

用四焦点全息透镜实现的 PS 和 FPS 互连网络*

康 辉 雒江涛 关 驰 战元龄

翟宏琛

(南开大学物理系, 天津 300071)

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

提要 提出了一种用四焦点全息透镜实现的二维 PS (Perfect Shuffle) 和 FPS (Folded PS) 的方法, 并给出了四焦点全息透镜的设计方法及应用于二维 PS 和 FPS 互连网络中的实验结果。

关键词 PS 变换, FPS 变换, 四焦点全息透镜, 互连网络

1 引 言

当前, 研究用光学方法实现计算系统中的互连网络是现代光学中比较活跃的领域之一^[1~7]。由于光学方法具有的高度并行性、强抗干扰性以及其它优越性, 光子互连网络不仅可应用于电子计算机中, 以克服电子互连网络中存在的诸如 RC 问题, 冯·诺依曼瓶颈问题以及钟歪、时滞等问题, 而且光子互连网络也是光计算系统中不可缺少的关键部分^[1]。

PS 网络是属于自由空间光互连的一种基本互连网络^[2]。通过这种网络的多级迭代, 能够实现不同的互连功能。实现 PS 网络的光学方法有很多^[1,5], 例如棱镜透镜组、计算全息等方法。本文提出了一种使用四焦点全息透镜实现 2-D PS 和 FPS 的方法。该方法具有原理简单、制作简便、元件少等优点。但其最重要的特点是适用于高密度的信息传递。本文介绍了用四焦点全息透镜实现 2-D PS 和 FPS 的设计原理及四焦点全息透镜的制造方法, 并给出了相应的实验结果和讨论。

2 用四焦点全息透镜实现 2-D PS 和 FPS 的设计原理

2-D PS 可以看成是对二维的具有 $M \times N$ 个通道的系统依次进行行和列的 PS 变换^[2] (M 和 N 分别为行和列方向上的通道数, $M = 2^m$, $N = 2^n$, n 为正整数)。其中对行或列进行变换时, 将每行或列都视为一个一维的通道系统, 独立进行 1-D PS 变换 (见图 1)。FPS 是为了充分利用二维的空间带宽积, 提高运行速度而将一维的通道在二维空间进行的 PS 变换^[3]。由于它是对串行数据进行并行处理, 因此可以看成是一维系统和二维系统间的互连 (见图 2)。

我们的四焦点全息透镜法的基本思想就是制造一种特殊的透镜, 使其将一个二维的物分布成像为四个重叠的像, 而重叠的结果分别符合 2-D PS 和 FPS 变换的要求, 如图 3, 图 4 所示。

* 国家自然科学基金资助项目。

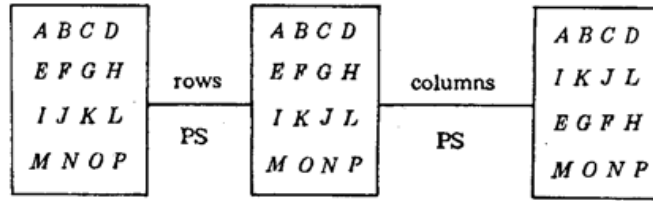


Fig. 1 Two-dimensional PS transformation

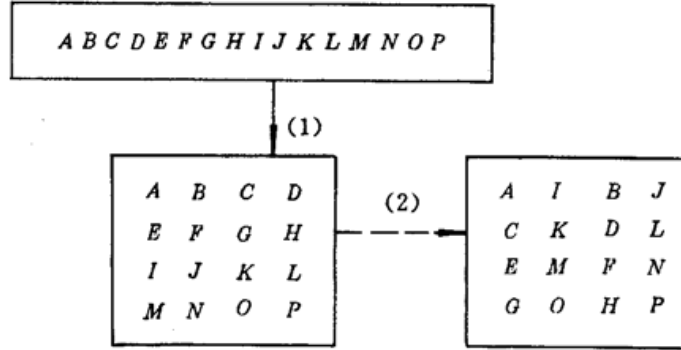


Fig. 2 Two-dimensional FPS transformation

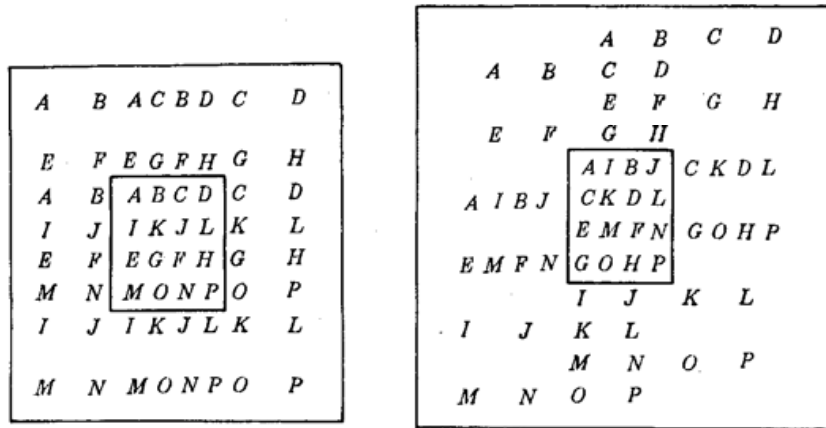


Fig. 3 Two-dimensional PS and FPS transformation performed by two different four-focus lenses

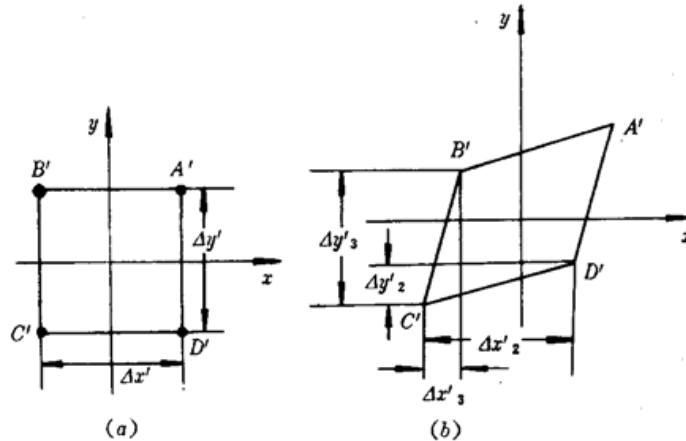


Fig. 4 The relative positions of four image points (A' , B' , C' , D') in 2-D PS (a) and FPS (b)

这种成像系统的四个焦点应保持一定的对称关系,并且焦平面垂直于光轴。由于所成的四个像的相对位置取决于放大倍率和四个焦点的相对位置,因此对于通道间距一定的物分布,在 2-D PS 和 FPS 两种不同的应用中应能通过调整而得到特定的放大倍率。下面对四焦点透镜的设计要求进行分析。

如图 5 所示,设 F 为滤波平面, Δ 为两个焦点间的距离, Δ' 为像平面 P 上对应的两个像中心

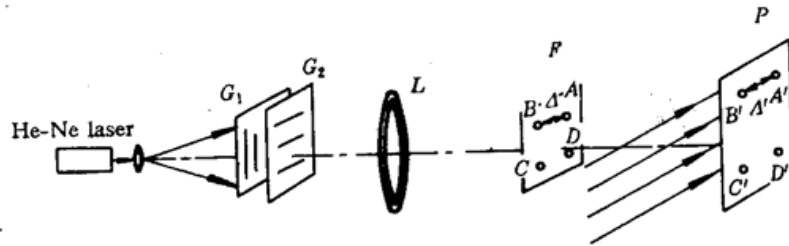


Fig. 5 Recording of the four-focus holographic lens

的距离, β 是系统的线性放大倍率的绝对值, 则可证明它们之间满足下列关系

$$\Delta' = (1 + \beta)\Delta \quad (1)$$

对于 2-D PS 和 FPS, 四幅图像中心的相对位置分别如图 4 (a) 和 (b) 所示。其中对于 2-D PS 的变换, 四个成像中心 A' , B' , C' , D' 构成矩形, 具有

$$\Delta X'_1 = (M - 1)\beta b/2 \quad (2-1)$$

$$\text{和} \quad \Delta Y'_1 = (N - 1)\beta b/2 \quad (2-2)$$

的关系。对于 FPS 变换, A' , B' , C' , D' 构成平行四边形, 具有相应的关系式

$$\Delta X'_2 = M\beta b/2 \quad (3-1)$$

$$\Delta Y'_2 = \beta b/2 \quad (3-2)$$

$$\Delta X'_3 = \beta b/2 \quad (3-3)$$

$$\Delta Y'_3 = N\beta b/2 \quad (3-4)$$

同样, 在 F 平面上四个焦点 A , B , C , D 的位置具有与图 4 相似的几何图形。并且根据 (1), (2) 和 (3) 式, 可得相应的关系式, 即对于 2-D PS, 四个焦点 A , B , C , D 构成矩形, 其中

$$\Delta X_1 = (M - 1)\beta b/2(\beta + 1) \quad (4-1)$$

$$\Delta Y_1 = (N - 1)\beta b/2(\beta + 1) \quad (4-2)$$

对于 FPS, 四个焦点 A , B , C , D 构成平行四边形, 其中

$$\Delta X_2 = M\beta b/2(\beta + 1) \quad (5-1)$$

$$\Delta Y_2 = \beta b/2(\beta + 1) \quad (5-2)$$

$$\Delta X_3 = \beta b/2(\beta + 1) \quad (5-3)$$

$$\Delta Y_3 = N\beta b/2(\beta + 1) \quad (5-4)$$

按照以上的方法进行设计, 要求物分布的通道间距 b 与通道宽度 a 之间满足

$$b \geq 2a$$

3 四焦点全息透镜的制作

我们选择通过四个点光源发出的球面波与一个平面波干涉的方法制造四焦点全息透镜, 其光路如图 5 所示。

由 He-Ne 激光源发出的细光束, 经一短物镜扩束后, 以发散球面波束照明正交放置的 1-D 光栅 G_1 和 G_2 。透镜 L 将光栅的衍射光束会聚, 在 F 平面上形成点光源方阵, 它便是 2-D 衍射光栅的空间频谱。用一四孔屏滤波后, 便得到四个相干的点光源。它们发出的四个球面波束在 P 平面处相互重叠。以此作为物波, 并同时引入另一平面波作为参考光束, 在 P 平面上形成干涉图。在此处放置全息记录干板, 即可记录得到四焦点全息透镜。

在制备好全息图后,应使用共轭参考光束来照明全息图,才能得到四个实焦点。其方法很简单,将全息图 H 上下翻转 180° 仍用原参考光再现即等效为共轭参考光照明〔见图 6(a) 所示〕。

本实验所用的物为 4×4 的字母矩阵,其字宽 $a = 1.9 \text{ mm}$,间距 $b = 5 \text{ mm}$,满足(5)式。取 $\beta = 1$,根据(3),(4)式,可计算四个孔的相对位置,其中对于 2-D PS, $\Delta X = \Delta Y = 3.75 \text{ mm}$,对于 FPS, $\Delta X_2 = \Delta Y_3 = 5 \text{ mm}$, $\Delta Y_2 = \Delta X_1 = 1.25 \text{ mm}$ 。记录全息图所使用的光栅分别具有 30 1/mm 及 50 1/mm 的空间频率,并在实验中被置于透镜前不同位置,使其谱面上的四孔滤波器处于同一平面,并与所设计的四焦点具有相同的相对位置。

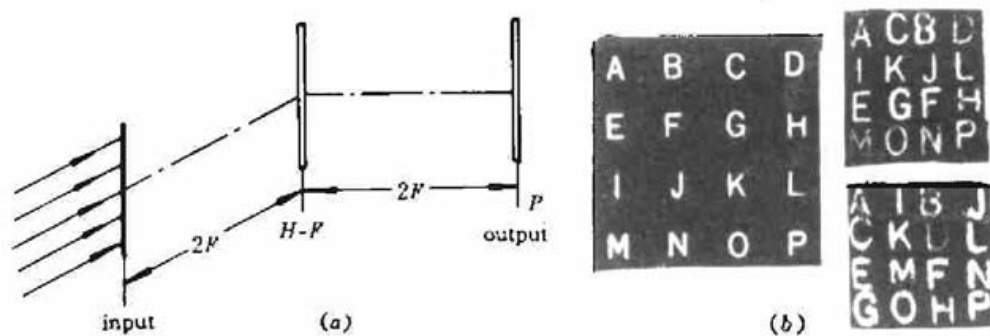


Fig. 6

(a) the experimental setup; (b) the experimental results

实验选用天津-I 型全息干版作为记录介质,用 He-Ne 激光器的 632.8 nm 波长输出光作为光源。全息图记录平面位置的确定应保证由四个孔发出的球面波在记录平面处的重叠面积即全息透镜的通光面积足够大,以便应用该全息透镜成像时与成像物的面积相匹配。四个小孔的大小应保证光栅衍射主最大光斑(即爱里斑)通过。过小会损失能量,过大会引入噪音。该全息透镜衍射效率主要受记录介质本身的限制。处理工艺和所用光栅的质量对全息透镜的效率也有一定影响。在本实验中,全息图衍射效率为 $13 \sim 15\%$ 。

4 实验结果及讨论

图 6(a) 为应用四焦点全息透镜进行 2-D PS 变换的光路图。在进行 FPS 变换时光路不变,而只将全息透镜进行相应的改变。

若用与记录全息透镜时的参考光光束来照明全息透镜,可在原记录时四孔屏的位置处得到四个虚焦点。此时必需与透镜组合使用才能实现原设计的 2-D PS 及 FPS 变换。

在图 6(b) 中示出实验结果,其中,左侧照片为物函数分布,经过 PS 和 FPS 变换后,其相应的函数分布如右侧的照片。

从实验结果来看,基本上实现了设计的要求,得到了正确的输出结果。在输出平面处部分字母的模糊,主要是由于记录 H-F 时所用的光栅透射率不均匀所致。物本身的不均匀性和设计的误差也使变换后的部分字母排列存在不齐的现象。不过,这些技术问题都可以在实际应用中得到克服和改进。

与棱镜、透镜组^[5]和计算全息^[4]等方法相比,该四焦点全息透镜方法除原理简单、制作方便、元件少等优点外,最重要的特点是适于高密度的信息传递,现仅就这一点与计算全息相比较。如图 7 所示,在不考虑像差时,网络的互连密度由系统的分辨率决定。计算全息波带片法

为每个通道绘制波带片以实现相应的偏折,通道之间不允许交叉。而四焦点全息透镜法中透镜的整个孔径为所有通道共有。若 N 为 x 或 y 方向上的通道数,则相应的通道密度 l/b 可被提高 N 倍,从而大大提高了信息传递密度。

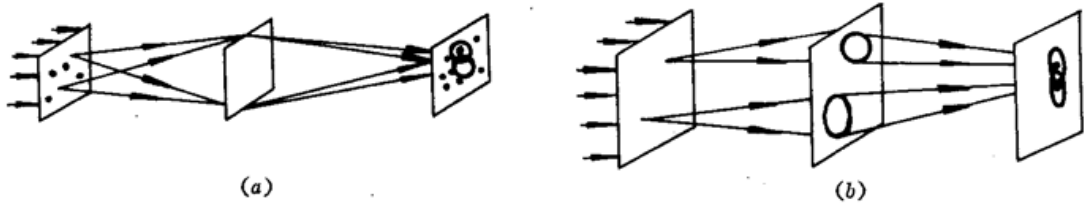


Fig. 7 Comparison between the two holographic methods

(a) four-focus holographic lens; (b) computer generated hologram of wave-zone

本方法 $b \geq 2a$ 的条件,使通道的最小几何尺寸约为系统瑞利分辨线元的两倍。另外由于只利用了四个像的重叠部分,并且全息透镜本身也存在一定损耗,所以能量利用率较低。对以上两种能量损耗,前者是方法本身所固有的,后者通过选择全息记录介质(如重铬酸明胶和光折变晶体等)可得到很大的改善。除此以外,这两种能量损失一般可以通过多级互连系统中有源器件的增益得到补偿。

参 考 文 献

- 1 A. W. Lohmann. Optical perfect shuffle. *Appl. Opt.*, 1989, 28(1): 1530
- 2 Yunlong Sheng. Light effective 2-D optical perfect shuffle using Fresnel mirrors. *Appl. Opt.*, 1989, 28(15): 3290
- 3 C. W. Stirk. Folded perfect shuffle optical processor. *Appl. Opt.*, 1989, 27(2): 202
- 4 周 进, 高文琦. 用计算全息元件实现光学 Perfect Shuffle 互连网络. *光学学报*, 1991, 11(5): 477
- 5 K. H. Brenner, A. Huang. Optical implementation of the perfect shuffle interconnection. *Appl. Opt.*, 1988, 27(1): 1
- 6 Chuanlin Wu, Tseyun Feng. The universality of the shuffle-exchange network. *IEEE Trans. Comput.*, 1981, C-30(5): 324
- 7 H. S. Stone. Parallel processing with the perfect shuffle. *IEEE Trans. Comput.*, 1971, C-20: 153

The Implementation of PS and FPS Interconnection Networks Using a Four-focus Holographic Lens

Kang Hui Luo Jiangtao Guan Chi Zhan Yuanling

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

Zhai Hongchen

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

Abstract In this paper, a method of using a four-focus holographic lens to implement PS (Perfect Shuffle) and FPS (Folded PS) interconnection networks is proposed. The design of the four-focus holographic lens and the experimental results are presented.

Key words PS transformation, FPS transformation, four-focus holographic lens, interconnection networks