

扩张型 Benes 光交换集成芯片路由算法

张金花,武保剑*,邱 昆

(电子科技大学 信息与通信工程学院,成都 611731)

摘要:针对目前重排无阻塞结构只重点解决配置算法的资源冲突、算法复杂度和时间复杂度,而没有关注整个芯片结构的性能问题,以“基于微环谐振器的 16×16 高速光交换集成芯片”863 项目为背景,介绍了光交换集成芯片实验系统组成,以及重排无阻塞的传统型和扩张型 Benes 光交换集成芯片结构,详细描述了相应环路路由算法的具体执行过程。针对扩张型 Benes 光交换集成芯片结构,提出一种层级优化的环路路由算法,并通过穷举法证明了其有效性,其中算法的权值系数与光开关插入损耗相联系。针对给定的交换连接需求情形,采用层级优化的路由算法,得到了其最佳配置状态。研究表明:扩张型 Benes 结构具有很好的串扰抑制性能,容错能力强,但其插入损耗比传统型 Benes 结构略有增加。

关键词:光交换集成芯片; Benes 交换网络; 环路路由算法

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)02-0001-08

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.02.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Routing algorithm of dilated Benes optical switching integrated chip

ZHANG Jinhua, WU Baojian*, QIU Kun

(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Aiming at rescheduling non-blocking architecture which only focuses on rescheduling algorithm's resource conflict, algorithm complexity and time complexity, but does not pay attention to the performance of the whole chip structure, based on the 863 project of "16 × 16 high-speed optical switching integrated chip on account of micro-ring resonator", this paper introduces the composition of the optical switching integrated chip experimental system, the traditional and dilated Benes optical switching integrated chip architectures with no blocking rearrangement, and describes the specific implementation process of the corresponding loop routing algorithm. A hierarchical optimization loop routing algorithm is proposed for the extended Benes optical switching integrated chip architecture, and its effectiveness is proved by exhaustive method. The weight coefficient of the algorithm is related to the insertion loss of optical switch. For a given switching connection requirement, a hierarchical optimization routing algorithm is used to obtain the optimal configuration state. The results show that the extended Benes structure has good crosstalk suppression performance and fault tolerance, but its insertion loss is slightly higher than that of the traditional Benes structure.

Key words: optical switching integrated chip; Benes switching network; loop routing algorithm

0 引言

光交换集成芯片是指在微纳尺度内、利用集成光

收稿日期:2018-11-05。

基金项目:国家 863 计划(2013AA014402)资助;国家自然科学基金(61271166,61671108)资助;教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1218)资助。

作者简介:张金花(1993-),女,硕士,现就读于电子科技大学信息与通信工程学院电子与通信工程专业,主要从事光交换芯片的基本开关单元结构、拓扑结构及路由算法方面的研究,并针对具体的大规模光交换芯片进行优化路由算法研究及其仿真验证。

*通信作者:武保剑(E-mail:bjwu@uestc.edu.cn)。



学技术实现光交换功能芯片,光交换功能可使光信号从一个信道选择性地转移到另一个信道。与传统光交换器件相比,光交换集成芯片能够有效降低交换节点功耗、体积和成本,也有助于提高交换容量、增强器件可靠性。集成光开关是构成光交换集成芯片的基本单元,常见的集成光开关单元结构有定向耦合器型、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)或微环干涉型、多模干涉型、全内反射型和数字型等^[1,2]。光开关的切换功能离不开光波导材料的热光、电光和载流子色散等物理效应,制作集成光开关的光波导材料主要有 LiNbO_3 、III-V

族化合物半导体(如 InP、GaAs)、SiO₂ 和硅等,其中基于 III-V 族化合物半导体和硅材料的高速光交换集成器件是目前研究的热点^[3,4]。

一般而言,光交换集成芯片由输入输出光耦合接口、光开关矩阵以及控制单元等几部分组成。其中,光开关矩阵是由光开关单元组成的交换网络结构,如严格无阻塞的直通型和树型结构、重排无阻塞的拜尼兹型(Benes)和斯潘克-拜尼兹型(Spanke-Benes)结构等^[5-9]。因此,采用 1×2 或 2×2 光开关单元组成大规模光交换集成芯片时,光开关单元拓扑结构至关重要^[3]。相比而言,重排无阻塞交换结构所需的开关单元数目较少,因此被广泛研究。2014 年,上海交通大学报道了一个低功耗的 2×2 开关单元^[10],采用的开关单元结构是双微环耦合 MZI 结构,器件串扰小于-20dB,开关切换的功耗为 0.69mW。2017 年,中科院半导体研究所基于 Benes 结构实现了 32×32 载流子注入型光交换芯片^[4],体现了目前高速光交换芯片的规模水平。在大规模光交换芯片中,预先确定开关路由来满足交换服务请求是不现实的,必须借助于合适的路由算法。因此,交换结构的性能与芯片路由算法密切相关。另一方面,随着光交换集成芯片输入输出端口数的扩大,芯片系统的串扰和插入损耗急剧增加,成为制约光交换芯片交换规模的关键因素^[11-13]。除进一步完善光开关单元设计和加工工艺外,通过改进光交换网络拓扑结构及其路由算法也可以降低芯片系统串扰和插入损耗^[14-16]。在光交换网络中,主要从以下两方面评价路由算法:一是输入信号能够无阻塞、无差错地路由到指定的输出端口,二是所选择的路由的插入损耗或串扰尽可能小。

以前,针对重排无阻塞结构^[17-21],重点解决配置算法的资源冲突、算法复杂度和时间复杂度等问题,没有关注整个芯片结构的性能问题。本文以“基于微环谐振器的 16×16 高速光交换集成芯片”863 项目为背景,介绍光交换集成芯片系统组成,研究重排无阻塞传统型 Benes 光交换集成芯片路由算法,提出一种可提高芯片串扰性能的扩张型 Benes 交换结构和层级优化环路路由算法。

1 光交换集成芯片实验系统

光交换芯片实验系统如图 1 所示,它由 16×16 传统型 Benes 光交换芯片模块、芯片控制模块、管理模块以及光交换收发模块组成^[22]。芯片控制模块包含有可扩展的高精度热光控制电路和电光控制电路,管理模

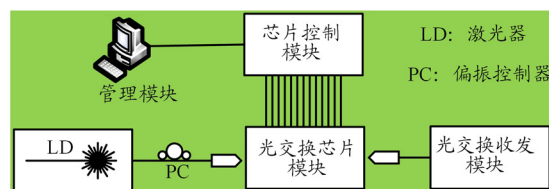


图 1 光交换芯片测试系统

块中运行芯片的配置路由算法。当管理模块收到所需输入输出交换服务请求时,调用路由算法,把计算得到的所有开关状态通过传输总线下载到控制模块中,控制模块产生适当的开关电压,完成光交换芯片中各开关单元状态的配置,从而将输入光信号交换到指定的输出端口,实现芯片交换功能。

2 传统型 Benes 光交换芯片的环路路由算法

对于图 2 所示的由 7 级光开关组成的 16×16 传统型 Benes 结构,可采用基于 2ⁿ 可重排交换网络的环路路由算法^[21],在输入端口和输出端口之间建立一一对应关系,其中同一 2×2 光开关单元的 2 个输入信号不能同时到达同一个输出端口。事实上,通路上开关单元交叉态或平行态(2×2 光开关的 2 种状态)的不同,也影响芯片的串扰和插入损耗等性能。实验中我们采用改进的环路算法,具体的改进过程将结合扩张型 Benes 结构加以说明。

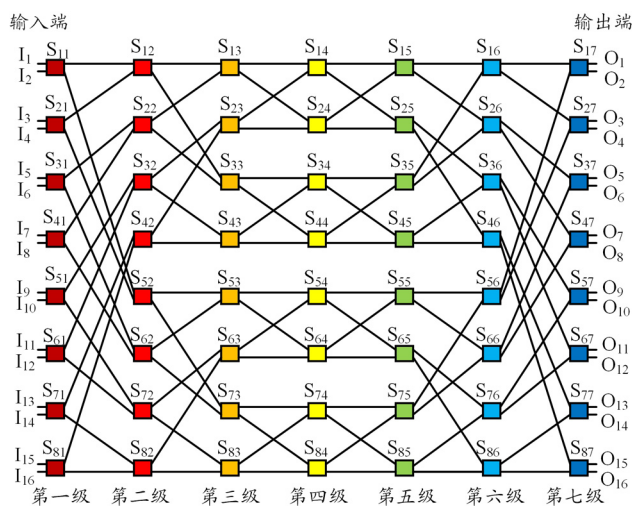


图 2 16×16 传统型 Benes 光交换结构

下面针对 16×16 传统型 Benes 结构描述环路路由算法基本思想:首先确定边缘级(如第一级和第七级)开关的状态,再确定内部次级(如第二级和第六级)开关的状态,依次类推,直到所有开关状态都确定。以 $I_1 \rightarrow O_8, I_2 \rightarrow O_{13}, I_3 \rightarrow O_7, I_4 \rightarrow O_9, I_5 \rightarrow O_1, I_6 \rightarrow O_2, I_7 \rightarrow O_{16}$ 、

$I_8 \rightarrow O_5, I_9 \rightarrow O_{11}, I_{10} \rightarrow O_{10}, I_{11} \rightarrow O_{15}, I_{12} \rightarrow O_3, I_{13} \rightarrow O_{14}, I_{14} \rightarrow O_4, I_{15} \rightarrow O_6$ 和 $I_{16} \rightarrow O_{12}$ 为例, 描述环路路由算法的具体实施过程。首先, 假设第一级的第 1 个开关 S_{11} 为平行态, 根据 Benes 网络结构特点, 从第一级中 I_1 输入的光信号经“上”子网络连接至对应开关 S_{47} (交叉态) 的 O_8 , 即完成交换需求 $I_1 \rightarrow O_8$; 然后, 与同一开关 S_{47} 的 O_7 对应的交换需求是 $I_3 \rightarrow O_7$, 输出端口 7 应从“下”子网络连接至 I_3 , 对应的开关 S_{21} 应为交叉态, 则开关 S_{21} 另一输入端口 I_4 应从“上”子网络连接至处于平行态的开关 S_{57} , 这样才能满足交换需求 $I_4 \rightarrow O_9$; 依次类推, 形成了第一个环路。接下来, 从第一级中任选一个未遍历的开关开始, 按照第一个环路路由的过程进行所有未遍历开关状态的配置, 由此形成第二个环路, 第二个环路与第一个环路相互独立, 且此时第一级和第七级的所有开关均已遍历完。第一级和第七级开关的对应状态如图 3 所示。下一步的任务是通过第二级和第六级之间的两个 8×8 开关阵列建立连接路径, 并确定第二级和第六级的开关状态。最终确定的所有光开关状态如图 4 所示。

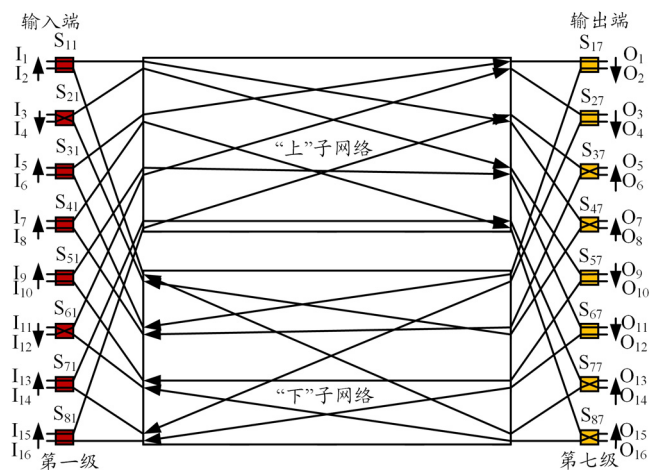


图 3 16x16 传统型 Benes 第一级和第七级开关状态确定过程

在我们承担的 863 项目中, 采用了带有环路算法的 Benes 结构交换芯片^[2], 测试得到的最大插入损耗为 32.75dB, 最大串扰为 -10.29dB, 光交换芯片串扰小于 -10dB, 实验系统实物图如图 5 所示, 实验表明它能够满足通信系统要求。

3 扩张型 Benes 结构与层级优化路由算法

3.1 扩张型 Benes 光交换结构

$N \times N$ 扩张型 Benes 光交换网络通过混洗和逆混洗的方式构造而成^[7], N 为端口数, 具体构造过程如下:

①一个 2×2 扩张型 Benes 网络包含 2 级光开关,

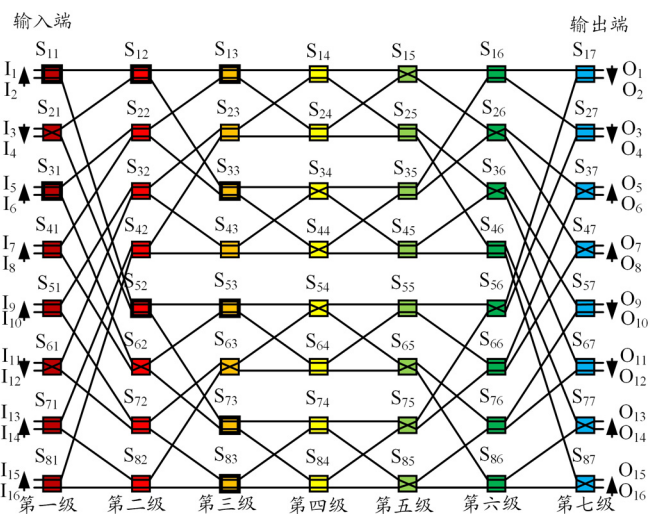


图 4 16x16 传统型 Benes 所有开关状态

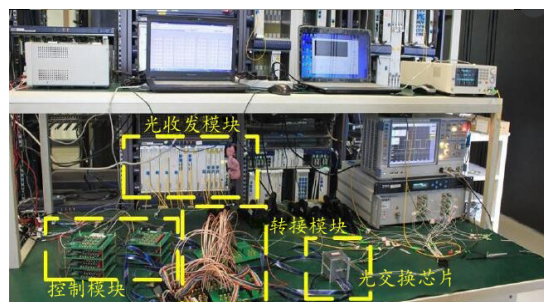


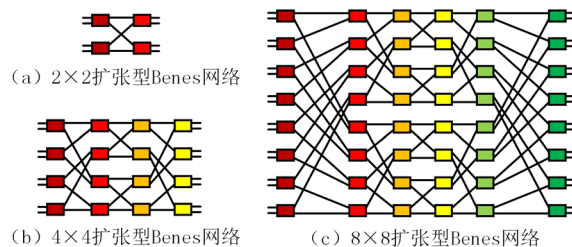
图 5 16x16 光交换芯片实验系统实物图

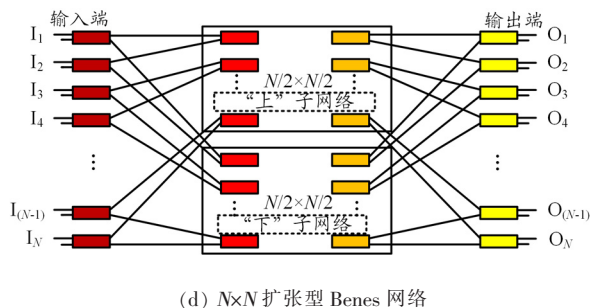
每级 2 个开关单元, 2 级开关通过混洗和逆混洗的方式连接而成, 如图 6(a) 所示, 2×2 扩张型 Benes 网络是 $N \times N$ 扩张型 Benes 网络中的基本网络 ($N \geq 2$);

②一个 4×4 扩张型 Benes 网络包含 4 级开关, 每级 4 个开关单元, 第一级和第四级开关通过混洗和逆混洗的方式连接至中间 2 个 2×2 子网络, 如图 6(b) 所示;

③一个 8×8 扩张型 Benes 网络包含 6 级开关, 每级 8 个开关单元, 第一级和第六级开关通过混洗和逆混洗的方式连接至中间 2 个 4×4 子网络, 如图 6(c) 所示。

以此类推, 按照上述相同构造方式可递归至一个 $N \times N$ 扩张型 Benes 网络, 包含 $2 \log_2 N$ 级开关, 每级 N



图 6 $N \times N$ 扩张型 Benes 结构构造

个开关单元,第一级和最后一级开关通过混洗和逆混洗的方式连接至中间两个 $N/2 \times N/2$ “上”、“下”子网络, $N \times N$ 扩张型 Benes 网络共计 $2N \log_2 N$ 个开关单元,如图 6(d)所示。

16×16 扩张型 Benes 光交换结构如图 7 所示,由图 7 和扩张型 Benes 结构特点可知,网络中每个光开关只允许 1 路信号通过,即不能有 2 路信号同时到达。对每级光开关而言,第 $(2s-1)$ 和第 $2s$ 个开关之间具有约束关系($s=1,2,\dots,8$),也就是说,若第 $(2s-1)$ 个开关从“上”子网络连接至下一级开关,则第 $2s$ 个开关只能从“下”子网络连接至下一级开关。因而扩张型 Benes 网络具有几乎可以忽略的串扰量^[8],具有非常高的信噪比优势。

16×16 扩张型 Benes 光交换结构共有 8 级(比传统型 Benes 结构多一级),每级有 16 个开关,总计 128 个光开关单元。总体而言,扩张型 Benes 光交换结构在插入损耗性能上要劣于传统型 Benes 光交换结构,或

者说,扩张型 Benes 光交换结构能够显著提升串扰性能是以增加开关单元数或插入损耗为代价的^[7,8,23]。因此,研究扩张型 Benes 光交换结构的路由算法,控制并选择具有较低插入损耗的开关路由是本文研究的重点。

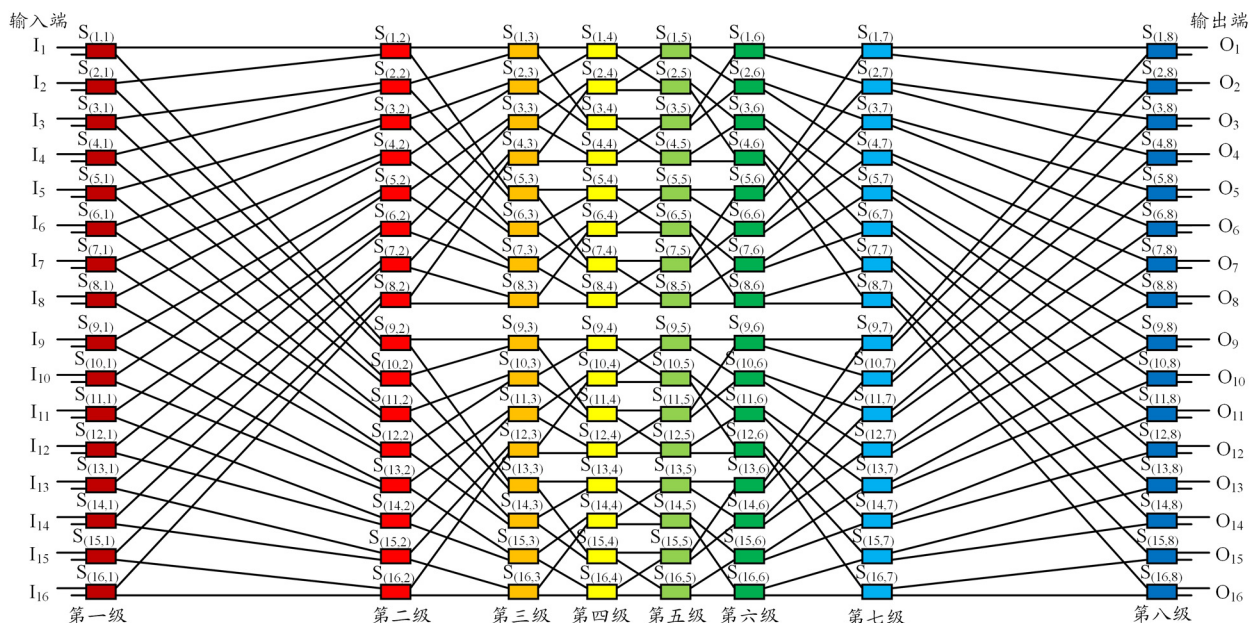
3.2 层级优化路由算法

目前大部分路由算法是针对交换网络输入输出端口的连通性而设计的,未考虑交换芯片中光开关单元状态及其数量对相应开关路由插入损耗的影响。实际中,光开关插入损耗在交叉态和平行态时会有较大的性能差异^[14,17],若初始态为平行态并具有较低的插入损耗,则其切换到交叉态时,插入损耗会增加。因而,建立输入输出交换路径时,要尽可能多地选择平行态^[11]。为达到这一目的,我们通过适当设置相应权值,提出一种层级优化路由算法,权值对应于插入损耗性能,权值越大,插入损耗越大,反之插入损耗越小。

16×16 扩张型 Benes 光交换结构有 128 个开关,设处于平行态的开关数为 m ,处于交叉态的开关数为 n ,假设平行态的权值为 x ,交叉态的权值为 y ,则系统的总权值 A 可由式(1)计算:

$$A = xm + yn = x(128 - n) + yn = 128x + (y - x)n = 128x + (x - y)m \quad (1)$$

以 A 值最小为优化目标,由式(1)可知,如果 $y > x$,则 n 取最小值;如果 $x > y$,则 m 取最小值,即权值小的状态开关数应尽量多,这样可以降低插入损耗,从而得到与上述分析一致的结果。

图 7 16×16 扩张型 Benes 光交换结构

层级优化路由算法的基本思想是: 通过环路路由算法确定每个环路中的所有开关状态, 然后引入所有开关交叉态或平行态下的权值, 计算每个环路中开关权值之和 M ; 同时将环路中的开关状态全部取反后再计算开关权值之和 M' 。对 2 个权值 M 和 M' 进行比较判断, 若 $M < M'$, 则取权值更小者 M 对应的开关状态 (即选择平行态开关个数更多的环路); 若 $M > M'$, 则取权值更小者 M' 对应的开关状态。

下面以 16×16 扩张型 Benes 光交换结构说明层级优化路由算法的具体实现过程。以输入输出请求 $I_1 \rightarrow O_8, I_2 \rightarrow O_{13}, I_3 \rightarrow O_7, I_4 \rightarrow O_9, I_5 \rightarrow O_1, I_6 \rightarrow O_2, I_7 \rightarrow O_{16}, I_8 \rightarrow O_5, I_9 \rightarrow O_{11}, I_{10} \rightarrow O_{10}, I_{11} \rightarrow O_{15}, I_{12} \rightarrow O_3, I_{13} \rightarrow O_{14}, I_{14} \rightarrow O_4, I_{15} \rightarrow O_6$ 和 $I_{16} \rightarrow O_{12}$ 为例, 假设所有开关的初始态为平行态 (低插入损耗状态), 设置所有开关的平行态权值为 0.11, 交叉态权值为 0.89。假设第一级和第八级中的每个 2×2 开关单元的上端口作为系统的输入和输出端口。算法的具体过程如下:

第一步, 利用优化的路由算法确定边缘级 (第一级和第八级) 的开关状态。假设从第一级中的开关 $S_{(1,1)}$ 开始路由且其状态为平行态, 则输入端口 1 的信号将通过“上”子网络连接至开关 $S_{(8,8)}$ (平行态) 的输出端口 8, 即完成交换需求 $I_1 \rightarrow O_8$; 此时, 与开关 $S_{(8,8)}$ 相互约束的开关为 $S_{(7,8)}$, 其 O_7 对应的交换需求是 $I_3 \rightarrow O_7$, O_7 应通过“下”子网络连接至 I_3 , 对应的开关 $S_{(3,1)}$ 应为交叉态; 要满足交换需求 $I_4 \rightarrow O_9$, 与 $S_{(3,1)}$ 相互约束的开关 $S_{(4,1)}$ 的输入端口 4 应从“上”子网络连接至处于平行态的开关 $S_{(9,8)}$; 依次类推, 直到形成一个环路, 并计算该环路中所有开关的权值之和为 $M_1 = 0.11 \times 16 + 0.89 \times 16 = 16$, 然后将上述环路中所有开关状态取反后再计算权值之和为 $M_1' = 0.11 \times 16 + 0.89 \times 16 = 16$, 即 $M_1 = M_1'$, 边缘级中平行态和交叉态开关均为 16 个, 可以取任意一种开关组合状态。第一级和第八级开关的对应状态如图 8 所示。

第二步, 确定 2 个 8×8 中间级子网 (即第二级和第七级) 的开关状态。以“上”子网络为例, 说明路由算法确定开关状态的过程。由第一级和第七级的开关状态可知, “上”子网络中对应的输入输出请求为 $I_1 \rightarrow O_4, I_2 \rightarrow O_5, I_3 \rightarrow O_1, I_4 \rightarrow O_8, I_5 \rightarrow O_6, I_6 \rightarrow O_2, I_7 \rightarrow O_7$ 和 $I_8 \rightarrow O_3$ 。这里表示的输入输出端口是相对于 8×8 “上”子网而言的。首先, 假设从开关 $S_{(1,2)}$ 开始路由且其状态为平行态, 则 I_1 将通过“上”子网络连接至开关 $S_{(4,7)}$ (交叉态) 的 O_4 , 即完成交换需求 $I_1 \rightarrow O_4$; 然后与开关 $S_{(4,7)}$ 相互约束的开关 $S_{(3,7)}$ 的 O_3 对应的交换需求是 $I_8 \rightarrow O_3$, O_3 应通过“下”子网

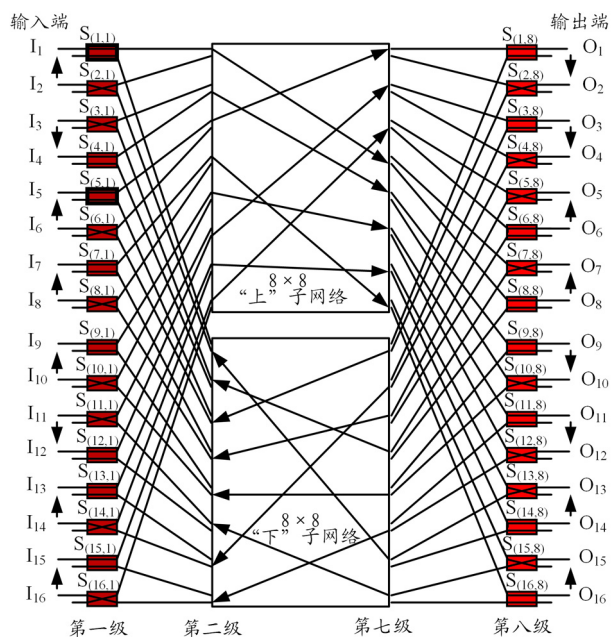


图 8 16×16 扩张型 Benes 第一级和第八级开关的对应状态

络连接至 I_8 , 对应的开关 $S_{(8,2)}$ 应为交叉态, 则与开关 $S_{(8,2)}$ 相互约束的开关 $S_{(7,2)}$ 的 I_7 应从“上”子网络连接至处于交叉态的开关 $S_{(7,7)}$, 这样才能满足交换需求 $I_7 \rightarrow O_7$; 依次类推, 直到遍历完该 8×8 子网络中的所有开关, 由此形成一个环路。计算该级环路中所有开关的权值之和为 $M_2 = 0.11 \times 10 + 0.89 \times 6 = 6.44$, 将该级环路中所有开关状态取反后再计算权值之和为 $M_2' = 0.11 \times 6 + 0.89 \times 10 = 9.56, M_2 < M_2'$, 所以取权值较小者 M_2 对应的开关组合状态, 即环路中有 10 个平行态开关, 6 个交叉态开关, 平行态开关个数多于交叉态开关个数。第二级和第七级所有开关的对应状态如图 9 所示。

第三步, 按照与上述第一步和第二步类似的路由过程, 确定中间第三级和第六级的开关状态, 然后再确定第四级和第五级的开关状态, 最终可确定整个 16×16 扩张型 Benes 的所有 128 个开关状态, 如图 10 所示。

4 扩张型 Benes 层级优化路由算法验证

在任意给定的输入输出交换连接请求下, 通过与穷举法获得的所有可能无阻塞路由方案的插入损耗进行比较, 来验证层级优化路由算法的有效性。仍以 $I_1 \rightarrow O_8, I_2 \rightarrow O_{13}, I_3 \rightarrow O_7, I_4 \rightarrow O_9, I_5 \rightarrow O_1, I_6 \rightarrow O_2, I_7 \rightarrow O_{16}, I_8 \rightarrow O_5, I_9 \rightarrow O_{11}, I_{10} \rightarrow O_{10}, I_{11} \rightarrow O_{15}, I_{12} \rightarrow O_3, I_{13} \rightarrow O_{14}, I_{14} \rightarrow O_4, I_{15} \rightarrow O_6$ 和 $I_{16} \rightarrow O_{12}$ 的交换连接请求为例, 通过穷举法获得的满足上述连接请求的开关组合状态数为

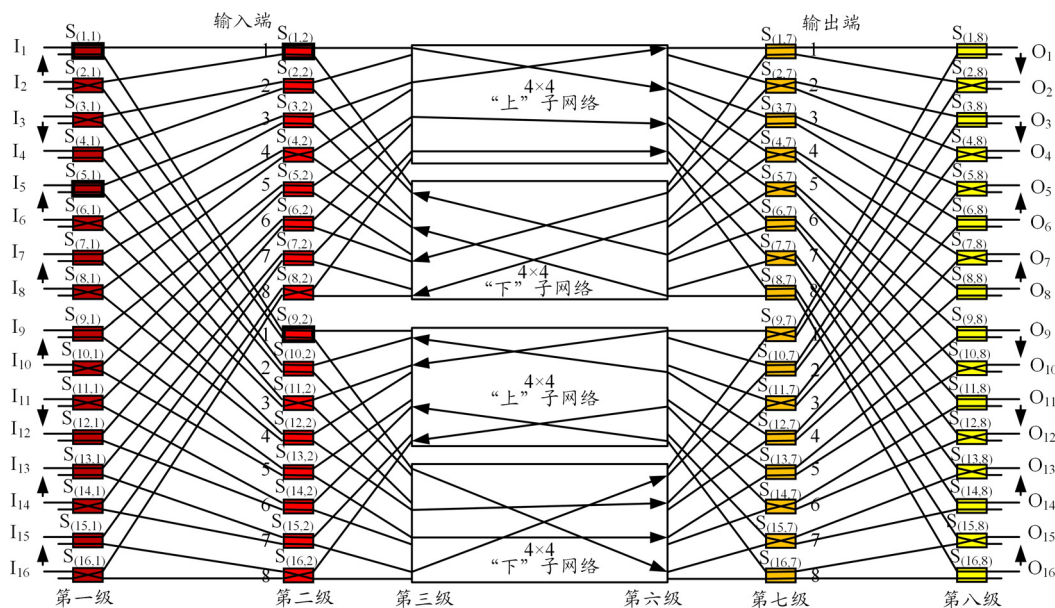


图9 16×16 扩张型 Benes 第二级和第七级所有开关的对应状态

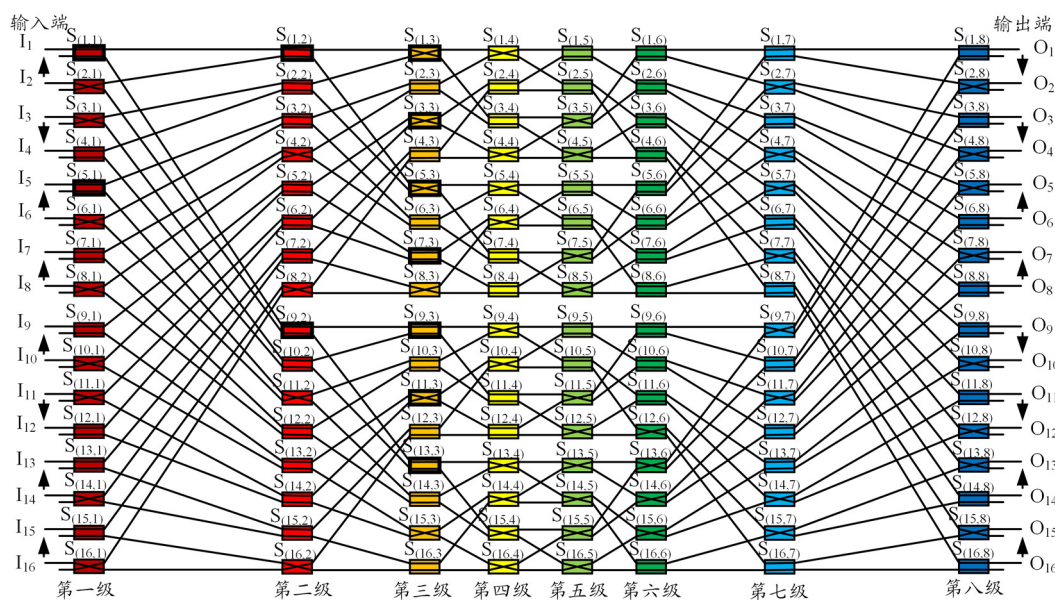


图10 16×16 扩张型 Benes 所有 128 个开关状态

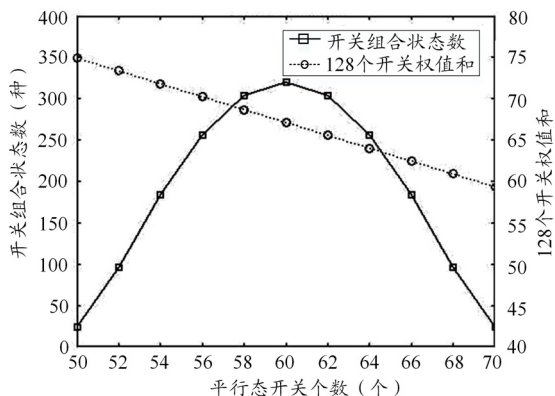


图11 穷举法得到的遍历结果

2048 种, 各路由方案的插入损耗由式(1)计算, 其中所有开关的平行态权值为 0.11, 交叉态权值为 0.89。通过 Matlab 计算实现的穷举法遍历结果如图 11 所示, 其中有 24 种权值和最小为 59.32 的开关组合状态, 128 个开关中平行态开关数为 70 个, 交叉态开关数为 58 个。

按照本文提出的层级优化路由算法, 每个环路路由方案对应一种开关组合状态, 若已知每个层级的可选择路由环路个数, 则所有可能的开关组合状态也能确定。设边缘级 (第一级和第八级) 的路由环路数为 q , 中间级 (第二级和第七级) 的路由环路数为 p , 中间级 (第三级和第六级) 的路由环路数为 r , 每个环路的开关组合状态有 2 种, 则共有 $N_c = 2^q \times 2^p \times 2^r$ 个开关组合状态可以满足所指定的连接需求。例如, 对于上述举例的输入

输出信号请求, 所有可能的开关组合状态总数为 $2^2 \times 2^2 \times 2^7 = 2048$ 种, 通过层级优化路由算法可得到最优的一种开关组合状态, 其权值和为 59.32, 对应的每级开关状态及 16 路路由路径如图 12 所示。需指出的是, 在边缘级或每个中间级寻找环路时, 可能会形成几个相互独立的子环路, 它们的不同组合均可构成相应的完整环路, 对应着不同开关状态。因此, 根据层级优化路由算法, 还可得到其它 23 种权值和为 59.32 的开关组合状态, 这样权值和最小的开关组合状态有 24 种, 与穷举法所得结果一致。具有更多开关组合状态的好

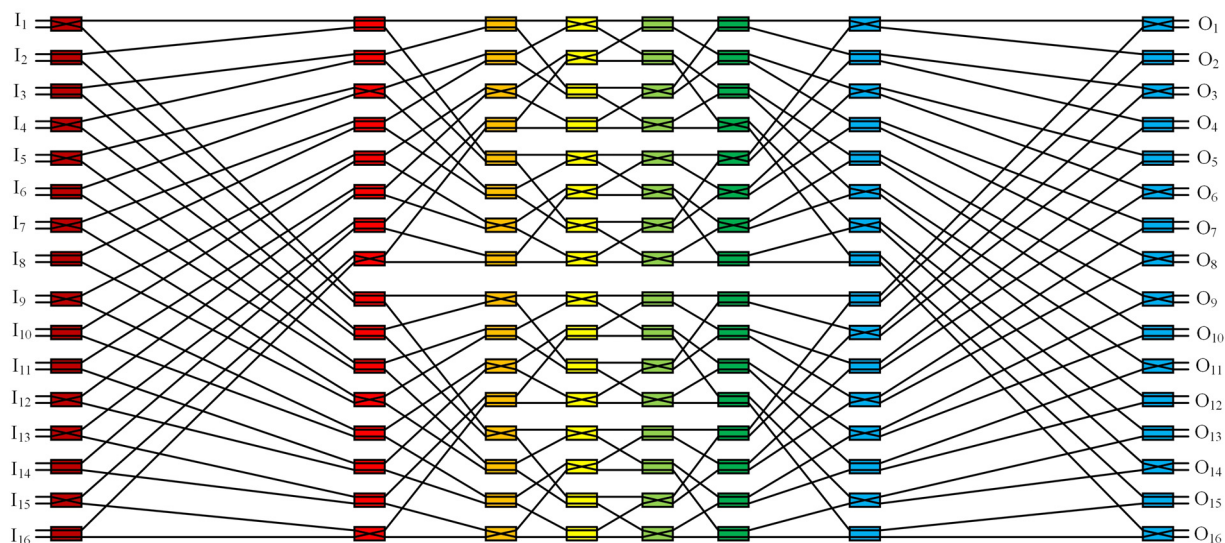


图 12 层级优化路由算法得到的结果

处是可提高芯片的容错能力, 即当最优开关组合状态中某个或几个光开关单元损坏或性能劣化时, 选择不经过这些故障光开关的次优备选交换路由, 仍可满足所需的交换连接请求。由此可见, 扩张型 Benes 结构具有较高的容错能力。

通过层级优化路由算法得到的权值和最小的 24 种开关组合状态中, 可进一步计算比较 24 种状态的输入输出端口插入损耗 (对应于 16 个路由信道的权值和), 每种状态对应的 16 个路由信道权值和分布及其标准差曲线如图 13 所示。显然, 存在一种开关组合状态 (如图 12 所示), 它的 16 个路由信道权值和的差别最小 (为 3.12)、标准差也最小 (为 0.82), 换句话说, 其对应的 16 个路由信道的插入损耗最为接近, 16 个路由信道的输入输出端口的插入损耗一致性最好, 即信道均衡性能最好。本文提出的层级优化算法不仅能得到权值和一致的多种路由选择, 还能获得其中最佳的一种配置状态。

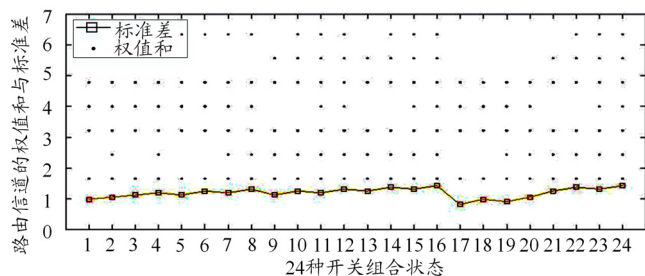


图 13 对应于 24 种开关状态的路由信道权值和与标准差

当然, 层级优化路由算法也可运用于传统型 Benes 结构。对于上述输入输出信号请求, 能且仅能获得权值和最小的唯一一种开关组合状态。其中, 交叉

态开关个数为 18 个, 平行态开关个数为 38 个, 它的 16 个路由信道权值和最大相差 1.56, 标准差为 0.65, 其插入损耗性能优于扩张型 Benes 结构。由文献[24]中提出的信噪比公式计算可得, 16×16 传统型 Benes 结构的信噪比为 11.5dB, 而扩张型 Benes 结构的信噪比为 25.5dB, 信噪比性能明显优于传统型 Benes 结构。

在组网能力方面, 输入输出端口之间的串扰和插入损耗最大值表征了光开关矩阵的性能, 它们主要影响组网半径或网络路由路数。分别通过光放大和光整形技术可进一步减小插入损耗和串扰, 其中整形功能相对更难实现。因此, 扩张型 Benes 结构更适用于串扰受限系统。此外, 串扰或插入损耗的非一致性会对网络路由波长分配算法提出更高要求, 影响组网灵活性。现实中使光交换芯片的所有性能参数同时达到最优几乎是不可能的^[7,8,25,26], 但可以根据实际需求选择合适的拓扑结构及其优化路由算法来提高大规模光交换芯片系统整体性能。

5 结束语

针对低串扰的扩张型 Benes 结构, 本文提出了一种可实现任意输入输出连接请求的层级优化环路路由算法, 能够得到最佳的开关配置状态, 采用遍历方法证明了其有效性。研究表明: 与传统型 Benes 结构相比, 扩展型 Benes 结构的容错能力更强, 但输入输出端口之间插入损耗的一致性略差。

参考文献:

- [1] 王章涛, 余金中. 集成光开关阵列的研究进展 [J]. 激光与红外,

2003, 33(1): 17-20.

[2] 杨建义, 江晓清. 用于光纤通信的光开关研究进展[J]. 光通信研究, 2000(4): 42-48.

[3] TANIZAWA K, SUZUKI K, TOYAMA M, et al. Ultra-compact 32×32 strictly-non-blocking Si-wire optical switch with fan-out LGA interposer [J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17599-17606.

[4] QIAO L, TANG W, CHU T. 32×32 silicon electro-optic switch with built-in monitors and balanced-status units [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42306-42312.

[5] HINTON H S. A nonblocking optical interconnection network using directional couplers [C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, November 9, 1984, Atlanta, USA. Piscataway: IEEE, 1984: 885-889.

[6] SPANKE R. Architectures for large nonblocking optical space switches [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 22(6): 964-967.

[7] PADMANABHAN K, NETRAVALI A N. Dilated Networks for Photonic Switching [J]. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35(12): 1357-1365.

[8] KABACI, SKI W. Modified dilated Benes networks for photonic switching[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(8): 1253-1259.

[9] KUO G S, ZHU G. A Novel Integrated Multistage 2-D MEMS Optical Switch With Spanke-Benes Architecture[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(5): 560-568.

[10] CHEN J, LU L, ZHOU L, et al. Low-power 2×2 silicon electro-optic switches based on double-ring assisted Mach-Zehnder interferometers [J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1633-1636.

[11] 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(1): 157-163.

[12] 周治平, 郗定山, 汪毅, 等. 硅基集成光电子器件的新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(2): 31-38.

[13] 赵元力. 硅基光交换芯片设计与性能评估[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

[14] 石鑫, 孙军强. 通用改进扩展 Benes 型光开关的控制模块设计[J]. 光电子·激光, 2003, 14(12): 1263-1267.

[15] GUAN A, SUN J, LI F. Low crosstalk improved dilated benes networks for photonic switching[J]. Iet Optoelectronics, 2007, 1(1): 31-34.

[16] 管爱红, 张红梅, 王玉华, 等. 基于扩展 Benes 结构的光交叉连接节

点中串扰积累特性分析[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 602-607.

[17] KARIMI A, AGHAKHANI K, MANAVI S E, et al. Introduction and Analysis of Optimal Routing Algorithm in Benes Networks [J]. Procedia Computer Science, 2014, 42(6): 313-319.

[18] FENG T Y, SEO S W. A New Routing Algorithm for a Class of Rearrangeable Networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 1994, 43(11): 1270-1280.

[19] CHAKRABARTY A, COLLIER M. Low complexity routing algorithm for rearrangeable switching networks [C]//Proceedings of the 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, March 25-28, 2013, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE, 2013: 145-152.

[20] CHAKRABARTY A, COLLIER M, MUKHOPADHYAY S. Matrix-based nonblocking routing algorithm for bene? networks [C] //Proceedings of the 2009 Computation World: Future Computing, Service Computation, Cognitive, Adaptive, Content, Patterns, November 15-20, 2009, Athens, Greece. Piscataway: IEEE, 2009: 551-556.

[21] ANDRESEN S. The Looping Algorithm Extended to Base 2tRearrangeable Switching Networks [J]. Communications IEEE Transactions on, 1977, 25(10): 1057-1063.

[22] 廖明乐, 武保剑, 黄维, 等. 硅基光子交换芯片的路由控制与性能测试[J]. 光电子·激光, 2017(9): 933-940.

[23] 刘彬, 孙军强. 扩展 Benes 光交换结构消除串扰路由算法[J]. 光通信技术, 2003, 27(12): 22-24.

[24] SAVASTANO L, MAIER G, MARTINELLI M, et al. Performance comparison of guided-wave architectures for space-division photonic switching [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Broadband Networks (BROADNETS 2004), October 25-29, 2004, San Jose, USA. Piscataway: IEEE, 2004: 202-211.

[25] KHANDKER M U R, JIANG X, SHEN H, et al. A New Architecture for Nonblocking Optical Switching Networks [J]. Photonic Network Communications, 2001, 3(4): 393-400.

[26] AHMED M, RAHMAN M, ROSLI A N C, et al. A new optical switching network architecture with crosstalkfree and nonblocking routing algorithm [C]//Proceedings of Annual International Conference on Network Technologies & Communications (NTC 2010), November 29-30, 2010, Phuket, Thailand. Singapore: Global Science and Technology Forum, 2010.

2019 年征订启事

光通信技术 月刊

邮发代号: 48-126

定 价: 16 元/册; 192 元/年

订 阅: 全国各地邮局

为增强读者的阅读舒适感, 2019 年《光通信技术》全刊采用铜版纸彩色印刷。