

全息图数字再现中零级衍射斑的消除

国承山 王伟田 李 健 高铁军
(山东师范大学物理系, 济南 250014)

摘 要 分析了无透镜傅里叶变换全息图数字再现时零级衍射斑对再现像的影响, 提出了用全息数字相减及数字重现来消除零级斑实现无零级数字全息再现的方法, 给出了计算机模拟实验结果, 并对再现结果作了分析。

关键词 全息图, 数字重现, 数字相减。

1 引 言

由于无透镜傅里叶变换全息图具有记录光路简单, 记录时又不需要傅里叶变换透镜的特点, 使它在 X 光全息及电子全息术中得到了重要应用^[1,2]。近期, 朱佩平等人对 X 光束的相干性和 X 光无透镜傅里叶变换全息图的分辨率之间的关系进行了详细的理论分析^[3]。其分析结果表明, 在 X 光束的相干长度一定的情况下, 要想获得较小的分辨距离, 参考点源与物体应尽量靠近。但是由于再现时物波自相关项(零级衍射项)的存在, 常使±1级衍射像与零级衍射斑相互干扰而无法观察到再现像。为了避免这一现象, 参考点源与物体中心的距离 d 又不能太小, 需要满足以下分离条件:

$$d \geq 3(u - u_0)_{\max} \quad (1)$$

式中 u_0 为物中心的坐标。显然, 设法消除零级衍射项, 进一步减小参考点与物体的距离将有助于提高全息图的分辨率或降低对 X 光束相干性的要求。本文将全息数字再现技术^[4]用于无透镜傅里叶变换全息图, 提出了一种利用全息图数字相减来消除零级衍射项的全息数字再现技术。利用该技术可大大降低对参考点源与物中心的距离 d 的要求, 从而可降低对 X 射线源的相干性的要求, 并可望获得更高分辨率的再现像。

2 基本原理

无透镜傅里叶变换全息图的基本记录光路如图 1 所示。假定参考点源 R 位于坐标原点, 物体 O 的中心到参考点源的距离是 d , 物体 O 的振幅透过率函数为 $a_o(x, y)$ 。 $a_o(x, y)$ 经菲涅耳衍射, 传播距离 z 后到达全息面, 其复振幅分布为 $a_o'(x, y)$, 参考点源 R 在全息面上的复振幅分布为 $a_r(x, y)$ 。于是全息面上光振幅分布为:

$$a_h(x, y) = a_o'(x, y) + a_r(x, y) \quad (2)$$

相应的光强度分布为:

$$I_h(x, y) = |a_o'(x, y)|^2 + |a_r(x, y)|^2 + a_o'(x, y)a_r^*(x, y) + a_o'^*(x, y)a_r(x, y) \quad (3)$$

其中,

$$a_r = \exp [i\pi(x^2 + y^2)/\lambda z] \quad (4)$$

$$a_o' = \{ \exp (i2\pi z/\lambda) \exp [i\pi(x^2 + y^2)/\lambda z] / i\lambda z \} \iint_{-\infty}^{\infty} a_o(x_0, y_0) \times \\ \{ \exp [i\pi(x_0^2 + y_0^2)/\lambda z] \} \{ \exp [-i2\pi(x x_0 + y y_0)/\lambda z] \} dx_0 dy_0 \quad (5)$$

如果直接记录下(3)式所表达的强度分布,并用图2所示的光路再现,则在透镜的后焦面上可以得到±1级衍射像,同时在中心位置有一个零级衍射斑,它主要是物波的自相关函数。显然,如果记录时参考点源与物体的距离不满足(1)式,再现像和零级衍射斑就无法分离,就无法很

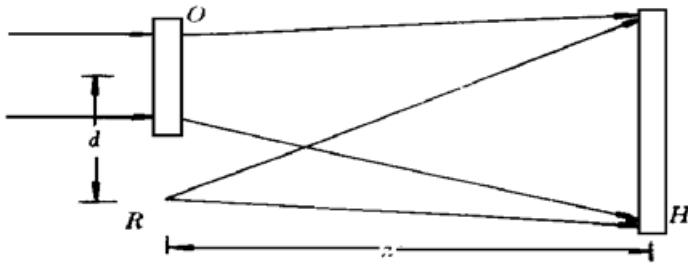


Fig. 1 The diagram for lensless Fourier transform hologram recording, where the distance between object and hologram is z , the distance between the reference point source and the center of the object is d

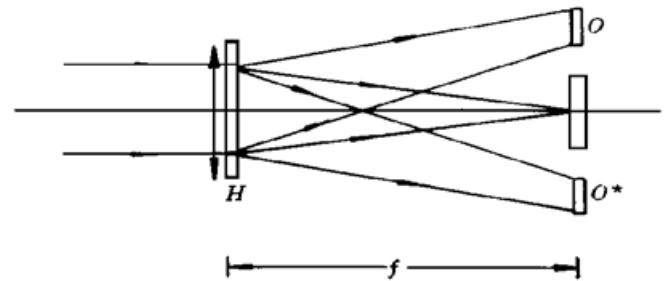


Fig. 2 The diagram for lensless Fourier transform hologram reconstructing

好地观察到再现像。在这种情况下,为了观察到不受干扰的再现像,必须设法将零级衍射斑去掉,对于这种无透镜傅里叶变换全息图,如果记录时参考点源与物体的距离不满足(1)式,用频谱滤波的方法^[4]也无法得到不受干扰的再现像。这里,采用了全息数字相减的方法,成功地将零级衍射斑消除掉,并且使±1级衍射像保持不变,其基本过程如下:

首先用 CCD 摄像机记录下(3)式所示的强度分布 I_h , 同时把离散化的数据输入计算机存储。然后保持实际光路不变,分别挡住参考光和物波,用同一个 CCD 摄像机记录下它们各自的强度分布 I_o' 和 I_r' 。

$$I_o' = |a_o'(x, y)|^2 \quad (6)$$

$$I_r' = |a_r(x, y)|^2 \quad (7)$$

同时也分别把它们输入计算机存储。最后,利用计算机程序对上述所采集到的三组数据进行数字相减得到 I_h' , 即

$$I_h' = I_h - I_o' - I_r' = a_o'(x, y)a_r^*(x, y) + a_o'^*(x, y)a_r(x, y) \quad (8)$$

利用文献[4]中提出的全息图数字再现方法对(8)式的全息图数据进行全息数字再现,在显示屏上就可得到±1级衍射像,而零级衍射斑将被消除。

3 重现结果

用计算机模拟了上述实验过程,这里采用字符 E 为物体。通过改变参考点源与物体中心的距离 d 来观察中心衍射对 ± 1 级衍射像的影响,同时也得到采用全息数字相减技术而消除了中心衍射斑的不受干扰的 ± 1 级图像。整个过程都在 PC 机上进行,输出结果直接在显示屏上显示。图 3 表示满足(1)式的无透镜傅里叶变换全息图的再现结果。其中图 3(a)对应的条件式为 $d = 3(u - u_0)_{\max}$,图 3(b)对应的条件式为 $d > 3(u - u_0)_{\max}$ 。从图中可见,如满足(1)式,全息图的 ± 1 级衍射像可以与中心衍射斑较好地分离。

图 4 表示不满足(1)式的无透镜傅里叶变换全息图的再现结果。

从图 4 可以明显地看出,如果参考点源与物中心的距离 d 不满足(1)式时,中心衍射斑严重干扰了 ± 1 级衍射像,无法很好地观察到再现像。现在采用数字相减技术,分别得到对应上述三种情况的再现像,如图 5 所示。从图中可以看出,中心衍射斑被消除, ± 1 级衍射像被清楚地再现出来。此时参考点源与物中心的距离只须满足条件

$$d > (u - u_0)_{\max}, \tag{9}$$

就可得到不受干扰的再现像。

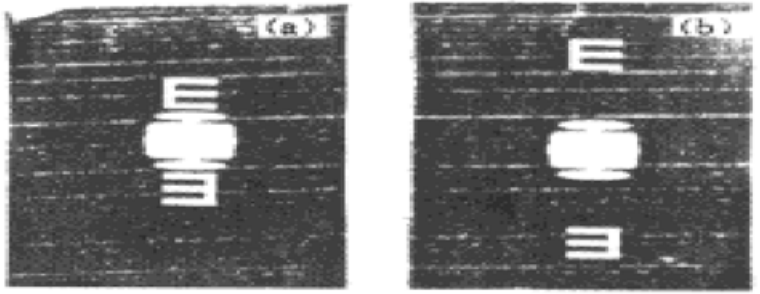


Fig. 3 Reconstruction of lensless Fourier transform hologram for $d \geq 3(u - u_0)_{\max}$: (a) $d = 3(u - u_0)_{\max}$; (b) $d > 3(u - u_0)_{\max}$

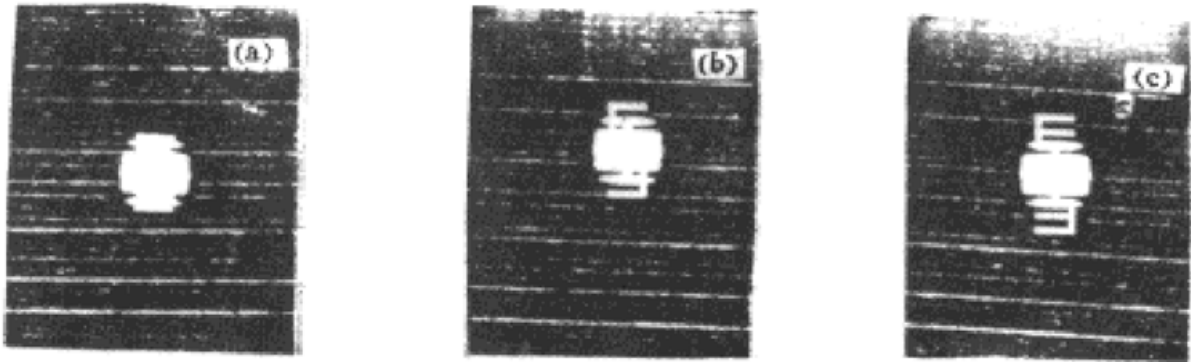


Fig. 4 Reconstruction of lensless Fourier transform hologram for $d < 3(u - u_0)_{\max}$: (a) $d = (u - u_0)_{\max}$; (b) $d = 1.5(u - u_0)_{\max}$; (c) $d = 2(u - u_0)_{\max}$

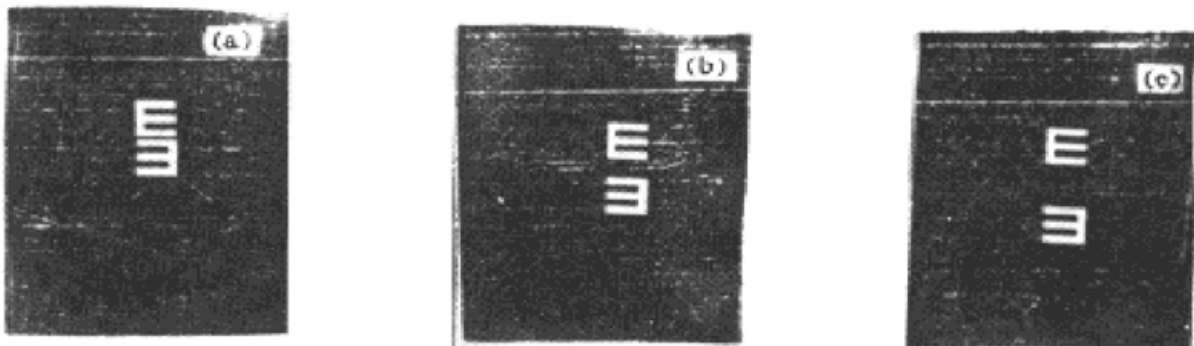


Fig. 5 Reconstruction of lensless Fourier transform hologram without zero-order diffraction spot: (a) $d = (u - u_0)_{\max}$; (b) $d = 1.5(u - u_0)_{\max}$; (c) $d = 2(u - u_0)_{\max}$

结 论 从理论上提出了一种用全息数字相减技术消除无透镜傅里叶变换全息图再现时产生的中心衍射斑的新方法,并给出了该方法的计算机模拟实验结果。模拟实验结果表明该方法是可行的。对于 X 光无透镜傅里叶变换全息图,该法可望使再现像的质量得到较大的提高,并可降低对 X 光源相干性的要求。由于实验条件的限制,文中用于重现的全息图强度分布数据都来自理想计算。因此,为了使本文所述方法有关的数字相减、数字重现软件能够用于实际物体的数字全息中,还需要建立一个相应的数据采集系统,这也是要进一步开展的工作。

参 考 文 献

- [1] I. McNulty, J. Kirz, C. Jacobsen *et al.*, High-resolution imaging by Fourier transform X-ray holography. *Science*, 1992, **256**(15) : 1009~ 1012
- [2] 朱佩平,徐至展,陈建文等, 可见光再现 X 射线无透镜傅里叶变换全息图的可行性研究。光学学报, 1994, **14**(10) : 1076~ 1081
- [3] 朱佩平,徐至展,陈建文等, 相干性对 X 光全息图分辨率的影响。光学学报, 1994, **14**(11) : 1167~ 1171
- [4] 肖体乔,徐至展,陈建文等, 全息图的数字重现。光学学报, 1995, **15**(2) : 129~ 134

Elimination of Zero-Order Diffraction Spot in Digital Reconstruction of Hologram

Guo Chengshan Wang Weitian Li Jian Gao Tiejun
(*Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014*)

(Received 3 November 1996; revised 8 July 1997)

Abstract The effects of zero-order diffraction spot on the reconstruction images in the digital reconstruction of lensless Fourier transform hologram are analyzed. A method to eliminate the zero-order diffraction spot with digital subtraction and digital reconstruction of hologram is suggested. Reconstructions of hologram without zero-order diffraction spot are implemented successfully. The results are discussed.

Key words hologram, digital reconstruction, digital subtraction.