

扩张型 Benes 光交换芯片未满载配置情形下的 约束链路路由算法

张金花, 武保剑*, 邱昆

电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 611731

摘要 针对扩张型 Benes 光交换芯片在未满载配置情形下的问题, 提出一种约束链路路由算法。该算法首先按照光开关的横向约束和子网连接关系对需要配置的光开关进行分组, 然后通过优化光开关组合状态形成满足交换需求的链路路由, 无需对其他空闲光开关进行任何处理, 提高了光交换芯片的配置效率。以 16×16 扩张型 Benes 光交换网络为例, 描述了约束链路路由算法的执行过程, 并与其他配置路由算法进行比较。分析了芯片网络中当光开关失去切换功能或丧失通光功能时, 该算法在提高芯片容错能力方面发挥的作用。

关键词 集成光学; 光交换芯片; 扩张型 Benes 结构; 路由算法; 插入损耗; 开关故障

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.211301

Constrained Link Routing Algorithm for Dilated Benes Optical Switching Chips Under Non-Full Configuration

Zhang Jinhua, Wu Baojian*, Qiu Kun

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

Abstract A constrained link routing algorithm is proposed to solve the problem of unconfigured dilated Benes optical switching chips. First, the algorithm groups the optical switches to be configured according to their lateral constraint and subnet connection relationship, and then it optimizes the optical switch combination state to form a link route that satisfies the switching requirement. In this manner, the configuration efficiency of optical switching chips is improved since no processing is required for other idle optical switches. Taking a 16×16 dilated Benes optical switching network as an example, the execution process of the constrained link routing algorithm is described and compared with other configuration routing algorithms. Furthermore, the role of the algorithm in improving the fault tolerance of a chip when its optical switch loses the switching or light-passing function in the chip network is analyzed.

Key words integrated optics; optical switching chip; dilated Benes structure; routing algorithm; insertion loss; switch failure

OCIS codes 130.3120; 060.4258; 060.4251; 130.4815

1 引言

大规模光交换集成芯片通常由多个 1×2 或 2×2 光开关组成的光开关矩阵构成, 它们通过一定的拓扑结构级联而成为光交换网络^[1-2]。随着输入、输出光交换端口数的增多, 芯片系统的串扰和插入损

耗也急剧增加^[3-4], 从而制约光交换集成芯片的交换规模。在光交换芯片系统中, 很难实现所有性能同时达到最优^[5-6], 但选择合适的网络拓扑结构及优化路由算法可实现部分性能最优。在众多光交换芯片的网络拓扑结构中^[7-12], 一种串扰几乎为零的扩张型 Benes 结构被广泛研究与应用, 但这种串扰性能

收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-04-14; 录用日期: 2019-04-26

基金项目: 国家 863 计划(2013AA014402)、国家自然科学基金(61271166, 61671108)

* E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

的提升以增加光开关数量和开关级数为代价,也就是说,扩张型 Benes 结构的插入损耗性能劣于传统型 Benes 结构。

网络领域中常见的大部分路由算法考虑较多的是运行时间、实现复杂度和时间复杂度等^[13-19]参数,很少与光开关单元的串扰或插入损耗等具体性能参数相联系。文献[13]提出一种能降低开关配置时间且容错能力较好的算法,适用于 $2\text{lb } N$ 级或 $(2\text{lb } N - 1)$ 级的可重排光交换网络;文献[15]提出一种快速重构算法,该算法研究的重点是如何利用三种扩展方法快速配置光 Benes 网络来实现任意或部分排列;文献[16]提出一种基于矩阵的非阻塞路由选择算法,该算法的时间复杂度一般,实现复杂度较低,是实现大规模光交换的可行算法;文献[17]中涉及两种最优路由算法,两种算法关注的重点问题是如何快速和安全地进行路由选择。

事实上,整个芯片系统的插入损耗等性能与光开关单元所处的状态(平行态或交叉态)密切相关^[20]。例如,对于通过载流子色散效应实现快速切换的硅光子开关而言^[21-22],当光开关从一种状态切换到另一状态时,相伴的载流子吸收效应会导致光开关插入损耗等性能的改变,从而必然影响光交换芯片的总体性能,如若开关的初始状态为平行态(低插入损耗状态),那么当其切换成交叉态时,该开关的插入损耗势必会有所增加。因而,在满足光交换网络交换需求的开关组合状态中,应该让更多的光开关处于性能更好的状态。

在实际工程应用中,光交换芯片往往运行在未满配置的情况下,即只有部分输入/输出端口有交换需求,因此有部分光开关处于空闲状态。存在冗余光开关资源或交换路由的好处是,一方面有利于获得路由性能更佳的开关组合状态,另一方面即使有个别光开关出现故障,仍可保持芯片系统的交换连通性。本文针对扩张型 Benes 光交换芯片结构的未配置情形,提出一种约束链路路由算法,从最外层级开关开始逐级确定各中间层级开关的状态,在每一层级进行开关确定时,首先对存在横向约束和子网连接关系的光开关进行分组,再依次配置各分组的开关状态,并得到相应分组的开关链路,通过比较链路上平行态和交叉态开关个数,能得到插入损耗性能最优的开关组合状态。利用提出的约束链路路由算法,重点分析光开关发生故障时芯片系统的交换路由性能。

2 未配置情形下约束链路路由算法

一个 2×2 光开关包含两种状态:平行态和交叉态,如图1所示。

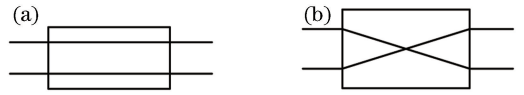


图1 2×2 光开关的两种状态。(a)平行态;(b)交叉态

Fig. 1 Two states of 2×2 optical switch.

(a) Bar state; (b) cross state

一个 $N \times N$ 扩张型 Benes 网络包含 $2\text{lb } N$ 级光开关^[11],每一级中均有 N 个 2×2 光开关,故共计有 $2N\text{lb } N$ 个光开关,其中第一级(输入端)和最后一级(输出端)光开关通过如图2所示的方式,分别连接至两个 $(N/2) \times (N/2)$ “上”、“下”子网络。

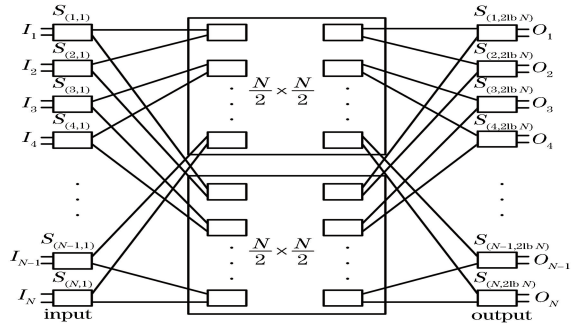


图2 $N \times N$ 扩张型 Benes 结构的递归构造

Fig. 2 Recursive construction of $N \times N$ dilated Benes structure

由图2可知,扩张型 Benes 结构的基本特点是,各级光开关均只允许一路光信号通过,光开关状态决定扩张型 Benes 网络输入、输出端口的对应关系,其中 $I_1 \sim I_N$ 表示输入端口编号, $S_{(1,1)} \sim S_{(N,1)}$ 表示输入端开关的 N 个开关, $S_{(1,2\text{lb } N)} \sim S_{(N,2\text{lb } N)}$ 表示输出端开关的 N 个开关, $O_1 \sim O_N$ 表示输出端口编号。例如,开关 $S_{(1,1)}$ 与输入端口 I_1 一一对应,即若开关 $S_{(1,1)}$ 为平行态且从“上”端口输入信号,则输入端口 I_1 将连接至 $(N/2) \times (N/2)$ “上”子网络。正是由于“各级光开关均只允许一路光信号通过”的条件,扩张型 Benes 结构中某些开关之间存在横向约束和子网连接关系。1)横向约束关系是指,若两个相互约束的开关同为输入端开关(或同为输出端开关),当一个开关的对应端口连接至“上”子网络时,另一个开关的对应端口只能连接至“下”子网络,不能同时连接至“上”子网络。因此,对每级光开关而言,第 $(2s - 1)$ 和第 $2s$ (s 为光开关编号, $s = 1, 2, \dots, N/2$)个光开关单元之间具有横向约束关系。2)另

一方面,由于输入端与输出端之间存在交换连接需求,而扩张型 Benes 结构又分为两个 $(N/2) \times (N/2)$ “上”、“下”子网络,因此能够满足交换需求的开关的对应端口均需连接至同一“上”子网络或“下”子网络,称为子网连接关系。

针对以上特点,一种约束链路路由算法的具体步骤如下。

步骤 1:对有关交换需求的开关进行分组。将存在横向约束和子网连接关系的开关放至同一分组中,由此形成分组 A_1, A_2, \dots, A_i, i 为分组编号, $1 \leq i \leq 2 \lfloor N/2 \rfloor$ 。

步骤 2:针对每一个分组 A_i 中的开关,选择任一开关开始并配置其状态为平行态(假设开关初始状态为平行态,对应于低插入损耗状态),再根据开关之间具体的横向约束和子网连接关系,确定分组

表 1 16×16 扩张型 Benes 光交换网络的输入、输出交换需求

Table 1 Input and output exchange requests for 16×16 dilated Benes optical switching network

Corresponding switch	$S_{(1,1)}$	$S_{(2,1)}$	$S_{(3,1)}$	$S_{(5,1)}$	$S_{(8,1)}$	$S_{(9,1)}$	$S_{(10,1)}$	$S_{(11,1)}$	$S_{(13,1)}$	$S_{(15,1)}$
Input port	I_1	I_2	I_3	I_5	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{13}	I_{15}
Output port	O_8	O_{13}	O_7	O_1	O_5	O_{11}	O_{10}	O_{15}	O_{14}	O_6
Corresponding switch	$S_{(8,8)}$	$S_{(13,8)}$	$S_{(7,8)}$	$S_{(1,8)}$	$S_{(5,8)}$	$S_{(11,8)}$	$S_{(10,8)}$	$S_{(15,8)}$	$S_{(14,8)}$	$S_{(6,8)}$

1) 确定第 1 级和第 8 级开关的状态。

步骤 1:对第 1 级和第 8 级中存在横向约束和子

A_i 中其他开关状态,且每一个分组 A_i 对应一条开关链路 L_i 。

步骤 3:计算链路 L_i 上平行态开关与交叉态开关的个数,若交叉态开关个数多于平行态开关个数,则将链路 L_i 上的开关状态全部取反;反之,则不取反。

采用步骤 1~3 的算法路由方式,从最外层开关开始,依次逐级确定各中间级开关状态,最终所有有交换需求的开关状态均能被确定。对于没有交换需求的空闲光开关,无需对其进行分组及开关状态配置。

以 16×16 扩张型 Benes 光交换网络的 10 路输入、输出交换需求为例,说明未满足配置情形下采用约束链路路由算法的具体执行过程,如表 1 所示。这里假设第 1 级和第 8 级的光开关都是从“上”端口输入或输出光信号。

网连接关系的开关进行分组,得到 5 个分组: A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 ,各分组及其所含开关情况如图 3 所示。

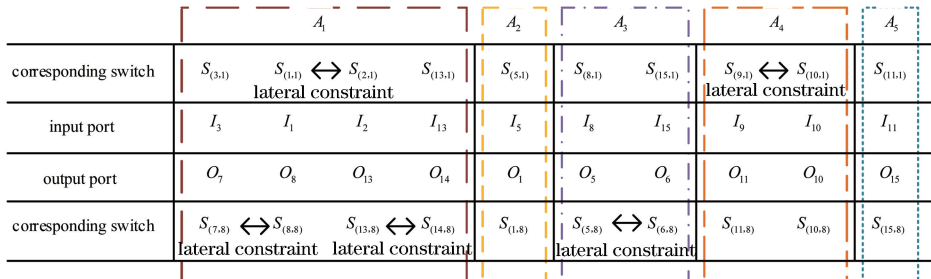


图 3 第 1 级和第 8 级开关分组

Fig. 3 Grouping of the first and eighth stage switches

步骤 2:依次确定分组 $A_1 \sim A_5$ 中开关的状态。确定分组 A_1 的开关状态,假设首先配置开关 $S_{(1,1)}$ 为平行态,则其输入端口 1 连接至“上”子网络,交换需求为 $I_1 \rightarrow O_8$,故与开关 $S_{(1,1)}$ 存在子网连接关系的开关 $S_{(8,8)}$ (平行态)的输出端口 8 也需连接至“上”子网络;此时与开关 $S_{(8,8)}$ 存在横向约束的开关 $S_{(7,8)}$ (交叉态)的输出端口 7 需连接至“下”子网络,则与开关 $S_{(7,8)}$ 存在子网连接关系的开关 $S_{(3,1)}$ (交叉态)的输入端口 3 也需连接至“下”子网络,即完成交换需求 $I_3 \rightarrow O_7$;以此类推,直到分组 A_1 中的开关状态均被确定。

按照与确定分组 A_1 中开关状态类似的方式,

可依次确定分组 $A_2 \sim A_5$ 的开关状态,并分别对应得到 5 条链路 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 。

步骤 3:计算比较各链路上平行态与交叉态开关个数,最终 5 条链路路径及开关状态如图 4 所示,每条链路中平行态开关个数均不少于交叉态开关个数,5 条链路中平行态开关总数为 12,交叉态开关总数为 8。

2) 确定第 2 级和第 7 级开关的状态。

根据第 1 级和第 8 级开关配置情况,可得到第 2 级和第 7 级 2 个 8×8 子网络开关的输入、输出端口交换需求,由此可对第 2 级和第 7 级中的开关进行分组,并按照约束链路路由算法的路由过程(即步骤 1~3),确定相应链路及开关状态。

link path	$L_1: I_1 \rightarrow O_8 \rightarrow O_7 \rightarrow I_3 \rightarrow I_2 \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{14} \rightarrow I_{13}$	$L_2: I_5 \rightarrow O_1$	$L_3: I_8 \rightarrow O_3 \rightarrow O_6 \rightarrow I_{15}$	$L_4: I_9 \rightarrow O_{11} \rightarrow I_{10} \rightarrow O_{10}$	$L_5: I_{11} \rightarrow O_{15}$
corresponding switch state	$S_{(3,1)}$ lateral constraint cross $S_{(4,1)}$ bar $S_{(2,1)}$ lateral constraint cross $S_{(13,1)}$ bar	$S_{(5,1)}$ bar	$S_{(8,1)}$ bar $S_{(15,1)}$ cross	$S_{(9,1)}$ lateral constraint bar $S_{(10,1)}$ lateral constraint cross	$S_{(11,1)}$ bar
input port	I_3 I_1 I_2 I_{13}	I_5	I_8 I_{15}	I_9 I_{10}	I_{11}
output port	O_7 O_8 O_{13} O_{14}	O_1	O_3 O_6	O_{11} O_{10}	O_{15}
corresponding switch state	$S_{(7,8)}$ lateral constraint cross $S_{(8,8)}$ bar $S_{(13,8)}$ lateral constraint cross $S_{(14,8)}$ bar	$S_{(1,8)}$ bar	$S_{(5,8)}$ bar $S_{(6,8)}$ lateral constraint cross	$S_{(11,8)}$ bar $S_{(10,8)}$ cross	$S_{(15,8)}$ bar
	A_1		A_2	A_3	

图 4 第 1 级和第 8 级开关的链路路径及开关状态

Fig. 4 Link path and switch state of the first and eighth stage switches

3) 确定第 3 级和第 6 级开关的状态,第 4 级和最终,可实现所需 10 路交换需求的 80 个开关第 5 级开关的状态也将随之进行。状态的成功确定,80 个开关状态如图 5 所示。

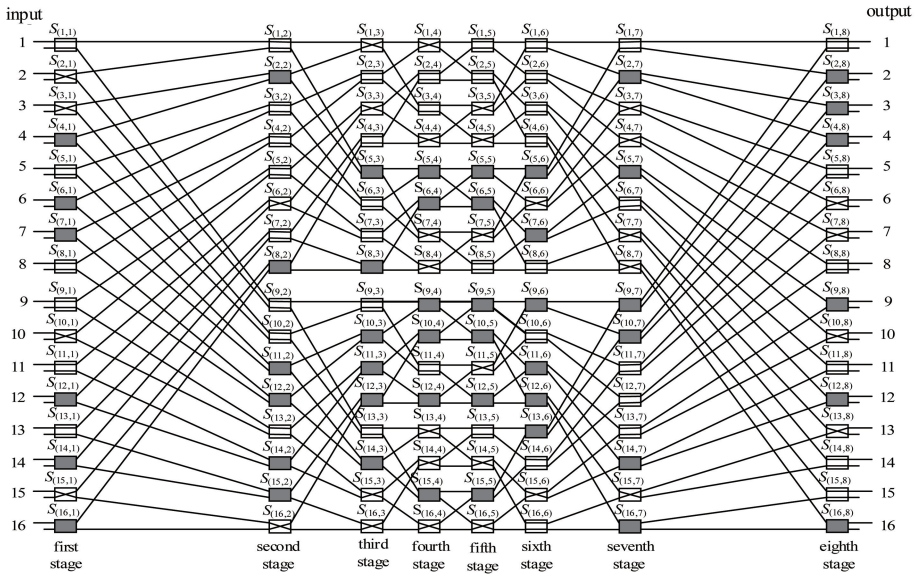


图 5 16×16 扩张型 Benes 网络所有开关状态

Fig. 5 All switch states of 16×16 dilated Benes network

3 约束链路路由算法性能分析

按照举例所示的 10 路输入/输出交换需求,利

用约束链路路由算法最终可得到 16×16 扩张型 Benes 光交换网络共计有 15 条独立链路,每级链路数及开关状态情况如表 2 所示。

表 2 16×16 扩张型 Benes 网络的所有链路及开关状态

Table 2 All links and switch states of 16×16 dilated Benes network

Stage	Number of links	Bar state switch	Cross state switch
First and eighth stage	Five links are $L_1, L_2, L_3, L_4,$ and L_5	12	8
Second and seventh stage	Four links are $L_6, L_7, L_8,$ and L_9	13	7
Third and sixth stage	Six links are $L_{10}, L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{14}$ and L_{15}	14	6
Fourth and fifth stage		7	13
Total number of switches	15	46	34

在得到的 80 个光开关的最佳开关组合状态中,平行态开关个数为 46 个,交叉态开关个数为 34 个,平行态开关个数比交叉态开关个数多 12 个,即 10

路输入/输出请求信号中,每路至少有一个光开关的插入损耗性能得到改善。在路由过程中,只需对在分组中的 80 个开关进行状态确定,对于 48 个不在

分组中的空闲开关无需进行状态配置,这在很大程度上提高了交换网络的配置效率。

实际上,由于15条链路之间相互独立,故采用约束链路路由算法可得到所有可能的开关状态组合共有 2^{15} 种,其中最佳开关组合状态有 $2^3 \times 2^1 \times 2^2 = 64$ 种(即这64种开关组合状态中,平行态开关均为46个,交叉态开关均为34个)。因此,通过约束链路路由算法可得到一种最佳的开关组合状态,若重新调用算法,仍能找出其他最佳开关组合状态,能得到多种最佳开关组合的好处是可以大大提高交换网络的容错能力。

之前本课题组研究了一种针对任意规模的扩张型 Benes 光交换网络在满配置情形下的层级优化路由算法^[23],该算法通过引入权值来表征开关插入损耗性能,通过依次遍历每层级网络中的所有开关状态,可得到权值和最小的开关组合状态。与层级优化路由算法不同,约束链路路由算法在进行每层级开关状态配置时,首先对各层级中存在横向约束和子网连接关系的光开关进行分组,再依次配置各分组中开关的状态,每个分组对应形成一条不闭合的开关链路,通过比较链路上平行态和交叉态开关的个数,可得到插入损耗性能最优的开关组合状态。对于没有交换请求的空闲光开关,无需对其进行分组和开关状态的遍历。

综上可知,约束链路路由算法亦可运用于满配置情形下,在满配置时将所有光开关均分类至相应分组中即可。实际上,层级优化路由算法也可应用在未满配置情形下,通过假定空闲开关有需求并补全其相应的交换请求,也可获得相应开关组合状态,但得到的插入损耗性能劣于约束链路路由算法。例如,针对举例的10路需求,假设增加6路需求: $I_4 \rightarrow O_9, I_6 \rightarrow O_2, I_7 \rightarrow O_{16}, I_{12} \rightarrow O_3, I_{14} \rightarrow O_4, I_{16} \rightarrow O_{12}$,即补全其为16路需求后,在获得满足10路需求的80个开关中,平行态开关个数为44个,交叉态开关个数为36个,平行态开关数减少了2个。

此外,针对同样的10路输入/输出交换需求,若采用文献[19]提出的针对 2^t (t 为自然数, 2^t 为可重排网络的阶数)可重排网络的环路路由算法,其路由过程为从最外层某一开关开始,逐级对每一个开关进行“0”或“1”状态标记,直到所有开关均标记完成,最终得到的平行态开关个数为34个,交叉态开关个数为46个;若采用文献[11]提出的针对扩张型 Benes 网络的控制路由算法,则需补全为16路交换需求,首先选择输入级任一未配置状态的开关开始,

根据交换需求,对输入、输出端口进行“向上”或“向下”中间子网连接,从而可依次遍历、配置每一个开关状态,最终得到的平行态开关个数为32个,交叉态开关个数为48个;若不补齐为16路需求,在未满配置情形下直接按照该算法的路由思路,则当其遍历到冗余光开关时,需将其看作已配置状态的开关,这样处理容易造成多路路由的冲突。由此可以看出,上述两种算法均需遍历所有128个开关,且得到平行态开关数目均明显少于约束链路路由算法。因此,在光交换网络未满配置情形下,本文约束链路路由算法无需对48个空闲开关进行任何处理,路由过程更为简单,且不会发生路由冲突,在实现复杂度及开关性能上均有明显的优化。

在实际的光交换网络应用场景下,空闲开关数越多,则需要配置的光开关数就越少。当算法对最外层32个光开关进行路由时,最大分组数和空闲光开关数对交换需求数的依赖曲线如图6所示。可以看出:在交换路数最少为1路时,空闲光开关数最多为30个,算法得到的最大分组数为1,此时算法所需确定的分组数和配置开关数最少,算法配置效率最高;空闲光开关数将随着输入/输出交换需求数的增加而线性减少,当交换需求数为任意8路或9路时,可得到最多8个分组;在空闲光开关数少于14的范围内,空闲光开关数越少,最大分组数越小;当空闲光开关数大于16时,最大分组数随着空闲光开关数的增加而减小。

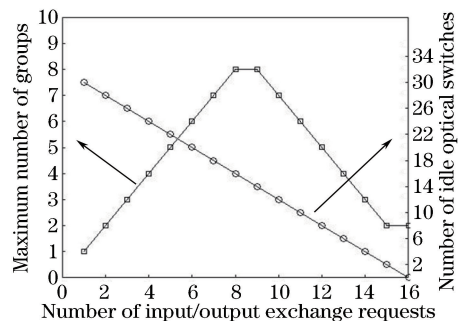


图6 最大分组数和空闲光开关数随交换需求数的变化曲线

Fig. 6 Maximum number of groups and number of idle optical switches dependent on number of exchange requests

4 光开关故障情形下算法的应用

由于约束链路路由算法是针对未满配置情形下的端口交换需求算法,故会有部分光开关不需配置,处于空闲状态,可以随时被调用。

在这里,将一个 2×2 光开关的故障分为2类情

况:第 1 类故障是指光开关失去切换功能,即不能由某一状态切换成另一状态,但其中某一状态可以进行光信号的传递与交换,即光开关为部分故障;第 2 类故障是指光开关丧失通光功能,无论光开关处于哪种状态,均不能进行光信号的传递与交换,即光开关为完全故障。

在原已配置好的交换通路中某个或几个光开关出现第 1 类或第 2 类故障时,约束链路路由算法均可通过算法的重新应用,进行开关状态的重新分配,避开开关故障状态或完全故障开关,调用空闲开关,使重新分配的开关组合状态仍满足所需的交换需

求,实现光信号的正常交换。

例如对于 16×16 扩张型 Benes 网络,当采用约束链路路由算法配置 10 路未满足配置的输入/输出交换需求时,可以满足 10 路光信号,同时只需 80 个光开关参与交换过程,还有 48 个光开关处于空闲状态。假设在如图 7 所示的 8×8 “下”子网络中,开关 $S_{(11,4)}$ 出现第 2 类故障,丧失通光功能,此时可通过约束链路路由算法为交换请求 $I_2 \rightarrow O_4$ 重新分配交换路径,选择不经过开关 $S_{(11,4)}$,而选择经过空闲开关 $S_{(9,4)}$ (平行态)和 $S_{(9,5)}$ (交叉态),仍能保证正常路由交换。

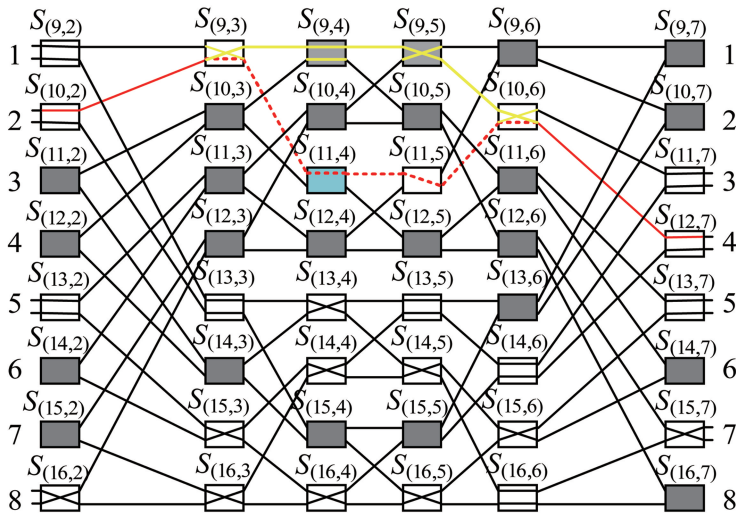


图 7 开关故障时算法重新分配交换路径

Fig. 7 Algorithm redistributes the exchange path when the switch fails

由上述分析过程可以看出,在光开关出现故障时,空闲光开关为交换路径的重新分配提供了机会,发挥了非常关键的作用。

5 结 论

针对扩张型 Benes 网络在未满配置情形下的问题,提出一种约束链路路由算法,首先对存在横向约束和子网连接关系的光开关进行分组,再依次确定各分组中光开关的状态,并通过比较各分组对应链路上的平行态和交叉态开关个数,最终可得到插入损耗性能最优的开关组合状态。研究表明,约束链路路由算法只需配置有交换需求的光开关,无需遍历非分组中的空闲光开关,提高了光交换芯片的配置效率。在光开关发生部分故障或完全故障时,该算法可通过避开光开关故障状态或调用空闲光开关,得到满足交换需求的开关组合状态。与已有算法相比,约束链路路由算法在实现复杂度、开关性能及提高芯片容错能力等方面具有明显优势。

参 考 文 献

[1] Zhou L J, Lu L J, Guo Z Z, *et al.* Development status and key technologies of integrated optical switches [J]. Study on Optical Communications, 2019(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[J]. 光通信研究, 2019(1): 9-26.

[2] Liang L X, Zhang X J, Wu X S, *et al.* Terahertz filter and optical switch based on magnetic-photonic crystals [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (5): 0513002.
梁龙学, 张晓金, 吴小所, 等. 基于磁光子晶体的太赫兹滤波器 and 光开关[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0513002.

[3] Wonfor A, Wang H, Penty R V, *et al.* Large port count high-speed optical switch fabric for use within datacenters [invited] [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(8): A32-

- A39.
- [4] 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: 42306.
- [5] Kar S, Selvarajan A. Some novel photonic guided-wave space-switching architectures[J]. *IETE Journal of Research*, 1990, 36(5/6): 513-519.
- [6] Liao M L, Wu B J, Huang W, *et al.* Routing control and performance test of silicon-based photonic switching chip [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2017, 28(9): 933-940.
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, 28(9): 933-940.
- [7] Zhou T, Jia H. Method to optimize optical switch topology for photonic network-on-chip [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 230-235.
- [8] Hinton H S. A nonblocking optical interconnection network using directional couplers[C] // *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 1984)*, November 9, 1984, Atlanta, USA. New York: IEEE, 1984: 885-889.
- [9] Spanke R A. Architectures for large nonblocking optical space switches[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(6): 964-967.
- [10] Zhu G M, Kuo G S. A novel integrated multistage 2-D MEMS optical switch with Spanke-Benes architecture[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(5): 560-568.
- [11] Padmanabhan K, Netravali A N. Dilated networks for photonic switching [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, 35(12): 1357-1365.
- [12] Zhao S Y, Lu L J, Zhou L J, *et al.* 16×16 silicon Mach - Zehnder interferometer switch actuated with waveguide microheaters [J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): 202-207.
- [13] Seo S W, Feng T Y, Lee H L. Permutation realizability and fault tolerance property of the inside-out routing algorithm [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1999, 10(9): 946-957.
- [14] Cam H, Fortes J A B. Work-efficient routing algorithms for rearrangeable symmetrical networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1999, 10(7): 733-741.
- [15] Lu E Y, Zheng S Q. Fast reconfiguration algorithms for time, space, and wavelength dilated optical Benes networks [J]. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 2007, 22(1): 39-58.
- [16] Chakrabarty A, Collier M, Mukhopadhyay S. Matrix-based nonblocking routing algorithm for Benes networks [C] // *2009 Computation World: Future Computing, Service Computation, Cognitive, Adaptive, Content, Patterns*, November 15-20, 2009, Athens, Greece. New York: IEEE, 2009: 551-556.
- [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: 313-319.
- [18] Liu B, Sun J Q. Routing algorithm for eliminating intraband crosstalk in dilated Benes switching network [J]. *Optical Communication Technology*, 2003, 27(12): 22-24.
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.
- [19] Andresen S. The looping algorithm extended to base 2' rearrangeable switching networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1977, 25(10): 1057-1063.
- [20] Zhao Y L, Wu B J, Liao M L, *et al.* Crosstalk analysis of optical switching chips with DQPSK signal transmission experiment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0113001.
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): 0113001.
- [21] Wu Y Y, Zhang X P, Shan X Y, *et al.* An ultrafast all-optical switch with silicon-based silica structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 041303.
吴永宇, 张小平, 单欣岩, 等. 一种硅基二氧化硅结构的超快全光开关[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 041303.
- [22] Zhuang D W, Han X C, Li Y X, *et al.* Silicon-based optoelectronic integrated optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050001.
庄东炜, 韩晓川, 李雨轩, 等. 硅基光电子集成光控相控阵的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050001.
- [23] Zhang J H, Wu B J, Qiu K. Routing algorithm of dilated Benes optical switching integrated chip [J]. *Optical Communication Technology*, 2019, 43(2): 1-8.
张金花, 武保剑, 邱昆. 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.