

虚焦点成像实现平行光输入的 PS 光互连*

刘 艺 何淑梅 王仕明

(电子科技大学应用物理系 成都 610054)

提要 用平行光输入 $2N \times 2N$ 元素阵列, 采用 2×2 全息透镜阵列的虚焦点成像方式, 实现了元素阵列的 PS (Perfect Shuffle, 即全混洗) 光互连; 透镜阵列直接实现 PS 光互连时, 成像放大率为 $2N$, 成像距离 l_H 与 N 成线性; 当在全息透镜阵列后另引入一成像透镜 L 时, 推导的成像距离公式和系统放大率公式表明: 互连的成像距离主要与成像透镜焦距有关, 成像放大率主要与成像透镜焦距和全息透镜焦距之比有关。相应的实验证明了各公式的正确性。

关键词 PS 光互连, 全息透镜阵列, 虚焦点成像

1 引 言

全混洗(PS)是一种基本而重要的互连置换, 它可以实现任意形式的光互连, 对它的研究具有重要的意义。有文献将二维元素阵列通过四焦点全息透镜成像, 使元素阵列获得四个像并对称叠合, 在重叠部分获得输入阵列的 PS 光互连^[1]。由于输入要成四个像, 系统的光能利用率有限, 为此, 本文将二维元素阵列用平行光入射, 通过全同的 2×2 全息透镜阵列, 利用全息透镜的虚焦点成像获得 PS 光互连。这时各输入元素只能对应形成一个自身的输出像, 可以保证系统的光能利用率。同时理论推导表明, 通过引入成像透镜, 在输入元素数目较大时, 互连的成像距离是有限的, 像放大率的调节也非常灵活, 这使得全息透镜阵列的虚焦点成像 PS 光互连系统具有良好的实用价值。

2 虚焦点直接成像实现 PS 光互连

全息透镜的虚焦点成像, 即是用平行入射光沿全息透镜的原记录参考光方向, 使得再现光中的一级衍射波呈现为直接的发散光的成像情况。

如图 1, 用两个全同全息透镜阵列 $H_i (i = 1, 2)$ 对一维输入进行变换, 其焦点 O_i 正对透镜中心; 输入用平行光沿全息透镜原记录参考光方向入射, 在 H_1 和 H_2 交界处等宽地被分割成两束。

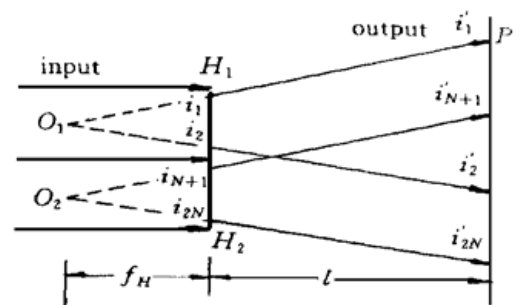


图 1 平行光入射虚焦点成像的 PS 变换

Fig. 1 The virtual focus imaging PS transformation under the parallel light input

* 电子科技大学青年基金资助项目。

收稿日期: 1998-08-10; 收到修改稿日期: 1998-09-21

设全息透镜口径为 d , 焦距为 f_H , 输入元素为 $i_1 \sim i_{2N}$, 元素均匀分布, 中心间距为 b ($b > 2a$, a 为元素字宽), 一维输入的总长度为 $2Nb$, 接收屏 P 放置在透镜阵列后的成像距离 l_H 处, 接收的元素像为 $i_1' \sim i_{2N}'$ 。令全息透镜的放大率为 β_H , 因为元素均匀分布及透镜全同, 由图中的几何关系有

$$\begin{aligned} \Delta i_1 i_2 &= b & \Delta i_1' i_2' &= \beta_H \Delta i_1 i_2 \\ d &= N \Delta i_1 i_2 = \Delta i_1 i_{N+1} & \Delta i_1' i_{N+1}' &= \Delta i_1 i_{N+1} \end{aligned}$$

由于输出的元素像需要满足 PS 光互连交错插入条件, 因此

$$\Delta i_1' i_2' = 2 \Delta i_1' i_{N+1}'$$

故

$$\beta_H = 2N \quad (1)$$

根据透镜成像公式, 可得 PS 光互连的成像距离 l_H 为

$$l_H = (\beta_H - 1)f_H = (2N - 1)f_H \quad (2)$$

由(2)式可见, 用虚焦点成像可以直接对输入元素矩阵实现 PS 光互连, 但系统放大率 β_H 和成像距离 l_H 均与 N 成线性, 随着输入元素的增多, 成像距离 l_H 将迅速增大。因此, 虚焦点直接成像实现 PS 光互连, 要求全息透镜的焦距 f_H 较小, 且输入元素数目不宜过大。

此时, 输出元素像宽 a' 和输出元素像的中心间距 b' 分别为

$$\begin{aligned} a' &= \beta_H a = 2N a \\ b' &= \beta_H b / 2 = N b \end{aligned}$$

3 添加成像透镜的虚焦点 PS 成像

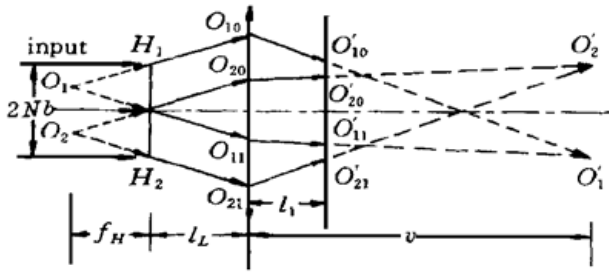


图 2 添加成像透镜的虚焦点 PS 成像的光路

Fig. 2 The virtual focus PS imaging optical system with an imaging lens

为了改进成像距离 l 与输入元素数目线性关联的情况, 在全息透镜阵列 H_i 后 l_L 处添加一个焦距为 f_L 的成像透镜 L , 构成的成像系统如图 2。 O_i' ($i = 1, 2$) 为全息透镜的焦点 O_i 的像点, O_{ij} ($j = 0, 1$) 和 O_{ij}' 表示输入阵列经过 H_i 后在 L 面和接收屏 P 面上的上下位置, v 为 O_i' 到成像透镜的距离, l_L 为接收屏 P 到成像透镜 L 的距离, 即成像距离。

设成像透镜的成像放大率为 β_L , 输入阵列经过 H_i 后在 L 面上的线度为 S , 在 P 面上的输出线

度为 S' , 系统成像放大率为 β ; 由物像关系及图中几何关系可知

$$v = \beta_L (l_L + f_H) \quad \beta_L = f_L / (l_L + f_H - f_L) \quad S = d(l_L + f_H) / f_H$$

$$S' = S \cdot \frac{v - l_L}{v} = \frac{d(l_L + f_H)}{f_H} \cdot \frac{v - l_L}{v}$$

$$\beta = \frac{S'}{d} = \frac{l_L + f_H}{f_H} \cdot \frac{v - l_L}{v} = \frac{\beta_L (l_L + f_H) - l_L}{\beta_L f_H} \quad (3)$$

图中各像点纵向坐标可分别表示为

$$\begin{cases} y_{10'} = \frac{d+S}{2} - \frac{l_l}{v} \left[\frac{d+S}{2} - \left[-\frac{1}{2}\beta_L d \right] \right] \\ y_{11'} = \frac{d-S}{2} - \frac{l_l}{v} \left[\frac{d-S}{2} - \left[-\frac{1}{2}\beta_L d \right] \right] \\ y_{20'} = \frac{-d+S}{2} + \frac{l_l}{v} \left[-\frac{-d+S}{2} + \frac{1}{2}\beta_L d \right] \\ y_{21'} = \frac{-d-S}{2} + \frac{l_l}{v} \left[-\frac{-d-S}{2} + \frac{1}{2}\beta_L d \right] \end{cases} \quad (4)$$

由图 2 可见, 满足 PS 互连要求的输出范围为 $O_{10'} \sim O_{21'}$, 叠合范围为 $O_{20'} \sim O_{11'}$ 。输出形成 PS 的叠合范围长度应为 $\beta(N - 1/2)b$, 故

$$y_{20'} - y_{11'} = \beta(N - 1/2)b$$

代入各值, 推导可得

$$l_l = \frac{f_L}{1 + f_L / [(2N - 1)f_H - l_L]} \quad (5)$$

由(5)式可得, 系统成像放大率

$$\beta = \frac{2Nf_L}{(2N - 1)f_H - l_L + f_L} \quad (6)$$

由式(5), (6)可见, 成像距离 l_l 与 N, l_L, f_H 和 f_L 都相关, 但主要是同 f_L 相关。当输入元素数目较大时, $l_l \approx f_L$, 系统成像位置比较稳定, 此时系统成像放大率 $\beta \approx f_L / f_H$ 。因此, 这种系统的实用价值较高。

和虚焦点直接成像一致, 输出元素的像宽 a' 和输出元素像的中心间距 b' 分别为

$$a' = \beta a \quad b' = \beta b / 2$$

4 实验结果及验证

实验上制作了 2×2 的全息透镜阵列, 其焦距 $f_H = 14.8 \text{ cm}$, 口径 $d = 2.0 \text{ cm}$ 。首先实现虚焦点直接成像变换: 输入为如图 3 (a) 的 4×4 的字母阵列, $N = 2$, PS 光互连输出的字母阵列照片如图 3 (b); 测量得, 字宽 $a = 2.5 \text{ mm}$, 字间距 $b = 1.0 \text{ cm}$, 成像距离 $l_H = 44.0 \text{ cm}$, 像字间距 $b' = 1.9 \text{ cm}$ 。而由公式(1), (2)可得, 输出字间距和成像距离应分别为

$$l_H = (2N - 1)f_H = 44.4 \text{ cm} \quad b' = \beta_H b / 2 = 2 \text{ cm}$$

PS 光互连的成像距离和成像放大率的理论值和实测值相符良好。

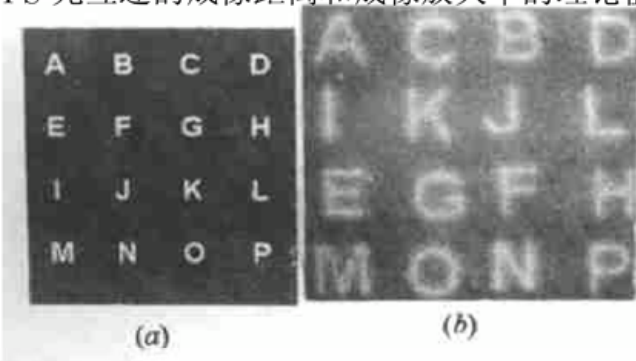


图 3 虚焦点成像实现 4×4 PS

Fig. 3 The 4×4 PS realized by virtual focus

(a) Input element group; (b) PS result by virtual focus

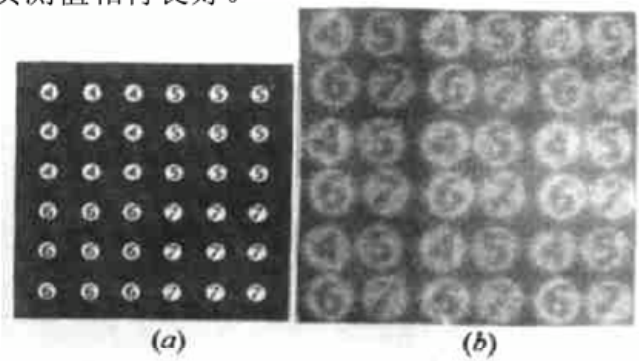


图 4 虚焦点添加成像透镜实现 6×6 PS 变换

Fig. 4 The 6×6 PS with imaging lens

(a) Input element group; (b) New PS result

采用同一个全息透镜阵列实现改进光路的虚焦点 PS 变换, 输入为如图 4 (a) 的 6×6 数字阵列, $N = 3$, PS 光互连成像结果如图 4 (b); 经测量, 输入阵列 $a = 2.5 \text{ mm}$, $b = 5.3 \text{ mm}$; 成像透镜焦距 $f_L = 30.0 \text{ cm}$, $l_L = 15.3 \text{ cm}$; 成像结果 $l_I = 19.5 \text{ cm}$, $a' = 5.0 \text{ mm}$, $b' = 5.3 \text{ mm}$ 。根据测量数据及公式(5), (6) 等可算得, 成像距离和系统放大率等参数应为

$$l_I = 19.8 \text{ cm} \quad \beta = 2.03 \quad a' = 5.1 \text{ mm} \quad b' = 5.3 \text{ mm}$$

理论计算值与测量值符合得也相当良好。图中输出元素对位不精确主要是由于实验制作的全息透镜阵列未能精确对位造成的。

参 考 文 献

- 1 Kang Hui, Luo Jiangtao, Guan Chi *et al.*. The implementation of PS and FPS interconnection networks using a four-focus holographic lens. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(5): 470~ 474 (in Chinese)

PS Optical Interconnection Realized by Virtual Focus Imaging under the Parallel Light Input

Liu Yi He Shumei Wang Shifan

(Department of Applied Physics, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract Using a 2×2 holographic lens array and a virtual focus imaging method, PS optical interconnection of the 2D elements group is realized under the parallel light input. The virtual focus imaging PS transformation of $2N \times 2N$ input element group is directly realized by the lens array. The imaging magnifying power is $2N$ and the imaging distance l_H varies linearly with N . When an imaging lens L is inserted behind the lens array, the deduced formulas of imaging distance relate mainly to the focal length and the imaging magnifying power relates mainly to the ratio between the imaging lens focal length and the holographic lens focal length. The experiments prove correctness of the formulas.

Key words PS optical interconnection, holographic lens array, virtual focus imaging