

基于 MURA 编码孔径准直器核辐射成像系统设计

陈立宏^{1,2} 李勇平¹ 赵翠兰^{1,2} 袁超^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 具有位置分辨能力的辐射成像系统在许多领域如天文观测、放射源检测与监控、核能开发和生物医学等都有广泛的应用。设计了一套适用于远场成像的便携式新型辐射成像系统。系统采用由 LaBr₃ 晶体与 H8500 平面型位置灵敏光电倍增管组成的位置灵敏探测器,满足高分辨率的设计要求。同时为了获得更高的射线探测效率,准直器采用由钨铜合金制作的修正均匀冗余阵列(MURA)嵌套编码板。图像重建算法采用最大似然期望最大化(MLEM)统计迭代算法,能够有效地抑制系统统计噪声。测试结果表明,该辐射成像系统能够对远场放射源进行清晰成像,能够很好地满足分辨率与视场角的设计要求。

关键词 辐射成像, 准直器, MURA, 图像重建

中图分类号 TL75⁺1

近年来,备受关注与重视的核能开发、国土安全与核反恐国策,对核设施辐射安全、放射源(包括核燃料与废料)的检测与监控提出了更高的要求。不仅需要知道放射源剂量信息,还需要确定放射源的位置与强度分布,并且要能做到对放射源的远距离大面积可视化探测。传统的辐射探测设备只能近距离测量某个位置的辐射情况,对一定范围内的放射源进行精确定位则需借助多台设备联合测量,这样的操作不仅对工作人员自身健康不利,而且费时费力,有时还会受到现场情况和探测设备的限制,获得的放射源分布信息也十分模糊。因此迫切需要发展新型的核辐射检测分析技术及仪器设备。

编码孔径成像技术的不断发展为研制新型辐射成像设备提供了理论依据。该技术最早是由 Mert 和 Young 在 1961 年提出^[1],当时编码孔径采用菲涅尔波带板。虽然它与传统的单针孔相比光子采集效率要高很多,但是加工难度大且只有在菲涅尔波带板无穷大时才会具有较好的相关特性^[2]。之后数十年间有人相继提出随机阵列、非冗余阵列和均匀冗余阵列(URA),它们的相关特性逐步改善,且都具有各自的优缺点,其中 URA 阵列具有理想的相关特性,开孔率高(50%)且孔分布具有周期性,使得通过循环嵌套提高成像系统视场成为可能。1989 年 Gottesmen^[3]在 URA 的基础上提出了修正均匀冗余阵列,即 MURA 阵列。它兼顾 URA 阵列的所有优点,可以排列成方形使得加工与使用都更为方便^[4]。

我们致力于研究新型辐射成像技术,目前已开发出基于局域重心法定位的前端简化读出电路模块以及与之匹配的数据采集模块,具备开发高分辨率辐射成像设备的硬件平台。本文旨在硬件平台的基础上研究编码孔径成像及其图像重建算法,构建一套高性能辐射成像系统,用于便携移动式高分辨率放射源成像。

1 编码孔径成像原理

编码孔径成像是一种通过编码孔径来改善成像系统的传递函数,从而实现一定方式的像元组合技术。它是为了提高成像系统的信噪比从而在单针孔基础上发展起来的一种多孔成像技术。其成像的基本流程分两步,如图 1 所示。第一步是编码过程,放射源发出的射线经过编码板后在探测器上形成投影图像,即编码图像,它是射线经过编码板上每个小孔后在探测器上形成投影的叠加。第二步是解码过程,也称重建过程,编码图像在计算机中经过重建程序进行相应处理,就恢复出放射源分布图像^[3]。

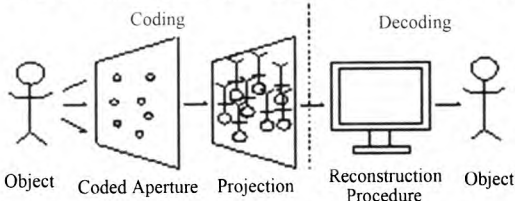


图 1 编码孔径成像的基本流程
Fig.1 Flow chart of coded aperture imaging.

中国科学院科研装备项目(Y2010034)和国家自然科学基金(11105209)资助
第一作者: 陈立宏, 男, 1987 年出生, 2013 年于中国科学院上海应用物理研究所获硕士学位, 核辐射成像系统
收稿日期: 2013-01-21, 修回日期: 2013-03-04

上述过程中编码板对放射源分布信息进行调制编码, 它在整个系统中起到至关重要的作用。编码板通常是一块布满小孔的金属板, 小孔的分布满足一定的规律且对应一个固定的解码矩阵。如果将编码矩阵记为 h , 解码矩阵记为 g , 则它们满足式(1)的数学关系^[4]。

$$h \otimes g = \delta \quad (1)$$

式中, $\otimes$ 为周期相关操作符。如果将探测器上投影记为 p , 放射源分布记为 f , 则编码过程表示成^[3]:

$$p = f * h' + n \quad (2)$$

式中, h' 为单点源经过编码板调制以后在探测器上的投影, 即系统的单点源响应; n 是编码过程中的统计噪声; $*$ 代表卷积操作。因此, 只需要研究出系统的单点源响应就可对系统编码过程进行描述, 而编码过程的准确描述又是图像重建的必要基础。

2 成像系统设计及实现

2.1 MURA 编码设计

编码板又称编码孔径准直器, 是辐射成像系统的核心组成部分。它的设计好坏直接影响到辐射成像系统的空间分辨率、灵敏度、信噪比(SNR)等重要技术指标。修正均匀冗余阵列(MURA)编码孔径准直器不仅具有 50% 的高开孔率与周期相关性, 而且在有限的几何尺寸下具有理想的相关特性^[4], 可以提高成像系统的灵敏度与射线收集效率, 减少系统的成像时间, 比较适合远场放射源成像。因此我们最终选取 MURA 作为成像系统编码孔径准直器。

视场与空间分辨率是衡量辐射成像系统的两个重要指标。我们设计的成像系统焦距 b (编码板到探测器的距离) 在 3–10 cm 范围内可调。在此基础上我们的设计目标是: 在 10 m 远处, 辐射成像系统视场达到 $\pm 10^\circ$ – $\pm 20^\circ$, 空间分辨率达到 1.1° – 2.2° 。经研究表明视场满足以下关系^[1]:

$$\theta = \arctan\left(\frac{d_m}{2b}\right) \quad (3)$$

式中, d_m 是编码孔径准直器的长度。系统空间分辨率是由成像系统几何分辨率和探测器固有分辨率共同决定的。而成像系统几何分辨率与对应的单针孔几何分辨率一致^[4], 故可以通过单针孔成像分辨率来确定成像系统几何分辨率。假设编码孔径准直器为一个单针孔准直器, 则系统几何分辨率^[4]:

$$\Delta\theta \approx \frac{p_m}{b} \quad (4)$$

式中, p_m 是单针孔的直径大小。结合焦距可调范围与系统设计目标, 利用式(3)与式(4)得到 $d_m=34.5$ mm, $p_m=1.8$ mm, $d_m/p_m \approx 19$ 。因此我们在成像系统中使用小孔大小为 1.8 mm 的 MURA19×19。

同时考虑到 LaBr₃ 晶体探测器的有效面积有限 (~39 mm), 为能够让探测器能够有效地接收到来自编码板的投影, 我们通常将编码板进行周期扩展^[3], 即利用 MURA 编码孔径准直器的周期相关性, 将 MURA19×19 向四周各延拓一个周期, 使得 4 个 MURA19×19 循环周期排列, 基本单元阵列 MURA19×19 嵌套在编码板的中心, 得到嵌套 MURA37×37, 如图 2 所示。

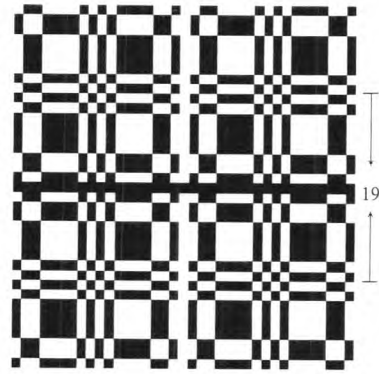


图 2 嵌套 MURA37×37 结构示意图
Fig.2 Schematics of mosaicked MURA37×37.

2.2 重建算法设计与实现

图像重建的主要任务是对探测器上得到的编码板投影进行适当的处理, 从而恢复出放射源的分布图像。对于编码孔径成像系统, 早期的图像重建算法主要采用傅里叶变换法与相关解码算法。前者会放大系统噪声, 容易出现病态特性^[6]。后者虽然重建速度较快, 但是不能有效地抑制统计噪声, 因此重建图像的质量并不理想。近年来统计迭代算法在图像重建领域得到广泛应用, 它属于一种建立在统计学模型上的数值逼近算法, 能够对图像形成物理过程中的统计涨落进行有效地描述, 因此能够有效地抑制系统统计噪声, 提高重建图像质量^[6]。

最大似然-期望最大化(MLEM)迭代算法就是建立在泊松统计模型上一种参数估计方法。它将放射源衰变过程以及探测器接收射线过程都用泊松分布进行描述, 能有效抑制泊松噪声。对于编码孔径二维成像, 它可以表述成^[5]:

$$f^{k+1} = f^k \times \left(\frac{p}{f^k * h'} \otimes h' \right) \quad (5)$$

式中, f^k 是第 k 次迭代后放射源分布图像估计值; p 表示探测器上得到的真实投影; h' 是系统的单点源响应, 也称作点扩散函数(PSF), 在一定几何关系下, 它可通过 matlab 软件仿真得到, 如图 3 所示, 它通常存储在计算机中以便重建程序调用。由式(5)可知, 该算法包含了两个过程:“投影”与“反投影”。 $f^k * h'$ 代表“投影”过程, 它得到 f^k 在探测器上的投影估计值。周期相关操作代表“反投影”过程, 通过 h' 与投影比值(真实投影与投影估计值之比)周期相关运算结果来对 f^k 进行修正。整个迭代过程当投影估计值接近真实投影时终止。

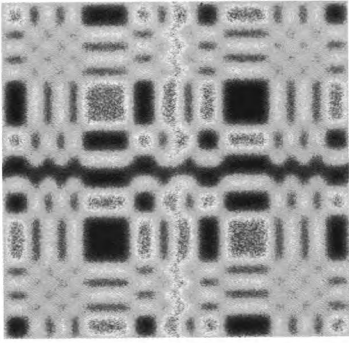


图 3 系统的单点源响应(PSF)
Fig.3 Point spread function of imaging system.

3 系统组装与测试

该辐射成像系统探测器采用实验室研发的位置灵敏高分辨率探测器系统, 它由 LaBr₃ 晶体与 H8500 平面型位置灵敏光电倍增管组成, 分辨率~1.5 mm。我们将装有探测器的方形盒子插入密闭的铅盒中, 在铅盒的前端固定着 MURA37×37 编码孔径准直

器, 如图 4 所示。探测器与编码板之间的距离(系统焦距 b)可以通过前后抽动方形盒子来调节。当 b 较小时, 成像系统的视野较大, 称为宽视野; 当 b 较大时, 成像系统的视野较小, 称为窄视野, 而且窄视野时系统的分辨率应优于宽视野。

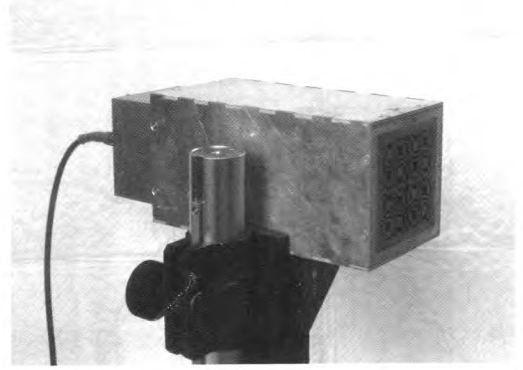


图 4 编码板与探测器组成的成像系统
Fig.4 Imaging system which consists of coded aperture and detector.

考虑到实验室现有放射源较弱, 且射线强度与距离的平方成反比, 我们将放射源置于编码板前方 1 m 处测试。首先, 设定 $b=4.69$ cm、 $a=100$ cm, 成像系统处于宽视野状态。将直径 5 mm、强度 7.4×10^5 Bq 的 ^{57}Co γ 点源放在视场中心, 得到投影图像如图 5(a), 其 matlab 下 MELM 算法重建结果如图 5(e)。再将放射源偏离视场中心 38.1 cm, 此时放射源位置与视场中心成 20° 夹角, 得到投影图像如图 5(b), 其重建图像如图 5(f)。其次, 设 $b=9.69$ cm、 $a=100$ cm, 成像系统处于窄视野状态。将 ^{57}Co 点源放在视场中心, 得到投影如图 5(c), 其重建图像如图 5(g)。再将放射源偏离视场中心 19.3 cm, 此时放射源位置与视场中心成 10° 夹角, 得到投影图像如图 5(d), 其重建图像如图 5(h)。

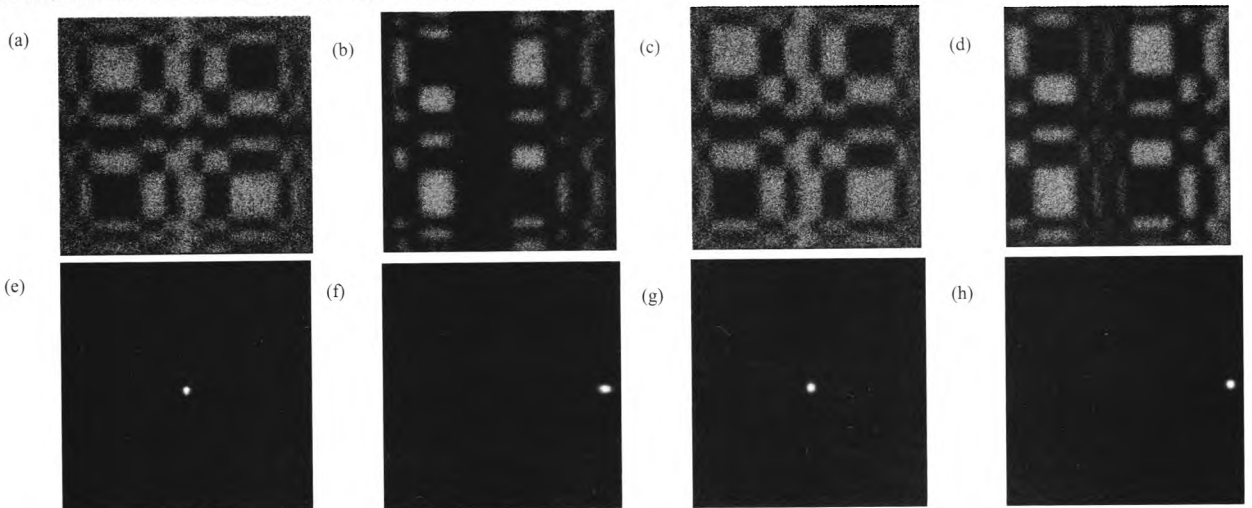


图 5 编码孔径投影及其重建图像
Fig.5 Coded aperture projections and their reconstruction images.

我们通常用系统点源响应的半高全宽(FWHM)来衡量成像系统的几何分辨率。对图 5 中重建图像中心截面强度图进行高斯拟合, 结合几何位置关系, 得到图 5(e)–5(h)点源响应的半高全宽分别为 11.431 mm、17.781 mm、6.709 mm 和 8.051 mm。对应的角度分辨率分别为 1.311° 、 2.038° 、 0.769° 和 0.923° 。可见, 系统在宽视野状态下, 放射源偏离视场中心 20° 时, 系统几何分辨率为 2.038° 。系统在窄视野状态下, 放射源偏离视场中心 10° 时, 系统几何分辨率为 0.923° 。说明该辐射成像系统实现了视场 $\pm 10^\circ$ – $\pm 20^\circ$ 范围内可调, 对应的几何分辨率在 0.923° – 2.038° 范围内可变, 与理论预期值 1.1° – 2.2° 相近, 达到了预期的设计目标。

4 结语

本文成功设计并实现了一台编码孔径辐射成像系统, 用于便携移动式高分辨率放射源成像。该辐射成像系统的准直器使用 MURA 37×37 编码板, 而且准直器与编码板之间距离可根据需要在 3–10 cm 范围内调节, 以获得不同的成像视野。重建算法采用能够有效抑制统计噪声的 MLEM 统计迭代算法, 实现了其在编码孔径成像中的应用。实验测试结果表明, 该成像系统不仅能很好地满足视场与分辨率的设计要求, 几何分辨率在 0.923° – 2.038° 范围内可变, 而且具有很高的便携式移动方便性, 是一台高性能辐射成像系统。本文的辐射成像系统具有较高的性价比和实用价值, 可以推广到其它远、近场射线成像领域。

参考文献

- 1 Mert L, Young N O. Fresnel transformation of images[A]. In proceedings of the international conference on optical instrumentation and techniques, Chapman and Hall, London, 1961, 305
- 2 洪俊杰. γ 相机中编码孔径准直器设计及数字图像重建[D]. 硕士学位论文. 华中科技大学. 2006
HONG Junjie. Design of coded aperture collimator and digital image reconstruction in gamma-ray camera[D]. Master Thesis. Huazhong University of Science and Technology. 2006
- 3 Gottesmen S R, Fenimore E E. New family of binary arrays for coded aperture imaging[J]. Applied Optics, 1989, 28: 4344–4352
- 4 Roberto Accorsi. Design of near-field coded aperture cameras for high-resolution medical and industrial gamma-ray imaging[D]. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology. 2001
- 5 Mu Z P, Liu Y H. Aperture collimation correction and maximum-likelihood image reconstruction for near-field coded aperture imaging of single photon emission computerized tomography[J]. IEEE Transaction on Medical Imaging, 2006, 25(6): 701–711
- 6 Fenimore E E, Cannon T M. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays[J]. Applied Optics, 1978, 17(3): 337–347

Design of nuclear imaging system based on MURA coded aperture collimator

CHEN Lihong^{1,2} LI Yongping¹ ZHAO Cuilan^{1,2} YUAN Chao^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: Location nuclear imaging systems have been used in many fields, such as astronomical observation, radioactive source monitoring, nuclear development, biomedicine, etc. **Purpose:** It puts forward much higher requirements of monitoring and control of safety of nuclear facilities and radioactive sources. In this paper, a new portable nuclear imaging system is designed, which can be used in far field imaging. **Methods:** It uses high resolution detector which consists of LaBr₃ crystal and H8500 position sensitive photomultiplier to meet the design requirements of high resolution. In order to acquire the higher radiation collection efficiency, we choose modified uniformly redundant arrays (MURA) as system collimator. It uses the maximum likelihood-expectation maximization (MLEM) algorithms in reconstruction procedure. **Results:** The test results show that the imaging system can image the far field radioactive source clearly. The field-of-view of our system can achieve the design goal: $\pm 10^\circ$ – $\pm 20^\circ$, and its resolution can be variable among 0.923° – 2.038° . **Conclusions:** It can meet the design requirements of resolution and FOV very well. This radiation imaging system can achieve miniaturization and portability radiation imaging robot which is suited for the long-range control.

Key words Nuclear imaging, Collimator, MURA, Image reconstruction

CLC TL75⁺1