

X 光编码孔径成像和处理技术

胡家陞 董己芝 赵宝庆 高清峰
(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文论述了编码孔径成像的基本原理。讨论了孔径编码的方法和相机的制作,侧重于均匀冗余阵列(URA)的编码技术。介绍了编码孔径图像的光学处理和数字处理的研究成果。给出了实验和实际应用的结果。

关键词: X 光成像; 图像处理。

一、引 言

在高能物理及激光核聚变过程中,会有大量的超短波长的射线,特别是 X 射线辐射出来。研究和探测这些射线的方法和研制射线源的成像和处理设备,是十分重要的。

经典的单针孔成像是解决 X 光成像的最简便的方法。它的特点是分辨率高。然而,单针孔相机之所以能达到高分辨率,是因针孔小所致。因而,通光效率低,信噪比也低。如辐射强度小于一定的限度时就难以成像。为了改善这种状况,有人提出用菲涅耳带板来代替单针孔^[1]。带板所接收的辐射能量要比单针孔的多很多,但会产生虚构伪像,并降低了信噪比。而且为了获得较高的分辨率,菲涅耳带板的物距通常较短(1 cm 左右),这样就占据了较大的立体角范围,给其它多种探测仪器的放置带来了困难。

E. E. Fenimore^[2], C. Yamanaka^[3] 等人从理论上和实验上发展了编码孔径成像技术。现在这种技术已经成为 X 射线成像的主要手段之一了。

所谓编码孔径,就是用按一定规律排列的多针孔代替单针孔。其优点有:

1. 它保留了单针孔的高分辨率。而且由于开口总面积加大,收集 X 射线的能力成数量级地增加,可在弱 X 射线辐射下获得目标源的图像。

2. 信噪比高; 为单针孔的 $\sqrt{\frac{N}{2}}$ 倍, 其中 N 为针孔总数。通常针孔数在 1000~10000 个之间。

3. 可得到层析像。H. H. Barrett^[4] 指出: 离开孔径不同距离的物点成像在像面上, 形成不同大小的阴影。通过光学或数字处理可重构出不同深度的目标像。

4. 多针孔成像是一种两步成像过程。第一步是收集目标源的信息, 得到目标的重叠像。第二步是对所获得的信息进行重整和处理, 得到原目标的清晰像。这种两步过程在某种程度上给实时获取图像带来一定困难。但目前所知的编码孔径成像的应用领域对实时性并不作严格要求。

目前已出现几种孔径编码的方法,如随机阵列,非冗余阵列(NRA),均匀冗余阵列(URA)等。随机阵列的好处是通光量大,但自相关函数为高斯分布,相关噪声较大,并产生伪像。NRA的相关函数倒是 δ 函数。但其开孔数很少,接收的辐射能量有限,对弱辐射目标难以成像。

E. E. Fenimore等提出了URA的孔径编码技术^[5]。它兼有随机阵列和非冗余阵列的优点。在URA中,开口总数的面积大(约占编码板总面积的一半左右),接收到的辐射通量多,对弱射线源也可成像。另外,相关函数可实现 δ 函数,旁瓣平滑,信噪比高,滤波器也较容易实现。在我们的研究工作中,采用的就是URA制成的孔径编码板,在实际应用中得到了很好的结果。

二、编码孔径成像的基本原理

编码孔径成像是一种两步成像过程。第一步是用编码孔径相机尽可能多地收集目标源的信息,得到目标的重叠像。通常重叠像的个数等于编码板的针孔数。第二步是对重叠像进行重整和处理,以便恢复原目标的清晰像。其成像过程如图1所示。

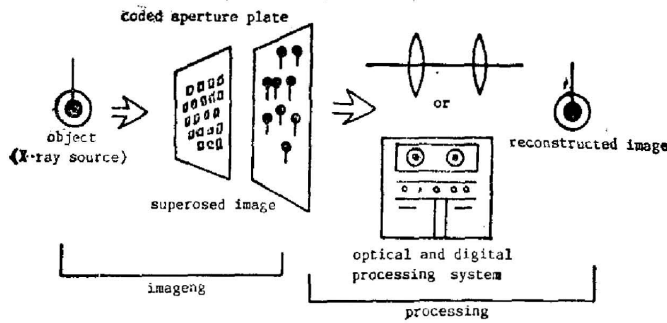


Fig. 1 Coded aperture imaging and processing

图1中,目标(X射线源)经编码孔径相机成一重叠像。然后用光学或计算机方法对所获得的重叠像进行处理,得到目标的清晰像。设目标函数为 $O(x, y)$,经编码孔径相机成像为:

$$P(x, y) = O(x, y) \otimes A(x, y) + N(x, y), \quad (1)$$

式中 \otimes 为卷积符号, $A(x, y)$ 为编码孔径的卷积函数, $N(x, y)$ 为无关噪音函数。 $P(x, y)$ 为重叠像函数。

有两种方法可以重构和恢复原始目标 $O(x, y)$ 。

1. 是解卷积方法

重构图像为

$$\hat{O}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[P(x, y)]/\mathcal{F}[A(x, y)]\} = O(x, y) + \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[N(x, y)]/\mathcal{F}[A(x, y)]\}, \quad (2)$$

式中 \mathcal{F} , \mathcal{F}^{-1} 分别表示傅里叶变换和逆变换。这种解卷积方法有一个缺点,即 $\mathcal{F}[A(x, y)]$ 具有非常小的项,甚至为零,旁瓣不平滑,噪音有奇异值,使得最后得到的重构像有时产生难以接受的噪音。

2. 是相关分析方法

重构图像是通过记录下来的重叠像与译码函数 $G(x, y)$ 的相关运算得到的:

$$\hat{O}(x, y) = P(x, y) * G(x, y) = O(x, y) \otimes [A(x, y) * G(x, y)] + N(x, y) * G(x, y) = O(x, y) + N(x, y) * (x, y). \quad (4)$$

这就避开了解卷积方法中所遇到的奇异值问题。因此在我们的光学和数字处理中采用的是相关方法。

三、URA 孔径编码和相机

由上面的分析知道,URA 优于随机阵列和 NRA。目前 URA 的方式有两种,一是二次冗余阵列^[5],二是 m 阵列^[6]。这两种排列形式都具有每个确定的间隔出现一对 1(或 1 对小孔)的次数相同,以及都具有无相关噪音和接收辐射通量大的特性。我们采用 m 阵列的排列方式。

URA 的 m 阵列是由 m 序列折叠而成的。 m 序列的定义:对于长度为 $N = 2^m - 1$ 的二进制伪随机阵列,存在一个 m 次模 2 的本源多项式 $h(x)$ ^[6],令 $h(x)$ 为

$$h(x) = h_m x^m + h_{m-1} x^{m-1} + \dots + h_0. \quad (5)$$

式中, $h_m = h_0 = 1$, $h_i = 0$ 或 1 , $0 < i < m$ 。任意给出 m 序列的前 m 个不全为零的元素,如设 $a_0 = a_1 = \dots = a_{m-1} = 1$,其它元素为

$$a_{m+n} = \sum_{i=0}^{m-1} h_i a_{n+i} \quad (6)$$

式中 $0 \leq n \leq N - m - 1$ 。此处求和为模 2 加法。对于所求得的 m 序列 $(a_0, a_1, \dots, a_{N-1})$,选取 k_1 和 k_2 ,使 $k_1 k_2 = m$,即 $N = 2^{k_1 k_2} - 1$,并使 $n_1 = 2^{k_1} - 1$ 和 $n_2 = N/n_1$ 为互质数,且都大于 1。例如选取 $m = k_1 k_2 = 10$,则可写成 $N = 2^{5 \times 2} - 1$,则 $n_1 = 2^5 - 1 = 31$, $n_2 = N/n_1 = 1023/n_1 = 33$ 。从而长度为 N 的 m 序列可以折叠成 $n_1 \times n_2$ 的 m 阵列。我们将 m 序列 $(a_0, a_1, \dots, a_{N-1})$ 依次添满 m 阵列的 $n_1 \times n_2$ 个元素。首先从主对角线开始,只要达到阵列的边界,就接着在对面一侧对角线方向继续,直到全部添满为止。例如长度为 15 的 m 序列 $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{14})$,折叠成 3×5 的阵列 A ,表示如下:

$$\begin{bmatrix} a_0 & a_6 & a_{12} & a_8 & a_9 \\ & a_{10} & a_1 & a_7 & a_{13} & a_4 \\ a_5 & a_{11} & a_2 & a_3 & a_{14} \end{bmatrix}$$

折叠过程可以用数字表示, m 序列的元素 a_i 放在 m 阵列 A 的第 I 行、第 J 列的位置上,作为 m 阵列 A 的元素 $A(I, J)$ 。这里 $I = \text{mod}_m i$, $J = \text{mod}_m j$ 。

m 阵列具有平衡性,它的元素由 2^{m-1} 个 1 和 $2^{m-1} - 1$ 个 0 组成。1 和 0 的个数几乎相同。且具有双值自相关特性。其自相关为

$$\sum_i \sum_j A(i, j) A(i+k, j+l) = \begin{cases} 2^{m-1} & \text{若 } \text{mod}_m k = 0 \quad \text{mod}_m l = 0, \\ 2^{m-1} & \text{其它值。} \end{cases}$$

如果按下式

$$G(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{若 } A(i, j) = 1, \\ -1 & \text{若 } A(i, j) = 0 \end{cases}$$

来选取阵列 $G(i, j)$,则 $A(i, j) * G(x, y)$ 为 δ 函数,即

$$\sum_i \sum_j A(i, j) G(i+k, j+l) = \begin{cases} 2^{m-1} & \text{若 } \text{mod}_m k = 0, \quad \text{mod}_m l = 0, \\ 0 & \text{其它值。} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $G(i, j)$ 为事后处理阵列。

我们用均匀冗余 m 阵列制作编码孔径板, 开口尺寸为 $20\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ 两种, 孔间距为 $50\ \mu\text{m}$, 照理, 开口尺寸应与孔间距相等, 我们这样做是为了解决编码孔径板的支撑问题, 因为多针孔板是在 $5\sim 6\ \mu\text{m}$ 厚的金膜上刻蚀而成的。有效的开口总数为 31×33 。图 2 是均匀冗余 m 阵列的实际分布情况。

在上述研究的基础上, 我们研制成可在真空靶室中工作的多功能编码孔径相机, 其结构如示意图 3 所示。

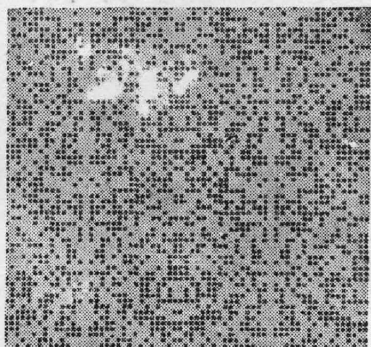


Fig. 2 An m -array coded aperture plate (31×33)

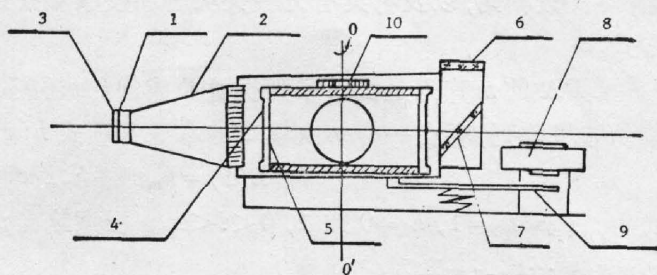


Fig. 3 The construction of the proposed coded aperture camera

图 3 中, 1 为编码板, 2 为锥形相机筒, 3 为针孔套, 4 为滤光片, 5 为记录胶片, 6 为分划板, 7 为可见光反射镜, 8 为电磁铁, 9 为吸片, 10 为拨条。为了使不可见的 X 射线源能在记录胶片上成像, 在该相机上装有可见光瞄准装置。为了使该相机能在真空室拍摄多幅照片, 减少调整环节, 记录胶片装置成四面体结构, 通过使四面体转动 90° 的方法可持续地拍摄四幅照片。用更换相机锥形筒的方法可改变相机的倍率和工作尺寸。大大地增加该相机的通用性和灵活性。图 4 为我们研制的编码孔径相机的实物照片。

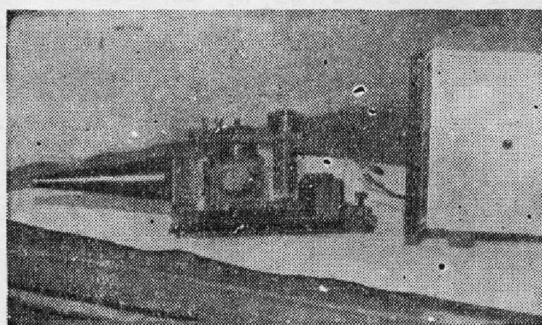


Fig. 4 The URA coded aperture camera

四、重叠像的重构和处理

用编码孔径相机所拍摄的重叠像表面上看是杂乱无章的。人们无法判读, 必须进行重构和处理, 以恢复原目标的图像。在某种意义上这是关键的一步。目前采用光学技术和数字技术来处理重叠像, 而且侧重于数字技术^[9, 7]。光学处理的结果至今未见详细报道。我们采用光学和数字方法对重叠像分别进行了处理, 均获得了令人满意的结果。

我们在 IBM PC/XT 和 PDP 11/23 上对目标的编码图像进行了译码处理。首先用摄像机使重叠像数字化, 采用平衡相关处理进行译码。对每个分辨单元采取 10×10 的细抽样, 经过 δ 译码的快速哈达玛变换获得了 X 射线源的重构目标像。

首先我们在实验室中进行模拟实验。用 URA 编码孔径相机拍摄直流 X 射线源的目

标“L”的重叠像，“L”尺寸为 0.47×0.34 毫米，线宽为 0.06 毫米。用数字方法在计算机上进行译码处理，得到很好的重构图像。与同等条件下用单针孔拍摄的图像相比较(如图 5 所示)，很显然，无论是分辨率还是信噪比，URA 成像和处理系统都比单针孔成像优越得多。

我们还在真空靶室中进行实地拍摄，目标为空心靶。同时用 URA 编码孔径相机和单针孔相机进行记录。由于辐射强度不够，单针孔相机没能拍下 X 射线源的图像，图 URA 编码孔径相机却记录了重叠像。经过数字译码处理，得到比较满意的重构图像，如图 6 所示。

我们在 IBM PC/XT 上编制了直方图，三维立体图及区域分布等图像处理软件，在与 PDP 11/23 联机的图像处理系统 M75 上，应用了相应的软件。对 X 射线源的重构图像作了进一步分析和处理，图 6(c) 就是空心靶的等值分割曲线。

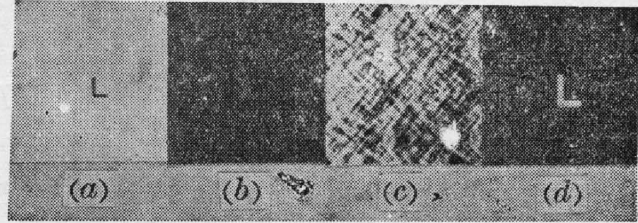


Fig. 5 The superposed image of DC X-ray source obtained by URA camera and digital processing result.

- (a) Object; (b) single pin-hole image;
(c) Superposed image obtained by URA camera;
(d) Digital processing result

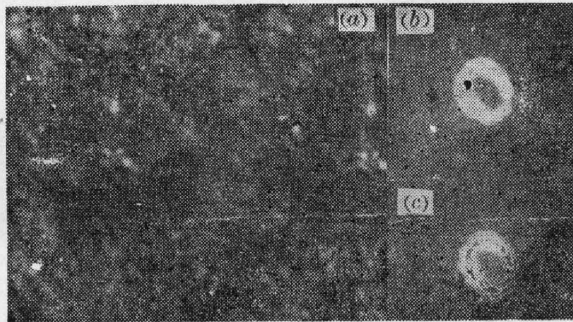


Fig. 6 Superposed image of an actual hollow object and result of digital processing

- (a) Superposed image of actual hollow object;
(b) Result of digital processing;
(c) Equalized-value curves

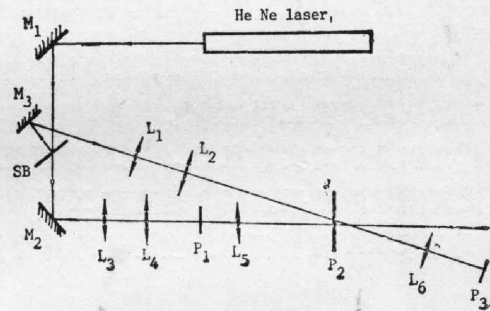


Fig. 7 Holographic correlation processor

我们用相干光学处理技术，也对重叠像进行了处理，得到了至今未见报道的好结果。在相干光学处理中，编码孔径板的点扩散函数的获取和全息相关滤波器的制作是关键，因为它决定了能否使 $A(x, y) * G(x, y)$ 成为符合要求的 δ 函数。当然，最好的方法是用 URA 编码孔径相机来实地拍摄理想的点 X 射线源的像。但是要找到尺寸非常小而又有足够辐射强度的点 X 射线源十分困难。为此我们采用替代办法，模拟点源记录时的条件，用高质量的物镜将编码板放大到与实地拍摄时相同的倍率。实验结果表明这样做的结果很好。

采用图 7 所示的装置来处理重叠像，He-Ne 激光器发出的光束经过反射镜 M_1 后，被分束器 SB 分成两部分，一束经反射镜 M_2 ，另一束经过反射镜 M_3 ，而后分别被 L_1L_2 和 L_3L_4 扩束并准直，使之成为平面波。 L_1L_2 形成的准直光束为参考波， L_3L_4 路为物光路。在 P_1 处 (L_5 的前焦面) 放置制作好的 URA 相机的点扩散函数 (PSF)，在透镜 L_5 的后焦面 P_2 处形成 PSF 的傅里叶变换。加入参考光束后，并相干记录，就得到了相关滤波器。当进行重构

处理时,在 P_1 处放置 URA 相机所获得的目标重叠像,在 P_2 处放置相关滤波器,那么经过认真的调整就会在 P_3 面上得到目标的重构像。用这种方法得到了与理论分辨率十分接近的结果。

多针孔和单针孔一样,其分辨率为(略去衍射效应)

$$\Delta = d \left(1 + \frac{1}{M} \right), \quad (10)$$

式中 d 为针孔尺寸, M 为系统放大率。该系统的针孔尺寸为 $d = 20 \mu\text{m}$, $M = 3$, 理论分辨率为 $\Delta = 26.7 \mu\text{m}$ 。我们对间距为 $28.6 \mu\text{m}$ 的三线测试目标成像和重构处理,得到清晰可辨的图象,如图 8 所示。可见与理论分辨很接近。

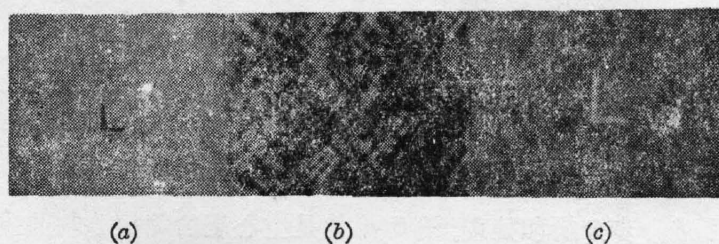


Fig. 8 Test of the system resolution

(a) The object with three lines; (b) The superposed image of the object;
(c) The image reconstructed by the optical processor

对信噪比也进行了实测,当单针孔所获得的图像的信噪比为 1 时,URA 相机的成像和处理系统的信噪比可达 14。

我们分别对实验室的 X 射线源直流靶和实际的真空靶的重叠像进行了光学处理,得到了比较满意的结果。图 9 是直流 X 射线源的重叠像和光学处理结果(L 尺寸同图 5)。图 10 是用 URA 相机得到的空心靶的重叠像和光学处理结果。

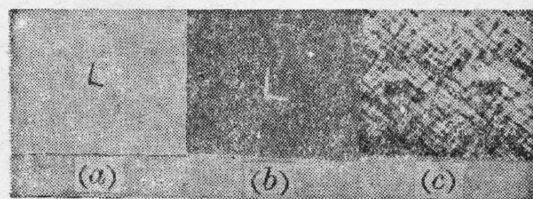


Fig. 9 Superposed image of DC X-ray source obtained by URA camera and optical processing result

(a) Object; (b) Superposed image;
(c) Reconstructed image by optical processing

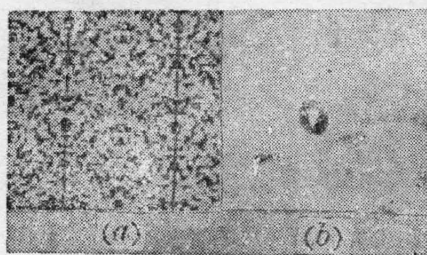


Fig. 10 Superposed image of actual hollow object and result of optical processing

(a) Superposed image of actual hollow object;
(b) Result of optical processing

参加本项工作的还有贾林贤、张国栋和宫迅凯同志。

该项工作中使用的 URA 编码孔径板是上海冶金所傅新定同志制作的,在此表示感谢。郑志坚、刘宗礼、张菊娣等同志对我们的工作给予了大力支持并提出一些很好的建议;于前洋、张宪英等同志也提出过很好的意见,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] L. Meriz; "*Transformation in Optics*", (Wiley, New York 1935), 80~101.
- [2] E. E. Fenimore and T. M. Cannon; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 10 (May), 1858~1864.
- [3] C. Yamanaka *et al.*; *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 1984, **31**, No. 1 (Feb), 490~494.
- [4] H. H. Barrett and F. A. Norrigan; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 11 (Nov), 2686~2702.
- [5] E. E. Fenimore and T. M. Cannon; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 3 (Feb), 337~341.
- [6] F. J. Macwilliams and N. J. A. Sloane; *Proc. of IEEE*, 1976, **64**, No. 12 (Dec), 1715~1730.
- [7] M. Yamanaka *et al.*; *SPIE*, 1982, **348**, 952~957.

Imaging and processing techniques of X-ray coded aperture

HU JIASHENG, DONG YIZHI, ZHAO BAOQING, GAO QINGFENG,
JIA LINXIAN, ZHANG GUEDONG AND GONG XUNKAI
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 24 September 1988; revised 12 December 1988)

Abstract

The basic principle of coded aperture imaging is described in this paper. Some methods of coded aperture and making of camera are discussed, with emphasis on the coded aperture technique of uniformly redundant array (URA). Investigative results of optical and digital processing on coded aperture image are presented. Finally, the experimental results and the examples of practical applications are given.

Key words: X-ray imaging; image processing.