

模拟激光等离子体软X射线成像的光学处理方法

张国栋

(东北师范大学物理系)

Optical processing method of soft X-ray emission from
analogue laser-produced plasmas

Zhang Guodong

(Physics Department, Northeast Normal University, Changchun)

提要: 本文报道了一个软 X 射线 URA(uniformly redundant arrays) 编码孔成像的光学图像处理方法。利用相干光学解码图像处理技术给出了模拟靶图像。

关键词: 编码孔成像, 均匀冗余阵列

一、引言

激光引发核聚变是通过聚爆产生高温高密度等离子体来实现的。激光产生等离子体的电子温度位于这样一个区域, 它的辐射主要是在软 X 射线区域。对 X 射线的成像诊断可以提供被压缩激光靶的形状、尺寸等信息^[1]。我们这里研究的是关于模拟激光等离子体放射 X 射线, 用 URA 编码孔照相记录, 编码图像用光学方法处理恢复原目标图像。

已有单针孔相机和非涅耳带板解决 X 射线成像问题。然而单针孔相机光孔面积小, 透光效率低, 信噪比低; 非涅耳带板法成像比单针孔相机成的像亮得多, 但它有产生重构赝像缺点。为了获得较高空间分辨率, 非涅耳带板通常置于距靶目标约 1 cm 处, 这样它占据较大的空间立体角, 对设置多种探测仪器不利。

编码孔成像是指用一定图形的多针孔代替简单的单针孔成像。Fenimore 和 Cannon 对 URA 编码孔成像用计算机模拟重构给予了具体的叙述^[2]。G. Yamanaka 等人进一步对已制成的 URA 编码相机用于惯性约束聚变实验得到了 X 射线源编码图像的数字图像处理结果^[3]。URA 编码成像有许多优点, 首先编码孔数目可以选择达几千个, 因而它具有较大的信号收集面积, 如果有 N 个孔, 那末相对于单针孔相机信噪比有 \sqrt{N} 倍改善; 其次 URA 编码的自相关函数近似于 δ 函数, 这对于一个平面目标在编码像的重构成像中没有赝像; 以及 URA 编码成像与非涅耳带板成像一样也具有层析能力。

我们采用 URA 编码方法, 编码孔数选为约 1800 个, 对模拟 X 射线源目标字母“L”进行编码记录, 将所得到的编码像作相干光学处理恢复目标字母 L 像。

收稿日期: 1988年2月1日。

二、URA 编码的数学模型

把长度为 $n=2^m-1$ 的二元序列称为赝随机序列或 m 序列。其中 m, n 为正整数, 二元是指序列中元素为 0 或 1。构成赝随机序列需要一个 m 次多项式。当规定了一个反馈记录时, 反馈移位寄存器将输出一个无限序列。除去序列中全部为零的状态, 无限序列的最大可能周期是 2^m-1 [4]。

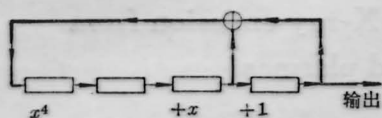


图1 多项式 x^4+x+1 的反馈移位寄存器

为简便起见, 以 $n=15$ 为例说明赝随机序列。 $n=15$ 对应的多项式为 $h(x)=x^4+x+1$, 由图1右面输出得到赝随机序列为 000100110101111。设有一长度为 n 的赝随机序列 $S_0, S_1 \dots S_{n-1}$, 若自相关函数 $\rho(\hat{i})$ 为

$$\rho(\hat{i}) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} S_j \cdot S_{j+\hat{i}}^+, \quad \hat{i} = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (1)$$

“+”表示复共轭。对于 $n=15$ (如图2所示) 那末有

$$\rho(0) = 1, \quad \rho(\hat{i}) = -\frac{1}{15}$$

对于 $1 \leq \hat{i} \leq 14$,

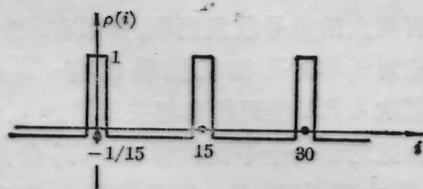


图2 $n=15$ 的赝随机序列的自相关函数

把上述一维赝随机序列推广到平面二维赝随机点分布阵列, 即得到我们称为的 m 序列 URA 编码分布。对于 $n=2^m-1=n_1n_2$, n_1, n_2 互为质数的二维赝随机点分布, 它的自相关函数为:

$$\rho(0, 0) = 1, \quad \rho(\hat{i}, j) = -\frac{1}{n},$$

$$0 \leq \hat{i} < n_1, \quad 0 \leq j < n_2, \quad (\hat{i}, j) \neq (0, 0), \quad (2)$$

这里使用的二维赝随机点分布是通过多项式 $h(x)=x^{10}+x^3+1$ 的反馈移位寄存器输出二维 $n_1 \times n_2 = 31 \times 33$ 阵列。它以 2 个周期形式沿水平和垂直方向扩展便成为我们选用的编码图形。实验中制作了单元方孔尺寸为 $20 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m}$ 二种, 相邻两孔中心间距均为 $50 \mu\text{m}$ 的金膜 URA 编码板, 二种金膜编码板大小均为 $3.1 \times 3.3 \text{mm}$ 。图3为 URA 编码图。图4为金膜编码板的扫描电子显微镜局部放大照片。

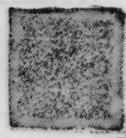


图3 m 序列 31×33 的 URA 编码图, 整个图形尺寸为 $3.1 \text{mm} \times 3.3 \text{mm}$



图4 $30 \mu\text{m}$ 方孔的扫描电子显微镜局部放大照片

应该指出 URA 编码是在随机编码和无冗余 (nonredundant arrays) 编码基础上发展来的, 它兼有随机编码的高透射性和无冗余编码自相关函数的平缓旁瓣优点, 它改进了随机编码固有噪音限度问题及无冗余编码孔数量不容易多选问题, 因此它是一种比较好的编码方式 [5]。

三、编码孔成像的光学处理

URA 编码像的光学图像处理是基于非

相干光的编码成像记录及相干光的解码光学图像处理。对于 X 射线的编码孔成像, 衍射效果可忽略。为方便起见取编码孔阵列中三个孔说明其成像原理。如图 5 所示, 设有一非相干发光(或 X 射线)源 L , 它的强度分布函数是 $f_0(x, y)$, P 为多针孔编码板, 在保持线性成像系统成立的 M 处, 像 $g_M(x', y')$ 强度分布为

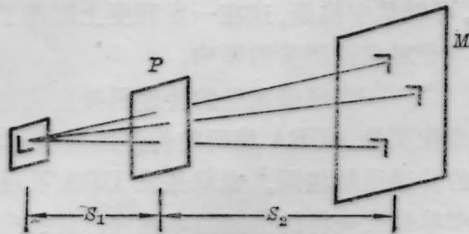


图 5 非相干光多针孔成像示意图

$$g_M(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} f_0(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy \quad (3)$$

式中 $h(x' - x, y' - y)$ 是编码成像系统的点扩散函数。把 (3) 式记为

$$g_M(x, y) = f_0(x, y) \otimes h(x, y) \quad (4)$$

\otimes 表示卷积。

将胶片上记录强度分布 $g_M(x', y')$ 图像印制在干板上并满足 $g_0(x_1, y_1) = k g_M$, 式中 $g_0(x_1, y_1)$ 是干板的振幅透过率分布函数, k 是比例常数。图 6 是相干光学消卷积图像处理系统示意图。由图 5 如在 L 处放一点光源, 可得到成像系统的点扩散函数, 它就是编码板 P 的编码图形以物距 S_1 像距 S_2 的几何比例放大 $[(S_1 + S_2)/S_1]$ 倍。将它放入图 6 的 P_1 平面中成为 $h(x_1, y_1)$ 。左面用平行的相干光照明。相干参考光是以 θ 角入射到 P_2 平面的单位振幅平面波, 在 P_2 面用全息技术记录 $|1 + H(u, v)|^2$, 将它作为振幅滤波器放在 P_2 面^[6]。

$$|1 + H|^2 = 1 + |H|^2 + H + H^* \quad (5)$$

其中 $H(u, v)$ 为 $h(x_1, y_1)$ 的傅里叶变换,

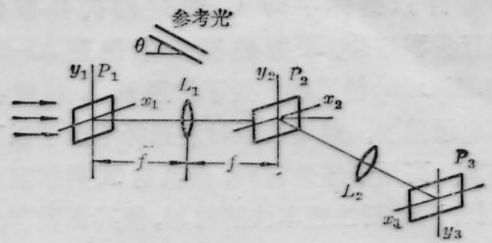


图 6 相干光学解码成像系统示意图

u, v 为 P_2 平面频率域坐标, $u = x_1/\lambda f, v = y_1/\lambda f, \lambda$ 为相干光波长, f 为傅里叶变换透镜 L_1 和 L_2 的焦距。将振幅透过率分布 $g_0(x_1, y_1)$ 置于光路中 P_1 面, 在滤波器后面的空间光分布为

$$G(|1 + H|^2) = G(1 + |H|^2) + GH + GH^* \quad (6)$$

$G(u, v)$ 是 $g_0(x_1, y_1)$ 的傅里叶变换。它由傅里叶变换透镜 L_1 对 g_0 作傅里叶变换在 P_2 平面得到。由成像关系的傅里叶变换有

$$G(u, v) = F(u, v) H(u, v) \quad (7)$$

$F(u, v)$ 是目标物光分布 $f_0(x_1, y_1)$ 的傅里叶变换。在 P_2 面后面沿 θ 角方向分离出一项

$$GH^* = FHH^*, \text{ 因 } HH^* = 1$$

所以

$$GH^* = F \quad (8)$$

此项经过傅里叶变换透镜 L_2 , 在 P_3 平面上得到字母 L 的目标图像 $f_0(x_3, y_3)$, 此图像大小取决于比值 S_2/S_1 。

四、实验结果及讨论

使用 1 m 长 He-Ne 激光器, 波长为 632.8 nm。傅里叶变换透镜 L_1, L_2 的焦距为 500 mm, 相对孔径为 1/10。物光与参考光夹角 $\theta \approx 10^\circ$ 。对编码孔单元尺寸 20 μm 和 30 μm 二种情况作了相干光学处理。选择 $S_1 = 30 \text{ mm}, S_2 = 90 \text{ mm}$, 实验中使用天津三号 X 射线感光胶片作卷积记录, 用 I 型全息干板作光学处理。

利用低功率超软 X 光源^[7] 放射 X 射线

照明目标物体字母 L, 通过编码孔成像进行卷积记录, X 射线源使用铝靶 Al-K α (0.834nm) 特征线。为了扩展软 X 射线波段记录范围, 对编码板材料选择考虑了以下方面: 高原子序数材料, 使其对 X 射线衰减较快; 离子刻蚀速率快的材料, 使其薄膜容易达到一定厚度; 一定的机械强度材料, 使编码板自身能承受支撑, 以及要求获得薄膜材料的工艺性要好, 选择了金。当膜层厚 8 μ m, 金膜对 0.04nm X 射线波长透过率为 69.4%, 对 0.1nm 透过率为 2.2%。使用铝靶时对灯丝加热产生可见光部分, 用铝膜滤光片挡住可见光部分让 X 射线通过。

图 7 是在图 5M 处获得的卷积像, 图 8 是在图 6 系统中获得的消卷积结果图像。



图 7 由图 5 获得的 X 射线卷积记录像

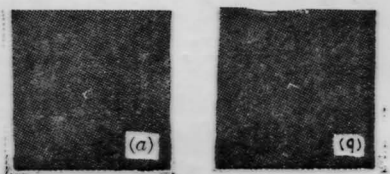


图 8 相干光学解码处理结果恢复像

(a) 方孔尺寸 20 μ m 的结果;
(b) 方孔尺寸 30 μ m 的结果

五、讨 论

(1) 当物距一定时编码孔数愈多, 则一部分编码孔偏离中心轴愈远。我们选用的物距比较 C. Yamanaka 等人选用的物距 150mm 近很多, 这样使目标对编码板张的立体角增大。编码板的厚度与小方孔尺寸可以相比较, 增大射线倾斜入射角使得小方孔作为分辨单元不够准确及对卷积记录会产生不利因素。如果要增加物距而又保持系统分辨率不变, 那末必须增加像距或者缩小单元

小孔尺寸。增加物距和像距促使对接收底片性能和射线源强度要求提高。合理的选择应该视具体情况适当兼顾来确定。

(2) 作者对编码孔尺寸不同的二种情况得到了一致的处理结果, 说明 URA 编码方式的光学图像处理是可行的。相干噪音是影响成像质量的重要因素, 由于 URA 编码具有周期特性, 光学处理恢复 L 字母像有许多个, 可以从中挑选, 这在一定程度上回避了相干噪音对成像质量的影响。

(3) 一个成像系统的传递函数表征物体的成像质量。URA 编码的传递函数和单针孔的传递函数相同, 也就是说 URA 孔径具有和单针孔一样的空间频率响应, 针孔愈小空间分辨率愈高。我们设计的物体字母 L 长度为 100~500 μ m, 长度与笔划宽度之比约为 8:1。由单针孔的成像情况可以看出缩小 URA 编码孔单元尺寸有改进的余地。

(4) 最后指出由于金膜编码板的制备, 使得编码板图形上面有一些小方孔疵病; 编码孔刻蚀剖面呈现不同的喇叭口形状; 二块编码板的单元方孔尺寸一致性方面也存在偏差, 这些因素对相干光学处理恢复目标像不可避免地带来影响。通过实验作者认为对编码图形的比例放大误差控制在 1% 为宜, 滤波器的转动配准精度在小于 2 $^\circ$ 范围内调整。

对上海冶金所傅新定等制作金膜编码板表示感谢。

参 考 文 献

- 1 徐至展 *et al.*, 激光核聚变译文集, 原子能出版社, 1979, 306
- 2 E. E. Fenimore, T. M. Cannon, *Appl. Opt.*, **17** (3), 337 (1978)
- 3 C. Yamanaka *et al.*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **NS-31** (1), 4909 (1984)
- 4 F. Jessie MacWilliams *et al.*, *Proc. IEEE*, **64** (12), 1715 (1976)
- 5 E. E. Fenimore *et al.*, *Proc. SPIE*, San Diego, California, **149**, 232 (1978)
- 6 G. Groh *et al.*, *Appl. Opt.*, **11** (4), 931 (1972)
- 7 杨名格, 光学机械, (3), 25 (1987)