

计算全息衍射光学代码的设计

陈祯培 饶建珍 陈怀新 戴建明

(四川联合大学光电系 成都 610064)

提要 提出了应用二元计算全息(BCGH)的方法来设计和制作一种新型的衍射光学代码(DOC), 并采用振幅补偿的方法来保证正确的可译性和实现高信噪比。还将其与 S. J. Bever 等人提出的相位整形方法制作的衍射光学条码(DOBC)的结果进行了比较, 分析结果表明这种方法制作的 DOC 具有能完全正确解译、低恢复误差、高信噪比等特点。

关键词 衍射光学代码, 二元计算全息, 振幅补偿

1 引言

条码为自动识别商品、证件、机密文件等提供了一种可验证的方法。对于厂家、商家而言, 自动识别为生产、包装、运输和库存处理提供了更好的管理手段。许多行业都要求一种满足其独特规定的条码, 一种大家熟悉的零售条码即通用产品代码(UPC) 往往不能满足其要求, 原因是普通条码有两个缺点: 太大(条码所占的面积至少有 2 cm^2) 和易于复制。为了条码的安全可靠, 条码就不能轻易被改变或替代, 但是普通的高分辨率复印机便能复制大多数的条码, 用假冒原件的复印条码作替代是相当简单的。为了解决这一问题, S. J. Bever 等人曾提出了一种衍射光学条码^[1], 该条码通过相位整形的方法制作, 它在受到一束相干平面波的照射时, 能获得一组二进制代码, 但这种代码的效果不很理想, 尤其不能保证所有的代码均能正确解译。为此我们提出了一种衍射光学代码(DOC), 它是由 $M \times N$ 个小到几微米的 $S \times R$ 大小的矩形所构成, 如图 1 所示。这种代码可制成透射式和反射式的来操作, 即代码在受到一束相干平面波照射时, 透射的(或反射的)衍射信号即代表了一种二进制编码。这种 DOC 所占的面积仅为 $2.5 \times 2.5\text{ mm}^2$, 约为普通产品代码大小的 3%, 而且每个矩形的大小均小于高分辨率复印机和数字打印机的分辨率, 因此这种 DOC 就不可能被打印或复印, 它比普通产品代码更安全更可靠。

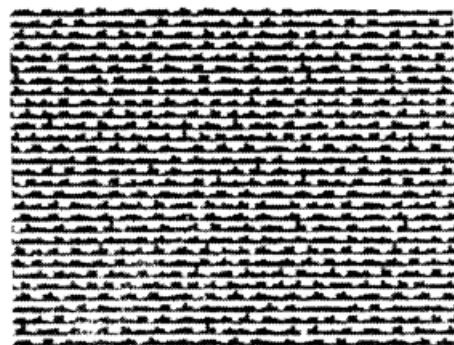


图 1 一张 DOC 的局部
Fig. 1 A part of a DOC

2 设计原理

这种 DOC 是在计算全息理论的基础上产生的。计算全息是把计算机首次引进光学处理

领域的技术^[2],它是利用数字计算机来综合的全息图,它并不需要物体的实际存在,而是把物波的数学描述输入数字计算机处理后,采取一定的编码技术(本文采用的是 BURCH 型离轴参考光计算全息图^[3]),控制绘图仪输出或阴极射线显像管(CRT)显示而制成的全息图。因此,计算全息能够综合出任何能用数学方法描述的物体,可以灵活地控制波面的振幅和位相。在 DOC 的设计中,可以把设计所需的代码输出作为物体来进行编码,同时为了加强 DOC 的保密性和制作上的经济简便,我们制作的是二元傅氏全息图。因为傅氏全息图记录的是物波函数的傅里叶谱,不仅人眼不能直接看清约几个微米宽的似乎无规律的条纹和间隔图案,即使显微镜下看清了它的细微结构也不知其真正含义,只有在特殊的装置下才能再现原代码;由于采用的是二元计算全息图,即只有黑与白两种灰阶,因而制作时对环境的要求不象光学全息图那么高,同时也增强了 DOC 抗外界噪声干扰的能力,且对记录介质的线性范围要求也可放松,这样就可利用母板多次复制而不失真。但是一般计算全息图制作的 DOC 其恢复误差大,易造成错译,我们采取振幅补偿的办法就可大大地降低恢复误差,保证完全正确解译。

2.1 DOC 计算全息的编码原理

假设代码为 8 字节的二进制代码,例如 11010110,可令物波函数为 $f(x, y) = 0$ 或 1,使其 0, 1 分别对应代码中的 0, 1。

把所需 DOC 的二进制编码作为物面信息输入计算机作离散傅里叶变换之前,要先对物面和全息面分别按抽样定理抽样,否则就易造成混叠现象。这里我们取 $2N \times N$ 个抽样单元(为了避免孪生像的重叠,物体只占有一半的抽样点)。

由于制作的是傅里叶变换全息图,因此要算出全息面上代码谱的复振幅分布 $F(u, v)$, 这样就必须进行离散傅里叶变换,其傅里叶变换谱为

$$F(m, n) = \sum_{j=1}^{2N} \sum_{k=1}^N f(j, k) \exp[-i2\pi(mj/2N + nk/N)] \quad (1)$$

计算时采用科研编程软件 MATLAB 来提高运算速度。

把此傅里叶变换谱函数用 BURCH 法加常数偏置,使谱面复振幅变为离散的实的非负数阵列。利用计算机灵活的特点,重新构成的全息函数为

$$F'(m, n) = 0.5\{1 + A(m, n) \cos[2\pi\alpha m - \phi(m, n)]\} \quad (2)$$

其中 $A(m, n)$ 为谱 $F(m, n)$ 的归一化幅值函数, $\phi(m, n)$ 则为谱的位相函数,而 α 则是所加的载频。 $F'(m, n)$ 就为包含物函数 $f(x, y)$ 的谱与共轭谱的谱函数。这样,只需对 $F'(m, n)$ 进行编码即可再现物体。

对函数 $F'(m, n)$ 采取一定的近似,可以组合出与函数 $F'(m, n)$ 等价的代表 $M \times N$ 个 $S \times R$ 大小的矩形的函数 $H(u, v)$, 而 $H(u, v)$ 就是便于计算机绘制的谱函数。绘出的全息图如图 1 所示。对于二进制代码的编码在每个抽样单元中,矩形孔的宽度取为定值 W , 而高度 I_{mn} 用来调制待记录的非负函数 $F'(u, v)$, 那么象图 1 所示的整个全息图面的透过率函数可写成

$$H(u, v) = \sum_m \sum_n \text{rect} \left[\frac{u - m\delta u}{W\delta u} \right] \text{rect} \left[\frac{v - n\delta v}{I_{mn}\delta v} \right] \quad (3)$$

其中
$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq 1/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

把此二元傅里叶变换全息图放入图 2 所示的再现装置中便可在像面看到物体的再现像。

2.2 振幅补偿编码原理

我们用细光束照射计算全息编码的衍射光学代码的全息图时发现,再现像的亮度从中心

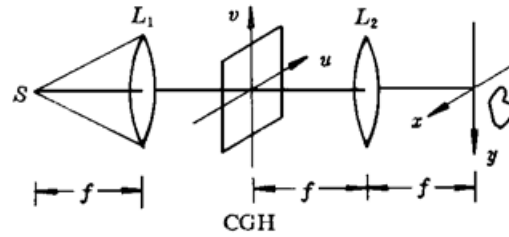


图 2 再现装置图

Fig. 2 Optical setup used to generate a code to be stored in a hologram

到边缘衰减得比较厉害,并不象设计时所要求的等振幅处光强相等或近似,这就给探测器正确解译带来了误差。通过分析发现,这主要是由于在进行编码时采取了一些近似条件所造成的。等式(3)所代表的全息图其再现像即函数 $H(u, v)$ 的逆傅里叶变换 $h(x, y)$ 为

$$\begin{aligned} h(x, y) &= \iint H(u, v) \exp[i2\pi(xu + yv)] dudv \\ &= \sum_m \sum_n W l_{mn} \delta u \delta v \operatorname{sinc}(Wx \delta u) \operatorname{sinc}(l_{mn}y \delta v) \exp(i2\pi m x \delta u) \exp(i2\pi n y \delta v) \end{aligned} \quad (4)$$

利用内插公式, $F'(m, n)$ 的像面可表示为

$$\begin{aligned} f'(x, y) &= \delta u \delta v \operatorname{rect}[(x - \alpha)/\Delta X] \operatorname{rect}(y/\Delta Y) \\ &\quad \sum_m \sum_n F'(m \delta u, n \delta v) \exp[i2\pi(m x \delta u + n y \delta v)] \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\Delta X, \Delta Y$ 为物波函数 $f(x, y)$ 在空域的大小,为了使 $h(x, y)$ 与 $f'(x, y)$ 的展开式至少在 $|x - \alpha| \leq \Delta X/2, |y| \leq \Delta Y/2$ 范围内相等,在等式(4)中采取了两项近似:

$$\operatorname{sinc}(Wx \delta u) \approx \operatorname{const.} \quad |x - \alpha| \leq \Delta X/2 \quad (6)$$

$$\operatorname{sinc}(l_{mn}y \delta v) \approx 1, \quad |y| \leq \Delta Y/2 \quad (7)$$

这样忽略了 sinc 函数的变化后,我们得出的衍射像强度 $|h(x, y)|^2$ 会偏离实际希望的像光强 $|f(x, y)|^2$, 偏离量为 $\operatorname{sinc}^2(Wx \delta u)$ 和 $\operatorname{sinc}^2(l_{mn}y \delta v)$, 在制作全息图时用振幅补偿的办法来弥补,只要在原物函数中乘以一个补偿因子,就可以在很大程度上消除这种近似所带来的误差。由于代码为一列或一行,所以只需补偿 X 方向和 Y 方向。在实际制作时,由于 Y 方向的衰减弱一些,我们利用的是 Y 方向,由于 Y 方向的偏离是谱域量 l_{mn} 和空域量 y 共同作用的结果,因此它是一个经验量,在用 Gauss 函数、 \cos 函数和 sinc 函数分别进行补偿时,经过比较分析,发现 Gauss 函数的补偿效果最好,因此我们就在原物函数上乘以 Gauss 函数的倒数,使其一级衍射像面像的恢复误差最低。

另外计算全息在制作时,人们早就意识到可以通过迭代的方法来提高二元傅氏计算全息图的再现质量^[4], 本文利用 F. Wyrowski 等人提出的迭代傅里叶方法^[5]来配置物函数的位相,使再现像的质量有很大的提高,而且也提高了衍射效率。

3 实验结果分析

由于这种衍射光学代码是通过探测器来读出,因此我们用峰值探测输出来取准:

$$D_{\max} = \max\{|h(m, n)|^2\} \quad m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

然后用阈值 0.5 来进行比较:

$$A_{mn} = \begin{cases} 1 & |h_{mn}|^2/D_{\max} \geq 0.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

这样, A_{mn} 的值就是衍射光学代码的真正含义。

为了评价这种衍射光学代码, 我们选择了一组随机 8 字节的二进制代码来作为输入物体, 分别对其进行了计算机模拟和光学实验, 研究振幅补偿计算全息成像质量, 包括信噪比和衍射效率等项指标, 并与计算全息编码和 S. J. Bever 等人提出的相位整形方法制作的衍射光学条码(DOBC)的结果进行了比较。

3.1 模拟实验结果

在进行模拟实验时, 利用的是公式(4), 因为无法采用快速傅里叶变换, 加之计算机的内存所限, 我们选取了 32×64 抽样点进行分析, 如图 3, 分别为三种方法对同一种代码的计算机模拟三维显示结果。

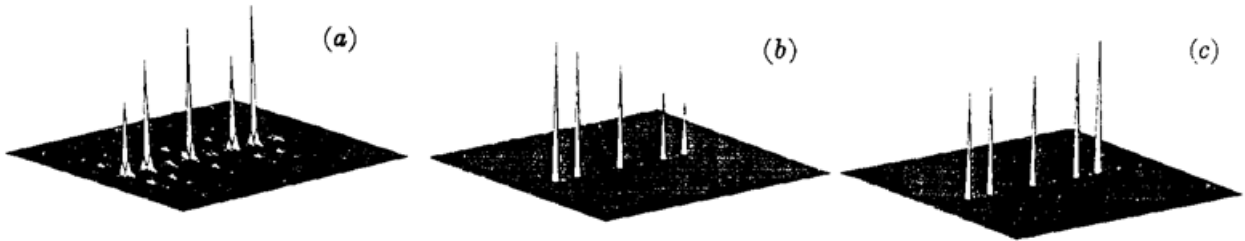


图 3 模拟再现图

(a) 相位整形法; (b) 一般二元计算全息; (c) 振幅补偿二元计算全息

Fig. 3 Digital reconstruction of (a) phase-shaping method; (b) conventional BCGH; (c) amplitude-compensated BCGH

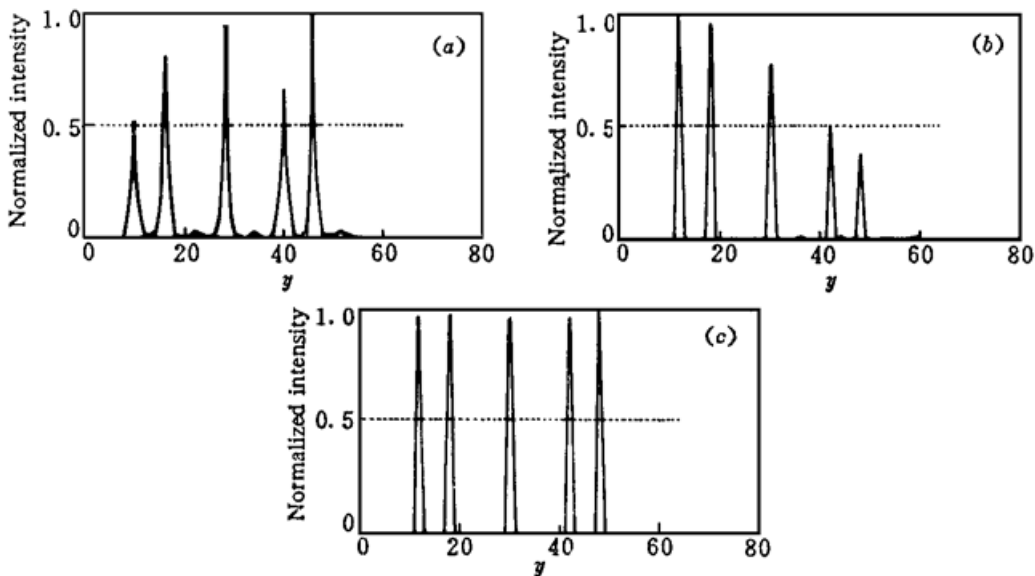


图 4 模拟再现输出信号强度比较

(a) 相位整形法; (b) 一般二元计算全息; (c) 振幅补偿二元计算全息

Fig. 4 Intensity of digital reconstruction of (a) phase-shaping method; (b) conventional BCGH; (c) amplitude-compensated BCGH

可以看出, 相位整形的结果较计算全息编码的结果好, 但前者易造成误译, 而后者由于恢

复误差大根本无法判读, 振幅补偿计算全息图的结果优于相位整形的结果, 像的恢复质量好从而保证了正确解译。模拟再现质量的提高是明显的。

图 4 则是代码的输出信号强度比较, 明显振幅补偿计算全息图的信噪比最好。

3.2 光学实验结果

进行光学实验时, 我们选取了 128×256 的样点进行分析, 编码后全息图用 HP-4P 激光打印机绘制在 A4 复印纸上, 最后用 GS-33 光学微缩机将全息图微缩 90 倍制成 $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ 的振幅型二元计算全息图。记录介质采用 Kodak 高分辨率干板(1A 型), 显影用 D8 高反差显影液。

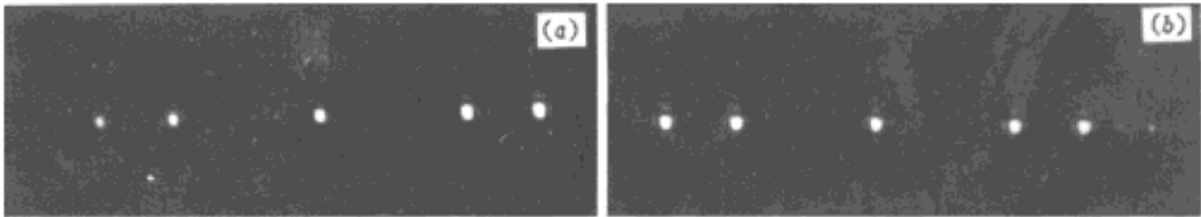


图 5 光学再现图

(a) 一般二元计算全息; (b) 振幅补偿二元计算全息

Fig. 5 Optical reconstruction of (a) conventional BCGH; (b) amplitude-compensated BCGH

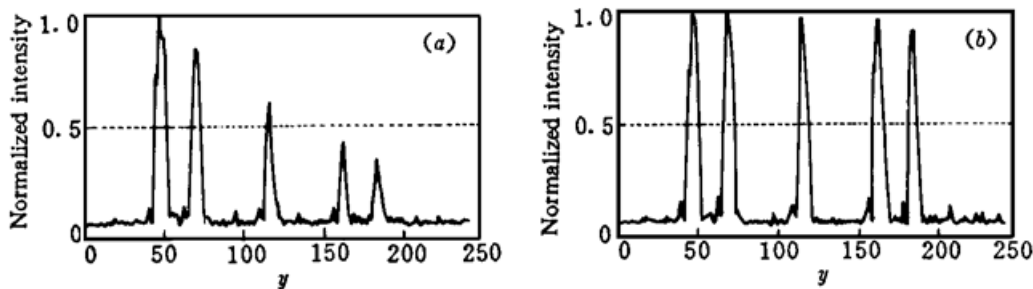


图 6 光学再现输出信号强度比较

(a) 一般二元计算全息; (b) 振幅补偿二元计算全息

Fig. 6 Intensity of optical reconstruction of (a) conventional BCGH; (b) amplitude-compensated BCGH

将全息图置于图 2 所示的装置上进行再现。采用 $\text{CA}_{05\text{A}}\text{He-Ne}$ 激光器作激光光源(波长为 $0.6328 \mu\text{m}$), 经准直透镜 L_1 变为平行光, 垂直照射计算全息图, 由于记录的是物光波的傅里叶谱, 为了得到物体的再现像, 必须对全息图的透射光场作一次逆傅里叶变换, 为此在全息图后方放置透镜 L_2 使全息图位于透镜前焦面上, 在透镜的后焦面上将得到物体的再现像。图 5 为补偿前与补偿后对同一种代码的再现结果。图 6 则为用 HDBW-9201C 面阵 CCD 探测的输出信号强度比较, 振幅补偿计算全息图的改善效果是显而易见的, 而且信噪比 $SNR = 17.05$ 。最后, 采用 DPM-HN100 数显式功率计, 实测光学再现的一级衍射效率(测量中用一级衍射光的强度与入射光强度之比), 它们分别为 4.3% 和 5.7%。

从实验结果可以看出, 这种 DOC 不仅具有前面所提到的面积小、不易复制的特点, 而且条码的重要指标 PCS 值(对比度)也相当高, 这可以从 SNR 上反映出来; DOC 的制作采用数字定量计算, 可保证尺寸精度, 因而不存在尺寸误差; 由于是以点的有无表示二进制的 0 或 1 值, 所以易识别, 对识别系统的精度要求不高; 代码可采用固定长以提高代码识读的可靠性; 另

外,亦可采用二维阵列代码以提高 DOC 的信息密度。

参 考 文 献

- 1 S. J. Bever, J. P. Allebach. Synthesis of diffractive optical bar codes. *Appl. Opt.*, 1992, **31** : 1074
- 2 G. Tricoles. Computer generated holography: an historical review. *Appl. Opt.*, 1987, **26** : 4356
- 3 J. J. Burch. A computer algorithm for sythnesis of spatial frequency filters. *Proc. IEEE.*, 1967, **55** : 599
- 4 B. K. Jennison, J. P. Allebach, Q. W. Sweeney. Iterative approaches to CGH. *Opt.*, 1989, **28** : 629
- 5 F. Wyrowski, O. Bryngdahl. Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, **A5** : 1058

Design of DOC by BCGH

Chen Zhenpei Rao Jianzhen Chen Huaixin Dai Jianming

(*Dept. of Opto-Electr., Sichuan Union Univ., Chengdu 610064*)

Abstract A new type of diffractive optical code (DOC) using binary computer-generated hologram (BCGH) is presented. We introduce a new method of amplitude-compensated CGH to guarantee the DOC correctly decoded and to obtain higher signal-noise ratio. Compared with the phase-shaping method for diffractive optical bar code (DOBC), this DOC can yield substantially lower reconstruction error and higher efficiency. Computer simulation and optical experiment are reported.

Key words DOC, BCGH, amplitude-compensated