

多物波计算全息编码与数字再现方法

陈家祯 郑子华 连桂仁

(福建师范大学数学与计算机学院, 福建 福州 350007)

摘要 探讨了离散物波计算全息与数字再现的编解码方法,分析了数字频谱面上零级像、原始像和共轭像的频谱位置特性,提出各像频谱分离的全息变换编解码方案,并实现了在同一幅全息图中记录多组物波数据。仿真实验结果表明,所提出的通过对原始物波数据预处理及编码参数控制来实现数字频谱面上零级像与原始像和共轭像频谱有效分离的方法简单易行,利用该方法所重建的原始像具有良好的再现质量。载频系数作为编码参数之一可以有效控制频谱面上各像频谱的移位位置,不恰当的编码参数将导致无法提取有效频谱,因此还可作为全息变换的加密参数来使用。

关键词 计算全息;傅里叶变换;频谱分离;数字再现

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s209009

Method on Computer-Generated Hologram Coding and Digital Reconstruction of Multi-Object Waves

Chen Jiazhen Zheng Zihua Lian Guiren

(School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract The methods on computer-generated hologram coding and digital reconstruction for discrete object wave are discussed and the frequency spectrum positions of zero-order image, original image and conjugate image are analyzed. The proposed coding and decoding scheme can separate the spectrum of each image and record multi-object wave data in the same computer-generated hologram. The simulation results show that the method by preprocessing the original object wave data and controlling parameters to separate effectively the frequency spectrum is simple and easy and the quality of the reconstructed image is good. As one of the coding parameters, carrier coefficient can effectively control the shift position of each spectrum component. Improper parameter setting can lead to be not able to extract effective spectrum. So it can also be used as an encryption parameter.

Key words computer-generated hologram; Fourier transform; separation of frequency spectrum; digital reconstruction

OCIS codes 070.2025; 200.3050; 090.1760

1 引言

激光的出现使全息术进入新的发展阶段,其应用领域涉及三维物体识别显示、微粒场测定、光学信息安全等,并且随着计算机技术、数字信号处理技术及新型记录和显示手段的应用,全息术也从传统的光学全息发展出计算全息、数字全息等学科分支,并不断扩展到新的应用领域。全息技术的核心在于如何记录和再现物波的全部信息。光学全息利用光学

手段记录和再现结果;计算全息利用计算机使用数字方法记录全息图,使用光学手段再现原始物波;数字全息相对于光学全息的概念而提出,利用电荷耦合器件(CCD)等光电探测器件作为记录介质,用数值方法再现全息图;广义的数字全息还包括计算机制全息记录数字再现等,在多媒体信息安全领域这种数字记录数字再现的方法常用于全息水印信号的设计,结合水印嵌入与提取方案可提供对数字作品

收稿日期: 2012-05-18; **收到修改稿日期**: 2012-07-07

基金项目: 福建省教育厅 B 类项目(JB11020)资助课题。

作者简介: 陈家祯(1971—),女,硕士,副教授,主要从事信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: jiazhen_chen@fjnu.edu.cn

版权的良好保护^[1~3]。但对离散物波进行计算机制全息编码过程中,由于离散傅里叶变换(DFT)的周期性和离散性,直接运用DFT计算得到的将是全息图一个周期内的离散频谱,各像频谱可能表现为混叠状态,因此需要改进全息编码方案以实现精确数字再现。针对计算机制全息编码中可能出现的数字域频谱混叠问题^[4],本文以一般光学离轴全息图为例,在对全息编码函数数字频谱特性分析的基础上提出对原始物波数据先作预处理再作全息编码的方法,这样可以做到在同一幅全息图中记录多组不同的物波数据,并且根据编码参数与数字频谱面有效频谱分量之间的特定关系可以确定出频谱面上所需像分量频谱的确切位置,从而实现原始物波信息的快速清晰重建,实现多物波记录和再现的全数字化处理。

2 计算全息编码原理与频谱特性

2.1 计算全息编码原理

计算全息将离散空间复值函数转换为实的非负值函数,以计算全息图^[5,6]的方式记录存储,不同的编码方法将得到不同类型的计算全息图。光学离轴全息图通过记录物光与参考光干涉后的光强分布,实现离散空间复值信号到携带有原始物波信息的计算全息干涉图之间的转换,其离散形式编码函数可表示为

$$h(m\Delta x, n\Delta y) = | f(m, n) + R(m\Delta x, n\Delta y) |^2 = | f(m, n) |^2 + | R(m\Delta x, n\Delta y) |^2 + f(m, n) \times R^*(m\Delta x, n\Delta y) + f^*(m, n)R(m\Delta x, n\Delta y), \quad (1)$$

式中 $f(m, n)$ 、 $R(m\Delta x, n\Delta y)$ 分别代表以数字图像方式表示的原始物波和离散化的参考光波, Δx 、 Δy 为物平面抽样间隔, $\Delta x = \frac{\Delta X}{M}$ 、 $\Delta y = \frac{\Delta Y}{N}$, ΔX 、 ΔY 分别为原始物波函数 x 、 y 方向的空间大小, M 、 N 为 x 、 y 方向抽样点数。将 $h(m\Delta x, n\Delta y)$ 均匀量化为 256 级灰度图,即可得到数字化的计算全息图。

2.2 计算全息图的数字域频谱特性

(1)式所表示的编码过程,从空间角度来讲,

$h(m\Delta x, n\Delta y)$ 可以看作是原始物波对参考光波调制的结果,从空间频率域的角度来讲,全息图的频谱中包括了物函数频谱的线性搬移。全息图的数字频谱可以通过快速傅里叶变换(FFT)计算,对(1)式做 $M \times N$ 点 FFT,得全息图的数字频谱结构为

$$H(k_1, k_2) = O(k_1, k_2)_{M \times N} + F(k_1 + l, k_2 + k)_{M \times N} + F^*[-(k_1 - l), -(k_2 - k)]_{M \times N}, \quad (2)$$

式中等号右边第一项表示零级像频谱,第二项表示中心点位于数字频谱面 (l, k) 像素点位置处的原始像频谱,第三项表示中心点位于数字频谱面 $(-l, -k)$ 像素点位置处的共轭像频谱。根据 DFT 性质,此时数字频谱面上原始像和共轭像的频谱属于循环移位,计算得到的 $M \times N$ 点数字频谱是一个周期内三像频谱共同作用的结果。

3 各像频谱分离的双物波计算全息编解码方法

3.1 计算全息编码改进方法

为了能够在数字频谱面将零级像、原始像和共轭像的频谱分开,提出一种改进的计算全息编码方法,该方法的基本思想是在全息编码之前先对编码的原始信号进行空间域插值^[7,8]和频谱域滤波,使预处理后的信号频谱除包含用于恢复原始物波信号所需的有效频谱分量外还存在大量的零值分量。充分利用这些零值分量有可能实现各像频谱分量的分离,从而可以在数字频谱面的特定位置提取出所需频谱分量,实现原始信号的快速清晰重建。此外充分利用频谱域中零值分量还可以在同一幅全息图中记录多组不同的物波数据,扩展了全息图的记录容量。以双物波记录为例,设原始物波函数 1 的空间大小为 $\Delta X \times \Delta Y$,离散化为 $M \times N$ 点的数字图像 $f(m, n)$,参考光波为 $R \exp(j2\pi\alpha x)$, α 为载频系数。实现频谱面双物波各像频谱分离的计算全息编解码算法为:

1) 对 $f(m, n)$ 进行补零插值得 $f_1(m, n)$, 即

$$f_1(m, n) = \begin{cases} f(m/4, n/4) & m = 0, 4, \dots, 4(M-1), n = 0, 4, \dots, 4(N-1) \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

2) 对插值后的离散物波数据 $f_1(m, n)$ 做 FFT 求离散频谱 $F_1(k_1, k_2)$, $F_1(k_1, k_2)$ 是 $f(m, n)$ 离散频谱 $F(k'_1, k'_2)$ 的周期性扩展。

3) 截取一个周期的频谱,其余为零值,即 $F'_1(k_1, k_2) = \begin{bmatrix} F(k'_1, k'_2) & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$ 。

4) 对 $F'_1(k_1, k_2)$ 做离散傅里叶反变换得预处理后信号 $f_2(m, n)$, 即

$$f_2(m, n) = \text{ifft2}[F'_1(k_1, k_2)], \quad (4)$$

式中 $0 \leq m \leq 4M-1, 0 \leq n \leq 4N-1$ 。

5) 对 $f_2(m, n)$ 加入参考光编码产生计算全息干涉图,

$$h_2(m\Delta x, n\Delta y) = |f_2(m, n) + R(m\Delta x)|^2 = |f_2(m, n)|^2 + |R|^2 + f_2(m, n)R^*(m\Delta x) + f_2^*(m, n)R(m\Delta x). \quad (5)$$

6) 用相同的方法再对另一物波函数 2 进行计算全息编码, 设物波 2 的物平面大小为 $\Delta X \times \Delta Y$, 经预处理后的信号表示为 $f_3(m, n)$, 其中 $0 \leq m \leq M-1, 0 \leq n \leq N-1$, 参考光波为 $R \exp(j2\pi\beta y)$, β 为载频系数。物波函数 2 的计算全息干涉图可表示为

$$h_3(m\Delta x, n\Delta y) = |f_3(m, n) + R(n\Delta y)|^2 = |f_3(m, n)|^2 + |R|^2 + f_3(m, n)R^*(n\Delta y) + f_3^*(m, n)R(n\Delta y). \quad (6)$$

7) 将两组不同物波的编码结果归一化并适当缩放后做线性叠加, 即 $H = ah_2 + bh_3$, a, b 为常数。

8) 将编码结果 H 写成数字图像文件, 即实现了原始物波到记录有双物波的计算全息图之间的转换。

3.2 计算全息图数字再现

为了再现原始物波数据, 可以模拟光学再现方法, 将全息图面乘以参考光波后做逆傅里叶变换进行再现, 也可直接对全息图做 DFT 后通过提取有效频谱分量的方法再现。采用直接对计算全息图 H 做 DFT 的方法进行数字再现, 得数字频谱面上物波 1 的各像频谱之间的关系为

$$H_2(k_1, k_2) = O_2(k_1, k_2)_{4M \times 4N} + F_2(k_1 + l_1, k_2)_{4M \times 4N} + F_2^*[-(k_1 - l_1), -k_2]_{4M \times 4N}. \quad (7)$$

式中零级像频谱 $O_2(k_1, k_2)_{4M \times 4N}$ 的有效频谱为 $2M \times 2N$, $F_2(k_1 + l_1, k_2)_{4M \times 4N}$ 表示循环移位 l_1 位置后的原始像频谱, 有效频谱大小为 $M \times N$; $F_2^*[-(k_1 - l_1), -k_2]_{4M \times 4N}$ 为循环移位 $-l_1$ 位置后的共轭像频谱, 有效频谱大小也为 $M \times N$ 。 k_1, k_2 为离散频谱点序号, $0 \leq k_1 \leq 4M-1, 0 \leq k_2 \leq 4N-1$ 。分析编码函数(5)式与离散频谱(7)式之间的关系可推导出移位值 l_1 与编码参数之间存在关系: $l_1 = \text{mod}(\alpha\Delta X, 4M)$, $\text{mod}(\cdot)$ 表示取余运算, 该移位值描述了数字频谱面各像频谱之间的相对位置关系, 其也是决定数字频谱面各像频谱是否混叠的关键因素。同理, 离散频谱面上物波函数 2 的各像频谱之间的关系为

$$H_3(k_1, k_2) = O_3(k_1, k_2)_{4M \times 4N} + F_3(k_1, k_2 + l_2)_{4M \times 4N} + F_3^*[-k_1, -(k_2 - l_2)]_{4M \times 4N}, \quad (8)$$

式中 $l_2 = \text{mod}(\beta\Delta Y, 4N)$, 其原始像和共轭像有效频谱大小也为 $M \times N$ 。由于物波 1 和物波 2 的有效频谱分量在数字频谱面的移位分别表现为垂直和水平移位, 合理设计编码参数 α, β , 可使两组物波数据的频谱在数字频谱面处于分离的状态, 从而可以精确提取出有效频谱分量, 实现原始物波的清晰再现。

3.3 物波频谱在数字频谱面上的分布情况

将计算全息图 H 的频谱面按 $M \times N$ 大小进行分块, 设各像频谱移至频谱面中心位置, 用图 1 来直观表示数字频谱面上各像频谱分量之间的相对关系。设移位值 $l_1 = 0$, 则物波 1 的零级像频谱将位于编号为 6, 7, 10, 11 的区域; 原始像位于编号为 11 的频谱块区域; 共轭像位于编号为 6 的频谱块区域。若控制编码参数使移位值 $l_1 = 2M$, 则物波 1 零级像频谱位置不变; 原始像频谱将移至编号为 3 的频谱块区域; 同时共轭像频谱将移至编号为 14 的频谱块区域。此时物波 1 的三像频谱在数字频谱域平面处于分离的状态。

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

图 1 数字频谱面各像频谱位置

Fig. 1 Spectrum position of each image in digital spectrum plan

同理, 对于物波 2, 若移位值 $l_2 = 0$, 则零级像频谱将位于频谱面编号为 6, 7, 10, 11 的区域; 原始像位于编号为 11 的频谱块区域; 共轭像位于编号为 6 的频谱块区域。若控制编码参数使移位值 $l_2 = 2N$, 则物波 2 零级像频谱位置不变; 原始像频谱将移至编号为 9 的频谱块区域; 同时共轭像频谱将移至编号为 8 的频谱块区域。此时, 物波 2 的三像频谱在数字频谱域平面也处于分离的状态。因此只要在编号 3 和编号 9 频谱块区域位置即可提取出物波 1 和物波 2 的数字频谱, 从而清晰再现原始像。利用频谱面上的零值区域, 最多可以实现四组不同的物波数据在同一幅全息图中的同时记录。

4 实验仿真结果与讨论

图 2(a)、(b)分别代表两组离散化的 64×64 点 256 色原始物波数据。由图 2(a)、(b)直接编码叠加得到的计算全息图、数字频谱图及再现像结果分别如图 3(a)~(c)所示。此时数字频谱图上两组物波数据的频谱处于混叠状态,因此无法直接通过逆变换再现原始物波信息。采用改进的编码方法,并设置编码参数使物波 1 和物波 2 的原始像频谱在数字频谱面上的移位值 l_1 和 l_2 为 128 pixel,得到的计算全息图如图 4(a)所示。此时计算全息图中记录的两组物波数据在物平面空间是混叠的,其对应的数字频谱图如图 4(b)所示。在数字频谱面上两物波有效频谱是分离的。图 5(a)和图 5(b)是在数字频谱图相应位置提取出物波 1 和物波 2 的原始像频谱进行数字再现的结果,可以看到由于精确分离出原物波的有效频谱,而实现了物波数据的快速清晰重建。

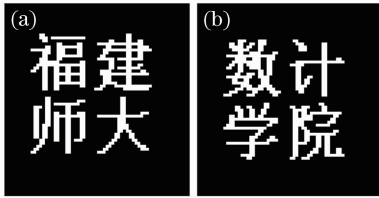


图 2 (a)物波 1 和(b)物波 2 的原始数据
Fig. 2 Original data of (a) object wave 1 and (b) object wave 2

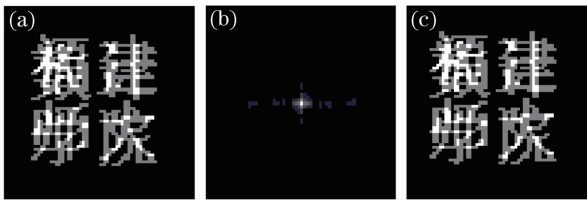


图 3 (a)计算全息图;(b)数字频谱图;(c)物波再现像
Fig. 3 (a) Computer-generated hologram; (b) digital frequency spectrum; (c) reconstructed object wave

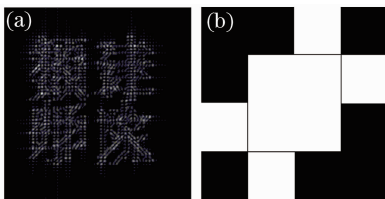


图 4 (a)计算全息图;(b)数字频谱图
Fig. 4 (a) Computer-generated hologram; (b) digital frequency spectrum

若编码参数 α, β 设置不合理,则频谱面上各像频谱将处于混叠状态,此时将无法恢复出清晰再现像。

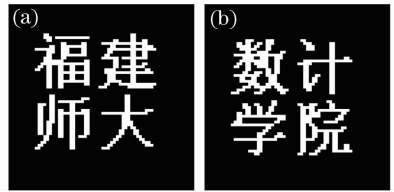


图 5 (a)物波 1 和(b)物波 2 的原始像再现结果
Fig. 5 Reconstructed image of (a) object wave 1 and (b) object wave 2

图 6(a)~(c)是设置编码参数使物波 1 和物波 2 的原始像和共轭像频谱在数字频谱面移位 192 pixel 位置后的数字频谱图及所恢复的再现像,由于频谱面上各像频谱处于混叠状态,频谱面上无法提取出用于恢复原始物波的有效频谱分量,因此无法清晰再现原始物波信息。

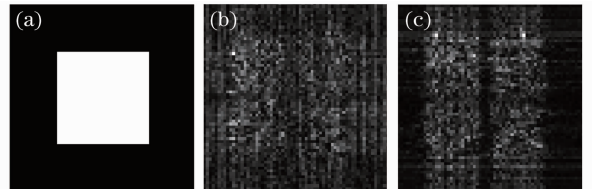


图 6 (a)数字频谱图;(b)物波 1 和(c)物波 2 的数字再现像

Fig. 6 (a) Digital frequency spectrum; reconstructed image of (b) object wave 1 and (c) object wave 2

若频谱部分重叠,由于全息图的不可撕毁性特征仍可利用数字频谱面上提取的部分频谱在一定程度上再现原始物波数据。图 7(a)是两物波原始像和共轭像频谱移位 160 pixel 位置的数字频谱图,此时用于再现的频谱分量只占有有效频谱的 1/2,但仍可完整再现原始物波的全部信息如图 7(b)和图 7(c)所示。只是分辨率下降了一些。

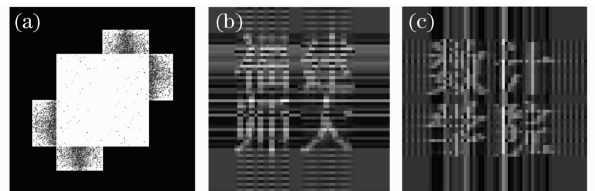


图 7 (a)数字频谱图;(b)物波 1 和(c)物波 2 的数字再现像

Fig. 7 (a) Digital frequency spectrum; reconstructed image of (b) object wave 1 and (c) object wave 2

对多物波记录可以实现类似的功能,图 8(a)~(e)是记录有四组不同物波数据的全息图、数字频谱图及原始像再现结果。可以看到由于频谱面上有效频谱分量的分离,仍可以完整清晰地恢复所有物波信息。

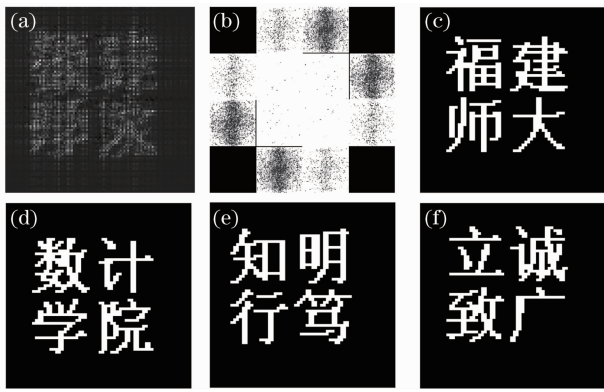


图8 (a)计算全息图;(b)数字频谱图;(c)物波1;
(d)物波2;(e)物波3和(f)物波4的数字再现像

Fig. 8 (a) Computer-generated hologram; (b) digital frequency spectrum; reconstructed image of (c) object wave 1; (d) object wave 2; (e) object wave 3 and (f) object wave 4

5 结 论

结合计算全息中的编码记录和数字全息中的数字再现,给出了光学离轴全息图的全数字化解决方案。通过原始物波数据预处理和编码参数控制的方法可以做到在同一幅全息图中记录多组物波数据,并使多组物波数据的频谱在数字频谱面处于可分离状态,从而可以在频谱面特定位置提取出各物波的有效频谱分量,实现物波数据的快速清晰重建。在数字全息水印技术中,所提出的方法作为水印信号使用时由于可以隐藏多个不同的水印信号,将具备更大的容量和更强的隐蔽性。此外,所需频谱分量的位置与编码参数有着特定的联系,未知编码参数或错误的编码参数都将导致无法提取出再现像的有效频谱,进一步加强了安全性。结合可编程芯片技术^[9,10],这种全数字化的处理方法也可以很容易地实现算法到芯片的移植。

参 考 文 献

- 1 N. Takai, Y. Mifune. Digital watermarking by a holographic technique[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873
- 2 Yuchi Liang, Gu Jihua, Liu Wei *et al.*. An image digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 355~361
尉迟亮, 顾济华, 刘 薇等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 355~361
- 3 Sun Liujie, Zhuang Songlin. Forgery prevention based on in-line Fourier holographic watermark with double random phase encryption[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 621~624
孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 621~624
- 4 Liu Wenwen, Dai Yiquan, Kang Xin. Zero-order image elimination in digital hologram based on finite impulse response filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 856~859
刘雯雯, 戴宜全, 康 新. 基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 856~859
- 5 Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer-Generated Hologram[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984. 48~58
虞祖良, 金国藩. 计算机全息图[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984. 48~58
- 6 Yu Meiwen. Optical Holography and Its Applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 297~301
于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 297~301
- 7 Cheng Peiqing. Digital Signal Processing Tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 87~97
程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 87~97
- 8 Li Junshan, Li Xuhui. Digital Image Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. 36~48
李俊山, 李旭辉. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 36~48
- 9 Zhang Peng, Peng Xiang, Niu Hanben. Information hiding theory based on virtual optics and its implementation with parallel hardware [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(10): 1585~1588
张 鹏, 彭 翔, 牛憨笨. 一种虚拟光学数据加密的系统实现[J]. *电子学报*, 2004, **32**(10): 1585~1588
- 10 Pan Song, Huang Jiye. EDA Applicable Technology [M]. Beijing: Science Press, 2011. 142~183
潘 松, 黄继业. EDA技术实用教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 142~183

栏目编辑:马 沂