

一种高效、高分辨的 FPS 光学互连网络*

康 辉 章江英 战元龄 李 加

(南开大学物理系 天津 300071)

翟宏琛 张铁群

(南开大学现代光学所 天津 300071)

提要 提出了一种 FPS 光学互连的新装置。在这一装置中,由于使用普通透镜和光楔作为光学互连元件,故其结构简单,制备方便,价格便宜,并具有高的光能利用率和高的互连信道密度等优点,因而具有实际应用价值。

关键词 FPS 互连, 高效高分辨网络, 透镜-光楔映像

1 引 言

互连具有广泛而深刻的涵义^[1],而通常科研工作者所说的互连是专指机内的互连通信。根据任务和用途,互连具有各种不同的类型,其中 PS(Perfect Shuffle)网络是一种最基本的互连形式,由它可以实现任意形式的互连。以光作为信息载体,以光学系统和光学元器件作为互连元件的所谓光互连,以并行、快速、大容量和强的抗干扰能力为特点而倍受人们的关注。在数学运算和信号处理中,为了充分利用光学系统的二维空间带宽积,Stirk 等人提出 FPS 光互连网络的概念并建立了相应的处理器^[2]。在这种网络系统中,他们使用四个透镜排成一个 2×2 透镜方阵,对 2-D 输入数据实现四个通道传输,并且在输入平面上,利用一块像限编码孔模板对数据取样,从而在输出平面上实现对输入物函数的 FPS 变换。后来,Haney 等人^[3]对上述方法作了分析,指出它产生能量损失的原因。他们采用 2-D 的小透镜阵列和棱镜阵列来克服放大和折转造成的能量损失,但是结构复杂,加工制造费时,以及装校困难。本文作者曾在文献[4]中研究了透镜-光栅作为互连元件的 FPS(Folded Perfect Shuffle)变换系统,在该系统中,仅使用一个透镜和一块 2-D 光栅,从而使系统简化,装校和调试也都变得简单容易方便,其缺点是能量利用率受限。稍后,作者又实验研究了利用四焦点全息透镜实现 FPS 变换的方法^[5],但仍然存在如同文献[4]的优缺点。在本文中,作者在已有工作的基础上进一步提出一种高效、高分辨的 FPS 互连网络。这种网络装置因为是由透镜和光楔等普通光学元件组成,而不含有衍射元件、子透镜和子棱镜阵列,所以它不仅结构简单,加工制作方便,价格便宜,而且光能利用率高,具有能充分合理利用光学系统的 2-D 空间带宽积,提高互连密度的潜力。

* 国家自然科学基金资助项目。

2 设计原理

对于 1-D(即线阵)排列的二元数据和它的 PS 变换数据线阵,当数据总量为 Q (等于 $2^k, k$ 为整数) 时,则可按折叠操作规则,将其排列成 $M \times N$ (等于 Q) 的二元数据面阵(见图 1 中左面的方块图)。在图 1 中示出 $Q = M \times N = 4 \times 8 = 32$ 个数据元素 的 FPS 变换分布图。

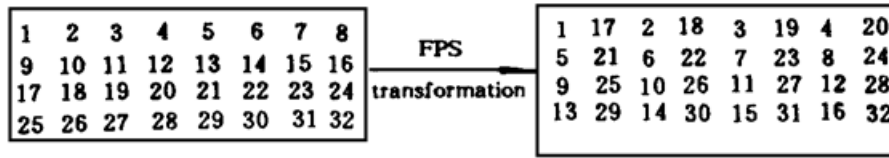


图 1 FPS 变换

Fig. 1 The folded shuffle transformation

设数据单个元素尺寸为 a , 相邻元素间距为 b (大于等于 $2a$), 于是根据像限数据相对平移交错内插实现 FPS 变换的方法^[4], 可求得四个像限内数据的相对平移量, 表 1 示出这些移动量的绝对值。

表 1 四个像限的相对移动量

Table 1 The relative translation of the data in the four quadrants

quadrants	relative translation		
	y direction	z direction	total amount
1 & 2	$Nb/2$	$b/2$	$(N^2 + 1)^{1/2}b/2$
2 & 3	$b/2$	$Mb/2$	$(M^2 + 1)^{1/2}b/2$
3 & 4	$Nb/2$	$b/2$	$(N^2 + 1)^{1/2}b/2$
4 & 1	$b/2$	$Mb/2$	$(M^2 + 1)^{1/2}b/2$
1 & 3	$(N + 1)b/2$	$(M + 1)b/2$	$[(N + 1)^2 + (M + 1)^2]^{1/2}b/2$
2 & 4	$(N - 1)b/2$	$(M - 1)b/2$	$[(N - 1)^2 + (M - 1)^2]^{1/2}b/2$

当由透镜和光楔构成 FPS 互连网络时, 透镜的作用是完成共线变换^[1], 光楔则起着分割象限并使各个象限数据在输出平面上产生定向的相应的平移量。对于不同类型的光学装置, 光楔的结构、参数以及安放位置都必须与输入的数据参量指标相匹配。下面讨论两种方案:

2.1 双透镜光楔映像系统

如图 2 所示, 由透镜 L_1 和 L_2 组成无焦成像系统。 P_1 为输入平面, P_2 为空间频谱面, P_3 为输出平面。将所选取的二元图像数据方阵(即 $M = N$)

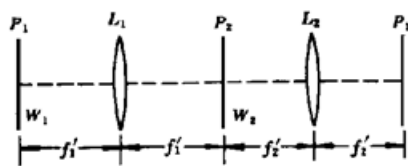


图 2 双透镜-光楔映像系统

Fig. 2 The double lens-wedge mapping system

放入输入平面上, 它可表示为一个 2-D 图像矩阵矢量^[1], 即

$$f = [f_{mn} = (0, 1); m, n = 1, 2, \dots, N] \quad (1)$$

放入输入平面上, 它可表示为一个 2-D 图像矩阵矢量^[1], 即

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N1} & f_{N2} & \dots & f_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

当将两个正交的非涅耳双棱镜(用 W_1 表示) 也同时放入 系统的输入平面时, 则二元输入数据

方阵被分割成四个像限。每个像限的输入数据可用子矩阵

$$g(k) = [g_{ij}^{(k)} = (0, 1); i, j = 1, 2, \dots, N/2], k = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

表示, 所以有

$$f = \begin{bmatrix} g^{(2)} & g^{(1)} \\ g^{(3)} & g^{(4)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

设菲涅耳双棱镜的顶角为 θ , 则输入物函数等于像限矩阵与像限相位因子相乘, 可表示为

$$g = \begin{bmatrix} p^{(2)} & g^{(2)} & p^{(1)} & g^{(1)} \\ p^{(3)} & g^{(3)} & p^{(4)} & g^{(4)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} p^{(1)} &= \exp\{-jk(n-1)(y+z)\} \\ p^{(2)} &= \exp\{-jk(n-1)(-y+z)\} \\ p^{(3)} &= \exp\{-jk(n-1)(-y-z)\} \\ p^{(4)} &= \exp\{-jk(n-1)(y-z)\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在单位振幅的单色平行光照明下, 于 P_2 平面上形成物函数的傅里叶谱, 它由四项组成, 即

$$G(\eta, \xi) = G_1(\eta + \eta_0, \xi + \xi_0) + G_2(\eta - \eta_0, \xi + \xi_0) + \\ G_3(\eta - \eta_0, \xi - \xi_0) + G_4(\eta + \eta_0, \xi - \xi_0) \quad (7)$$

其中, G_k 为第 k 像限物函数的傅里叶变换, 而

$$\eta_0 = \xi_0 = (n-1)\theta f_1' \quad (8)$$

θ 为菲涅耳双棱镜的折射顶角。由此可见, 它们对称分布在 P_2 平面的四个像限中。

为了在 P_3 平面上得到所要求的四像限输出图像的交错重叠, 必须同时在 P_2 平面的四个像限中分别放置由正交的顶角大小不同的菲涅耳双棱镜加工而成的四块光楔(用 W_2 表示), 其中由每一块菲涅耳双棱镜制成的两块光楔分别作用于相对(即 1 和 3, 2 和 4) 像限的频谱上。设两块菲涅耳双棱镜的顶角分别为 θ_α 和 θ_β , 则由 L_2 作第二次傅里叶变换后, 在 P_3 平面上得到输出像函数 $g'(y, z)$, 它亦由四项组成, 即

$$g'(y, z) = g_1'(y - \alpha, z - \alpha) + g_2'(y + \beta, z - \beta) + g_3'(y + \alpha, z + \alpha) + g_4'(y - \beta, z + \beta) \quad (9)$$

其中, α, β 分别表示像限输出图像在 y 和 z 方向的平移量。由表 1 所列数据可知, 当 $M = N$ 时, 它们应满足

$$\alpha = \frac{(N+1)b}{4} \cdot \frac{f_2'}{f_1'}, \quad \beta = \frac{(N-1)b}{4} \cdot \frac{f_2'}{f_1'} \quad (10)$$

如果用折射率为 n 的光学材料制作这两块正交的菲涅耳棱镜, 则其顶角 θ_α 和 θ_β 由下式确定

$$\theta_\alpha = \frac{\sqrt{2}(N+1)b}{4(n-1)f_1'}, \quad \theta_\beta = \frac{\sqrt{2}(N-1)b}{4(n-1)f_1'} \quad (11)$$

或者采用四块同样的双棱镜, 其两折射顶角分别为 $\theta_1 = \sqrt{2}\theta_\alpha/2$ 和 $\theta_2 = \sqrt{2}\theta_\beta/2$, 使它们分别覆盖两相邻的(即 1 和 2, 2 和 3, 3 和 4, 4 和 1) 像限, 并且让 θ_1 和 θ_2 分别位于相对(即 1 和 3, 2 和 4) 像限中。

如果在 P_1 平面上再放入一块取样模板时^[2], 则需要在 P_2 平面上正交放置两块顶角相同的菲涅耳双棱镜; 或者用四块顶角相同的光楔, 替代它们分别覆盖在四个谱上, 并且顶角相对放置。它们的夹角分别为

$$\theta'_1 = \frac{Nb}{4(n-1)f'_1}, \quad \theta'_2 = \frac{\sqrt{2}\theta'_1}{2} \quad (12)$$

以上这些方法均能在输出平面 P_3 上得到输入数据的 FPS 变换。

2.2 单透镜-光楔映像系统

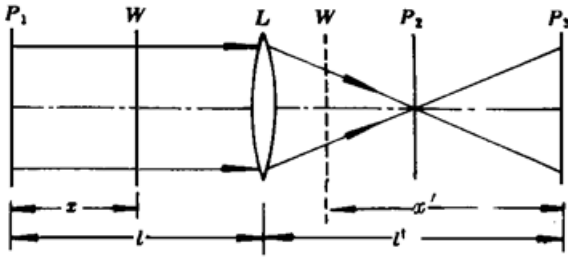


图 3 单透镜-光楔映像系统

Fig. 3 The single lens-wedge mapping system

图 3 示出由物镜 L 和单组光楔 W 作为互连元件构成的 FPS 映像系统(当然也可以象图 2 那样采用双透镜映像系统构成 FPS 互连网络), 这里, W 起着分割像限并使各像限数据在输出面上产生 FPS 变换所需要的位移量的双重作用。通过合理选择光楔 W 的位置和 W 的结构, 并在 P_1 平面上放置输入孔编码模板, 即可实现 FPS 变换。利用光学知识和图中的几何关系, 可以求出光楔 W 到输入平面 P_1 (或输出平面 P_3) 的距离 x 与输入

数据和棱镜顶角之间的关系式。当 W 位于 P_1 和 L 之间时, 菲涅耳棱镜的顶角为

$$\theta = \frac{Nb}{4(n-1)x} \quad (13)$$

当 W 位于 L 和 P_3 平面之间、到 P_3 之间距为 x' 时, 则有

$$\theta = \frac{Nbl'}{4(n-1)x'l} \quad (14)$$

其中, l 和 l' 为物像共轭距。

同样, 亦可采用如前所述的其他方法。

3 实验及结果

实验分别采用图 2 和图 3 所示的装置。由一台低功率的 He-Ne 激光器作为光源, 利用一个 40 倍的显微物镜和一个准直物镜 ($f' = 372$ mm) 组成扩束器, 以提供一个直径为 50 mm 的平行光束。

利用图 2 网络系统进行互连实验时, 各种参数为: 输入数据矩阵元素尺寸 $a = 2$ mm, 相邻元素间距 $b = 5$ mm, 棱镜顶角 $\theta_\alpha = 2.7^\circ$, $\theta_\beta = 5.4^\circ$, $f'_1 = 190$ mm, $f'_2 = 372$ mm。对应由阿拉伯数字折叠排列而成的 $N \times N = 4 \times 4$ 方阵的输入数据时, 其 FPS 变换的输出结果示于图 4(a) 中。

在利用图 3 所示的装置进行互连实验时, 将由阿拉伯数字折叠排列的 $N \times N = 8 \times 8$ 方阵作为物函数, 其中 $a = 1$ mm, $b = 2.15$ mm。物镜焦距 $f' = 190$ mm, 物像距(倒数)之比 $l'/l = 2$, 光楔 W 与平面 P_1 之间距 $x = 150$ mm, 光楔顶角 $\theta = 3.2^\circ$ 。因为在 P_1 平面上使用输入数据像限编码模板与在 P_2 平面的 1, 3 像限中使用对角小棱镜的作

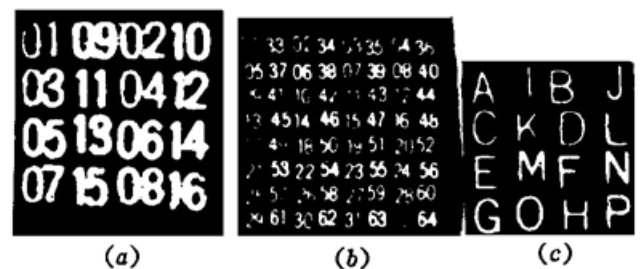


图 4 实验结果

(a) 图 2 所示网络系统的输出; (b), (c) 图 3 所示网络系统的输出, 其中 (b) 是 W 位于透镜前的情况, (c) 是 W 位于透镜后的情况

Fig. 4 The experimental results

(a) the output of the mapping system shown in Fig. 2; (b) and (c) the output of the apparatus shown in Fig. 3

用相同,所以在该实验中采用两块小棱镜替代输入模板,棱镜顶角为 1.1° 。实验结果示于图 4(b) 中。图 4(c) 是 W 位于透镜后面所得实验结果。

4 简单分析和结论

本文提出了一种基于透镜-光楔作为互连元件的 FPS 光学网络,由于网络中没使用衍射元件,并且输入和输出是一一对应的,所以除了元件界面的反射和光学介质的散射吸收外,几乎没有其它额外的光能损失,所以能量利用率非常高。又因为透镜和光楔是整体使用(不是透镜棱镜阵列),光楔夹角较小,所以整个系统具有较高的光学极限分辨率。只要将系统优化设计,就可以使网络具有较高的互连信道密度,从而提高并行运算和处理数据的能力。除此之外,由于互连元件均是普通光学元件,所以制造装校工艺成熟,造价低廉。

参 考 文 献

- 1 康 辉. 映像光学. 天津:南开大学出版社,1996
- 2 C. W. Stirk, R. A. Athale, M. W. Haney. Folded perfect shuffle optical processor. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(2): 202~ 203
- 3 M. W. Haney, J. J. Levy. Optically efficient free-space folded perfect shuttle network. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(20): 2833~ 2940
- 4 康 辉,章江英,战元龄. 用二维光栅实现 FPS 互连网络. 光学学报,1994, **13**(6): 564~ 567
- 5 康 辉,雒江涛,翟宏琛等. 用四焦点全息透镜实现的 PS 和 FPS 互连网络. 中国激光,1996, **23**(5): 470 ~ 474

An Optical FPS Interconnection Network with High Energy Efficiency and High Resolution

Kang Hui Zhang Jiangying Zhan Yuanling Li Jia
(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

Zhai Hongchen Zhang Tiequn

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract In this paper, a new optical architecture for FPS interconnection is proposed, in which ordinary imaging lenses and optical wedges are used as optical interconnection devices. The FPS interconnection network is simple and useful; both fabricating and adjusting are easy, and the cost is reasonable. Especially, the FPS network possesses high light efficiency and high interconnection channel density, therefore it has the value of the practical application.

Key words folded perfect shuffle interconnection, network with high efficiency and high resolution, lens-wedge mapping