

# 软X射线均匀冗余编码(URA) 像的光学重构处理

董玉芝 高清峰 张国栋

**摘要:** 本文简要介绍了URA编码孔径成像技术。着重讨论了URA相机所获得的重叠像的光学处理方法, 得到了实验的和实际的处理结果, 并对图像质量进行了必要的分析和评价。

## 一、引言

为了更好地分析激光加热等离子体核聚变的物理过程, 需要得到尽可能多的各种信息, 图像信息是必不可少的。然而, 众所周知的事实是X射线不能像可见光那样被介质折射、反射及衍射, 因为各种材料对X射线而言, 折射率都略小于1, 而且软X射线又极易被各种介质(包括空气)所吸收。研究新的成像技术势在必行, 人们首先利用的是简单易行的小孔成像原理, 早期它在核聚变及核医学中得到广泛而有效的应用。但它的分辨本领严格受到孔的大小的限制, 要提高分辨率必须减小小孔的尺寸, 而减小孔的尺寸会导致集光立体角的减小, 这样光通量就可能不够。编码成像技术正是在解决这样的问题时。可以起到重要作用。

六十年代初, *Mertz*和*Young*首先引入编码成像概念。1968年, *Dicke*将这种方法应用到X光天文成像上; 1972年*Barrett*等人将它用在医学上; 1975年, *Rose*等人用编码成像得到核子工程上的照片; 1977年*Ceglio*等人用这种技术得到惯性约束激光核聚变的软X射线像。

人们在发展编码孔径成像技术的过程中, 利用了几种孔径编码形式, *Mertz* 1965年首次用了*Fresnel*带板, 1968年*Dicke*提出用非均匀孔径编码(*NRA*), 1978年*Fenimore*和*Cannon*发明了用均匀冗余编码(*URA*)

成像, 虽然他们使用不同形式的孔径编码, 但都是二步成像过程。如图1所示, 第一步是形成光源(物体)的编码图, 即物体发出的X射线通过编码板的每一个孔, 都形成物体的单针孔像, 这些像叠加记录到底片上, 得到物体的卷积像; 第二步是物体像的重构或称解码, 这一步可以通过数字计算机, 也可以用光学模拟计算方法完成, 得到物体的像。用光学方法进行象重构需要做系统的点扩散函数, 用它得到全息相关滤波器, 它与物体卷积像相关, 得到需要的目标像。

编码孔径成像技术, 特别是均匀冗余编码(*URA*)技术, 与单针孔成像比较有很大优点, 它的最大优点在于可以大幅度地提高信噪比, 因为它是*N*个单针孔的总和效果, 达到用

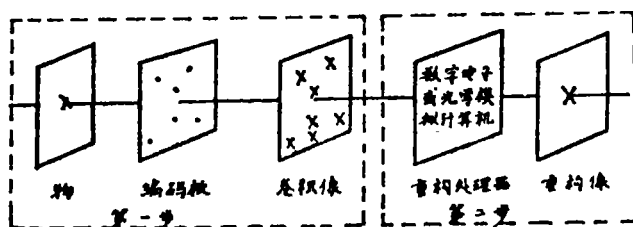


图1 编码成像过程示意图

小针孔得到大通量，从而使弱目标辐射信息可以被记录，其信号强度决定于编码孔径的个数，粗略认为信噪比可提高 $\sqrt{\frac{N}{2}}$ ， $N$ 可以达到 $10^{+6}$ ，即得到的信号强度可以成数量级的提高，均匀冗余编码(URA)的另一个优点是成像记录系统的点扩散函数可以做成 $\delta$ 函数，这样在重构像的过程中，物体的像平面没有鬼像，这就明显优于 Fresnel 带板及非均匀孔径编码(NRA)；均匀冗余编码与其它几种编码方法一样具有层析能力，我们采用的均匀冗余编码的层析能力，由于它的随机特性，好于其它编码方法的层析效果。

在我们的研究工作中，根据均匀冗余编码阵列(URA)技术研制成多针孔相机、光学和数字图像重构处理系统，编码相机中编码板的针孔尺寸为 $30\mu\text{m}$ 乘 $30\mu\text{m}$ ，间隔 $20\mu\text{m}$ ； $20\mu\text{m}$ 乘 $20\mu\text{m}$ 、间隔 $30\mu\text{m}$ 两种。卷积像记录倍率为2倍、3倍、4倍，相机的记录部分为四暗盒磁控转鼓式。卷积像重构光学模拟计算机(即光学处理系统)为付氏变换及逆变换系统，分辨率可达 $28.6\mu\text{m}$ ，图像畸变为1%左右，相关点信噪比为34:1，在相同条件下单针孔的信噪比为1:1，从而可见均匀冗余编码系统灵敏度明显优于单针孔相机。

## 二、基本原理

均匀冗余编码阵列(URA)成像过程，可以用数学形式表达。从物体上发出的软X射线经编码板后记录到胶片上，胶片上得到的投影图是物体信息与编码板的卷积，设 $P(x, y)$ 为卷积函数， $O(x, y)$ 为目标函数， $A(x, y)$ 为编码孔径函数，那么我们可以把记录到胶片上的信息表示成：

$$P(x, y) = O(x, y) \star A(x, y) + N(x, y)$$

$\star$ 为卷积，这里 $N(x, y)$ 为噪音函数。要得到物体的像，需要解卷积或相关处理，由于用光学方法解卷积较为复杂，噪音也不易消除，我们只考虑用相关方法做物体像重构，用这种方法得到像，则得找到一个函数 $G(x, y)$ ，当 $A(x, y) \star G(x, y)$ 为 $\delta(x, y)$ 函数时，才能达到目的，设 $\hat{O}(x, y)$ 为重构像，那么：

$$\begin{aligned} \hat{O}(x, y) &= P(x, y) \star G(x, y) \\ &= O(x, y) \star A(x, y) \star G(x, y) \\ &\quad + N(x, y) \star G(x, y) \\ &= O(x, y) \star \delta(x, y) + N(x, y) \star G(x, y) \\ &= O(x, y) + N(x, y) \star G(x, y) \end{aligned}$$

用数字计算方法与光学方法模拟计算均可找到 $G(x, y)$ ，但数学方法较光学方法更容易找到理想的 $G(x, y)$ 函数，而光学方法总是伴随着噪音，但也是可以较完善地重构物体的像。

## 三、光学重构

我们的光学重构过程是对两种不同方式取得的卷积像进行处理的，即卷积像记录用两种目标(软X光源)。一种是用铝(Al)直流靶源，它发出波长为 $8.4\text{\AA}$ ，物体是在6微米厚的金膜上刻蚀长 $0.5\text{mm}$ ，宽 $0.4\text{mm}$ ，透光部分为 $0.06\text{mm}$ 宽的字母“L”，做为模拟目标，记录

装置安排如图 1 的第一步, 光源与目标的距离以实现目标“ $L$ ”为面发光子光源为准, 目标到编码板的距离为 27mm, 编码板到底片的距离为 81mm, 108mm, 即卷积像放大了三倍, 四倍两种。编码板上小针孔尺寸为  $30\mu\text{m}$  乘  $30\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$  乘  $20\mu\text{m}$  两种, 我们的编码板为均匀冗余编码阵列, 它是由伪随机序列, 即  $m$  序列折迭而成的 (见本期“ $URA$  编码及编码像的积计算重构”一文)

记录卷积像的胶片, 按  $r = 2$  进行冲洗处理的, 以保证胶片满足复振幅平方转换定律, 这样的卷积像胶片是重构处理的“目标”。

这次研究的最后阶段, 用激光加热空心靶, 做了同样的记录, 并对结果做了同样的处理。

如前所述, 要得到满意的重构目标像, 首先要找到  $G(x, y)$  函数, 以便做相关处理。按一般方法, 用点  $X$  射线源作为目标, 将编码板投影到底片上, 当然投影倍率要满足卷积像记录时的条件, 以便保证得到的  $G(x, y)$  函数能真正消除卷积像记录时点扩散的影响, 正因如此,  $X$  光源要足够小, 这就使得曝光时间很长, 底片的信噪比低, 这样就会带来较大误差。在研究中我们对点扩散函数  $A(x, y)$  进行分析认为, 如果不采用点  $X$  光源, 可以达到同样的目的, 所以我们用另外的办法取得了  $G(x, y)$  函数, 它是以模拟点源记录时的情况, 将编码板用达到衍射极限的高质量镜头放大到卷积像记录时的倍率, 事实证明, 这样做效果是好的, 方便灵活, 省时省力。

在像重构处理时, 重要的部件是全息相关滤波器, 它决定了  $A(x, y) \star G(x, y)$  是否为好的  $\delta$  函数, 也就是说物体能否被完善重构主要取决于它, 我们知道, 在制做付氏变换全息图时, 在付氏变换镜头的前焦面放目标  $G(x, y)$ , 它与平面参考波在付氏变换镜头的后焦面上记录到付氏变换全息图, 这个全息图的强度分布可以表示为:

$$\begin{aligned} E(x, y) &= |G(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= |G(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 \\ &\quad + G(x, y) \cdot R(x, y) + G(x, y) \cdot R(x, y)^* \end{aligned}$$

在  $r = 2$  显影定影后, 强度分布  $E(x, y)$  正比于全息板的振幅透过率, 我们记录的卷积像是含有噪音的信号图片, 用上述相关滤频片放在付氏镜头的后焦面, 经仔细进行位置调整, 达到  $A(x, y) \star G(x, y) = \delta$ , 从而经逆付氏变换后, 得到物体重构像。

我们的全息相关器如图 2 所示: 激光器发出的光经反射镜  $M_1$  后, 由分束器  $LS$  分成两部分, 经反射镜  $M_2, M_3$  后均被扩束。为了使扩束后的光为理想平面波, 我们采取先分光后扩束, 扩束后的光束应以满足卷积像记录片的视场为准。  $L_1$  路为平面参考波,  $L_2$  路为物光路,  $P_1$  是经翻拍处理的  $G(x, y)$  函数,  $P_2$  而置记录干板记录  $G(x, y)$  的付氏变换全息图。

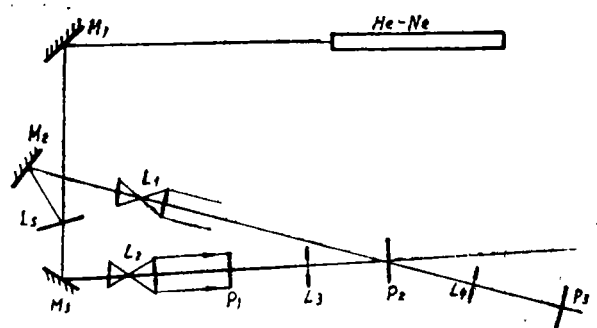


图 2 全息相关滤波器

好的全息相关滤波器应具有较高的衍射效率, 我们的研究证明物光束与参考光

束的比在谱面位置光强比为 1:1, 这时衍射效率最高。全息干板的质量对  $G(x, y)$  函数影响极大, 我们用了几种全息干板做对比实验, 最后使用天津 1 型全息干板及 Kodak 649 F 全息干板做全息相关滤波器, 选择再现后畸变小, 衍射效率高的为实际使用的全息相关滤波

器。全息相关滤波器的另外一个择优方法是将选好的全息相关片复位到记录面(谱面)  $P_2$ , 调整这个全息相关片, 使它与在  $P_1$  上的点扩散函数片相关, 相关输出大者为好。

上述工作完成后, 就可以做重构处理了。  $P_1$  面上换成目标的卷积像, 调整  $P_2$  上的全息相关滤波器, 在  $P_3$  面上就会得到重构的物体像。

### 四、实验结果

均匀冗余编码成像系统的好坏可以用下列质量指标判定: 1) 系统的分辨率与理论分辨率的差异; 2) 图象的信噪比; 3) 重构像的畸变的大小。

在我们研制的系统上, 不考虑衍射影响, 一般分辨率是这样确定的: 底片上一点对编码板上一个针孔的张角在物体上的投影为理论分辨率, 故它取决于单个针孔的大小及卷积记录时的倍率, 简单说来, 针孔小分辨率高, 卷积记录倍率高时分辨率也高, 但实际工作中还有许多其它因素, 使得人们不能无限地使针孔减小, 记录倍率也受到其它因素的制约。在不考虑衍射影响的情况下分辨尺寸为:

$$\Delta = d \left( 1 + \frac{1}{M} \right)$$

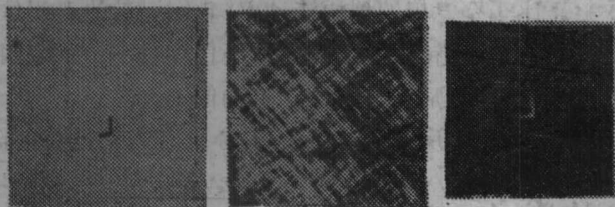
这里  $d$  为针孔尺寸,  $M$  为物体放大率。

我们的针孔尺寸为  $20\mu\text{m}$ , 放大率为 3 倍, 那么它的理论分辨率为  $26.7\mu\text{m}$ 。我们用三线目标做为测定分辨率的目标, 它是在金膜上用离子束刻蚀的, 线宽为  $28.6\mu\text{m}$ , 它同编码板的卷积记录像重构后, 线条清晰可分辨, 据此看来, 我们的系统分辨率可好于  $28.6\mu\text{m}$ 。

均匀冗余编码 (URA) 是可以大大地提高信噪比的。我们用测定信号及背景强度证实了这个结论, 对同样条件下拍摄的单针孔像及卷积记录的重构像做了测量, 单针孔像几乎与背景不能区别的时候, 即信噪比为 1 时, 而重构像的信噪比可达到 14, 我们还进行了另外的验证, 在激光核聚变靶室中, 将单针孔和均匀冗余编码相机同时放入, 在激光器能量为 0.6 焦

耳左右的条件下, 单针孔相机始终未得到空心靶的软 X 射线图像, 而均匀冗余编码相机得到了好的卷积像, 处理后得到空心靶的真实信息。

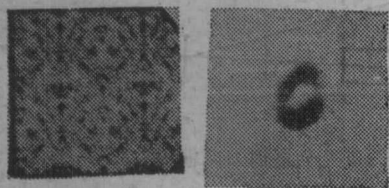
我们的均匀冗余编码相机及处理系统, 在满足激光核聚变产生的 X 光场的要求时, 系统畸变为 1% 左右,



a. 目标      b. 卷积像      c. 重构像

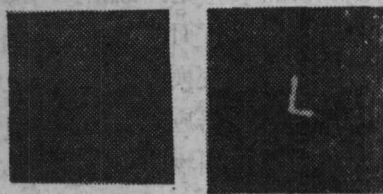
图 3 直流 X 射线源的目标卷积像重构结果

这对激光核聚变的物理过程的研究, 已能完全满足要求。



a. 卷积像      b. 重构像

图 4 空心靶的卷积及重构像



a. 单孔像      b. URA 重构像

图 5 单孔及均匀冗余编码相机得到的图像比较

## 五、结 论

我们的均匀冗余编码相机及处理系统已经成功地应用到激光核聚变的诊断上，它对聚变物理过程分析起到很大作用，分辨率接近理论值。

要提高这套系统的能力，在诸多方面还是有潜力的。提高它的分辨率最主要的手段是减小编码板上单个针孔的尺寸，现在的编码板最小针孔只做到  $20\mu\text{m}$ ，实际上做到边长几微米或直径几微米的孔也是可以记录到信息的，若这样，它的作用将更大。

如上所述，制做好的  $G(x, y)$  全息相关滤波片是至关重要的。我们采用的谱面上物光束与参考光束的强度比为 1:1，曝光时间 2~4 秒，利用高质量的全息干板，就得到了好的全息相关滤波器。

为补偿由于显影和定影后全息干板乳剂面不平引起的位相差，我们用折射率的匹配液体门，将全息相关滤波器及卷积像放入其中，减少了附加噪音，提高了重构像的信噪比。

为克服（减少）激光斑点的影响，在光路中加入平滑装置，我们是用毛玻璃达到这一目的。由于目标较小，要求毛玻璃颗粒度要小而且均匀，而且透光性能要好，我们是用最细金刚沙磨料研磨干板玻璃而成，在重构像光路  $P_1$  的前面几个毫米处加入这样的旋转毛玻璃，使得背景变得很平，从而提高信噪比。

总之，根据均匀冗余阵列（URA）编码技术研制的相机、光学和数字重构系统，性能是好的，是激光加热等离子体核聚变性能诊断的重要设备。

参加此项工作的还有胡家陞、赵宝庆、贾林贤和宫迅凯同志。

此项工作是在核工业部第九研究院二所的支持下进行的。工作进行过程中得到上海冶金所的傅新定同志及我所三室、九室、二室、检测中心等部门许多同志的大力帮助，在此向他们深表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] E.E.Fenimore et.al., Applied Optics 17 No3 P337 1 Febzuzzy 1978.
- [2] T. M. Cannon et. al., Applied Optics 18 No4 P1052 April 1979
- [3] C.Yamanaka et. al., IEEE Transaction on Nuclear Reieme Vol N531 No1 Febr. 1984  
P490
- [4] E. E. Fenimore et. al., Applied Optics, 18 No4 P945 April 1979

## Reconstruction Optical of Eoded Aperture Imaging of Sort-Ray with Uniformly Redundant Arrays(URA)

Dong Yuzhi Gao Qingfeng Zhang Guodong

### abstract

The URA coded aperture imaging technique is briefly introduced. The emphasis is on optical processing method of superpused images obtained by the URA camera. Experimental and practical results are given. Analysis and assessment on image quality are presented in the paper.