

用棱镜实现高效率的完全混洗互连网络

康 辉 章江英 战元龄

(南开大学物理系, 天津 300071)

摘 要 提出了用棱镜的普通光学系统实现二维的完全混洗 (Perfect Shuffle) 互连网络的新方法。方法简单、可行, 并能有效地利用光能, 因而具有实用意义。

关键词 完全混洗, 光互连, 棱镜。

1 引 言

由于光子与电子相比, 具有彼此不相干扰的优点, 在数字光计算机的研究中, 自由空间中的光互连备受关注。而其中 PS 是一种最基本的互连网络, 由它可以实现任意形式的光互连, 因而具有重要的地位。作者曾研究并提出了用普通成象光学系统和衍射光栅实现 PS 互连网络的各种有效方法^[1~3]。这些方法都具有简单、灵活、易于实现并能有效地提高网络通道密度的优点。但光栅总伴有能量损失的问题。为克服这一缺点, Lohmann 等曾提出用棱镜实现一维的 PS 的设想^[4]。本文则提出用棱镜作分束和相移元件实现二维的 PS 互连网络的新方法, 并给出用这些方法所得的实验结果。理论和实验都表明, 用棱镜实现高效率的 PS 互连网络是可行的。

2 原 理

二维的 PS 是同时将 $M \times N$ ($M = 2^i, N = 2^j, i, j$ 皆为整数) 个数据沿行和列进行交错内插操作。设数据孔的尺寸为 a , 相邻数据孔中心的间距为 b ($b > 2a$), 并设所用光学系统的横向放大率为 m , 显然, 若将该二维数据阵列等分割为四个象限, 并使各象限间有表 1 所示的相对位移^[5], 则可实现二维的 PS。

这种平分和交错均可用棱镜来实现。为此, 采用了下列各种方法。

2.1 用两组棱镜分别进行平分和交错

采用图 1 所示的 $4f$ 系统 (图中只表示出实现一维 PS 的情况)。应用这种系统可采用下列两种方案。

2.1.1 第一种方案

将二维的输入数据阵列作为物函数, 放在图 1 中的物平面 P_1 上, 用 $f(y, z)$ 表示。将其

Table 1. The relative translations between quadrants

quadrants	relative translation		
	y-direction	z-direction	total amount
1 and 2	$m(N-1)b/2$	0	$m(N-1)b/2$
2 and 3	0	$m(M-1)b/2$	$m(M-1)b/2$
3 and 4	$m(N-1)b/2$	0	$m(N-1)b/2$
4 and 1	0	$m(M-1)b/2$	$m(M-1)b/2$
1 and 3	$m(N-1)b/2$	$m(M-1)b/2$	$m[(N-1)^2 + (M-1)^2]^{1/2}b/2$
2 and 4	$m(N-1)b/2$	$m(M-1)b/2$	$m[(N-1)^2 + (M-1)^2]^{1/2}b/2$

划为四个象限后, 它可视为四个象限物函数 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 的线性叠加。在输入平面 P_1 上放置顶角为 α 的两块棱边相互垂直的棱镜(图 2), 使之分别复盖第 2、3 和第 3、4 象限的数据阵

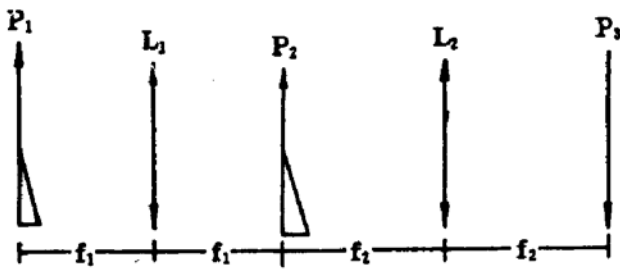


Fig. 1 The 4f system for implementing PS by using prisms, only for 1-D PS presented

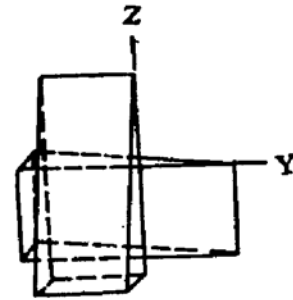


Fig. 2 Two crossed prisms

列, 则物函数表示为

$$\begin{aligned}
 f(y, z) = & f_1(y, z) * \delta(y - y_0, z - z_0) \\
 & + f_2(y, z) \exp[-ik(n-1)\alpha y] * \delta(y + y_0, z - z_0) \\
 & + f_3(y, z) \exp[-ik(n-1)\alpha(y+z)] * \delta(y + y_0, z + z_0) \\
 & + f_4(y, z) \exp[-ik(n-1)\alpha z] * \delta(y - y_0, z + z_0)
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n 为棱镜玻璃的折射率, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光在真空中的波长, $*$ 为卷积运算符, 且 $y_0 = Nb/4$, $z_0 = Mb/4$, 于是在频谱平面 P_2 得到四个象限函数的傅里叶变换, 它们是四个分立的频谱:

$$\left. \begin{aligned}
 & F_1(p, q) \exp[-i(py_0 + qz_0)], \\
 & F_2[p + k(n-1)\alpha, q] \exp[i(py_0 - qz_0)], \\
 & F_3[p + k(n-1)\alpha, q + k(n-1)\alpha] \exp[i(py_0 + qz_0)], \\
 & F_4[p, q + k(n-1)\alpha] \exp[-i(py_0 - qz_0)],
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 F_j 表示第 j 象限函数 f_j 的傅里叶变换, 即 $F_j = \mathcal{F}\{f_j\}$, p, q 为空间圆频率, 它们与 P_2 平面坐标 u, v 的关系为: $p = ku/f_1, q = kv/f_1$ 。由(2)式可知, α 的大小应保证 F_1, F_2, F_3 和 F_4 不相互重叠。

设平面 P_2 上所用两块棱镜的顶角分别为 α_y 和 α_z , 使两者正交并分别复盖 F_3, F_4 和 F_2, F_3 , (并参见图 2), 由 L_2 做第二次傅里叶变换后在 P_3 平面上得到四个交错重叠在一起的象:

$$\begin{aligned}
 f'(\zeta, \eta) = & f_1(\zeta - \zeta_0, \eta - \eta_0) + f_2(\zeta + \zeta_0 - \Delta\zeta, \eta - \eta_0) \\
 & + f_3(\zeta + \zeta_0 - \Delta\zeta, \eta + \eta_0 - \Delta\eta) + f_4(\zeta + \zeta_0, \eta + \eta_0 - \Delta\eta)
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\zeta_0 = my_0, \eta_0 = mz_0, m = f_2/f_1$ 及

$$\Delta\zeta = (n-1)\alpha_y f_2, \quad \Delta\eta = (n-1)\alpha_z f_2. \quad (4)$$

参照表 1, 只要使 $\Delta\zeta$ 、 $\Delta\eta$ 同时满足

$$\Delta\zeta = m(N-1)b/2, \quad \Delta\eta = m(M-1)b/2. \quad (5)$$

即可确定 P_2 平面上两块棱镜的顶角 α_y 和 α_z 。输出象函数则为

$$\begin{aligned} f'(\zeta, \eta) = & f_1(\zeta - mbN/4, \eta - mbM/4) + f_2(\zeta - mb(N-2)/4, \eta - mbM/4) \\ & + f_3(\zeta - mb(N-2)/4, \eta - mb(M-2)/4) \\ & + f_4(\zeta - mbN/4, \eta - mb(M-2)/4) \end{aligned} \quad (6)$$

这就是二维的输入数据阵列的 PS 排列。

2.1.2 第二种方案

在输入平面上用两块相同且正交放置的非涅耳双棱镜将输入数据平分为四个象限, 然后在频谱面 P_2 上同样放置两块正交的非涅耳双棱镜, 其顶角分别为

$$\alpha_y = \frac{m(N-1)b}{4(n-1)f_2}, \quad \alpha_z = \frac{m(M-1)b}{4(n-1)f_2} \quad (7)$$

或者在 P_2 平面的四个象限中分别放置顶角为

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\alpha_y^2 + \alpha_z^2} \quad (8)$$

的四块小棱镜, 且调整好它们的方位, 于是在 P_3 平面上得到输出函数:

$$\begin{aligned} f(\zeta, \eta) = & f_1(\zeta - c, \eta - c) + f_2(\zeta + c, \eta - c) \\ & + f_3(\zeta + c, \eta + c) + f_4(\zeta - c, \eta + c) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $c = mb/4$ 。它亦是输入函数 $f(y, z)$ 的 PS 排列。与前者不同的是, 它位于 P_3 平面的中心位置。

2.2 利用成像系统和一组棱镜实现 PS

这里采用图 3 所示的成像系统(图中亦只表示出实现一维 PS 的情况), 利用该系统实现二维物函数 PS 排列的原理是, 将具有一定角度的棱镜组放在系统适应位置处, 使其完成按象限分割物光束并同时使它在像平面上相对平移在表 1 中所列出的相应量, 即可实现物函数的 PS 排列。所以关键问题是根据棱镜组所处的具体位置及各象限光束移动量, 选择棱镜的夹角。下面分别将棱镜组件放在物面 P_1 与透镜 L 之间或 L 与 L 的焦平面 P_2 之间或 P_2 与象面 P_3 之间三种情况进行讨论。

2.2.1 棱镜组件放置在 P_1 和 L 之间

此时, 顶角为 α_y 和 α_z 的棱镜在象面上产生的相移分别为

$$\Delta\zeta = m\Delta y = m(n-1)\alpha_y x, \quad \Delta\eta = m\Delta z = m(n-1)\alpha_z x. \quad (10)$$

其中 x 为棱镜至物面 P_1 的距离。所以, 当沿行和列方向分别用一块棱镜平时, 只要棱镜的顶角为

$$\alpha_y = \frac{(M-1)b}{2(n-1)x}, \quad \alpha_z = \frac{(N-1)b}{2(n-1)x}. \quad (11)$$

时, 则可实现二维的 PS 互连。

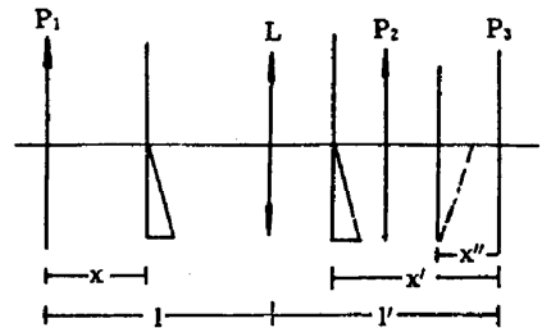


Fig. 3 Imaging system for implementing PS by using prisms, only for 1-D PS presented

2.2.2 棱镜放在 L 和 P_2 之间

此时，棱镜的顶角分别应为

$$\alpha_y = \frac{m(M-1)b}{2(n-1)x'}, \quad \alpha_z = \frac{m(N-1)b}{2(n-1)x'} \quad (12)$$

式中 x' 为棱镜至象面的距离， $m = |v'/l|$ 为透镜的横向放大率。

2.2.3 棱镜放在 P_2 和 P_3 之间

此时棱镜有如图 3 中虚线所示的方位，其顶角由(12)式决定。

以上三种情况的输出像表示式与第一种方案的(6)式相同，不再赘述。

3 实验及结果

实验分别采用图 1 和图 2 所示的装置。由 He-Ne 激光经一个 $40\times$ 的显微物镜和一个焦距 $f = 372 \text{ mm}$ 的准直物镜变为直径为 50 mm 的平行光束。

对图 1 所示的装置，采用第一个方案时，作为输入数据取 4×4 数字阵列，如图 4(a)所示，其中 $a = 1.5 \text{ mm}$ ， $b = 4 \text{ mm}$ ， $\alpha_y = \alpha_z = 2.7^\circ$ ， $f'_1 = 245 \text{ mm}$ ， $f'_2 = 372 \text{ mm}$ ， $m = f_2/f_1$ ，实验结果如图 4(b)所示。

采用第二方案时，所得结果如图 5(b)所示，其中所用输入数据为图 5(a)所示的 4×4 字母阵列，其中 $a = 1.5 \text{ mm}$ ， $b = 4 \text{ mm}$ ， $\alpha_z = 1.88^\circ$ ，其它参数同第一方案。

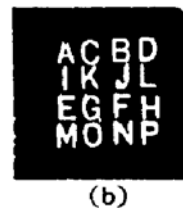
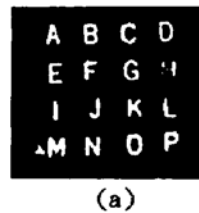
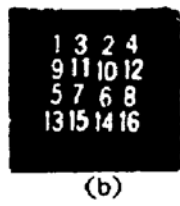
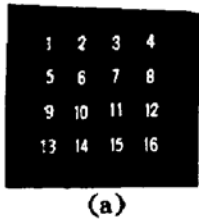


Fig. 4 Experimental result by using two sets of prisms with the first scheme. (a) Input (b) Output

Fig. 5 Experimental result by using two sets of prisms with the second scheme. (a) Input (b) Output

采用图 3 所示的装置，将棱镜放在 P_1 和 L 之间时，用的是 8×8 数字阵列作为输入数据，如图 6(a)所示。其实验结果见图 6(b)，其中 $a = 1 \text{ mm}$ ， $b = 2.15 \text{ mm}$ ， $\alpha_y = \alpha_z = 5.4^\circ$ ， $f = 190 \text{ mm}$ ， $x = 77 \text{ mm}$ ， $m = 2$ 。

棱镜放在 P_2 和 P_3 之间的情形，实验结果如图 7(b)所示，输入数据亦为 4×4 字母阵列 [图 7(a)]，其中 $a = 1.5 \text{ mm}$ ， $b = 4 \text{ mm}$ ， $\alpha_y = \alpha_z = 2.7^\circ$ ， $x' = 245 \text{ mm}$ 。

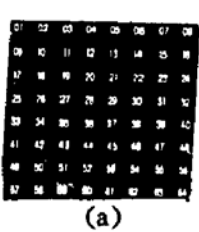


Fig. 6 Experimental result by using one set of prisms, which are between P_1 and L . (a) Input (b) Output

Fig. 7 Experimental result by using one set of prisms which are between P_2 and P_3 . (a) Input (b) Output

结 论 由以上的理论分析和实验结果可以看出,采用棱镜将二维的输入数据阵列分成四个象限,然后在光学系统中再用棱镜进行相移,从而实现交错内插操作,以及用简单的成象系统和一组棱镜实现二维的 PS 都是简单而又有效的方法。特别是能有效地利用光能,而所用的棱镜加工起来也并不困难。因而本文提出的用棱镜实现高效率的 PS 互连的新方法是具有实际意义的。

参 考 文 献

- [1] Hui Kang, Yuanling Zhan, Jiangying Zhang *et al.*, Optical implementation of the perfect shuffle interconnection networks using CGH beamsplitter. *Chinese Journal of Lasers*, 1993, **B2**(2): 159~165
- [2] Hui Kang, Jiangying Zhang, Yuanling Zhan, An improved method for implementing optical perfect shuffle network by using an imaging system and diffraction gratings. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14): 2988~2990
- [3] Hui Kang, Jiangying Zhang, Yuanling Zhan, Optical implementation of 2-D perfect shuffle interconnection network using quadrant-encoded gratings. *J. Opt.* (to be published)
- [4] A. W. Lohmann, W. Stork, G. Stuckle, Optical perfect shuffle. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10): 1530~1531
- [5] 杨振寰著,母国光,羊国光,庄松林译,光学信息处理,天津,南开大学出版社,1986,315~320

Optical Implementation of PS Interconnection Network with High Energy Efficiency Using Prisms

Kang Hui Zhang Jiangying Zhan Yuanling
(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)
(Received 22 December 1993; revised 14 March 1994)

Abstract In this paper, new methods are proposed to implement the 2-D PS (Perfect Shuffle) interconnection network by using prisms and ordinary optical systems. These method are simple and feasible, especially the light energy can be effectivelly utilized, and therefore they are of practical significance.

Key words perfect shuffle, optical interconnection, prism.