

编码孔径成像:一种全息逆转滤波处理

陈林森 姜亚光
(苏州大学激光研究室)

提 要

本文利用动态范围宽的全息逆转滤波器(HIF)对几种编码图像进行了解码。讨论了HIF的性能,给出光学模拟下非冗余列阵(NRA)对二维物体成像和对三维物体层析的一些结果。

关键词: 全息逆转滤波器; 编码孔径; 层析术。

一、引 言

在核物理学和医学上,为探测放射性物分布,提高探测器光子收集效率和保持单针孔角分辨率,采用了编码孔径作为成像手段,发展了多种编码孔径以及在非相干相关系统中的解码方法^[1-3]。由于编码图像携有三维物信息,层析是可能的^[4]。一种改进方法是用逆转滤波器作为编码图像的了解码手段,理论上,恢复像是原始物分布的准确复原,因此,编码孔径成像(CAI)保持了较好的空间分辨率。但是,逆转滤波器的性能决定了恢复像的质量。全息夹层滤波器^[5,6],动态范围小^[7],仅能处理线性运动或失焦造成的简单模糊图像。漂白型滤波器^[8],虽然衍射效率有所提高,却在恢复像上产生严重相干噪声。文献[9]用夹层滤波器处理了仅由三个阿拉伯数字构成的编码图像。由于滤波器性能的限制,未见更好的结果报道。本文作者之一提出了全息逆转滤波器的制作方法,得到了线性运动模糊像^[10]及与任意点扩散函数卷积的模糊像^[11]的恢复像。本文分析了这种HIF的响应和性能,提出HIF应用于CAI中使成像具有较好的空间分辨率,并可提高恢复像的信噪比,用HIF对二维物和三维物的编码图像进行了解码,给出了实验结果。

二、CAI中的逆转滤波解码

设成像系统是线性的和空间不变的,编码图像 $g(x, y)$ 可看成为原物分布 $o(x, y)$ 和编码孔径点扩散函数(PSF) $h(x, y)$ 的卷积:

$$g(x, y) = o(x, y) \otimes h(x, y). \quad (1)$$

这里 \otimes 为卷积运算,式中略去了标度因子。作为消卷积运算的逆转滤波器,同样可作为编码图像的了解码手段,令 $O(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 分别为 $o(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 的傅里叶变换,在 $g(x, y)$ 的傅里叶变换面上置 $1/H(u, v)$ 的逆转滤波器,再作逆傅里叶变换,用符号 $\mathcal{F}^{-1}\{ \}$ 表示,则恢复像

$$I(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{O(u, v)H(u, v) \cdot (1/H(u, v))\} = o(x, y) \quad (2)$$

是原物的准确再现。对三维物分布,可分别让每层物分布的频谱标度与滤波器匹配,这样,每层物分布便可层析出来,其它各层失配成背景噪声。因此,逆转滤波器作为解码手段,恢复像与编码孔径的选择无关。

三、动态范围宽的 HIF

1. HIF 的响应

如图 1(a)所示,在输入面上置点扩散函数 $h(x, y)$, 用相干准直波照明,在频谱面上有:

$$H(u, v) = A |H(u, v)| \times \exp[-i\phi_H(u, v)] \quad (3)$$

这里 $H(u, v)$ 是 $h(x, y)$ 的傅里叶变换, $|H(u, v)|$ 为归一化振幅分布, A 为 $H(u, v)$ 的中央峰值。引入参考光

$$R(u) = |R| \exp(-i2\pi x_0 u) \quad (4)$$

与物光 $H(u, v)$ 干涉,经记录后成为全息图,设记录是线性的,当用物光 $H(u, v)$ 照明全息图时,在参考光方向的再现波为^[12]

$$W(u, v) = (1/2)t'_B(E_0) \cdot A |H(u, v)| \times E_0(u, v) \cdot M(u, v) \times \exp(-i2\pi x_0 u) \quad (5)$$

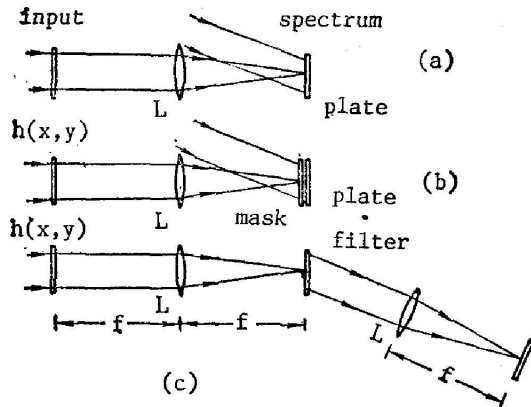


Fig. 1 Making and processing system of HIF

因此,在 $R(u)$ 方向上全息图的振幅透过率为

$$t_F(u, v) = (1/2)t'_B(E_0) \cdot E_0(u, v) \cdot M(u, v) \cdot (A |H(u, v)| / H(u, v)) \times \exp(-i2\pi x_0 u) \quad (6)$$

这里 t_B 为全息图的总振幅透过率,在线性记录下, $t'_B(E_0) = (dt_B/dE)|_{E_0}$ 为常数。全息图的调制度 $M(u, v) = (2|R|/A) \cdot (|H(u, v)| / \{|H(u, v)|^2 + (|R|^2/A^2)\})$, 在弱参考光条件 $|R| \ll A$ 下,对于 $|R|^2/A^2 < |H(u, v)|^2$ 的区域, $M(u, v) \sim (2|R|/A) \cdot (1/|H(u, v)|)$, 但全息图平均曝光量 $E_0(u, v) = k\tau[A^2|H(u, v)|^2 + |R|^2] \sim A^2|H(u, v)|^2$, 起伏非常大,远超过记录介质线性范围。由(6)式可知,严格地说,这种全息图不能实现 $t_F(u, v) \sim 1/H(u, v)$ 。

如图 1(b)所示,在调制的掩膜后记录全息图,物光和参考光均通过掩膜, $M(u, v)$ 不变。在图 1(a)中,用底片先对 $H(u, v)$ 曝光,再对 $R(u)$ 曝光,显影使底片反差 $\gamma=1$, 则底片的振幅透过率 $t_m(u, v)$ 为

$$t_m(u, v) = K E^{-\gamma/2} = K [A^2 |H(u, v)|^2 + |R|^2]^{-1/2} \quad (7)$$

这里 K 为比例系数,用此底片作为调制的掩膜,则

$$E_0(u, v) = k\tau [A^2 |H(u, v)|^2 + |R|^2] \cdot t_m^2(u, v) = k\tau K^2 = \text{const.} \quad (8)$$

由(8)式和(6)式有

$$t_F(u, v) = [k\tau K^2 t'_B(E_0)] \cdot (A^2 |H(u, v)|^2 / \{A^2 |H(u, v)|^2 + (|R|^2/A^2)\}) \times (1/H(u, v)) |R| \exp(-i2\pi x_0 u) \quad (9)$$

在弱参考光条件下, $t_F(u, v) \sim 1/H(u, v)$ 。用 $H(u, v)$ 照明全息图, 见图 1(c), 在 $R(u)$ 方向上再现了平面波, 输出面得到了恢复点。因此, (9) 式为 HIF 的响应的表达式。

2. 双输出 HIF

在图 1(b) 中, 引入双参考光 $R_1(u)$ 、 $R_2(u)$, 则 HIF 的响应为

$$t_F(u, v) = (c / \{1 + [(|R_1|^2 + |R_2|^2) / A^2 |H(u, v)|^2]\}) \cdot (1 / H(u, v)) \times [|R_1| \exp(-i2\pi\alpha_{01}u) + |R_2| \exp(i2\pi\alpha_{02}u)]. \quad (10)$$

这里 c 为常数, HIF 在两参考光方向上实现了双图像输出。

与单输出 HIF 相比, 我们认为, 双输出 HIF 的优点是, 双输出 HIF 可进行图像比较, 把信息与噪声区别开来; 由于随机噪声分布比编码图像的频谱分布精细得多, 并扩展到整个谱面, 双参考光在双输出 HIF 上叠在一高频光栅结构上, 对谱面内的噪声有调制和抑制作用, 抑制了部分高频噪声。

由(9)式和(10)式可知, HIF 具有“Wiener”型抑制噪声的优点, 由于 HIF 是单片全息图, 因此衍射效率较夹层滤波器要高, 而且调整使用方便。

3. HIF 的动态范围估计^[7]

HIF 的动态范围取决于掩膜及记录全息图底片的动态范围。底片的振幅透过率 t 与密度 D 的关系为 $t = 10^{-D/2}$, D 的值很容易控制在 $0 \sim 3$ 之间, 因而 t 可在 $1 \sim 10^{-1.5}$ 之间变化。由(7)式和弱参考光条件, 有 $t_m(u, v) \sim 1/|H(u, v)|$, 底片的 t 的动态范围为 32:1, 表明作为掩膜底片, 线性地记录了 $|H(u, v)|$ 的起伏为 32:1。实验中, 掩膜的动态范围要小些(对天津全息干板(I), 在 $\gamma=1$ 下, 动态范围约为 20:1), 再考虑到记录全息图的底片的动态范围, HIF 的动态范围不难做到优于 100:1, 这样, 这种 HIF 具有较好的消模糊能力, 使恢复复杂编码图像成为可能。

4. $|R|/A$ 与 HIF 的逆转区域

根据(9)式和(10)式, 用 $H(u, v)$ 照明 HIF, 严格地说, 再现波的振幅不是常量而与 $|R|/A$ 和 $|H(u, v)|$ 有关($|H(u, v)|$ 的零点使再现波产生齿缝效应)。令再现波第 (n, m) 峰值 $B_{n,m}$ 与中央峰值 $B_{0,0}$ 之比满足 $B_{n,m}/B_{0,0} > \sqrt{2}/2$, 则级次低于 (n, m) 的再现波较为平坦, 可看成平面波, 由(9)式有

$$|R|/A < \{[1 - (\sqrt{2}/2)] / [\sqrt{2}/2 - (A_{n,m}/A)^2]\} \cdot (A_{n,m}/A). \quad (11)$$

这里 $A_{n,m}$ 为 $H(u, v)$ 的第 (n, m) 级峰值。(11)式表明, $|R|/A$ 确定了 HIF 的逆转区域。 $|R|/A$ 不能任意减小, 否则将降低图像信噪比。

四、实验结果及讨论

如图 2 所示, 三种编码孔径: (a)螺旋型孔径(Spiral Aperture), (b)均匀冗余列阵(Uniformly Redundant Array), (c)非冗余列阵(Non Redundant Array), 直接记录的全息图不能获得这三种编码孔径的 HIF, 只有在合适的掩膜后记录才能制得 HIF。对三种编码孔径的 PSF 用相应的 HIF 处理, 恢复像点的直径均小于 0.05 mm , 而 SA、URA 和 NRA 的 PSF 的尺寸分别为 $0.64 \times 0.77 \text{ mm}^2$ 、 $1.86 \times 1.95 \text{ mm}^2$ 和 $1.43 \times 1.64 \text{ mm}^2$ 。

以 NRA 为例, 下面的实验结果给出了 NRA 对二维物成像和对三维物层析的结果, 表明

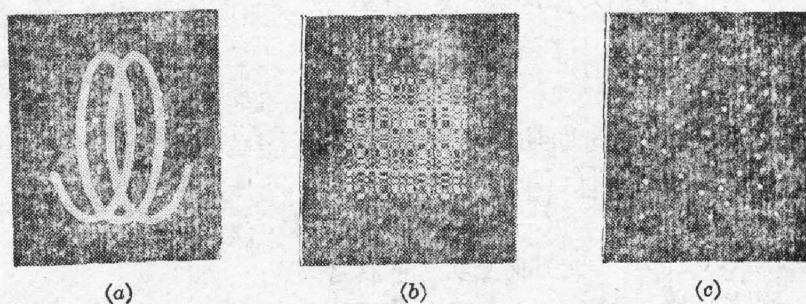


Fig. 2 Coded apertures

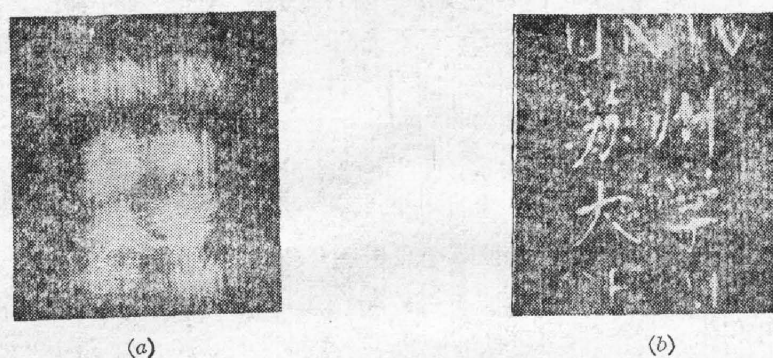


Fig. 3 The coded picture of NRA and result of decoding

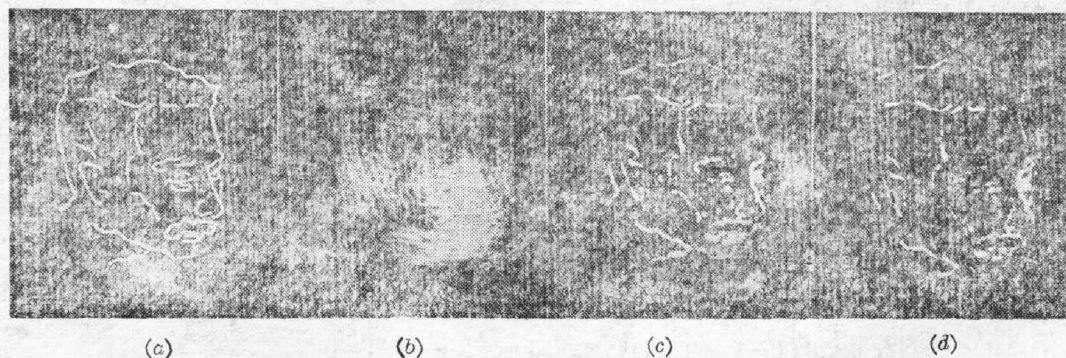


Fig. 4 Restored images of two output HIF

HIF 的消模糊功能是很好的。图 3(a) 为 NRA 对二维物分布的编码图像，它由 43 组物分布叠加而成，将编码图像置入图 1(c) 的输入面上，在输出面得到的解码结果见图 3(b)，HIF 把原物分布从重叠严重的编码图像中恢复出来，输出时未作任何消噪声处理，恢复像的信噪比和分辨率是较高的。

图 4(a) 为 NRA 对二维物分布的编码图像，(b) 为原物分布，(c) 和 (d) 为双输出 HIF 的恢复像，较细致地恢复出原物分布，结果表明，两恢复像上的噪声不尽相同；双输出 HIF 对噪声有一定抑制作用。

图 5(a) 为 NRA 对三维物分布(由两个层面构成)的编码图像(物的第一、二层面及卷积平面距编码孔径平面分别为 185 cm、188 cm 和 200 cm)，将编码图像置于图 1(c) 中透镜 L_1 后的变标度光路中，改变编码图像至频谱面的距离，便可改变频谱标度，这样可将两层物

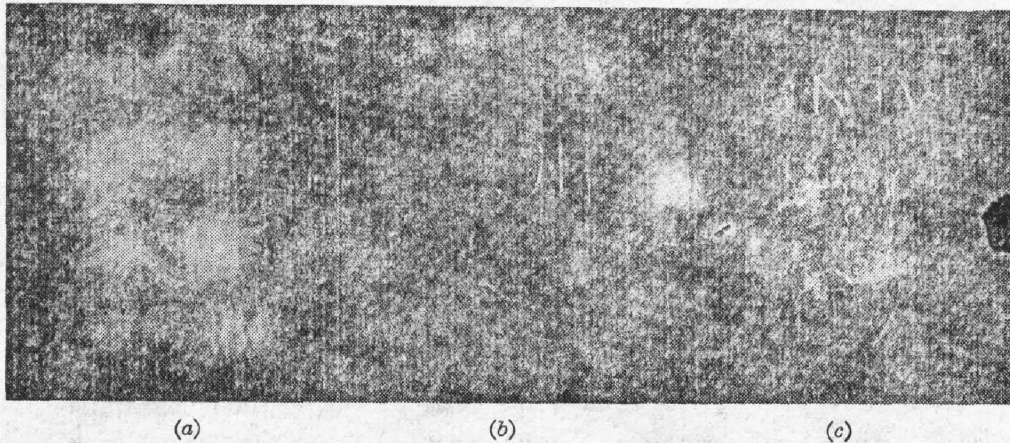


Fig. 5 Tomographical results using HIF

分布分别层析出来, 5(b) 为对“苏州大学”层析后的结果, “UNIV OF MI.” 成为背景, 5(c) 为对 “UNIV OF MI.” 层析后的结果, “苏州大学”成为背景。

实验中, 由于 $H(u, v)$ 存在大量零点, 编码图像的频谱与 HIF 的严格匹配是重要的, 否则将影响恢复像的质量和增加大量噪声。

五、结 论

用动态范围宽的全息逆转滤波器作为编码图像的解码手段, 使得 CAI 保持了较高的分辨率, 恢复像具有较好的信噪比, 不仅可对复杂的二维物分布的编码图像进行恢复, 而且应用在光学层析术中是可行的。

参 考 文 献

- [1] A. Wouter, K. M. Sunion and J. G. Hirschberg; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 8 (Aug), 1871~1873.
- [2] E. E. Fenimore, T. M. Cannon; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 3 (Feb), 337~347.
- [3] R. Silva, G. L. Rogers; *Optica Acta*, 1981, **28**, No. 8 (Aug), 1125~1134.
- [4] R. Silva, G. L. Rogers; *Optica Acta*, 1982, **29**, No. 3 (Mar), 257~264.
- [5] G. W. Stroke, R. G. Zech; *Phys. Lett.*, 1967, **25A**, No. 2 (Jul), 89~90.
- [6] G. W. Stroke, M. Halioua; *Phys. Lett.*, 1972, **39A**, No. 4 (May), 269~270.
- [7] J. W. Goodman; *«Coherent Optical Engineering»*, (North Holland Pub. Co., Amsterdam, 1977), 263~280.
- [8] S. I. Ragnarsson; *Phys. Scr.*, 1970, **2**, 145~153.
- [9] H. Weiss *et al.*; *Optica Acta*, 1977, **24**, No. 4 (Apr), 305~325.
- [10] Y. G. Jiang, Y. Z. Xu; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 6 (Mar), 784~786.
- [11] Y. G. Jiang, C. H. Zhang and L. S. Chen; *Optics News*, 1985, **11**, No. 9 (Sep), 119.
- [12] E. J. 科利尔等著; *«光全息学»*, (机械工业出版社, 北京, 1983), 155~156.

Coded aperture imaging: A holographic inverse filtering approach

CHEN LINSEN AND JIANG YAGUANG

(Laser Research Section, Suzhou University)

(Received 9 November 1987; revised 29 February 1988)

Abstract

Several kinds of coded pictures have been decoded using the holographic inverse filter (HIF) with wide dynamic range. The performances of the HIF are discussed. The results of imaging two-dimensional objects optically by the spiral aperture (SA) and non-redundant array (NRA), and also, the results of imaging the three-dimensional objects by NRA (optical tomography) are presented in the paper.

Key words: holographic inverse filter; coded aperture; tomography.