

文章编号 1004-924X(2007)10-1495-08

# 台阶型微闪耀光栅面阵实现二维全混洗变换

杨俊波<sup>1</sup>, 苏显渝<sup>1</sup>, 徐平<sup>2</sup>

(1. 四川大学 电子信息学院 光电科学技术系, 四川 成都 610064;

2. 深圳大学 工程技术学院, 广东 深圳 518060)

**摘要:**基于台阶型微闪耀光栅衍射效率高、特征尺度小、集成度高和加工容易等特点,提出了利用台阶型微闪耀光栅面阵实现二维全混洗变换的方法。讨论了一维和二维全混洗的变换规则和数学定义;通过对刻蚀过程中各单元光栅的刻槽取向和周期的控制,使信号光满足所需要方向的闪耀输出,制作出一维和二维的微闪耀光栅面阵,在自由空间分别实现信号光的一维和二维全混洗变换。最后,比较与讨论了微闪耀光栅实现全混洗变换的方法。理论分析和实验结果均表明:该方法与传统的通过信号光矩阵的分割成像、放大、重组、叠加操作不同,它利用单一器件的衍射特性来控制信号光的取向和光强的分布,从而实现二维全混洗变换。因此,该方法具有光能量利用率高、控制简便、易操作和易集成的特点,充分体现了二维全混洗变换在光通信和光信息处理中具有的高空间带宽积和多自由度的特点。

**关键词:**光通信;光网络;微闪耀光栅;全混洗变换

**中图分类号:** O436.1; TP393.03 **文献标识码:** A

## Implementation of two-dimensional perfect shuffle transform using step-based micro-blazed grating planar-array

YANG Jun-bo<sup>1</sup>, SU Xian-yu<sup>1</sup>, XU Ping<sup>2</sup>

(1. *Department of Optoelectronic Science, College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China;*

2. *College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

**Abstract:** Based on some interesting properties of a micro-blazed grating planar-array such as high diffraction efficiency, small size, high degree of integration and easy to fabricate, a 2D Perfect Shuffle (PS) transform method was proposed. The mathematic principles and the mapping rule of 1D and 2D PS transform were defined, respectively. Then, 1D and 2D PS transforms were realized in free space using micro-blazed grating arrays by controlling and modulating the gratings' etching direction and period to direct the signal beams to reach to the desired position. Finally, compared with the conventional method (depend on the operation of dividing, magnification, interlacing and superimposing), this method mainly relying on the diffractive properties of signal beams and the distribution of light intensity presents a single diffractive element to perform 1D and 2D PS transform. The theoretical analysis and experimental results show this method has the advantages of more higher energy efficiency, high

收稿日期:2007-02-13;修订日期:2007-07-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60527001)

feasibility, compact structure, easy to integrate etc., which should be helpful in a optical interconnection network, especially, in a perfect shuffle omega network.

**Key words:** optical communication; optical network; micro-blazed grating; Perfect Shuffle(PS) transform

## 1 引言

随着通信和计算机技术的发展,光互连以其高速、并行、无干扰以及带宽高等优点越来越引起人们的关注,它可以广泛应用于光计算、光学神经网络以及光通信等领域,是高速并行处理系统之间进行信息传递和交换的重要手段。根据传输介质和信号交换过程的不同,光互连可以采取光纤、波导和自由空间(规则和不规则)三种互连方式<sup>[1-3]</sup>,通过站点与站点、系统与系统、板与板、芯片与芯片以及各逻辑处理单元之间数据通道的连接,实现信号的传输与交换。按照光互连网络拓扑结构的不同,可以构建全混洗(Perfect Shuffle, PS)<sup>[4-5]</sup>、全交叉(Crossover)<sup>[6]</sup>、榕树网(Banyan)<sup>[7-8]</sup>、Clos<sup>[9]</sup>等网络。其中,PS网络因其卓越的性能和特点在光互连网络中具有重要的应用。它不仅可以实现任意形式的互连,而且可应用在计算机的快速傅里叶变换、多项式求值、矩阵运算等方面。同时,它与节点开关阵列的组合,可以构建大端口大容量的Omega<sup>[10]</sup>网络,能够实现高空间密度的数据交换和高带宽的信息处理。到目前为止,已经提出了许多实现PS变换的方法:(1)利用传统的光学器械如透镜、棱镜、光栅等<sup>[11]</sup>; (2)利用全息元件<sup>[12]</sup>; (3)利用微光学器件以及光电子器件的组合<sup>[13]</sup>。这些方法各有特点,都较好地实现了PS变换,为PS变换的光学实现研究做出了很大的贡献。由于1D-PS变换受空间带宽积和运算速度的限制,C. W. Stirk等人<sup>[14-19]</sup>提出了用二维方法实现1D-PS变换,这样可以充分利用二维空间的带宽积,在光互连网络中使其结构更加紧凑,更利于集成。但是这些方法主要都是通过输入信号、图像或元素进行分束成像再交错内插组合,最终在输出屏中央信号重叠部分截取出满足2D-PS变换的部分,即得到PS变换的结果。因此,它的能量利用率不高,损耗大,控制

和操作都不太容易,而且由于器件的离散会造成模块集成的困难。针对这些问题,本文提出一种二元光学方法设计的8台阶型微闪耀光栅阵列,利用其特殊的衍射特性,通过控制其台阶的刻槽取向和周期,使信号光满足PS变换的方向输出,从而在自由空间实现1D和2D的PS变换。该方法最大的优点是:光能量的利用率高、器件特征尺寸小、集成度高、只需单一元件即可实现PS变换,因此操作和控制都较为简便。本文的工作是对PS变换光学实现方法研究的补充和完善,希望能够对该项研究工作有所帮助。

## 2 全混洗变换的定义

### 2.1 1D-PS变换

输入一组元素 $A_k (k=0, 1, \dots, N-1)$ , 输入输出端口数 $N = 2^m$ , 其输出为 $A_{k'} (k'=0, 1, \dots, N-1)$ ,  $k$ 和 $k'$ 分别为输入和输出端口序号,且满足:

$$k' = \begin{cases} 2k & 0 \leq k < N/2 \\ 2k+1-N & N/2 \leq k \leq N \end{cases}, \quad (1)$$

例如,输入元素为{1 2 3 4 5 6 7 8}序列,则经过PS变换后为{1 5 2 6 3 7 4 8}序列,如图1所示。

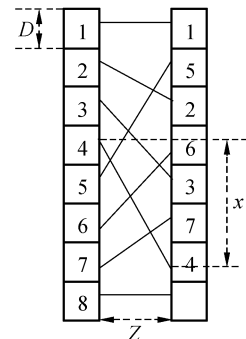


图1  $N=8$  全混洗变换

Fig. 1  $N=8$  PS transformation

### 2.2 2D-PS 变换

2D-PS 变换包括 2D-fold perfect shuffle (FPS)和 2D-separable shuffle,两种操作都是将  $N=2^m$  ( $m$  为偶数)个信道重新设置在  $2^{m/2} \times 2^{m/2}$  列阵的二维平面上,这个列阵可以看作是一个矩阵。下面对这两种 2D-PS 变换分别讨论。

2D-FPS 变换的数学描述为:设输入面为  $N \times N$  ( $N=2^m$ )个元素组成的方阵,每个元素的序号为  $a_i$  ( $i=0,1,\dots,N^2-1$ ),经过互连置换后,方阵中的元素序号变为  $a_i'$ ,那么  $a_i'$  和  $a_i$  满足:

$$X_m' X_{m-1}' \cdots X_1' = X_1 X_m X_{m-1} \cdots X_2, \quad (2)$$

其中,  $X_m' X_{m-1}' \cdots X_1'$  和  $X_m X_{m-1} \cdots X_1$  分别是  $a_i'$  和  $a_i$  的二进制表示。 $N \times N = 16$  的 FPS 变换如图 2 所示。FPS 实质上是叠放在一起的 1D-PS 变换,它的意义在于:当 1D-PS 的元素数目很多时,可以转化为 2D-FPS 变换的形式,从而具有更加紧凑的结构。

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

→

A	I	B	J
C	K	D	L
E	M	F	N
G	O	H	P

图 2  $4 \times 4$  的 2D-FPS 变换

Fig. 2  $4 \times 4$  2D-FPS transformation

2D-separable shuffle 变换的数学描述如下:设输入面的元素阵列为  $A_{ij}$  [ $i, j = 0, 1, 2, \dots, 2^m$ ],输出面的元素阵列为  $B_{pq}$  [ $p, q = 0, 1, 2, \dots, 2^m$ ],则下标  $i, j$  和  $p, q$  间的关系仍可用式 (1)表示,其中  $k' = p, q; k = i, j; N = 2^m$ 。 $4 \times 4$  的 2D-separable shuffle 变换如图 3 所示。

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

→

A	C	B	D
I	K	J	L
E	G	F	H
M	O	N	P

图 3  $4 \times 4$  的 2D-separable shuffle

Fig. 3  $4 \times 4$  2D-separable shuffle

由 2D-separable shuffle 变换的定义可知,其实质是在行和列方向上分别对各元素进行 1D-PS 变换。

### 3 微闪耀光栅实现一维混洗变换

本文作者曾经利用二元光学的设计理论,通过反应性离子刻蚀技术,以普通玻璃为基底材料,制作了由 8 块表面台阶数都是 8 的子微闪耀光栅构成的微闪耀光栅阵列元件<sup>[20-21]</sup>,成功实现了 1D-PS 变换。图 4 为该微闪耀光栅的表面微结构图。 $T$  为闪耀光栅的周期, $d$  为刻蚀深度。

$$\frac{x}{\lambda z} = \frac{n}{D} + \frac{1}{T}, \quad (3)$$

式 (3) 为微闪耀光栅的周期方程。其中,  $x$  为信号光通过微闪耀光栅后由于光栅的闪耀输出偏离原

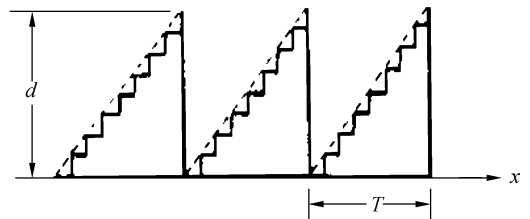


图 4 8 台阶微闪耀光栅

Fig. 4 8-step micro blazed-grating

来传播方向的距离(偏移量),  $z$  为微闪耀光栅对光信号的衍射距离,或者称为完成信号空间交换的距离,  $n$  为输入信号的序号或入射的端口数,  $D$  为相邻两信号端口的间距或每块光栅的宽度,  $\lambda$  为信号光的波长。由式 (3) 可知,选取合适的参数控制微闪耀光栅的周期,即可得到不同入射端口的光信号在空间上满足混洗变换要求的位置闪耀输出。在实验中,信号光为 He-Ne 激光 ( $0.6328 \mu\text{m}$ ),每块微光栅等宽  $D = 2000 \mu\text{m}$ ,信号光的衍射距离  $z = 200 \text{ mm}$ 。由一维混洗变换的特点可知,信号光通过第 2, 7 块微闪耀光栅衍射后的横向偏移量均为  $D$ ,它们具有相同的周期,而刻槽的方向刚好相反,即在竖直方向上一个台阶的取向是由低到高排列,而另外一个则是由高到低排列。同理,信号光通过第 3, 6 块和第 4, 5 块微闪耀光栅后的横向偏移量分别为  $2D$  和  $3D$ ,它们也具有相同的周期值而刻槽取向彼此相反。将相关参数带入式 (3),得到:  $T_4 = T_5 =$

21.09  $\mu\text{m}$ ,  $T_3 = T_6 = 32.15 \mu\text{m}$ ,  $T_2 = T_7 = 67.56 \mu\text{m}$ 。图 5 即为根据这些实验参数制作的 8 台阶型微闪耀光栅阵列,图 6 为具体的实验装置图,实验结果如图 7 所示。显然,微闪耀光栅阵列很好地实现了 1D-PS 变换。

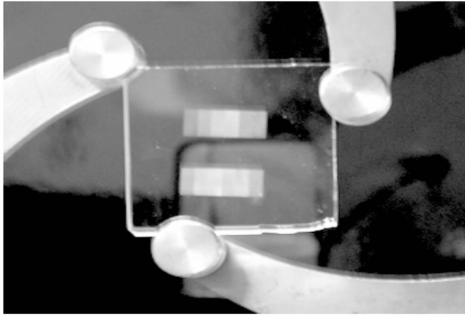


图 5 8 通道的微闪耀光栅阵列

Fig. 5 8-channel micro-blazed grating array

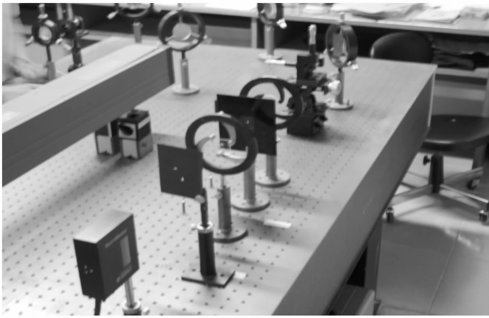


图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setup

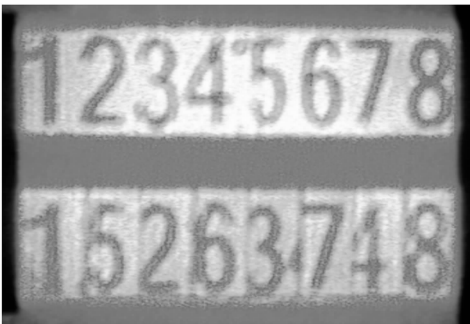


图 7 全混洗变换的结果

Fig. 7 Result of PS transformation

#### 4 微闪耀光栅面阵实现二维混洗变换

由上面的分析可知,通过控制各子闪耀光栅的周期和刻槽方向(台阶的取向),可以控制信号

光在水平或竖直方向上输出的空间位置和闪耀角。为此,本文设计了由不同周期和刻槽取向的子闪耀光栅构成的二维面阵,即在一方形的玻璃基底上刻蚀出  $4 \times 4 = 16$  块不同周期和刻槽取向的子闪耀光栅构成的面阵。各子闪耀光栅的周期值由式(3)根据各通道信号光通过闪耀光栅面阵后由于衍射引起的偏移量  $x$  所确定。下面具体讨论微闪耀光栅面阵实现二维混洗变换的原理与过程。

如图 3 所示的  $4 \times 4$  2D-separable shuffle 变换,由于其变换操作实际上是对行和列方向上的元素分别进行一维的混洗变换,所以输入信号矩阵的四个边上的数据(信号)都只在其所处的行或列上进行位置的平移,唯有信号矩阵中间的数据 F、G、J 和 K 发生了对角线方向的移动,也就是说它们在行和列方向上均发生了平移。根据这样的特点,本文设计出如图 8 所示的两块微闪耀光栅面阵。在图 8 (a)中,信号光 B、C、N 和 O 处对应的子闪耀光栅的刻槽方向沿着水平方向,其中 B、N 和 C、O 所对应的子光栅的台阶取向刚好相反、周期相等,因此通过子光栅闪耀后在距离  $Z$  处,信号光 B、N 将沿水平方向向右平移一格(宽度为  $D$ )输出,而信号光 C、O 则向左平移一格输出。也就是说通过该微闪耀光栅面阵后,信号光 B 和 C、N 和 O 在距离  $Z$  处在水平方向实现了空间位置的交换。同理分析, E、F、G、H 和 I、J、K、L 信号所处的子光栅的刻槽沿着竖直方向,它们将在竖直方向上完成信号间位置的交换。其中 E、F、G、H 和 I、J、K、L 所对应的子光栅的台阶方向相反、周期相等。因此,通过各子光栅的衍射后,在距离  $Z$  处在竖直方向上信号 E 和 I、F 和 J、G 和 K、H 和 L 将完成位置交换。由于信号 A、D、M 和 P 不发生位置的交换,因此它们对应位置的玻璃基底不具有空间周期结构,信号光将不发生衍射而直接通过。由此得到的输出信号光矩阵排列方式如图 8(b)所示。此时信号光 F、G 和 J、K 只完成了竖直方向上的移动,按照 2D-separable shuffle 的要求,还必须完成水平方向上的平移,因此本文又设计一块如图 8(b)所示的微闪耀光栅面阵。由于只需考虑水平方向上的移动,因此

它的设计就显得相对简单,设计过程和上面一样,子光栅的周期值也相同,只不过要注意信号光 J、F 和 K、G 所对应的子光栅的台阶取向相反。其它位置处的信号光不发生衍射而直接通过其对应的玻璃基底。利用微闪耀光栅面阵实现 2D-separable shuffle 的过程可以用图 9 简单描述,输入信号光矩阵通过两块微闪耀光栅面阵的衍射作用,最后在距离  $Z'$  处得到所需的 2D-separable shuffle 变换。

同样的方法,可以设计不同周期和刻槽取向的微闪耀光栅面阵,通过它们的组合可以实现图 2 所示的 2D-FPS 变换。如图 1 和图 7 所示,由于微闪耀光栅的输出光位于水平或竖直方向,即信号光的交换或平移只能在水平或竖直方向上进

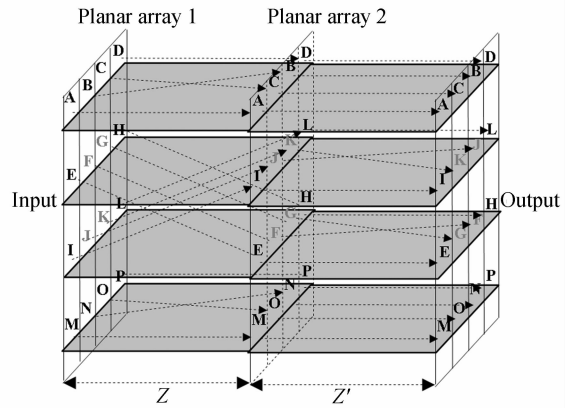
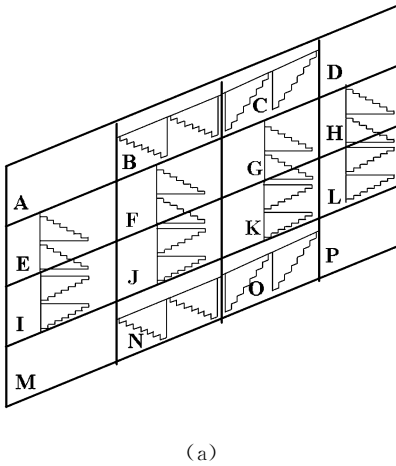
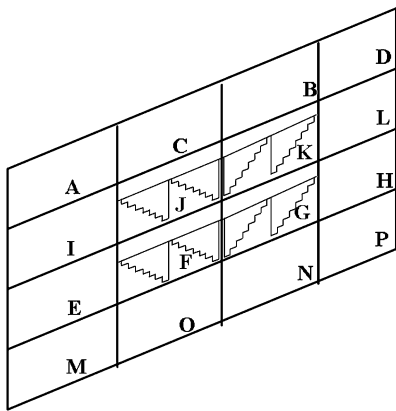


图 9 微闪耀光栅面阵实现 2D-separable shuffle 示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of implementation of 2D-separable shuffle using micro-blazed grating planar-array



(a)



(b)

图 8 实现 2D-separable shuffle 的微闪耀光栅面阵  
Fig. 8 Planar-array of micro-blazed grating performing 2D-separable shuffle

行,因此要完成 2D-FPS 变换,必须分几步分别在水平和竖直方向上进行平移操作,对应的操作过程如图 10 所示。

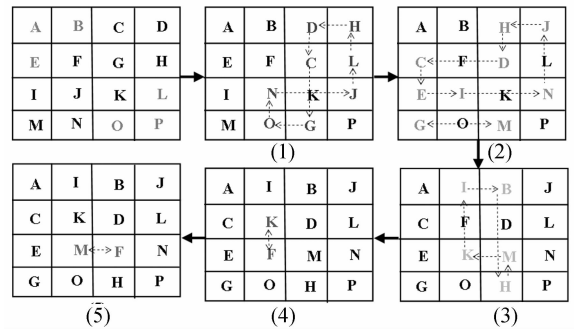
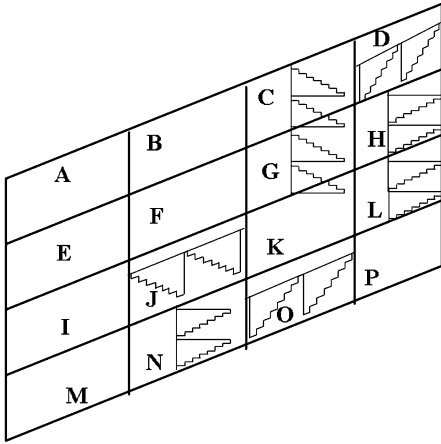


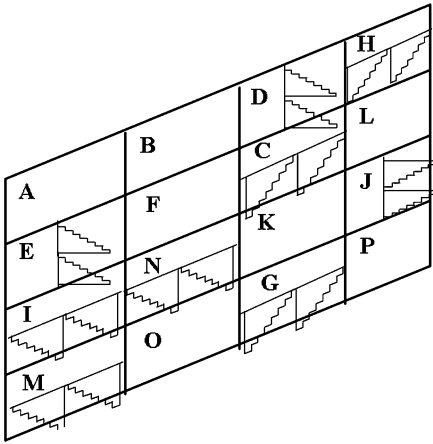
图 10 2D-FPS 变换的操作过程  
Fig. 10 Operational process of 2D-FPS

图中经过 5 步的平移操作即可完成 2D-FPS 变换。在每一步移动过程中信号光必须满足的原则是:该信号光在水平或竖直方向上移动后留下的位置必须由同行或同列中其它的信号填充,依次类推,直到最后一个位置由第一个移动的信号来填充,也就是说信号光的移动方向形成一个封闭的循环链。如图 10 所示,图中带箭头的虚线表示信号的移动方向,它决定了该子光栅在制作时台阶的取向,而信号光移动的格数代表通过其对应的子光栅衍射后在这方向上的偏移量  $x$ ,由此根据式(3)即可得到该子光栅的周期。根据图 10 中的 5 步平移操作,本文设计出实现每一步操作

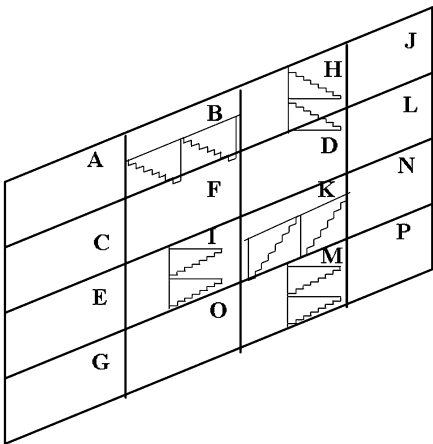
所对应的微闪耀光栅面阵,如图 11 所示。输入信号光矩阵依次通过这 5 块微闪耀光栅面阵后,最终将得到 2D-FPS 变换的结果。



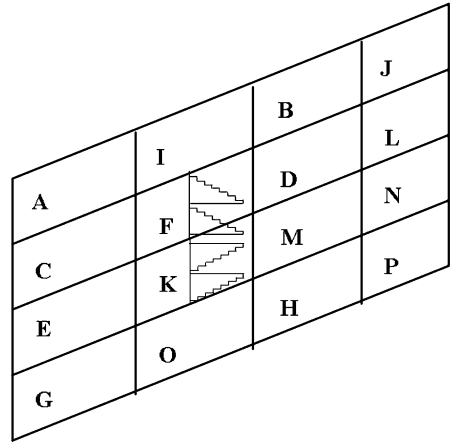
(a)



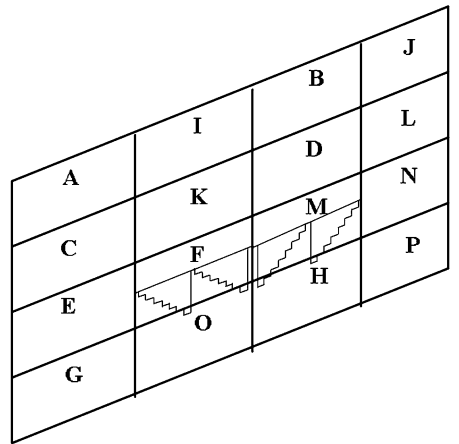
(b)



(c)



(d)



(e)

图 11 实现 2D-FPS 变换的微闪耀光栅面阵

Fig. 11 Micro-blazed grating planar-array performing 2D-FPS

## 5 讨论与分析

由上面的分析可知,微闪耀光栅面阵实现 2D-PS 变换,与传统的利用透镜、棱镜或全息光栅的实现方法不同,它不需要对输入信号矩阵进行分束(或分象限)成像,交叉内插操作,最后再叠加和截取出需要的成像部分。这种方法的实质是对每一个信号光单元(输入信号矩阵中的单个元素)进行操作,而不是对象限整体进行平移,因此它对信号光的输出位置的控制更加灵活,只需根据需要设计其对应的子光栅台阶的取向和周期即可。由于每一束信号光均参与了交换(或直通或衍

射),因此其光能量的利用率非常高。而且由二元光学的理论可知<sup>[22]</sup>,对于 8 台阶型微闪耀光栅其衍射效率理论上可以达到 95%左右。

需要特别注意的是:信号光一次只能在一个方向上发生平移(或水平或竖直),因此根据信号光最终变换的位置,可能需要设计出几块不同周期和刻槽取向的微闪耀光栅面阵。对于 2D-separable shuffle 变换,只需设计两块微闪耀光栅面阵,输入信号光矩阵依次通过这两块微闪耀光栅面阵,利用衍射效应分别完成水平和竖直方向上的平移操作,最后在输出平面上即得到所需要 2D-separable shuffle 变换。因此其结构非常紧凑,易于与其它光电子器件实现集成。但是对于 2D-FPS 变换,信号光矩阵必须经过 5 块微闪耀光栅面阵后,才能完成所需的变换,其交换距离相对较长,能量损耗也相对较大,因此在具体的实施过程中还有许多问题需要解决,比如微闪耀光栅面阵的设计必须进一步优化,各元件间的对位必须更加精确,以求能够减少各级交换的距离(衍射

距离)和降低能量的损失。

## 6 结 论

本文利用二元光学理论,设计了 8 台阶  $4 \times 4$  微闪耀光栅面阵,通过控制每块子光栅的周期和台阶取向,可以很方便地控制信号光闪耀输出的方向和空间位置。输入的信号光矩阵依次通过各级微闪耀光栅面阵,由衍射效应分别完成各信号光单元在水平或竖直方向上的平移,平移量由其对应的子光栅的周期值决定,而移动方向则取决于子光栅微台阶的取向(刻槽的方向),最终实现 2D-separable shuffle 和 FPS 变换。理论分析表明,该方法具有光能量利用率高、器件特征尺寸小、集成度高、操作简便和控制灵活等特点。下一步的工作是完成微闪耀光栅面阵的具体制作以及实验过程中衍射效率、能量损耗和实验效果的评测。本文的工作是对 PS 变换光学实现方法研究的一点补充,希望能够对该项研究工作有所帮助。

## 参考文献:

- [1] 刘泽文, 宣云, 雷啸锋, 等. 高阻硅上 RF-MEMS 共面波导设计及测量研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 158-164.  
LIU Z W, XUAN Y, LEI X F, *et al.*. Design and measurement of RF-MEMS CPW on HRS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):158-164. (in Chinese)
- [2] 张燕君, 陈才和, 吴波, 等. 硅微光机械加速度地震检波器中 M-Z 光波导干涉仪结构设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1):77-82.  
ZHANG Y J, CHEN C H, WU B, *et al.*. Structure design of Mach-Zehnder interferometer in electrooptic integrated acceleration seismic geophone[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):77-82. (in Chinese)
- [3] 邵兵, 孙立宁, 曲东升, 等. 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1):43-47.  
SHAO B, SUN L N, QU D SH, *et al.*. Design of fine pointing tip/tilt mirror of ATP system for free space optical communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):43-47. (in Chinese)
- [4] STONE H S. Parallel processing with the perfect shuffle[J]. *IEEE Trans. Comput.*, 1971, C-20:153-156.
- [5] LOHMANN A W, STORK W, STUCKLE G. Optical perfect shuffle[J]. *Appl. Opt.*, 1986, 25(10):1530-1531.
- [6] SINQH B K, GUPTE N. Crossover behavior in a communication network[J]. *Physical Review E*, 2003, 68(6): 66121-1-9.
- [7] XIAOHONG J, PIN-HAN H, HORIGUCHI S. Performance modeling for all-optical photonic switches based on the vertical stacking of banyan network structures[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(8):1620-1631.
- [8] 曹明翠, 李再光, 李洪谱, 等. 榕树网络的互连矩阵与模拟研究[J]. 光学学报, 1994, 14(5):513-517.  
CAO M C, LI Z G, LI H P, *et al.*. Interconnection matrix of the banyan network and its simulation study[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(5):513-517. (in Chinese)
- [9] ANDRZEJ J. Nonblocking, repackable, and rearrangeable cros networks: fifty years of the theory evolution[J].

*IEEE Communications Magazine*, 2003,41(10):28-33.

- [10] YANG Y, WANG J. A class of multistage conference switching networks for group communication[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2004,15(3):228-243.
- [11] 康辉, 章江英, 战元龄. 用棱镜实现高效率的完全混洗互连网络[J]. *光学学报*, 1995, 15(3): 332-336.  
KANG H, ZHANG J Y, ZHAN Y L. Optical implementation of PS interconnection network with high energy efficiency using prisms[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(3): 332-336. (in Chinese)
- [12] DAVIDSON N, FRIESEM A A, HASMAN E. Realization of perfect shuffle and inverse perfect shuffle transforms with holographic elements[J]. *Appl. Opt.*, 1992,31(11):1810-1812.
- [13] CHARLES W S, RAVINDIA A A, MICHAEL W H. Folded perfect shuffle optical processor[J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(2):202-203.
- [14] STIRK C W, ATHALE R A, HANEY M W. Folded perfect shuffle optical processor[J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(2): 202-203.
- [15] 张二平, 余重秀, 徐大雄. 采用全息方法实现的光学折叠 PS 互连网络[J]. *高技术通讯*, 1995, 9:27-30.  
ZHANG E P, YU CH X, XU D X. Realizing optical folded PS interconnection network by using holography[J]. *High Technology Letters*, 1995, 9:27-30. (in Chinese)
- [16] 邱晓东, 路明哲, 母国光, 等. 光学全息方法实现光学全混洗[J]. *中国激光*, 1993, A20(10):757-760.  
QIU X D, LU M ZH, MU G G, *et al.*. The realization of optical perfect shuffle with hologram[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1993, A20(10):757-760. (in Chinese)
- [17] 刘艺, 何淑梅, 王仕璠. 虚焦点成像实现平行光输入的 PS 光互连[J]. *中国激光*, 2000, A27(1):87-90.  
LIU Y, HE SH M, WANG SH F. PS optical interconnection realized by virtual focus imaging under the parallel light input[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, A27(1):87-90. (in Chinese)
- [18] WU Y M, LIU L R, WANG ZH J. Characteristics, routing algorithm, and optical implementation of two-dimensional perfect-shuffle networks[J]. *App. Opt.*, 1993, 32(35):7210-7216.
- [19] SHAO L, LIU L R, PENG H F, *et al.*. Routing scheme, permutation properties, and optical implementation of a four-shuffle-exchange-based Omega network[J]. *Opt. Eng.*, 1997,36(5):1542-1547.
- [20] XU P, ZHOU X, ZHANG X CH, *et al.*. Optical perfect shuffle interconnection using computer-generated blazed grating array[J]. *Optical Review*, 1995,2(5):362-36515.
- [21] XU P, YANG J B, HUANG H X, *et al.*. The theoretical analysis and design of perfect shuffle interconnection using micro-optical array element[J]. *SPIE*, 2005,5636:334-340.
- [22] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.  
JIN G F, YAN Y B, WU M X, *et al.*. *Binary Optics*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)

**作者简介:**杨俊波(1974—),男,四川西昌人,四川大学博士研究生,主要研究方向为信息光学、光通信、光互连等。E-mail: yangjunbo008@sohu.com

苏显渝(1944—),男,四川成都人,四川大学电子信息学院教授,博士生导师,主要研究方向为信息光学和光学三维传感技术的研究。E-mail: xysu@email.scu.edu.cn