

文章编号: 0253-2239(2004)08-1045-6

惯性约束聚变中环孔编码图像恢复的 改进维纳滤波方法

刘晓辉 郭成安 胡家升

(大连理工大学电子与信息工程学院, 大连 116023)

摘要: 针对惯性约束聚变(ICF)中环孔编码图像的恢复问题提出了一种改进的维纳滤波方法。在传统的维纳滤波方法中,由于原图像和噪声是未知的,故通常是用某一待定常量来代替其中的噪声与信号的谱密度之比。这种近似忽视了信号与噪声本身的信息,从而造成丢失某些关键的细节,难以达到高质量的图像复原效果。在改进的方法中,首先采用传统维纳滤波方法求得初始估值,然后利用该初始值求得原图像及噪声的谱密度估值,进而利用这些新获得的信息构成改进的维纳滤波器对退化图像进行第二次滤波。实验表明,这种改进方法可以克服原方法的不足,突出图像的一些关键细节,提高图像的整体质量。在仿真实验中,恢复图像的均方误差降低了 15% 以上;在实际惯性约束聚变图像的解码恢复实验中,图像恢复效果亦有显著改善。该方法还可以推广到其他图像恢复的应用中。

关键词: 信息处理; 图像恢复; 环孔编码成像; 维纳滤波; 惯性约束聚变

中图分类号: TP391.41; TN911.43 文献标识码: A

A Modified Wiener Filtering for Restoration of Ring-Coded Aperture Images in Inertial Confinement Fusion

Liu Xiaohui Guo Cheng'an Hu Jiasheng

(School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

(Received 30 June 2003; revised 16 October 2003)

Abstract: A modified Wiener filtering method for image restoration of the ring-coded aperture images in inertial confinement fusion (ICF) is presented. In traditional Wiener filtering method, the signal-to-noise ratio of spectral density has to be replaced with a constant parameter, which overlooks the spectral information of the underlying image and noise because the spectra are a priori unknown, and consequently the filtered result may lose some important details with inadequate resolution. In order to overcome this drawback, the authors propose an approach to exploit the spectral information. In the new method, the traditional Wiener filter is used at first to obtain the initial estimate of the target image, based on which the spectral densities of the target image and noise image are estimated. Then by using this information a new Wiener filter is reconstructed that is used to filter the coded image again to obtain an improved result. The validity of the new method is confirmed by the experimental results: for simulations, the mean square errors are decreased more than 15%, and for practical ICF images, the restoration results are improved significantly compared with the results obtained by using the traditional Wiener filters. The approach can also be applied to other image restoration problems such as that the point spread functions are known.

Key words: information processing; image restoration; ring-coded aperture imaging; Wiener filtering; inertial confinement fusion

1 引 言

X 射线在真空中对物体有很强的穿透力,且不同物质对 X 射线的吸收有很大的差异,因此 X 射线成像技术为研究和分析物体的内部结构和本质特性提供了强有力的手段。近年来,随着等离子体物理,特别是激光引爆的惯性约束聚变(Inertial confinement fusion, ICF)的发展和需要, X 光成像和过程诊断技术越发变得必不可少。但由于 X 射线波长很短,在介质中被强烈吸收,又由于绝大多数材料在 X 射线波长范围内的折射率略小于 1,因此利用光学器件的聚焦性质进行几何成像的普通成像方式已不适用。目前主要依靠透射或者掠入射反射方法^[1]来成像。在透射式成像中,编码成像是研究的热点^[2,3]。

透射式成像先后经历了单针孔成像、菲涅耳带板、针孔阵列成像^[4]和环形编码孔径成像等发展阶段。相对而言,环形编码孔径的优越性更为显著^[5]:首先,由于只有一个环孔,因此它的制作工艺较为简单;其次,它在保持高分辨率的同时,还具有高集光效率和高信噪比;第三,由于膜层可以做得较厚,故可以在强 X 射线下使用,且使用的 X 射线波长可短至 0.1 nm。如果金膜厚度再增加,使用的 X 光波长还可以缩短。环形编码成像是一种两步成像过程。第一步是使靶标光源的 X 光透过环形孔径形成退化的重叠的投影图像(编码),第二步是利用计算机或光学方法对退化像进行复原处理(解码),恢复出靶标的原图像^[6]。

环形编码孔径是以硅作为基底材料,采用光刻蚀和电镀相结合的方法,例如通过在基底材料上镀金膜(环孔处不镀金膜)等工艺使得 X 光线仅能透过环孔以形成环孔编码图像^[5]。编码孔径成像技术是一种投射式成像,入射光经孔径编码后直接投射在接收平面上,每个物点在接收平面上形成编码孔径的投影图像。不同物点产生的像因相互错开、叠加而在接收平面上形成了退化的、重叠的二维分布信号,即编码像。

图 1 和图 2 是用环形编码孔径获得重叠像的原理图。图 1 中画出靶标中的 A 和 B 点所成的像,图 2 表示点目标的像与环孔宽度和直径的关系:

$$\begin{cases} d_2 = (l_1 + l_2)d_1/l_1, \\ \Delta d_2 = (l_1 + l_2)\Delta d_1/l_1, \end{cases} \quad (1)$$

设靶标函数为 $o(x, y)$, 环形编码孔径系统的点扩展函数为 $h(x, y)$, 干扰噪声为 $n(x, y)$, 则编码孔径所

形成的像函数 $i(x, y)$ 为

$$i(x, y) = o(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (2)$$

式中“*”为卷积运算符号。

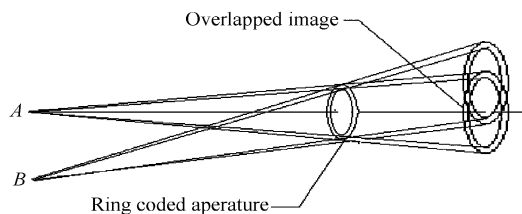


Fig. 1 Ring coded-aperture microscope diagram

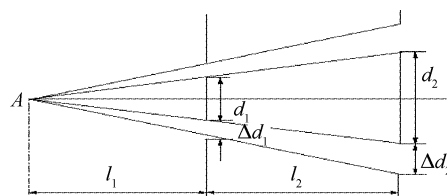


Fig. 2 Relationship of image dimension and ring coded-aperture parameters

对编码图像进行解码重构,就会得到靶标像。整套成像系统的性能最终体现为重建图像的质量,所以如何提高重构图像的质量,是一个值得深入研究的课题。现在普遍采用的图像恢复方法是传统的维纳滤波。这种恢复方法虽然优越于逆滤波法,但是图像质量尚待提高^[2,5,7]。

本文针对惯性约束聚变中图像恢复问题提出一种改进的维纳滤波方法,并进行了实验研究。结果表明采用这种改进方法可使恢复图像的质量得到显著提高。

2 图像恢复解码方法

2.1 传统图像解码方法

在惯性约束聚变中为了得到靶标的真实图像,需要对接收平面上得到的编码图像进行解码重建处理。即根据编码图像,编码孔径的传递函数及对噪声的某种先验知识等信息,设法得到靶标图像的最佳估计。为此通常采用维纳滤波方法来实现图像解码^[8]。

对(2)式进行傅里叶变换,得到频域表达式为

$$I(u, v) = O(u, v)H(u, v) + N(u, v), \quad (3)$$

式中 $I(u, v)$ 为像函数的频谱, $O(u, v)$ 为目标函数的频谱, $H(u, v)$ 为调制传递函数(MTF), $N(u, v)$ 为噪声频谱。

维纳滤波就是寻找传输函数为 $H_w(u, v)$ 的滤波器,使得恢复出的目标估计值 $o_w(x, y)$ 与真实 $o(x, y)$ 的均方误差达最小,即

$$\langle [o(x, y) - o_w(x, y)]^2 \rangle \rightarrow \min, \quad (4)$$

结果为^[8]

$$H_w(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)/S_o(u, v)}, \quad (5)$$

其中 $H^*(u, v)$ 为编码孔径成像系统的传递函数的复共轭, $S_o(u, v)$ 和 $S_n(u, v)$ 分别为靶标图像和噪声的功率谱密度。由于在图像恢复问题中, $S_o(u, v)$ 和 $S_n(u, v)$ 是未知的, 故在传统的维纳滤波方法中通常将(5)式中的 $S_n(u, v)/S_o(u, v)$ 用某个常量 ϵ 来近似代替^[8]。

在惯性约束聚变实验中, $S_o(u, v)$ 和 $S_n(u, v)$ 亦是未知的。故在已有的惯性约束聚变图像恢复研究中均将 $S_n(u, v)/S_o(u, v)$ 设为某个经验值 $\epsilon^{[2,5,7]}$, 即

$$\hat{H}_w(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \epsilon}, \quad (6)$$

在上述滤波方法中, 参量 ϵ 起到归整化的作用, 可消除核函数的频域奇异性造成的病态问题。由于方法简单, 成为很多图像重建应用中的典型方法。目前环形编码图像解码重建都是基于这种方法^[2,5,7]。这种滤波器的最大优点是计算方便, 在对恢复精度要求不高的场合可得到基本满意的结果。但由于在这种方法中采用了常量来代替噪声与原图像的功率谱比值的近似方法, 未能充分利用图像和噪声本身的信息, 故常常难以得到高质量的图像复原效果。为此本文提出一种改进的维纳滤波方法, 从而使解码重建的图像质量得到明显改善。

2.2 改进的维纳滤波方法

在传统的维纳滤波中, 用常量 ϵ 来代替 $S_n(u, v)/S_o(u, v)$, 结果使恢复图像趋于平滑, 降低图像的恢复质量。如果能从现有的信息中提取或者估计出 $S_o(u, v)$, 将会提高滤波函数的准确度。先验知识中包括退化图像, 点扩展函数的形状以及环宽和直径的比值等。欲从这些信息中得出逼真的靶标图像是我们追求的目标。另一方面, 由对图像恢复的研究可知, 应用传统的维纳滤波方法, 通过选择合适的参量 ϵ 是可以得到一个 $S_o(u, v)$ 的估计值的。虽然该估计值不一定精确, 但可基本上反映实际 $S_o(u, v)$ 的变化趋势。

基于这种思想, 我们提出一种二次维纳滤波的方法。第一步, 利用传统的维纳滤波对编码图像进行解码, 得到靶标图像的一个近似估计 $\delta_w(x, y)$, 这个估计与理想图像有一定的误差, 但能大体反映出靶标的信息(这在传统的维纳滤波中是作为最终结果

的, 在这里, 不是最终结果)。第二步, 将第一步得到的 $\delta_w(x, y)$ 作为靶标图像的一个估计, 并由 $\delta_w(x, y)$ 估计出靶标图像的功率谱密度 $\hat{S}_o(x, y)$, 代入维纳滤波器公式中得

$$H_{MW}(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \sigma_n^2/\hat{S}_o(u, v)}, \quad (7)$$

其中的下标“MW”表示改进的维纳滤波器(Modified Wiener filter), σ_n^2 是噪声均方值, 通常噪声可近似看作为白噪声, 故这里用常量 σ_n^2 来代替噪声的功率谱密度(关于 σ_n^2 的估计见下节)。然后用 $H_{MW}(u, v)$ 对退化图像进行二次滤波。

这种方法与一次滤波的根本区别在于: 在一次滤波中所有的频率用统一参量 ϵ , 在二次滤波中, 使用原图像功率谱密度的估值, 相当于对各个频率施加不同的权值, 由此可突出图像的一些细节, 克服原方法的整体平滑性带来的影响。

关于如何求功率谱估计 $\hat{S}_o(u, v)$ 的问题, 已有许多成熟的理论和方法(例如基于快速傅里叶变换的周期图法及其各种改进算法^[9]), 感兴趣的读者可直接参考有关文献, 此处不再赘述。

Hillery 和 Chin^[10] 曾经提出一种迭代维纳滤波的思想, 其中以退化图像 $I(u, v)$ 作为初值, 一般需要多次迭代。这种初值的设定只适合通常的运动模糊或者噪声降质。同时多次迭代计算量较大, 且不能保证收敛。对于惯性约束聚变中的编码图像 $i(x, y)$ 已经“面目全非”, 不能直接反映原靶标图像的分布规律。故这种迭代维纳滤波方法不适合惯性约束聚变编码图像的恢复问题。而本文的改进维纳滤波方法则具有可行性和有效性。它通过第一次恢复的结果, 得到原图像的估计, 再经第二次滤波即可得到质量更好的恢复结果。根据本文的实验结果发现, 尽管第一次恢复结果并不精确, 或因参量 ϵ 的选择原因造成结果有差异, 但通过第二次滤波仍能得到相当理想的恢复结果, 这给实际应用带来了更大的可操作性。

下面给出本文改进的维纳滤波图像恢复方法的具体算法步骤:

- 1) 利用(6)式作为滤波器进行一次维纳滤波;
- 2) 调整参量 ϵ (ϵ 的选择方法见下节);
- 3) 根据第一次滤波结果估计 $\hat{S}_o(u, v)$ 和估计 σ_n^2 (估计的方法见下节);
- 4) 利用(7)式进行二次维纳滤波。

2.3 参量的选择

在第一次维纳滤波中, 还存在参量 ϵ 的选取和

σ_n^2 的估计问题。在本文的惯性约束聚变图像恢复问题中,对噪声的先验知识并不完备,且实际的靶标图像是未知的,因此既不能事先确定好一个 ϵ 值,亦不能完全依赖恢复结果来确定 ϵ 值,本文采用下述方法来确定参量 ϵ 。

首先根据对所研究问题的先验知识和模拟试验确定参量 ϵ 的取值范围。因为参量 ϵ 本身的物理意义是信噪比(信噪比的倒数),而在只有量化噪声的模拟实验中,信噪比满足公式^[11]

$$r_{\text{SN}} = 10\lg(1/\epsilon) \approx (6b - 1.25) \text{ dB}, \quad (8)$$

其中 b 是量化后的字长。实验中是用标准灰度格式来表示图像($b = 8$),于是可得 ϵ 的取值下限为

$$\epsilon \geq 2.1 \times 10^{-5}, \quad (9)$$

这个数量级经过我们的实验验证基本符合。在实际惯性约束聚变实验中除量化噪声外还存在其他干扰噪声,实际的噪声电平大于量化噪声,所取的参量值应该比这个值大。另外实际的编码(退化)图像不一定是 8 bit,例如图 8 所示的退化图像只有 7 bit,由此得出下限是 $\epsilon \geq 8.4 \times 10^{-5}$ 。这个分析给出了这个参量选取的下限,在实际中起到一定的指导作用。得到参量 ϵ 的下限后,逐渐增加 ϵ 的取值,在不同的 ϵ 下对编码图像进行滤波,得到不同的恢复结果,再根据下式计算相对误差 $E_R(\epsilon)$:

$$E_R(\epsilon_k) = \frac{\sum_{x,y} |o(x,y,\epsilon_k) - o(x,y,\epsilon_{k-1})|^2}{\sum_{x,y} |o(x,y,\epsilon_{k-1})|^2}, \quad (10)$$

式中 $o(x,y,\epsilon_k)$ 为取 ϵ_k 时的图像恢复结果。图 3 为实验中得到的一条相对误差曲线。由图中结果可见,相对误差 $E_R(\epsilon)$ 存在波谷区,根据该相对误差的定义,当 $E_R(\epsilon)$ 处于波谷区时,说明这时再改变 ϵ 已对恢复图像 $o(x,y,\epsilon_k)$ 的质量影响不大。因此可取该波谷所对应的 ϵ 作为这一参量的选择结果。

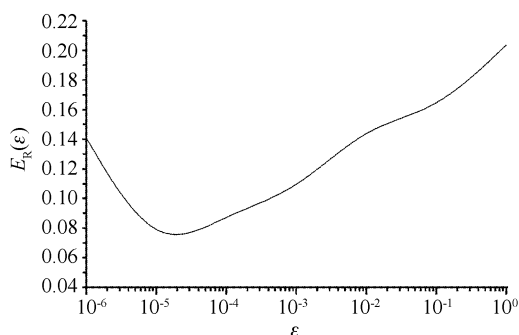


Fig. 3 Relative errors of restored images

在本文的改进维纳滤波方法中,参量 ϵ 是在第

一步的滤波中使用,本文对整个恢复算法中参量 ϵ 的敏感度也进行了实验和分析。结果发现本文的算法对 ϵ 并不十分敏感,当在 $E_R(\epsilon)$ 的谷底附近选择 ϵ 时,最后均能取得较好的恢复结果。例如,由图 3 可见, $\epsilon = 2.5 \times 10^{-5}$ 和 $\epsilon = 10^{-4}$ 都处于 $E_R(\epsilon)$ 的波谷附近($\epsilon = 2.5 \times 10^{-5}$ 更接近波谷),采用本文的改进算法,第一步分别用这两个参量进行一次滤波,然后进行二次滤波,尽管第一次滤波结果并不相同($\epsilon = 10^{-4}$ 的结果相对较差),但最后都取得比较显著的改善效果(实验结果见图 5)。

对于二次滤波算法中的参量 σ_n^2 的选择问题,可以根据第一次滤波恢复的结果 $\hat{o}_w(x,y)$ 估计 σ_n^2 。假设系统中的噪声 $n(x,y)$ 是零均值的白噪声,则据(2)式可得 σ_n^2 的估值为

$$\hat{\sigma}_n^2 = \frac{1}{MN} \sum_{x,y} [i(x,y) - \hat{o}_w(x,y) * h(x,y)]^2, \quad (11)$$

其中 M 和 N 分别是图像的宽和高。在本文的改进方法中,以估值 $\hat{\sigma}_n^2$ 作为确定 σ_n^2 的根据。

3 实验结果分析

3.1 仿真实验

本文首先用计算机模拟整个成像系统进行编码和解码过程的仿真研究。模拟产生了一个外直径为 250 像素,环宽为 5 像素的环,用它对图 4(a)的图样进行编码,得到图 4(b)所示的编码像,然后采用本文的改进维纳滤波方法进行图像解码。在第一步滤波时,采用上节所述的参量选择方法($\epsilon = 2.5 \times 10^{-5}$)。用传统维纳滤波方法得到恢复图像 $\hat{o}_w(x,y)$,如图 5(a)所示。然后用 $\hat{o}_w(x,y)$ 计算出功率谱密度 $\hat{S}_o(x,y)$ 和 $\hat{\sigma}_n^2$,再进行第二次滤波,得到改进结果 $o_{\text{MW}}(x,y)$,如图 5(b)所示。

在模拟实验中对两次滤波结果 $\hat{o}_w(x,y)$ 和 $o_{\text{MW}}(x,y)$ 分别计算出其相对于原始图像的均方误差,

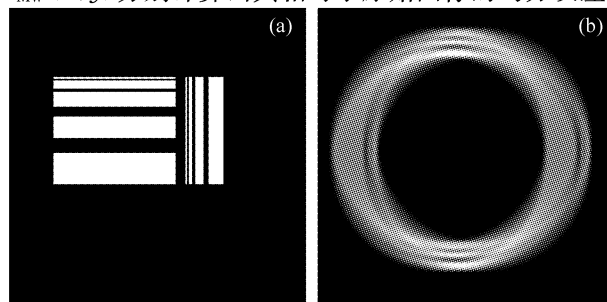


Fig. 4 Imaging simulations. (a) Original image, (b) Coded image

分别为 $E_{WMS} = 19.12$ 和 $E_{MWMS} = 16.19$ 。这表明应用本文的方法使图像恢复的质量得到了较为显著的改善,相对均方误差降低了 15.32%。

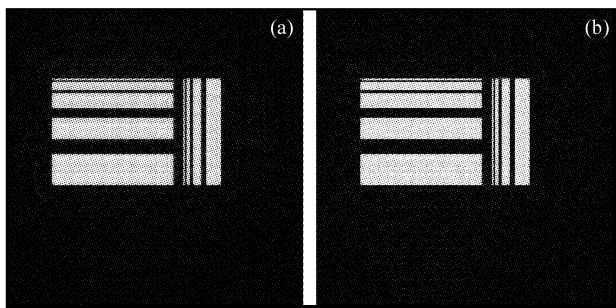


Fig. 5 Image restoration simulations. (a) Results of traditional Wiener filter, (b) Result of modified Wiener filter

为考查算法对参量 ϵ 的敏感性,实验时在第一步滤波中还同时取不同的 ϵ 值进行滤波,然后对结果再进行二次滤波。例如本文实验中取 $\epsilon = 10^{-4}$ (由图 3 可见这时的 ϵ 值并非为最佳),分别进行第一次滤波和改进滤波。然后分别计算得到各自的均方误差为 $E_{WMS} = 20.43$ 与 $E_{MWMS} = 16.68$,相对误差降低了 18.36%。

该结果说明当取不同的 ϵ 值时,对传统的维纳

滤波影响较大(第一步滤波),但对二次滤波结果影响不大。这说明本文提出的二次(改进的)滤波方法能够将第一次滤波时所造成的误差在一定程度上“矫正”过来,使得最终结果得到改善,同时该方法又对参量的选择有一定的鲁棒性。

3.2 实际编码图像的解码重建

本节给出实际惯性约束聚变编码成像实验中的解码重建结果。在惯性约束聚变实验中,应用的编码环内直径是 $1000 \mu\text{m}$,环宽 $5 \mu\text{m}$,将其装置在环形编码孔径显微镜上,对准贴有网状钨丝的靶标。当靶标发生激光聚变时发出的 X 光使钨丝发光,通过环形编码孔径成像,得到网格状钨丝的编码图像。实验中,编码图像采用 X 光底片拍摄,再经扫描仪转变成数字图像。扫描仪的分辨率为 2400 dpi,物像的放大率为 10。图 6(a)是原编码(退化)图像。首先对该图像做第一次滤波,在第一次滤波中仍然是通过计算相对误差 $E_R(\epsilon)$ 来选取参量 $\epsilon = 0.4$ (见图 7),第一次滤波恢复结果如图 6(b)所示。然后在此基础上进行第二次滤波得到改进的恢复结果,如图 6(c)所示。由图 6(c)可以看到原靶标的网状钨丝结构,而图 6(b)则比较模糊,这充分表明本文提出的改进滤波方法对重构图像的质量有明显的改善。

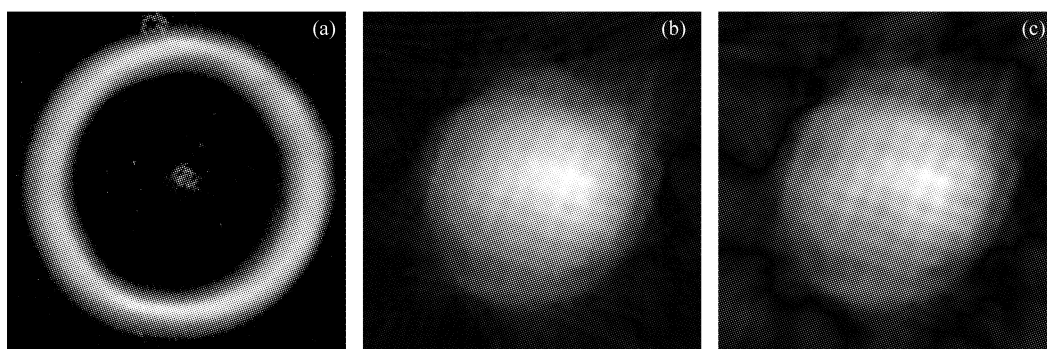


Fig. 6 Restoration results of actual ICF coded image in experiment 1. (a) Actual ICF coded image, (b) Result of traditional Wiener filter, (c) Result of modified Wiener filter

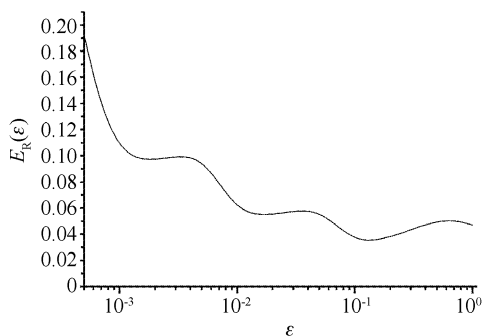


Fig. 7 Relative errors of restored images in ICF
在另外一个惯性约束聚变实验中,所用的靶标

是三根平行的钨丝,编码环环内直径是 $1000 \mu\text{m}$,环宽 $4 \mu\text{m}$ 。实验中,物像的放大率为 8 倍。图 8(a)是原编码(退化)图像。首先对该图像做第一次滤波,参量 ϵ 的选取与上例中的方法相同, $\epsilon = 0.1$,第一次滤波结果如图 8(b)所示。然后在此基础上进行第二次滤波得到改进的恢复结果,如图 8(c)所示。由图 8(c)可以看到原靶标图像上有明显的栅格结构,图中三根彼此平行的亮线是钨丝所处的位置。而图 8(b)则不如图 8(c)清楚。从而再次验证了改进算法对恢复图像质量的改善作用。

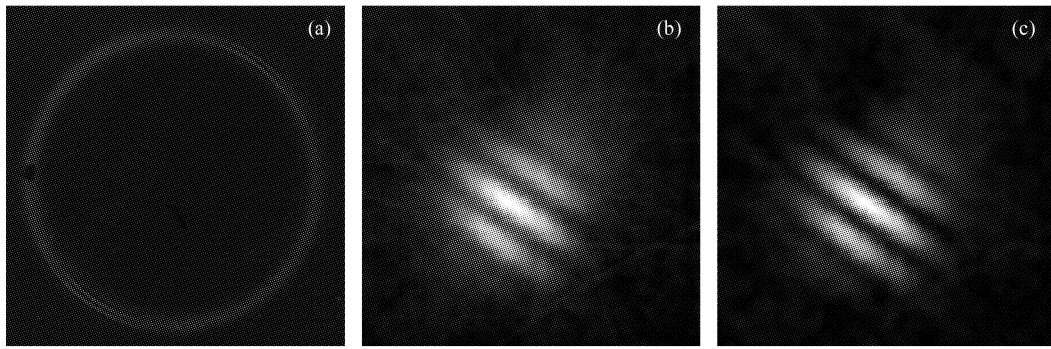


Fig. 8 Restoration results of actual ICF coded image in experiment 2. (a) Actual ICF coded image, (b) Result of traditional Wiener filter, (c) Result of modified Wiener filter

结论 在传统的图像维纳滤波方法中,通常是用某一常量来代替其中的噪声与信号的功率谱之比,这种近似忽略了信号和噪声本身所具有的信息,使得滤波结果趋于平滑,图像质量不高。为克服这一缺陷,本文在利用图像和噪声本身信息上提出了解决措施,提出一种二次滤波方案:首先采用传统维纳滤波方法得到原图像的初次估值,然后利用该估值结果得到原信号和噪声的谱密度的估值,进而构成新的维纳滤波器进行第二次滤波。此外,为有效地实施第一次滤波,本文对传统维纳滤波公式中的信噪比参量的确定问题,提出了一种通过计算相对误差来确定该参量的实用算法。针对所提出的改进方法,本文进行了大量的计算机仿真实验,并对实际的惯性约束聚变编码图像进行了解码恢复实验。结果表明,采用该方法使图像恢复的效果有较为显著的改善。同时由文中内容可知,该方法亦可以推广到其他(例如点扩展函数已知)的图像恢复问题中。

致谢 本项工作得到国家 863 计划和中国工程物理研究院的资助。中国工程物理研究院的曹磊峰博士提供了部分惯性约束聚变编码成像数据。对此作者表示感谢!

参 考 文 献

- 1 Sun Kexu, Yi Rongqing, Huang Tianxuan. Reflectivity calibration of soft X ray planar mirror in the BSRF. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3): 379~382 (in Chinese)
- 2 Hu Jiasheng, Cheng Lihong, Xie Cun *et al.*. Experimental research of ring-coded aperture microscope (RAM) in X-ray imaging technology. *J Dalian University of Technology* (大连理工大学学报), 2000, **40**. S1: 104~108 (in Chinese)
- 3 Ress D, DaSilva L B, London R A *et al.*. Novel X-ray imaging methods at the Nova laser facility (invited). *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(1): 579~584
- 4 Jiang Shaoen, Zheng Zhijian, Liu Zhongli. Study of pinhole array scan imaging system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(4): 573~574 (in Chinese)
- 5 Ress D, Ciarlo D R, Stewart J E *et al.*. A ring coded-aperture microscope for high-resolution imaging of high-energy X rays. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 5086~5088
- 6 Cheng Jing, Han Shensheng, Xu Zhizhan. The iterative algorithm of digital reconstruction of coding imaging. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(10): 1349~1354 (in Chinese)
- 7 Xie Cun, Hu Jiasheng *et al.*. A coded-decoded imaging method in optical-electronic imaging. *J. Optoelectronics Laser* (光电子·激光), 2001, **12**(10): 1064~1067 (in Chinese)
- 8 Zou Mouyan. *Deconvolution and Signal Recovery* (反卷积和信号复原). National Defence Industry Press, 2001. 185~189 (in Chinese)
- 9 Oppenheim A V, Schaffer R W. *Digital Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1975. 532~571
- 10 Hillery A D, Chin R T. Iterative Wiener filters for images restoration. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, **39**(8): 1892~1899
- 11 Castleman K R. *Digital Image Processing*. Zhu Zhigang Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 325~329 (in Chinese)