

一种新的纯位相型计算全息图及其应用*

黄向阳** 陈惠芬 应莹同 贾玉涓
(复旦大学物理系)

提 要

本文提出了一种新的制作纯位相型计算全息图的两孔编码方法并用实验加以证实。用本编码法制作的纯位相型计算全息图的特点是: (1) 可记录、复现任意的复函数光场; (2) 光场在全息图的光轴上再现, 空间带宽积大, 衍射效率高。

关键词: 纯位相型计算全息图, 衍射效率。

一、引 言

计算全息图 (computer-generated hologram 简称 CGH) 按编码方法不同可分为振幅型和位相型两类。通常的 Lee^[1] 全息编码法就是振幅型的。它将一个像素用四个具有确定位相差的采样孔表示, 通过控制各采样孔灰阶变化来合成该像素所要求的任意复函数。其全息像在光的一阶衍射方向上再现, 衍射效率低 (一般 $\leq 10\%$)。Kinofom 型全息则是纯位相型的^[2]。它用一个采样孔的光程变化记录物光波的位相信息, 全息像在光轴上再现, 衍射效率高, 图像清晰明亮。但它只能记录复函数的位相分布, 而无法记录其振幅变化, 所以适用范围有限。本文提出了一种新颖的纯位相型两孔编码法, 它兼具上述两类编码法之长, 不仅能同时记录复函数的振幅、位相分布, 而且全息像在光轴上再现, 衍射效率高。相对通常的振幅型编码法其空间带宽积提高 33% 以上。所需计算, 制作时间则相应减少。

二、原 理

根据复矢量理论, 任意复矢量 $A \exp(i\theta)$ 可以用两个等幅分矢量 $(1/2) \exp(i\theta_1)$ 、 $(1/2) \exp(i\theta_2)$ 唯一地合成, 它的振幅在 $0 \sim 1$ 之间变化, 位相在 $0 \sim 2\pi$ 范围内变化, 其中 θ_1 、 θ_2 与 A 、 θ 的关系为

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \theta - \arccos A, \\ \theta_2 &= \theta + \arccos A. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

如果在全息图的制备中, 将每一像素用两个一样大小的采样孔表示, 每一采样孔的位相满足公式(1), 同时根据抽样定理使像素的宽度 dx 满足

$$\frac{1}{dx} \geq f_{\max}, \quad (2)$$

式中 f_{\max} 为物光场限带函数的最大频率, 就可利用纯位相型两孔编码法记录所要求的任意复函数分布。作为一个特例, 当取 $\theta_1 = \theta_2$ 时, 本编码法就转换成 Kinofom 型编码法。

收稿日期: 1987年1月12日; 收到修改稿日期: 1987年6月5日

* 本文已在 ICHIA'86 北京国际全息应用会议上宣讲。 ** 现在上海交通大学。

三、制作方法

上述各个采样孔的位相值是利用全息干板经过不同的曝光,漂白处理后记录下来的。全息干板经曝光、漂白处理后,其振幅透射率为一,位相调制则由于干板乳胶层厚度及其折射率的变化所决定。在我们的特定漂白条件下,实验证实,由乳胶折射率变化引起的位相调制很小,可以忽略,故位相调制主要由乳胶层厚度变化所决定,其对应关系为

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) \Delta d, \tag{3}$$

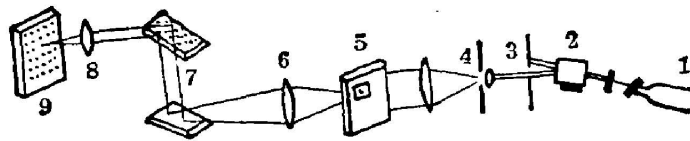


Fig. 1 Schematic diagram of the laser scanner

1—He-Ne laser; 2—acoustic-optical shutter; 3—aperture; 4—pin-hole spatial filter; 5—object aperture; 6—lenses; 7—galvanometric driven mirrors for X-Y addressing; 8—camera; 9—CGH

式中 θ 为位相值, n 为乳胶折射率; Δd 为乳胶层厚度在漂白前后的变化量。测定不同曝光量 E 下的位相值 θ , 利用计算机拟合可以得到 $\theta \sim E$ 曲线, 相应关系式为

$$E = E_0 (A_0 + A_1 \theta + A_2 \theta^2 + A_3 \theta^3 + A_4 \theta^4), \tag{4}$$

式中 E_0 为最小曝光量, $A_i (i=0,1,\dots,4)$ 为常数。实验得到: $A_0=0.0199$, $A_1=0.295$, $A_2=4.32 \times 10^{-8}$, $A_3=-6.84 \times 10^{-6}$, $A_4=-2.69 \times 10^{-9}$, 利用本编码法, 按照公式 (1) 计算各采样孔位相大小, 然后根据公式 (3) 算出相应曝光量大小, 借助激光扫描系统^[3,4] (如图 1 所示) 对全息干板按需要进行曝光、显影、漂白处理后即可制成所要求的计算全息图。图 2 为纯位相型计算全息图制作框图。严格控制实验的各个环节, 可获得重复性良好的纯位相型计算全息图。

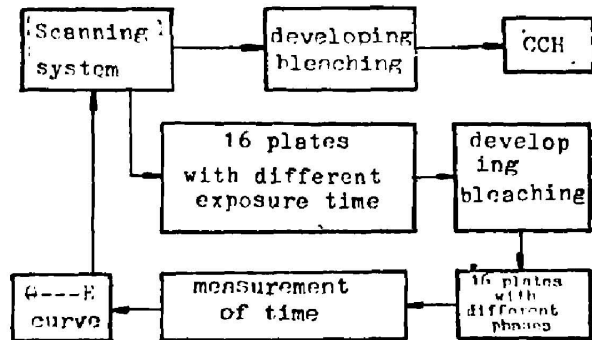


Fig. 2 Block diagram of experiment at procedures

四、实验结果

我们制作了两类计算全息图: (1) 像面全息图; (2) 空间微分滤波器。制作全息图的采样孔大小为 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$, 相应计算全息图尺寸为 $10 \times 10 \text{mm}^2$ 。下面是具体实验结果。

1. 像面全息图

(1) 记录的物光场空间分布函数 $A(x) = \cos 2\pi f_0 x$, 其中 $f_0 = 0.51/\text{mm}$, 为物光场空

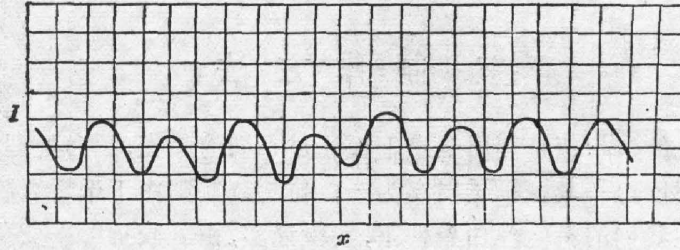


Fig. 3 Intensity distribution of imaging CGH of $\cos 2\pi fx$ at output plane

间分布变化频率, x 为物空间坐标。图 3 为在输出平面上全息再现的像光强分布。实验测得

$$(\Delta I/I) \leq 10\%; f_{\text{实验}} = (0.500 \pm 0.005) 1/\text{mm}$$

与物光场分布基本一致。

(2) 物光场是四条强度不同的平行光缝, 其强度比为

$$I_1:I_2:I_3:I_4=3:1:2:4。$$

图 4(a) 为在输出平面上全息再现像光强分布曲线。图 4(b) 为其全息再现像的照片。缝像光强比的实验值为

$$I_1:I_2:I_3:I_4=3.2:1.0:2.0:5.1。$$

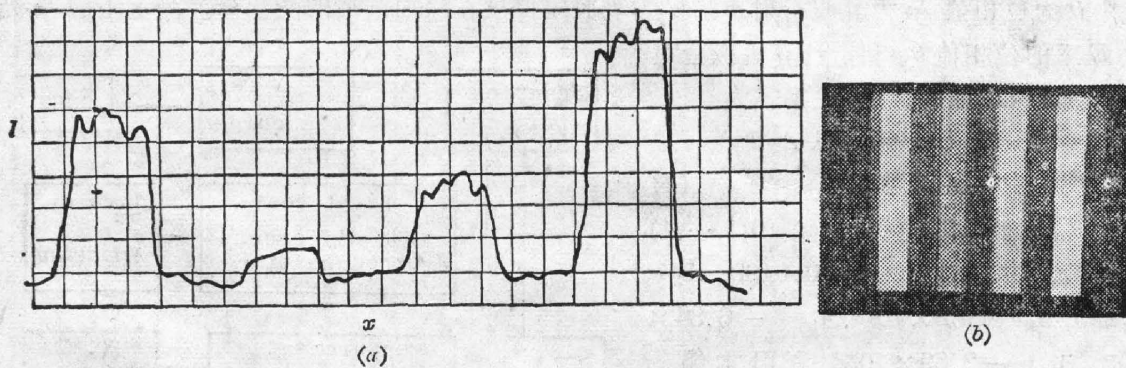


Fig. 4 Photo of reconstructed grey-scale with four levels and intensity distribution at output plane

2. 空间微分滤波器(一维)

用两孔编码法制作了一维空间微分滤波器。把它放在一般的光信息处理 $4f$ 系统的频谱面上, 即可在输出平面获得输入函数的空间微分像。图 5(a) 为矩孔物函数通过微分滤波处理后在输出平面上的光强分布曲线。对于宽度为 $L=1.9\text{mm}$ 的矩孔函数经过微分处理后, 在原矩孔两边缘线的位置上获得两个 δ 函数, 由图 5(a) 可测得其线宽 $w_0=96\mu\text{m}$, 信噪比 $(S/N)=100:3$ 。图 5(b) 为汉字“川”及字母“F”经微分滤波处理后的结果。显然, 用本编码法制作的计算全息空间微分滤波器的性能是较好的。

综上所述, 用两孔编码法制作的各类计算全息图具有再现波前失真小, 信噪比大, 衍射效率高等性能, 实验证明了两孔编码法的正确性和可行性。借助于这种新的编码法, 作者认为它可以用来制作各类空间滤波器, 以进行光学图像处理如特征识别, 消模糊图像处理等。

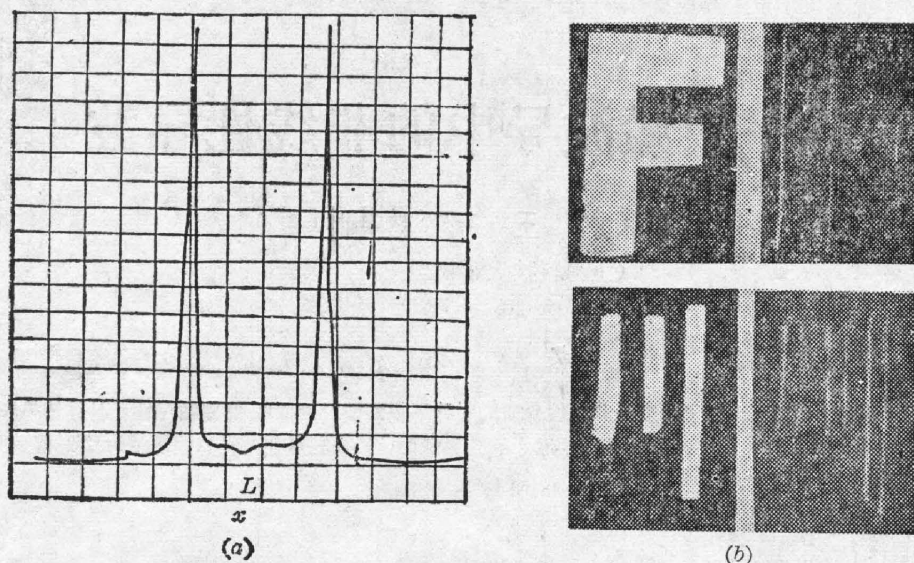


Fig. 5 Result of differentiation filtering processing

五、结 论

本文从理论上提出一种新的纯位相型两孔编码法并从实验上加以证实。本编码法用两等幅分矢量合成，纯位相调制的方式记录任意复光场函数。本编码法制成的全息图是纯位相型的，全息像在光轴上再现，衍射效率高，图像清晰明亮。相对一般振幅型编码法而言，其空间带宽积提高 33% 以上。早年的 Kinoform 型计算全息图仅是本法特例。故本法也适用于制作全息光学元件。

本文曾得到章志鸣教授的帮助和指导，在此谨表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] W. H. Lee; *App. Opt.*, 1970, 9, No. 3 (Mar), 639~643.
- [2] L. B. Lesem, P. M. Hirsch *et al.*; *IBM J. Res. Develop.*, 1969, 13, No. 1 (Mar), 150~155.
- [3] S. H. Lee, J. R. Leger; *Opt. Engng*, 1979, 18, No. 3 (Mar), 511~517.
- [4] 应萱同等;《光学学报》, 1982, 2, No. 4 (Jul), 315~320.

A new proposal for phase-only CGH and its application

HUANG XIANGYANG, CHEN WEIFENG, YING XUANTONG AND JIA YURUN

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

(Received 12 January 1987; revised 5 June 1987)

Abstract

A new coding method for a CGH with pure phase is proposed and demonstrated in which only two cells are needed for each sampling point.

The phase-only CGH produced by the proposed method can record any complex wavefront with advantages of on-axis reconstruction, high SBW and high diffraction efficiency.

Key words: phase-only CGH; diffraction efficiency.