Fig. 8). The results show that the detected eye diagram performance is better from I_{1-4} to O_{1-4} , which means that reducing the number of MRRs turned on can effectively reduce the negative influence on the network performance. Finally, we compare the proposed architecture with traditional single-wavelength single-mode (SWSM) and multi-wavelength single-mode (MWSM) optical switching architectures. The results show that the proposed architecture can effectively reduce the insertion loss without increasing the wavelength cost, and this advantage becomes more obvious as the size of the network expands (Fig. 10).

Conclusions We propose a scalable WDM-MDM-based on-chip optical switching network architecture and design an MRR-based wavelength/mode selection/multiplexing module and a WDM-MDM optical switching module of 2×2 . As a proof of concept, a switching network architecture of 16×16 with 2-mode, 4-wavelength, and Benes topology of 2×2 has been simulated. Finally, the maximum insertion loss performance of the proposed architecture and the traditional SWSM-based and MWSM-based switching architectures are simulated and analyzed, and the superiority of the proposed architecture is proven. The proposed architecture can further increase the scale of wavelength multiplexing and mode multiplexing and reduce the insertion loss through structural optimization, which can help realize large-scale and high-capacity optical data center switching networks.

Key words integrated optics; on-chip optical switching network; non-blocking; microring resonators; hybrid wavelength and mode division multiplexing; multicast communication