

基于 GAGG 闪烁体探测器康普顿相机角分辨率误差来源分析*

薛东阳 袁子泉 杨皓 江建勇[†]

(北京师范大学核科学与技术学院射线束技术教育部重点实验室, 100875, 北京;
北京师范大学物理学系, 100875, 北京)

摘要 基于 Geant4 模拟平台搭建了一个由 2 层 6×6 位置灵敏的 cerium-doped gadolinium aluminum gallium garnet (GAGG(Ce)) 闪烁体探测器阵列组成的康普顿相机; 从理论上分析了探测器的几何因素、能量分辨率和材料多普勒效应对康普顿相机角分辨率的影响; 散射角为 5°~90° 时, 角分辨率 < 10°。模拟条件: 采集了仅考虑几何因素、能量分辨率与多普勒效应, 以及综合考虑这 3 种误差来源等情况的符合数据, 并用滤波反投影算法进行图像重建。当 2 层探测器距离为 6.0~16.0 cm 时, 几何因素是影响角分辨率的主要误差来源, 能量分辨率次之, 多普勒效应贡献最小。

关键词 康普顿相机; 角分辨率; 蒙特卡罗模拟

中图分类号 TL812+.1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022136

0 引言

康普顿相机成像技术最早于 20 世纪 70 年代被提出^[1-2], 相比于传统的机械准直成像技术, 基于电子准直的康普顿相机灵敏度高、视野范围广。康普顿相机可实现对未知辐射源的三维成像^[3-4], 在核污染强辐射场中的辐射源定位^[5-6]与核医学成像^[7-8]中发挥重要作用。随着放射医学、核辐射事故探测与处理等应用领域对成像要求的不断提高, 康普顿相机成为近几年国内外的研究热点^[9-10]。

角分辨率(angular resolution, AR)是评价康普顿相机的重要参数之一, 主要受探测器几何设计、探测器的能量分辨率和多普勒效应等因素影响。

1 康普顿相机的基本原理

康普顿相机是一种 γ 射线成像技术, 它依据康普顿散射原理^[11], 并根据入射 γ 射线产生的反冲电子能量判断入射方向, 等效于用圆锥面准直器限定辐射源的方向, 因此这种定位方式被称为电子准直(图 1)。

由图 1 可见, 一台典型的康普顿相机由散射体和吸收体探测器阵列(以下分别简称散射体与吸收体)组成。取散射体的中心位置为坐标原点, 某点用从原

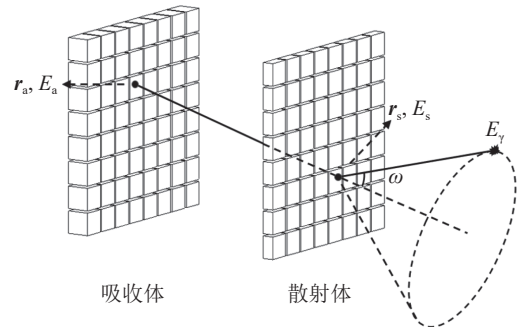


图 1 康普顿相机成像原理示意

点出发指向该点的向量表示。一次有效的探测如下: 能量为 E_γ 的光子入射到散射体, 并与之发生康普顿散射, 散射体记录下康普顿散射作用的位置 r_s 和沉积能量 E_s ; 散射光子逃出散射体后入射到吸收体, 并与之发生相互作用, 吸收体记录下其作用位置 r_a 和沉积能量 E_a 。由能量和动量守恒定律可求得散射角 ω 的余弦关系为

$$\cos \omega = 1 - m_e c^2 E_s / (E_\gamma (E_\gamma - E_s)), \quad (1)$$

式中: m_e 是电子静质量, $m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$; c 为真空中的光速, $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $m_e c^2 = 511.0 \text{ keV}$ 。将多次有效的探测进行反投影, 可获得放射源的分布情况。

* 国家自然科学基金资助项目(12105018); 北京市科技新星计划资助项目(Z211100002121129); 北京师范大学引进人才经费资助项目(312232104)

[†] 通信作者: 江建勇(1988—), 副教授。研究方向: 辐射探测与成像。E-mail: jianyong@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-30

2 材料和方法

2.1 康普顿相机的 AR AR 是评价康普顿相机的最重要指标之一,其精度依赖于圆锥面的重建精度^[12].假设圆锥面的顶点为 r_s ,则顶点位置精度与其灵敏探测器的分辨率相关;轴线方向为 $r_a - r_s$,轴向方向的精度同样与位置灵敏探测器的分辨率有关,同时受散射体与吸收体之间距离的影响.圆锥面顶点及轴线方向的不确定度会影响圆锥面的不确定度,其误差记作 $\Delta\omega_g$.圆锥面半顶角的不确定度主要受探测器能量分辨率及其材料多普勒效应的影响^[13-14],这 2 部分误差分别记作 $\Delta\omega_r$ 和 $\Delta\omega_d$.康普顿相机的 AR 误差 $\Delta\omega_a = (\Delta\omega_g^2 + \Delta\omega_r^2 + \Delta\omega_d^2)^{1/2}$.

如图 2 所示,记散射体与吸收体所在平面距离为 L_1 ,辐射源位于散射体正前方距离为 L_2 处,散射体与吸收体的空间分辨率分别为 $(\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s)$ 、 $(\Delta x_a, \Delta y_a, \Delta z_a)$,其中 $\Delta x_s = \Delta y_s = \Delta x_a = \Delta y_a = \Delta l$.

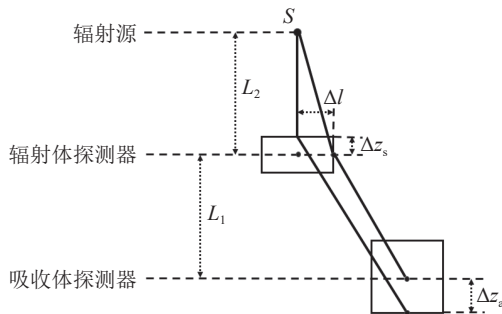


图 2 几何误差来源示意

根据 Ordonez 等^[15]的研究,有

$$\Delta\omega_g = \left(\left(\Delta l^2 (1 + k \cos \omega)^2 + (\Delta z_s k \sin \omega)^2 \right) / L_2^2 + \cos^2 \omega \left((\Delta l \cos \omega)^2 + (\Delta z_a \sin \omega)^2 \right) / L_1^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中: ω 为散射角; $k = L_2 |\cos \omega| / L_1$.

结合式(1)与文献[16]所提到的误差传递式,可得

$$\Delta\omega_r = (1 + \gamma(1 - \cos \omega))^2 \Delta E_s / (\gamma E_\gamma \sin \omega), \quad (3)$$

式中: $\gamma = E_\gamma / m_e c^2$, 单位为 1; E_γ 为辐射源发出的光子能量,单位为 keV; ΔE_s 是散射体探测器对沉积能量 E_s 的测量误差.

将 GAGG 闪烁体探测器与硅光电倍增器件耦合,并采用动态阈值的幅度时间转换进行信号处理,经测量,可获得 GAGG 探测器能量分辨率的关系为

$$\Delta E_s = 0.045 24 E_s + 9.016. \quad (4)$$

若计算 ω 时引入误差 $\Delta\omega_d$,则由 Matscheko 等^[17]、产小松等^[18]的研究,可近似给出核外电子的初始动量

$$\Delta E_d = \Delta p_z ((E_\gamma - E_s)(E_\gamma^2 + (E_\gamma - E_s)^2 - 2E_\gamma(E_\gamma - E_s) \cos \omega)^{1/2}) / (E_\gamma m_e c), \quad (5)$$

$$\Delta\omega_d = (1 + \gamma(1 - \cos \omega))^2 / (\gamma E_\gamma \sin \omega) \cdot \Delta E_d, \quad (6)$$

式中 Δp_z 为电子初始动量在散射矢量上的投影 p_z 的半高宽,根据 Biggs 等^[19]的研究, $\Delta p_z / m_e c^2 = 0.012 9$.

2.2 基于 Geant4 的蒙特卡罗模拟 基于 Geant4^[20] 模拟搭建了图 3 所示的康普顿相机,每层为 6×6 位置灵敏 cerium-doped gadolinium aluminum gallium garnet (GAGG(Ce)) 闪烁体探测器阵列.

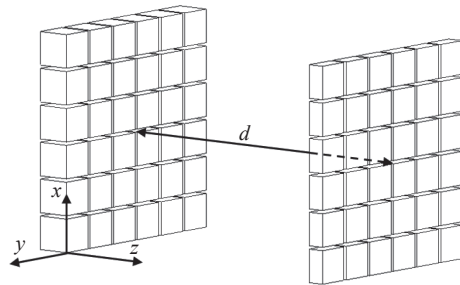


图 3 康普顿相机结构示意图

如图 3 所示,每个散射体探测器尺寸为 $1.0 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$,吸收体探测器尺寸为 $1.0 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$,2 个相邻探测器间隔为 0.1 cm .散射体中心坐标为 $(0, 0, 0)$,模拟时在 $(0, 0, 100)$ 设置点状辐射源,光子能量 662.0 keV ,探测器半高宽能量分辨率(full width half maximum, FWHM)为 5.89% ,符合探测时间窗为 10 ns .模拟时不考虑任何误差,只考虑探测器几何因素、能量分辨率、材料多普勒效应,以及探测器本身带来的误差等这 5 种情况进行了数据采集.

利用这些数据研究了散射体与吸收体之间的垂直距离 d ($6.0 \sim 16.0 \text{ cm}$) 对重建图像和 AR 的影响.

重建采用滤波反投影算法,滤波器为 high-pass,勒让德展开项数为 50; GPU 并行计算利用 OpenCL (开放计算语言)^[21].

3 结果

3.1 AR 随散射角的变化曲线 依照式(2)~(6),在 2 层探测器距离 $L_1 = 10.0 \text{ cm}$ 的情况下,取 ω 的范围为 $0 \sim 160^\circ$,作出探测器 AR 分别在探测器几何因素、能量分辨率、多普勒效应的影响下随 ω 的变化关系,以及探测器 AR 在这三者共同影响下随 ω 的变化关系(图 4).

由图 4 可见:散射角为 $5^\circ \sim 90^\circ$ 时,探测器 $\text{AR} < 10^\circ$; $\omega < 5^\circ$ 时,康普顿相机 AR 的主要影响因素为探测器能量分辨率; ω 为 $10^\circ \sim 40^\circ$ 时,康普顿相机 AR 的主要影响因素为探测器几何因素;随着 ω 继续增大,探测器几何因素的影响减小,能量分辨率重新占据主导

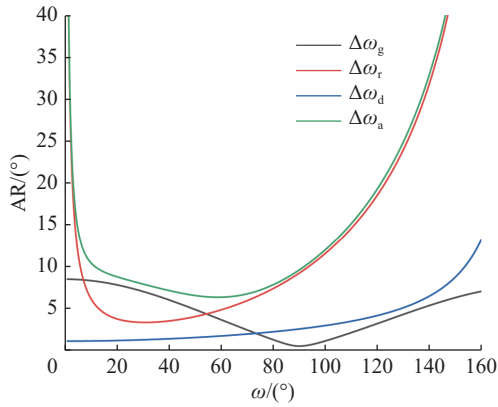


图 4 面型康普顿相机的 AR

地位.

本文图像重建所选择的符合事件满足 ω 为 $14^\circ\sim 60^\circ$, 在该范围内, 基于 GAGG 闪烁体探测器的多普勒效应不是主要影响因素.

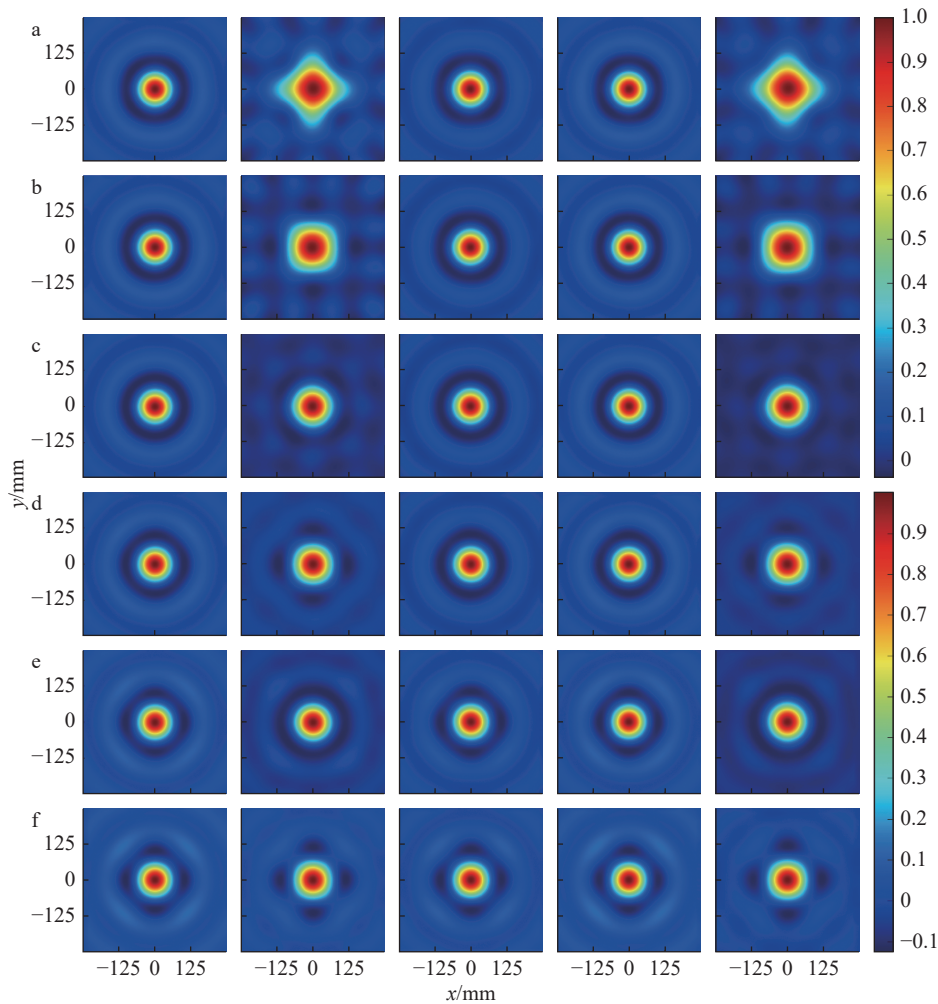
3.2 图像重建结果 对采集的数据进行图像重建, 结

果如图 5, 2 层探测器阵列间距为 6.0~16.0 cm, 步长为 2.0 cm.

由图 5-a、b、c 可见, 在 2 层探测器阵列间距为 6.0~10.0 cm 时, 仅考虑探测器几何因素与考虑 3 种误差来源的重建图像基本一致. 结果表明在该间距下, 影响康普顿相机 AR 的主要误差来源是几何因素.

由图 5-d、e、f 可见, 2 层探测器阵列间距为 12.0~16.0 cm 时, 重建图像难以用肉眼辨别出明显差别. 通过计算图 5 所对应的 AR, 可得不同误差来源的 AR 与散射体吸收体间距的对应关系(图 6-a).

由图 6-a 可见, 基于 GAGG 闪烁体探测器且探测器几何尺寸在 cm 量级的康普顿相机, 其 AR 主要贡献来自探测器的几何因素, 次要贡献是探测器能量分辨率; 6-b 为 6-a 的局部放大图, 可以清晰地看到, 是否考虑探测器材料的多普勒效应对此类康普顿相机 AR 几乎没有影响.



a. 2 层探测器阵列间距为 6.0 cm; b. 2 层探测器阵列间距为 8.0 cm; c. 2 层探测器阵列间距为 10.0 cm; d. 2 层探测器阵列间距为 6.0 cm; e. 2 层探测器阵列间距为 8.0 cm; f. 2 层探测器阵列间距为 10.0 cm.

图 5 从左到右依次为不考虑任何误差, 仅考虑几何因素、能量分辨率、多普勒效应, 以及综合考虑这 3 种误差来源情况下的重建图像

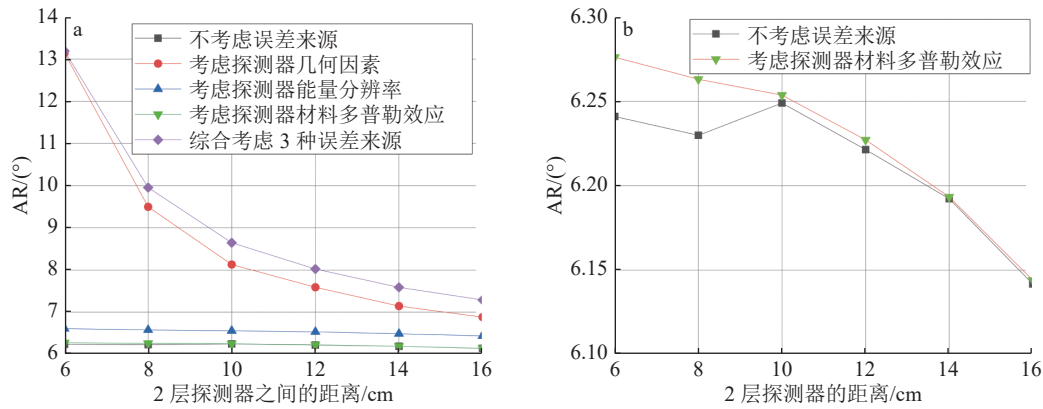


图 6 AR 随 2 层探测器之间距离的变化关系

4 结语

基于 GAGG 闪烁体探测器的康普顿相机, 利用理论与模拟计算相结合的方法, 对影响康普顿相机 AR 的因素进行了理论分析. 结果表明: ω 为 $5^\circ \sim 90^\circ$ 时, 探测器总 $AR < 10^\circ$; 对 ω 加以限制可提高重建图像的品质. 基于 GAGG 闪烁体探测器且探测器几何尺寸在 cm 量级的康普顿相机, 对 AR 的主要贡献来自探测器的几何因素, 次要贡献来自探测器的能量分辨率, 其材料的多普勒效应的贡献最小.

5 参考文献

- [1] PARODI K. On-and off-line monitoring of ion beam treatment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 809: 113
- [2] TODD R W, NIGHTINGALE J M, EVERETT D B. A proposed γ camera[J]. Nature, 1974, 251(5471): 132
- [3] ENGHARDT W, CRESPO P, FIEDLER F, et al. Charged hadron tumour therapy monitoring by means of PET[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004, 525(1/2): 284
- [4] NISHIO T, OGINO T, NOMURA K, et al. Dose-volume delivery guided proton therapy using beam on-line PET system[J]. Medical Physics, 2006, 33(11): 4190
- [5] JIANG J Y, SHIMAZOE K, NAKAMURA Y, et al. A prototype of aerial radiation monitoring system using an unmanned helicopter mounting a GAGG scintillator Compton camera[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2016, 53(7): 1067
- [6] HARAYAMA A, ICHINOHE Y, ODAKA H, et al. A portable Si/CdTe Compton camera and its applications to the visualization of radioactive substances[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 787: 207
- [7] JUDSON D S, BOSTON A J, COLEMAN-SMITH P J, et al. Compton imaging with the PorGamRays spectrometer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 652(1): 587
- [8] AMALDI U, HAJDAS W, ILIESCU S, et al. Advanced quality assurance for CNAO[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 617(1/2/3): 248
- [9] HENRIQUET P, TESTA E, CHEVALLIER M, et al. Interaction vertex imaging (IVI) for carbon ion therapy monitoring: a feasibility study[J]. Physics in Medicine & Biology, 2012, 57(14): 4655
- [10] TERZIOGLU F, KUCHMENT P, KUNYANSKY L. Compton camera imaging and the cone transform: a brief overview[J]. Inverse Problems, 2018, 34(5): 54002
- [11] POITRASSON-RIVIÈRE A, MAESTAS B A, HAMEL M C, et al. Monte Carlo investigation of a high-efficiency, two-plane Compton camera for long-range localization of radioactive materials[J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 81: 127
- [12] 王薇, 李传龙, 吴建华, 等. 康普顿成像系统角分辨影响因素的理论及模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(12): 2471
- [13] MATTAFIRRI S. On Compton imaging[M]. Berkeley: University of California, 2010
- [14] ZOGLAUER A, KANBACH G. Doppler broadening as a lower limit to the angular resolution of next-generation Compton telescopes[Z]. SPIE, 2003, 4851: 1302
- [15] ORDONEZ C E, CHANG W, BOLOZDYNYA A. Angular uncertainties due to geometry and spatial resolution in Compton cameras[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1999, 46(4): 1142
- [16] HE Z, LI W, KNOLL G F, et al. 3-D position sensitive

- CdZnTe gamma-ray spectrometers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, 422(1/2/3): 173
- [17] MATSCHEKO G, CARLSSON G A, RIBBERFORS R. Compton spectroscopy in the diagnostic X-ray energy range: II. effects of scattering material and energy resolution[J]. Physics in Medicine & Biology, 1989, 34(2): 199
- [18] 严小松, 杨建伦, 羊奕伟. 康普顿相机图像重建中的快速滤波反投影算法[J]. 计算物理, 2020, 2: 153
- [19] BIGGS F, MENDELSON L B, MANN J B. Hartree-Fock Compton profiles for the elements[J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1975, 16(3): 201
- [20] COLLABORATION G, AGOSTINELLI S. Geant4: a simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3): 250
- [21] STONE J E, GOHARA D, SHI G C. OpenCL: a parallel programming standard for heterogeneous computing systems[J]. Computing in Science & Engineering, 2010, 12(3): 66

Angular resolution error analysis of a Compton cameras based on GAGG scintillator detector

XUE Dongyang YUAN Ziquan YANG hao JIANG Jianyong

(The Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;
Department of Physics, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract A Compton camera consisted of two layers of 6×6 position sensitive cerium-doped gadolinium aluminum gallium garnet (GAGG(Ce)) scintillators was simulated using Geant4. The dependence of angular resolution of such a Compton camera on system geometry, detector energy resolution and Doppler effect as a function of scattering angle was analyzed theoretically. The overall angular resolution is better than 10° when the scattering angle is in the range of $5^\circ\sim 90^\circ$. Coincidence events was acquired under 5 different circumstances: ideal case with accurate position and energy detection without considering Doppler effect; only considering system geometry effect; only considering detector energy resolution effect; only considering Doppler effect; taking all the three effects into account. Images are reconstructed using a filtered back projection algorithm running on OpenCL platform when the layer distance of the Compton camera is between 6.0~16.0 cm. Results show that the system geometry effect is the main factor on the angular resolution for the Compton camera simulated.

Keywords Compton camera; angular resolution; Monte Carlo simulation

【责任编辑: 陆有忠】