

# 光学全息方法实现光学全混洗

邱晓东 路明哲 王许明 母国光

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**提要** 本文利用全息方法实现了光学全混洗(Perfect Shuffle)。

**关键词** 全混洗, 全息元件

## The realization of optical perfect shuffle with hologram

QIU Xiaodong, LU Mingzhe, WANG Xuming, MU Guoguang

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

**Abstract** An optical system with hologram for perfect shuffle is presented.

**Key words** perfect shuffle, hologram

## 1 引 言

由于光学方法具有极高的运算速度以及大规模并行传输处理信息的能力等电子计算机无法比拟的优点,对光学计算机的研究越来越引起人们的兴趣。光学互联由于具有较高的时、空域带宽和极大的并行互联能力,并且避免了传统电脑存在的串行结构的“瓶颈”问题,从而奠定了光学互联在全光学计算机研究中的重要地位。

在全光学计算机中早先提出用集成光学或光纤的方法将光学逻辑器件实现互联,这种方法很类似传统的计算机中逻辑门之间的电路互联,这种方法没有利用光在自由空间中互不干扰的特性,并由于需要大量的难以实现的材料连接,而没有多大的实用价值。1986年, Lohman<sup>[1]</sup> 等人将 PS(Perfect Shuffle)网络与光学计算机的光学互联联合起来,认为该网络可以作为实现任意形式互联的基本网络,因而引起人们极大的兴趣。现在已经提出了一些用光学来实现 PS 的方法<sup>[2~5]</sup>,主要应用的原理是通过对输入图像进行分束成像再交错组合。

本文采用光学全息的方法制成互联元件,并演示了一维和二维的光学 PS 运算。利用光栅对参考光进行调制,可以容易地得到各个方向的衍射参考光,使制作全息元件所使用的光学系统简单、可靠,全息元件可以有很高的衍射效率,并能够实现多元素的 PS 运算。

## 2 PS 网络

在多处理器结构中,处理元素间的通讯是主要问题。理想的互联网络应该是快速和灵活的。互联可以分为任意互联(Arbitrary Interconnection)和规则互联(Regular Interconnection)两种。任意互联的实现要求器件必须有极高的空间带宽积,为了使  $N$  个输入元素进行互联,要有  $N^2$  个自由度。例如神经网络模型,每个神经元都是一个输入、输出的非线性运算单元,其状态与前一层所有神经元状态有关系。规则互联对于器件的空间带宽积要求却是很低的,它是一个多级的、实现  $N$  个输入元素的单输入单输出的互联网络,从而大大增加了互联门的并行通道数目。其中 Perfect Shuffle 是一种最有效的理想互连模型,它实现了元素间的一种固定置换。这种规则互联结构看似应用范围狭窄,但是可以用这种最基本的 PS 网络构造成任意的网络来实现各种任意互联,主要适用于在计算机中进行快速傅里叶变换(FFT)、矩阵运算、排序等算法方面。

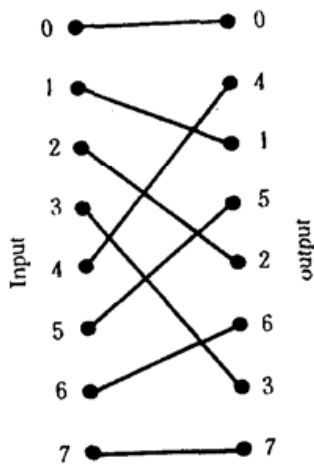


Fig. 1 The perfect shuffle net for 8 elements

所谓 PS 网络的互联是将输入的一组元素分成相等的上、下两部分,然后使它们以交错相嵌的顺序排列。如图 1 所示,为  $N = 8$  的 PS 置换。图左面为一组按地址次序  $0 \cdots (N - 1)$  排列的矢量元素组,它通过交替互联模式与右面的矢量相连。图中的黑点代表输入、输出元素。

另外,当  $N = 2^m$  时,PS 网络还可以表示为元素二进制地址的位循环左移,用数学公式表示为

$$\begin{aligned} i &= i_{m-1}2^{m-1} + i_{m-2}2^{m-2} + i_12 + i_0 \\ i' &= i_{m-2}2^{m-1} + i_{m-3}2^{m-2} + i_02 + i_{m-1} \end{aligned} \quad (1)$$

公式中,  $i$  和  $i'$  分别表示输入元素和输出元素的地址的二进制表达数值。当  $i_{m-1} = 0$  时,  $i' = 2i$ , 当  $i_{m-1} = 1$  时,  $i' = 2i - 2^m + 1$ 。

PS 网络具有一些奇特的性质。既然是一种有限数目的替换,那么重复一定次数后,元素就可以回到替换前的原先位置。例如:有  $N$  个元素,则进行  $\log_2 N$  次 PS 之后,可以使元素位置还原。另外,为了使 PS 网络更加灵活、适用,在网络中加入一种叫做“交换盒”(Exchange Box)的器件,则可以在  $(3\log_2 N - 1)$  次互联之内实现全部的随机互联置换。

另一种重要的互联方式为 Butterfly 的规则互联网络模型<sup>[2]</sup>,如图 2 所示。它可以表示为:在一个长度为  $N$  ( $n$  为偶数) 的链串上,元素二进制地址中的最低位和最高位的互换,即  $\text{bit}0 \leftarrow \rightarrow \text{bit}N - 1$ 。置换中存在三种移动方式:左移、右移、不移。

## 3 光学实现 PS 网络(OPS)

在规则互联中,网络实际上可以看作是对每一个输入进行不同位数的移位操作。对于以记录两束光相干条纹而形成的全息光栅,光栅的衍射方向由两束相干光的方向决定。当光以全息光栅的物光输入时,衍射光的方向为参考光的方向,因此,通过采用不同方向的参考光,可以实现对输入的不同位数的移位运算。我们采用的光学系统如图 3 所示。为了在光学系统中得到不同角度的参考光,在参考光路中加入一光栅对其进行调制,并在频谱面上用小孔滤波。光栅

衍射光的不同级次可以形成不同方向的参考光。在制作规则互联全息元件时,对于不同移位操作的输入区采用不同级次的衍射光作为参考光束,例如,零级作为不移位操作的参考光束,+1级作为左移一位的参考光束,-1级作为右移一位的参考光束,+2级作为左移两位的参考光束,-2级作为右移两位的参考光束,……。在各个操作区分别以相应的参考光束记录全息光栅,经过多次曝光,制成全息规则互联元件。虽然是多次曝光,由于每次曝光的区域不同,仍可以保证全息元件有较高的衍射效率。如对全息片进行漂白处理,制成位相型光栅,则衍射效率可进一步提高。

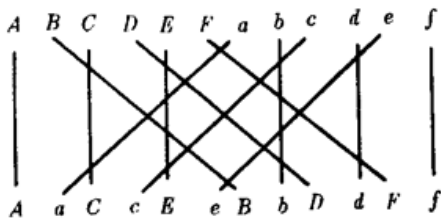


Fig. 2 Butterfly net with 12 elements

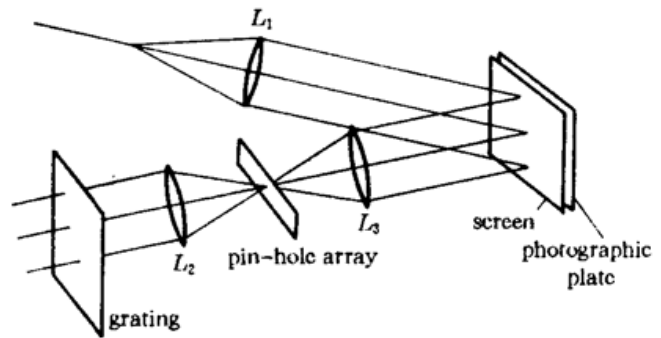


Fig. 3 Optical system for recording hologram element of PS

我们利用图 3 所示的光学系统实现了一维和二维 PS 运算。在制备互联全息元件时,首先根据互联规则对输入元素按位移操作进行分类,例如,对于图 1 所示的 8 个输入的 PS 置换网络中,0 和 7 为 0 位操作,1 为 +1 位操作,6 为 -1 位操作,2 为 +2 位操作,5 为 -2 位操作,……。并按此分类制成在相应输入元素通光的调制模板。当以 0 位操作的通光模板对物光进行调制时,用小孔滤波器在参考光束中选择调制光栅的零级衍射,在全息片上曝光;当以 +1 位操作的通光模板对物光进行调制时,用小孔滤波器在参考光束中选择调制光栅的 +1 级衍射,在全息片上曝光;当以 -1 位操作的通光模板对物光进行调制时,用小孔滤波器在参考光束中选择调制光栅的 -1 级衍射,在全息片上曝光;……。经多次曝光可得到规则互联全息元件。在规则互联全息片制备过程中采用氦氖激光器作光源,输出功率为 30 mW,参考光束与物光光束的夹角约为  $30^\circ$ ,对参考光束调制所用的光栅频率为 30 L/mm。在制作二维 PS 运算全息元件时,参考光需用二维光栅进行调制。实验结果列于图 4。由于我们这里使用的光栅是振幅型 Ronchi 光栅,光栅各衍射级次的光强相差很大,因此在记录全息图时,各次曝光的时间有所不同。如采用 Dyman 光栅,可得到各级次均匀的衍射光,制作过程能够更为简化。

用经典的透镜与棱镜的组合也可以实现光学 PS,但存在着各器件相互调节的难点,而且这些光学元件需要精密加工,受光学元件尺寸的限制,互连网络中的操作元数目不可能太多;更多的是采用对输入图像进行多幅成像,利用几幅图像的交叠部分实现 OPS,虽然这种方法可以利用已有的光学元件或全息元件,但它只能实现某几种特殊的规则互联,显然,这样的光学规则互联系统缺乏灵活性和普适性。我们这里介绍的用光学全息的方法,可以简单地实现一维及二维的 OPS,并可以通过改变每次曝光的调制模板来改变全息规则互联元件输入与输出之间的互联方式。实验表明这种方法是可行的,并且可以应用于其它的互连网络,尤其是应用于前面讲到的“交换盒”、Butterfly 网络等,由于这些网络中只包含 -1, 0, +1 三种位移操作,这样就只需三次曝光,我们的这种方法更为有效。

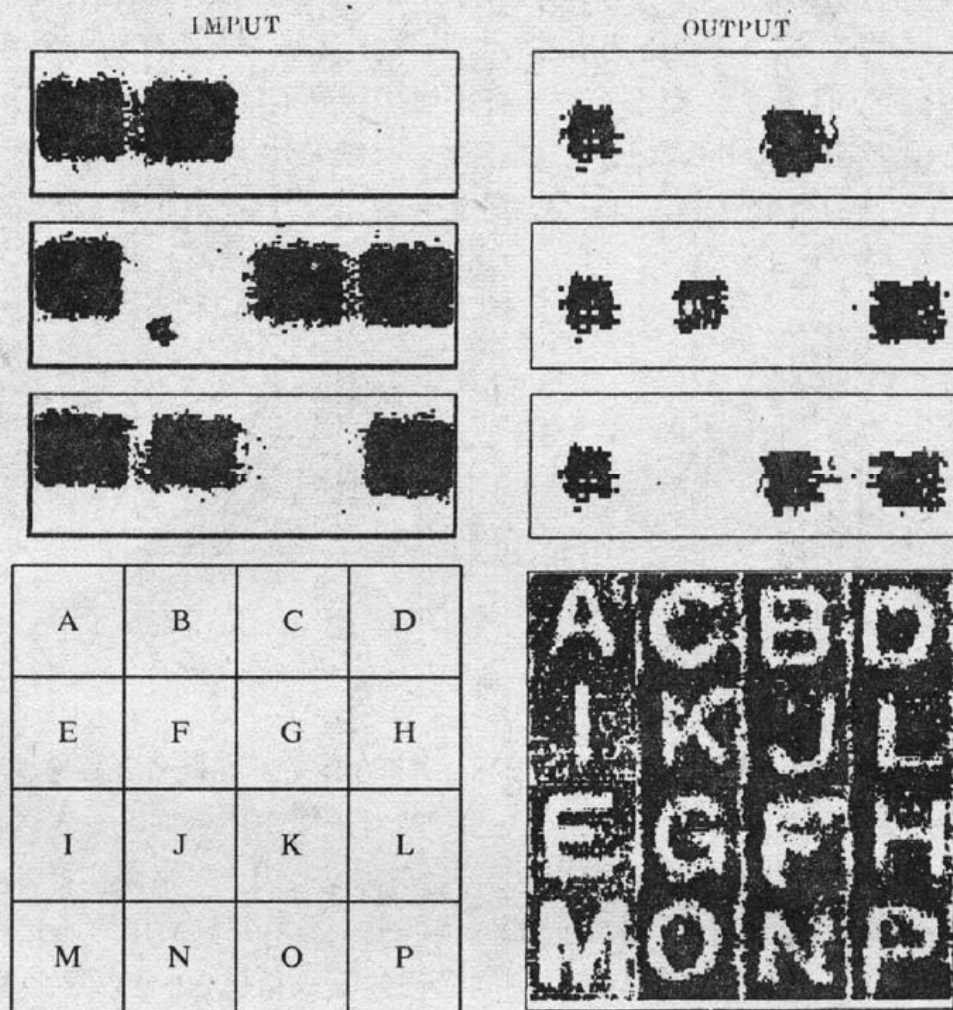


Fig. 4 Experimental results

## 参 考 文 献

- 1 A. W. Lohmman, W. Stork *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(10), 1530(1986)
- 2 K. H. Brenner, A. Huang, *Appl. Opt.*, **27**(1), 135(1988)
- 3 Q. W. Song, F. T. S. Yu, *Appl. Opt.*, **27**(7), 1222(1988)
- 4 M. Tsao, H. Li *et al.*, *Optical Computing and Processing*, **1**(1), 23(1991)
- 5 M. J. Murdocca, A. Huang *et al.*, *Appl. Opt.*, **27**(9), 1651(1988)