

基于阵列波导光栅的光洗牌网络设计

丁京杰¹,叶通¹,李东²

(1.上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240; 2.香港中文大学(深圳) 理工学院,广东 深圳 518172)

摘要: 现有的光洗牌网络方案在扩展性、实用性和经济性等方面存在不足,提出了一种基于阵列波导光栅(AWG)的光洗牌网络的构建方案。本方案使用了多个小规模AWG,采用波分复用(WDM)技术,设计出一种两级连线结构,通过两级交换完成洗牌网络的功能,避免了AWG的串扰问题,减小了网络的连线复杂度;该结构通过合理的信道标号,在连接上等价于洗牌网络。该方案结构简便、易于集成,具有较好的实用性和扩展性,对光器件的利用相当充分。

关键词: 洗牌网络;波分复用;阵列波导光栅

中图分类号:TN915.62 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)03-0050-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of optical shuffle network based on array waveguide gratings

DING Jingjie¹, YE Tong¹, LI Dong²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong(Shenzhen), Shenzhen Guangdong 518172, China)

Abstract: The existing optical shuffle networks have their disadvantages in terms of scalability, practicability and cost-efficiency. A kind of optical shuffle network based on array waveguide grating(AWG) is proposed. With the wavelength division multiplexing(WDM) technology, this paper designs a two-stage link structure using a set of small scale AWG, where the function of shuffle networks is realized by a two-stage structure. The crosstalk problem of AWG is avoided and the cabling complexity is reduced. This structure is equivalent to shuffle network in terms of connectivity with proper numbering scheme. This scheme is simple and easy to integrate with preferable practicability and scalability, and the use of optical devices is quite sufficient.

Key words: shuffle network; WDM; AWG

0 引言

在并行计算系统中,洗牌网络是十分重要的互连结构,被广泛用于实现快速傅里叶变换、多项式运算、位运算和矩阵运算等多种计算任务^[1]。洗牌网络在交换网络系统中十分常见,比较典型的例子是用于洗牌-交换网络。由于现代大型数据中心网络中的处理数据和传输数据都已经达到数十太比特量级^[2],传统电洗牌网络在容量、速度和能耗上都面临严峻挑战。

收稿日期:2018-11-09。

基金项目:国家自然科学基金(NSFC61671286)资助。

作者简介:丁京杰(1994-),男,江西赣州人,本科毕业于南京大学;现为上海交通大学硕士研究生,主修专业为电子与通信工程。主要从事光交换网络结构的研究。



因此,人们对光洗牌网络的研究产生了广泛兴趣,从而提出了很多光洗牌网络方案。此前,绝大多数光洗牌网络的设计方案都采用了自由空间光(FSO)技术。文献[1,3-5]提出了若干种基于FSO的洗牌网络方案,这些方案主要使用了复杂的透镜、偏振光分裂器等空间光器件;然而,这些空间光器件相对较贵,体积较大,难以集成、调整和维护^[6],因而这些方案普遍不太实用。在实际应用中,光洗牌网络的配置往往采用光纤直接连接的方式,但是随着网络规模(网络输入端口和输出端口数目)变大,这种方式需求的光纤数量会很大,给网络的布线和集成带来很大困难。

因此,本文提出一种基阵列波导光栅(AWG)的光洗牌网络设计方案。

1 洗牌网络与光器件介绍

1.1 洗牌网络的连接结构

本文设计的光洗牌网络是基于多个相同的小规模的 AWG 构建的。

一个 $N \times N (N=g \times l)$ 的洗牌网络是有 N 个输入端口和 N 个输出端口的连线网络^[7]。该网络的 N 个输入端口被平均分成 g 组,每组 l 个输入端口; N 个输出端口平均分成 l 组,每组 g 个端口;输入端第 i 组第 j 个端口与输出端第 j 组第 i 个端口相连 ($i=0,1,\dots,g-1, j=0,1,\dots,l-1$)。一个 8×8 的洗牌网络如图 1 所示 ($g=2, l=4$)。我们把洗牌网络的输入端第 x_1 组第 x_2 个端口的地址 X 记为比特 x_1x_2 , 输出端第 y_1 组第 y_2 个端口的地址 Y 记为比特 y_1y_2 。根据上述连线规则,输入端口 $X=x_1x_2$ 连向了输出端口 $Y=y_1y_2=x_2x_1$ 。在图 1 中,输入端有 2 个输入组,每组 4 个端口;输出端 4 个输出组每组 2 个端口;输入端口 02 与输出端口 20 相连。可以看出,在洗牌网络中每个输入组与输出组有且只有一条连线相连。由于洗牌网络的性质是能够进行比特交换,即对于一对相连的输入/输出端口的地址来说,它们的第一个比特与第二个比特发生了交换。

图 1 一个 8×8 的洗牌网络

1.2 AWG 的波长路由性质

AWG 是一种无源的波分复用 (WDM) 的光路由器,由输入/输出波导、自由平板波导和阵列波导组成,传播时延一般可以忽略不计。AWG 的插入损耗小,一个 32×32 的 AWG 的插入损耗约为 4dB^[8]。一个 $g \times l$ 的 AWG 有 g 个输入端口和 l 个输出端口,它与波长集合 $\Lambda=\{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{|\Lambda|-1}\}$ 相关联,其中, $|\Lambda|=\max\{g, l\}$ 。不失一般性,假设 $l \geq g$, 则 $|\Lambda|=l$ 。该器件有如下波长路由性质: 如果由波长 $\lambda_k \in \Lambda$ 承载的信号从输入端口 i 进入,那么它就会从输出端口 j 输出,输入端口 i 、输出端口 j 和波长 λ_k 的下标 k 存在如下关系:

$$k=[i+j]_l \quad (1)$$

$[x]_l$ 定义为 x 对 l 求模,其中, $i=0,1,\dots,g-1, j=0,1,\dots,l-1$ 。对一个 $g \times l$ 的 AWG 而言,每个输入端口容纳 l 个波长信道,每个输出端口容纳 g 个波长信道,整个 AWG

则提供了 $g \times l$ 个传输信道,每个波长信道的连接特性由式(1)决定。根据式(1)可知,AWG 的一个输入端口通过不同的波长与每个输出端口相连;同理,它的一个输出端口通过不同的波长与每个输入端口相连。因此,AWG 没有波长争用,故而是无阻塞的。一个 2×4 的 AWG 如图 2 所示。输入端口 0 与输出端口 2 通过波长 λ_2 相连。可以看出,AWG 的每个输入端口与每个输出端口恰好通过一个波长信道相连,这一特点与洗牌网络相似。

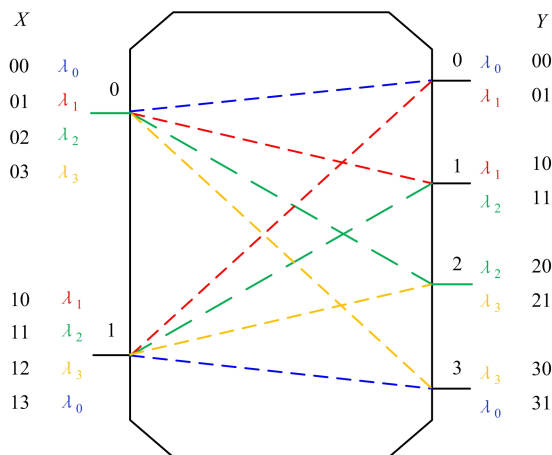


图 2 一个 2×4 的 AWG

2 单个 AWG 构成的洗牌网络

由上节内容可知,单个 AWG 与洗牌网络有一定的相似性。如果把 AWG 上的每个输入端口里的所有波长信道看成一个输入组,每个输出端口里的所有波长信道看成一个输出组,那么单个 AWG 与洗牌网络都满足每个输入组与每个输出组之间有且只有一条连接的特点。因此,如果给 AWG 每个端口上的每个波长信道进行恰当的地址编号,则单个 AWG 与洗牌网络可以实现等价连接。

受式(1)启发,本文把 AWG 上输入端口 x_1 里的波长为 λ_i 的信道地址记为 $X=x_1x_2$,其中 $x_2=[i-x_1]_l$;把输出端口 y_1 里的波长为 λ_j 的信道地址记为 $Y=y_1y_2$,其中 $y_2=[j-y_1]_l$,即地址的第一个比特表示 AWG 的端口,第二个比特表示波长。假设一个信号从输入信道 $X=x_1x_2$ 出发,其所用波长为 $i=[x_1+x_2]_l$ 。根据 AWG 的波长路由性质,该信号会到达输出端口 $y_1=[i-x_1]_l=[x_1+x_2-x_1]_l=x_2$ 上的波长信道 $y_2=[i-y_1]_l=[x_1+x_2-x_2]_l=x_1$,即该信号的传播路径为:

$$X=x_1x_2 \rightarrow Y=x_2x_1 \quad (2)$$

因此,输入信道 $X=x_1x_2$ 与输出信道 $Y=y_1y_2=x_2x_1$ 相连,满足比特交换的性质。在这种编号策略下,单个 AWG 本身就是一个洗牌网络,该 2×4 的 AWG 与图 1 所示的 8×8 的洗牌网络在连接上是完全等价的,如 AWG 中输入端口 0 通过波长 λ_2 与输出端口 2 相连,对应的是洗牌网络中输入信道 02 与输出信道 20 的连接。

因此,单个 AWG 在网络规模较小时可以直接实现光洗牌网络。然而根据文献[9]可知,在实际使用中如果 AWG 的规模太大,可能会出现多个信道使用同一载波波长,AWG 的传输信道会受到串扰影响,导致传输信号严重受损。因此,单个 AWG 仅用于小规模洗牌网络,不具备扩展性。

3 模块化 AWG 构成的洗牌网络

由于使用大规模 AWG 会带来严重的串扰问题,本文考虑使用多个小规模 AWG 来构建光洗牌网络。

3.1 由模块化 AWG 构成的 8×8 洗牌网络

由于一个 2×2 的 AWG 能提供 4 个波长信道,为了实现图 1 中的 8×8 的洗牌网络,我们使用 2 个 2×2 的 AWG 如图 3 所示。首先,把这 2 个 AWG 竖直排列,把网络的输入信道分成 2 组;然后,在输入端设置 2 个输入组,每组 2 个输入端口,第 i 组的第 j 个输入端口与第 j 个 AWG 的第 i 个输入端口相连;AWG 的每个输出端口看成一个输出组,使每个输入组到每个输出组之间恰有一个波长信道相连;最后,给该网络的所有波长信道进行适当的编号。

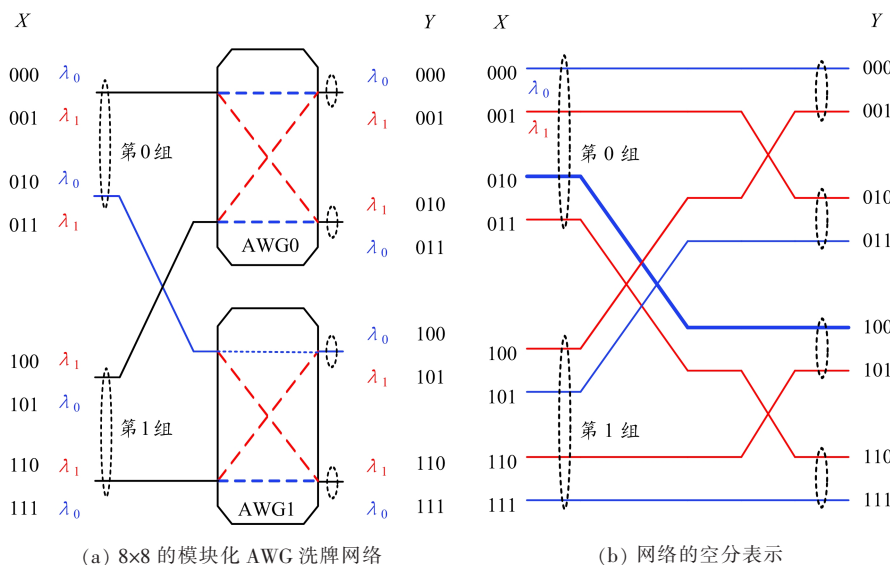


图3 模块化 AWG 洗牌网络与空分洗牌网络的等价性

从图 3(a)可看出,该网络由左边的光纤连线和右边的一系列 AWG 组成。由于使用了多个 AWG,为了便于区分,需额外使用一个比特,即使用 3 个比特给信道编址。我们把输入端第 x_1 组第 x_2 个端口里的波长为 λ_i 的信道记为 $X=x_1x_2x_3$,其中 $x_3=[i-x_1]_2$;把输出端第 y_1 个 AWG 第 y_2 个输出端口上的波长为 λ_j 的信道记为 $Y=y_1y_2y_3$,其中 $y_3=[i-y_2]_2$ 。照此方式,假设一个信号从 $X=x_1x_2x_3$ 出发,它使用的波长 λ_i 的下标 $i=[x_1-x_3]_2$ 。该信号在经过左边部分的光纤连线时,波长没有发生变化,而是光纤连线发生了地址交换,即信道从 $X=x_1x_2x_3$ 到达了 $x_2x_1x_3$;在经过右边部分的第 x_2 个 AWG 时,该信道使用波长 λ_i 从 AWG $_{x_2}$ 的第 x_1 个输入端口进入,根据式(1),该信道会到达 AWG $_{x_2}$ 的输出端口 $y_2=[i-x_1]_2=[x_1+x_3]_2-x_1]_2=x_3$ 上的信道 $y_3=[i-y_2]_2=[x_1+x_3]_2-x_3]_2=x_1$,即该信号的传播路径为:

$$X=x_1x_2x_3 \rightarrow x_2x_1x_3 \rightarrow Y=x_2x_3x_1 \quad (3)$$

该 AWG 网络在这种编号策略下,拥有与洗牌网络相同的比特调换的性质,即比特 x_1 与比特 x_2x_3 发生了调换。由式(3)可知,该 AWG 网络是无阻塞的。该 AWG 洗牌网络对应的空分表示如图 3(b)所示。例如该 AWG 网络中输入组 0 的第一个输入端口与输出组第一个 AWG 的第 0 个输出端口通过波长 λ_0 相连,与图 3(b)中输入信道 010 到输出信道 100 的连接相对应,图 3(b)实际上与图 1 是同一个网络。因此,模块化 AWG 网络与洗牌网络在连接上等价。

3.2 一般情况下的模块化 AWG 构成的洗牌网络

一个 $N \times N$ 的模块化 AWG 洗牌网络如图 4 所示。

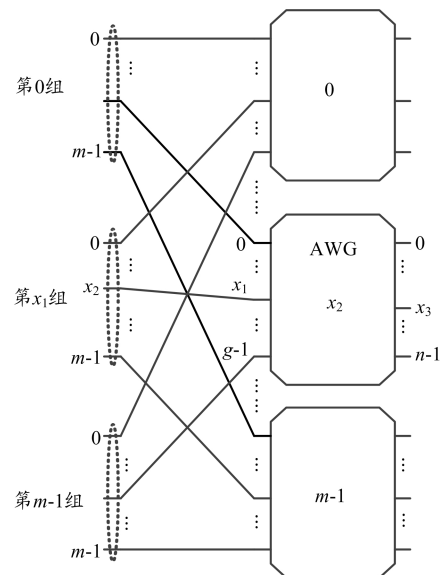


图4 一般情况下的模块化 AWG 洗牌网络

其中 $N=g \times l=g \times m \times n$ 。可以看出,在左边的连线部分,输入端设有 g 组端口,每组有 m 个输入端口,每个端口承载 n 个波长;在网络右边部分竖直排列了 m 个 $g \times n$ 的 AWG;第 i 个输入组第 j 个输入端口与第 j 个 AWG 的第 i 个输入端口相连。只要按照上节内容所述的标号方式,它就能实现洗牌网络的连接。本方案具有极大的扩展性,且对 AWG 波长信道的利用十分充分,没有信道资源的浪费。

本文设计的结构相比 FSO 方案有如下优点:①体积小,单个 AWG 的长宽可以达到 1mm 级别^[10],且易于集成;②空间光方案容易受物理机械和环境扰动,而本方案无此缺陷,且模块化的设计易于维护;③整个结构是无源设计,每信号都只穿过一个 AWG,插入损耗小,因而能量损失小;④相比 FSO 器件而言,其造价相对便宜。

4 网络参数的设置

对一个 $N \times N$ 的两级 AWG 洗牌网络而言,由于参数 g 一般是固定的,且不会很大,参数的选择主要是在 l 的因数分解上,即参数 m 与 n 的选择。在 WDM 网络中,波长带宽是十分重要的资源,不同波长的信号数目越少越好。在本文提出的网络中,连线复杂度主要取决 AWG 左侧的光纤连线,即 $g \times m$;而不同波长的数目则取决于 AWG 的规模,即 $\max\{g, n\}$ 。网络参数的选择对连线复杂度和不同波长的数目影响如表 1 所示。可以看出,如果 m 增大, n 减小,则不同波长的数目 $\max\{g, n\}$ 较小,但是连线复杂度 $g \times m$ 会增加,极端情况下 $m=l, n=1$, 网络就变成了光纤直连;反之,如果 m 减小, n 增大,连线复杂度 $g \times m$ 较小。由于不同波长的数目 $\max\{g, n\}$ 会比较大,还可能引发串扰问题,极端情况下 $m=1, n=l$, 则网络变成了一个 $g \times l$ 的 AWG。此

表 1 网络参数选择对连线复杂度和不同波长的数目的影响

网络参数	洗牌网络	
	连线复杂度 $g \times m$	不同波长的数目 $\max\{g, n\}$
$m=1, n=l$ (单个 AWG)	g	l
m 较小, n 较大	较小	较大
m 较大, n 较小	较大	较小
$m=l, n=1$ (光纤直连)	$g \times l$	1

外,根据文献[11]可知,如果本文网络中取 $\max\{g, n\}$, 那么由串扰引发的损失不会超过 2dB。总之,参数 m 与 n 的选择本质上是连线复杂度与不同种波长数目的折中,在配置网络时可以根据实际需求适当选择。

5 结束语

本文理论上分析了洗牌网络与 AWG 的内在联系,并从洗牌网络的性质出发,提出了一种基于 AWG 的光洗牌网络的设计方案。相比以往的研究方案,基于 AWG 的光洗牌网络的设计方案在物理实现上比较经济和实际,具有极大的扩展性。此外,本文还对基于 AWG 的洗牌网络的参数进行了一定的分析,对参数的设置提供了一些参考建议。

参考文献:

- [1] STONE H S. Parallel Processing with the Perfect Shuffle [J]. IEEE Transactions on Computing, 1971, C-20(2): 153-161.
- [2] PARK H W, YEO I Y, LEE J R, et al. Study on Big Data Center Traffic Management Based on the Separation of Large-Scale Data Stream[C]// Seventh International Conference on Innovative Mobile & Internet Services in Ubiquitous Computing, July 3-5, 2013, Taichung, China. New York: IEEE, 2013: 591-594.
- [3] KARL H B, HUANG A. Optical implementations of the perfect shuffle network[J]. Appl. Opt., 1988, 27: 135-137.
- [4] HANEY W. Folded perfect shuffle optical processor [J]. Appl. Opt., 1988, 27: 202-203.
- [5] YANG J, SHAO Z, ZHOU K, et al. Design of micro-optics array to realize two dimensional perfect shuffle transform [J]. Optical Switching and Networking, 2014, 12: 68-79.
- [6] KEUN, SHIWEN. A survey of free space optical networks[J]. 数字化用户; 数字通讯, 2017(2): 67-77.
- [7] LIEW SOUNG C, LEE T T. PRINCIPLES OF BROADBAND SWITCHING AND NETWORKING [M]. Hoboken, New Jersey, US: Wiley-IEEE Press, 2009: 49-51.
- [8] YE T, LEE T, Ge M, et al. Modular AWG-based Interconnection for Large-Scale Data Center Networks [J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2018, 6(3): 785-799.
- [9] NERI F, GAUDINO R. Simple Optical Fabrics for Scalable Terabit Packet Switches [C]// IEEE International Conference on Communications, May 19-23, 2008, Beijing, China. New York: IEEE, 2008: 5331-5337.
- [10] WU Y, LANG T, HE J. Horseshoe-Shaped 16×16 Arrayed Waveguide Grating Router Based on SOI Platform [C]// in Asia Communications and Photonics Conference, November 10-13, 2017, Guangzhou, China. New York: OSA, 2017: S4J.3.
- [11] XIAO X, PROIETTI R, ZHANG K, et al. Experimental demonstration of Flex-LIONS for reconfigurable all-to-all optical interconnects[C]// In European Conference on Optical Communication, September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE, 2018: 1-3.