

# 双层分离式康普顿相机研制及其性能研究

王薇 李兴隆 吴建华 庞洪超 骆志平

(中国原子能科学研究院 核安全研究所 北京 102413)

**摘要** 康普顿成像技术是近年新兴的一种辐射热点定位技术,其无需准直,视野广,效率高,应用前景广阔。针对核设施热点定位需求,采用两块像素型碲锌镉(Cadmium Zinc Telluride, CZT)探测器,基于专用读出芯片(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)的读出电子学系统,结合列表模式期望最大化极大似然(List-mode Maximum Likelihood Expectation Maximization, LM-MLEM)图像重建算法研制了一套双层分离式康普顿相机。采用 $^{137}\text{Cs}$ 点源对该系统的成像性能开展了实验测试,并对探测器层间距、吸收层面积等成像性能影响参数展开了优化研究,最后通过移动探测器的测量位置实现了对放射源的远场三维成像功能测试。该系统优势在于其结构可调性,探测器成本低,读出电子学相对简单,成像视野范围宽于传统 $\gamma$ 相机,测试结果表明:系统的能量分辨率约为3%(FWHM@662 keV),能确定5 m外的 $^{137}\text{Cs}$ 点源三维位置信息,优化后的系统前锥角 $\theta$ 和侧向方位角 $\varphi$ 的角分辨率约为 $10^\circ$ 。

**关键词** 康普顿相机, 热点成像, 碲锌镉探测器

**中图分类号** TL81

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030401

## Development and performance analysis of double-layer separated Compton camera

WANG Wei LI Xinglong WU Jianhua PANG Hongchao LUO Zhiping

(China Institute of Atomic Energy, Department of Nuclear Security, Beijing 102413, China)

**Abstract** [Background] Compton imaging technology is a new radiation hotspot location technology that does not require collimation and has a wide field of view, high efficiency, and broad application prospects. With the development of nuclear technology, Compton cameras with the above-mentioned advantages have a wide range of applications not only in the nuclear industry but also in the field of nuclear medicine, hence recently become a popular research field worldwide. [Purpose] This study aims to develop a double-layer separated Compton camera for far-field imaging of specific radiation scenes in nuclear facilities. [Methods] First of all, two pixel-type cadmium zinc telluride (CZT) detectors and an application-specific integrated circuit (ASIC)-based readout electronics system were adopted for the development of a double-layer separated Compton camera. A list-mode maximum likelihood expectation maximization (LM-MLEM) image reconstruction algorithm was implemented in the host computer software. Then,  $^{137}\text{Cs}$  point source was used for experimental test of imaging performance of the system, and the parameters affecting the imaging performance, such as the detector layer spacing and area of the absorption layer, were optimized. Finally, far-field three-dimensional imaging of the radiation source was performed by moving the measuring position of the detector. [Results] The test results show that the energy resolution of the CZT detectors is approximately 3% (FWHM@662 keV), which can determine the location of the point source at a distance of 5 m, and the angular resolution for  $\theta$  and  $\varphi$  directions of the optimized system is approximately  $10^\circ$ . [Conclusions] Double-layer separated Compton camera of this study has advantages of adjustable structure, low detector cost, relatively

第一作者: 王薇, 女, 1981年出生, 2009年于中国原子能科学研究院获硕士学位, 粒子物理与原子核物理专业, 主要从事辐射防护与环境  
保护研究, E-mail: janitor0405@126.com

收稿日期: 2022-08-23, 修回日期: 2022-11-28

First author: WANG Wei, female, born in 1981, graduated from China Institute of Atomic Energy with a master's degree in 2009, major in particle  
physics and nuclear physics, focusing on radiation protection and environmental protection, E-mail: janitor0405@126.com

Received date: 2022-08-23, revised date: 2022-11-28

simple readout electronics, and wide imaging field of view. The angular resolution of this double-layer separated Compton camera can be improved by proper adjustment of the imaging influence parameters (such as layer spacing and the area of the absorption layer).

**Key words** Compton camera, Hot spot imaging, CdZnTe detector

辐射源空间分布及其变化信息,特别是强辐射场产生的辐射热点成像技术在各行业领域的需求非常普遍,不仅包括核工业领域对设施场所内的热点成像,如核设施检修与退役、后处理厂核废物处理等,可协助采取有针对性的辐射防护措施来降低人员受照;还包括放射医疗领域的应用需求,可对各种放射性诊疗手段提供有效的实时监控。主流的辐射热点成像技术主要包括基于小孔成像原理的 $\gamma$ 相机和基于康普顿散射原理的康普顿相机<sup>[1-2]</sup>,其中康普顿相机以其数百 keV 以上较好的空间分辨本领,较宽的成像视野范围可达 $4\pi$ ,无需准直器,探测效率高,重量轻,具备近场三维成像能力等优势成为近年来的研究热点之一。目前康普顿相机的应用主要集中在核设施场所热点成像方面,对此国外研究成果较多,已经有商业产品问世<sup>[3-5]</sup>,但国内发展较晚,近几年取得了一些初步成果,包括对成像探测器性能研究<sup>[6-8]</sup>、基于三维位置灵敏探测器的康普顿成像研究<sup>[9-10]</sup>、康普顿成像理论及影响因素模拟研究<sup>[11-12]</sup>和康普顿相机成像算法研究及图像重建<sup>[13-14]</sup>等。

本工作建立了一个采用双层像素型碲锌镉(Cadmium Zinc Telluride, CZT)晶体分别作为散射和吸收探测器的康普顿相机,基于专用芯片(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)设计读出电子学系统采集有效康普顿事件的位置信息及能量沉积信息,采用期望最大化极大似然算法(Maximum Likelihood Expectation Maximization, MLEM)实现了成像图像的重建。通过试验测试了该成像系统的成像性能,同时对影响成像效果的因素如层间距、吸收层面积等开展了试验研究,结果表明,优化后成像系统的 $\theta$ 、 $\varphi$ 方向的角分辨率约为 $10^\circ$ ,同时通过移动探测器实现了系统对放射源的远场三维成像功能测试。本工作研发的康普顿相机主要针对核设施场所特定场景远场成像,研究结果为下一步该系统的实际工程应用奠定了基础。

## 1 原理

康普顿相机利用康普顿散射原理成像如图1所示,一般要求入射光子在探测介质中发生两次相互作用:第一次相互作用为康普顿散射,沉积部分能量并将其传递给介质中的电子,此时测量到的能量为反冲电子的动能 $E_1$ ,相互作用位置为 $V_1$ ;第二次相互

作用为光电效应,散射光子将剩余能量全部沉积,此时测量到散射光子的能量为 $E_2$ ,相互作用位置为 $V_2$ 。对满足上述条件的入射光子的能量 $E_0$ 可以简单表示为:

$$E_0 = E_1 + E_2 \quad (1)$$

康普顿散射角可以表示为式(2),其中: $m_e c^2$ 为电子的静止能量(511 keV):

$$\cos \theta = 1 - \frac{m_e c^2 E_1}{E_0^2 - E_1 E_0} \quad (2)$$

因此放射源所在位置处于一个以 $V_1$ 位置为顶点、 $V_1 V_2$ 连线为轴、顶角为 $\theta$ 的圆锥面上。经过多次符合条件的事件可以得到很多顶点位于不同位置、不同顶角( $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3 \dots$ )的圆锥,这些圆锥的交点就是放射源所在的位置。

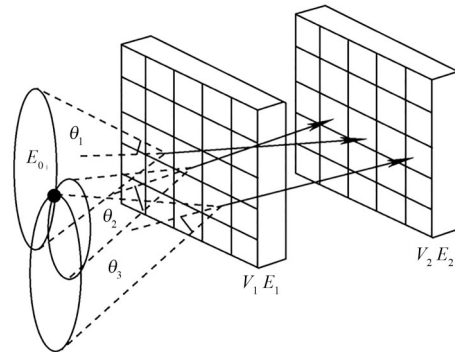


图1 康普顿成像原理示意图

Fig.1 Schematic of imaging principle of a Compton camera

现有康普顿相机基本结构可以分为一体式和分离式两种,如图2(a)、(b)所示,其中分离式结构采用两层或更多层二维位置灵敏探测器,散射和吸收事件发生在不同层探测器中被分别单独测量;一体式结构采用单块三维位置灵敏探测器同时测量散射和吸收事件。两种结构各有其优缺点:一体式结构本征探测效率高,具有全空间的成像视野,但需获取康普顿散射或光电效应的作用点深度信息,因此要求较厚的探测器和较复杂的信号处理电路,成本相对较高;分离式结构只能捕获一定散射角度内的散射光子,探测效率低,但无须获取作用点深度信息,成像效果较优,结构设计灵活,探测器及读出电路成本相对低廉,性价比高。综合比较本工作采用分离式两层康普顿相机的结构设计。

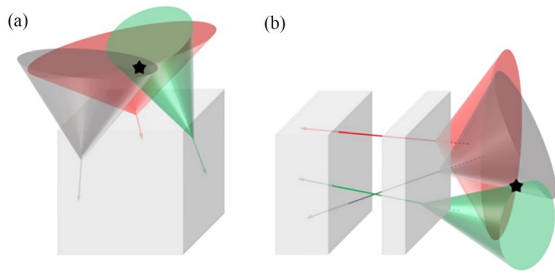


图2 康普顿相机的一体式结构(a)与分离式结构(b)  
Fig.2 Diagram of integrated structure (a) and separated structure (b) of a Compton camera

## 2 探测系统设计

### 2.1 探测器选型与性能校准

在探测器选型上,半导体、闪烁体和气体探测器等均可用于康普顿相机研制,由于成像效果与探测器的位置分辨和能量分辨直接相关<sup>[9]</sup>,半导体探测器优势明显,其中像素型CZT探测器可在室温下工作,无须制冷,对数百keV的 $\gamma$ 光子探测效率较高;此外,其独特的小像素效应<sup>[15]</sup>可以克服简单平面型CZT探测器在百keV以上低能拖尾造成的能量分辨率恶化。因此,本工作选择DT-PA02型像素CZT探测器作为成像系统基本探测器,如图3所示。探测

器整体尺寸为25.6 mm $\times$ 25.6 mm $\times$ 5.0 mm, $x$ 、 $y$ 方向各16路,共256路通道,每个像素探测单位的尺寸为1.6 mm $\times$ 1.6 mm $\times$ 5.0 mm。

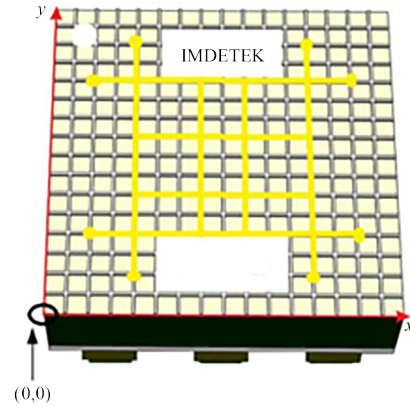


图3 DT-PA02型像素CZT探测器示意图  
Fig.3 Diagram of DT-PA02 type-pixel CZT detector

采用<sup>241</sup>Am(59.5 keV)、<sup>57</sup>Co(121.78 keV)、<sup>152</sup>Eu(244.7 keV、344.3 keV)和<sup>137</sup>Cs(661.66 keV)4种 $\gamma$ 放射源对拟采用的两块像素CZT探测器的所有可用通道进行了能量校准<sup>[16]</sup>,图4给出了校准后单块像素型CZT的<sup>57</sup>Co和<sup>137</sup>Cs能谱,经过校准后总能谱的能量分辨分别为4.3%(<sup>57</sup>Co)和2.6%(<sup>137</sup>Cs)。

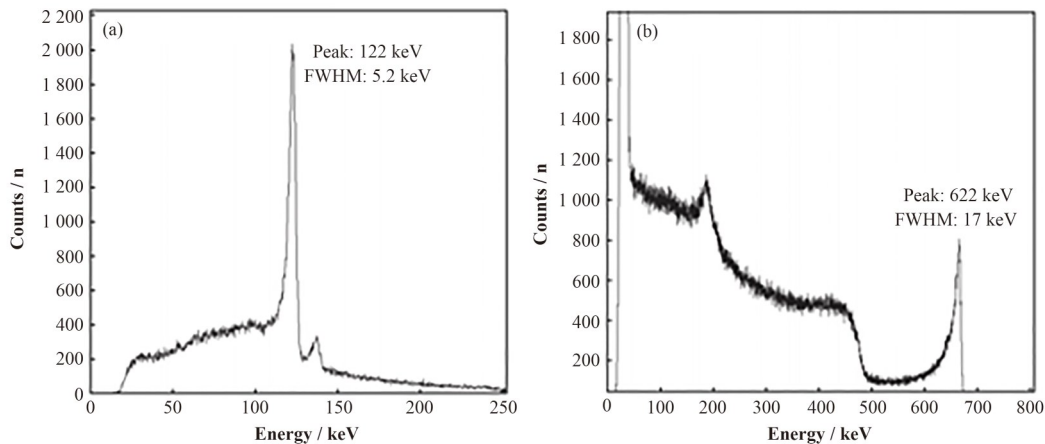


图4 校准后单块像素型CZT探测器的<sup>57</sup>Co(a)和<sup>137</sup>Cs(b)能谱  
Fig.4 Energy spectra of <sup>57</sup>Co (a) and <sup>137</sup>Cs (b) for a single pixel-type CZT detector after calibration

### 2.2 读出电子学系统设计

采用双层像素型CZT探测器获取康普顿散射事件,要求同时测得 $E_1$ 、 $V_1$ 、 $E_2$ 和 $V_2$ ,因此,需要确定相互作用点所在的像素和像素中沉积的电离电荷量。数百像素的信号读出需使用核电子领域的多通道ASIC, VATA9P<sup>[17]</sup>芯片内部集成了256个通道,其原理框图如图5所示,为简化起见,图5中仅给出了1个通道的前端模拟框图,其他255个通道与其相同。采用该芯片设计了多通道半导体探测器的信号

读出电子学系统,每个通道都集成了独立的前置放大(Preamp)、滤波成形(Shaper)、甄别(Discriminator)和峰保持电路(Sample and Hold, S/H),其中2.2  $\mu$ s的慢成形( $H_1(s)$ )电路和峰保持电路用于获取信号幅度信息,经Amplitude端口串行输出;0.27  $\mu$ s的快成形( $H_2(s)$ )电路和高通滤波( $H_3(s)$ )用于产生触发信号,超过设定阈值的通道数和相互作用所在通道由触发信号和逻辑电路产生并输出,因此,该ASIC的Amplitude输出给出相互作用点



沉积能量信息,击中通道数信号给出相互作用时间信息,通道地址给出相互作用位置信息。

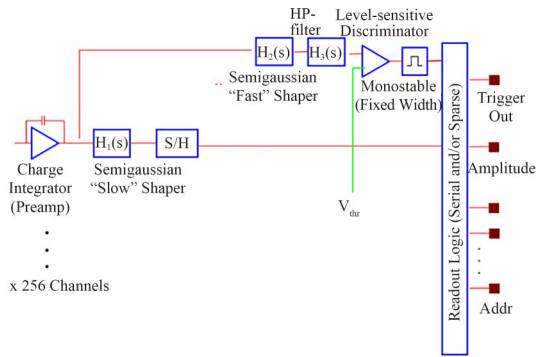


图5 VATAGP9芯片原理框图  
Fig.5 Block diagram of VATAGP9

读出电子学系统的设计方案<sup>[16]</sup>如图6所示,高压电源滤波后向CZT提供负偏置电压,CZT阳极像素的信号经紧邻的ASIC进行放大和处理。ASIC以电流模式输出信号幅值、击中通道数、地址等信号,其中信号幅值与输出电流成正比,经电流-电压转换和缓冲放大电路处理后进入模数转换(Analog-to-Digital Converter, ADC)板进行模数转换;击中通道

数的输出电流值为超过阈值的通道数量乘 $100\ \mu\text{A}$ ,经电流-电压转换和多个比较器得到标准的LVCMOS数字电压信号;地址信号线共计8条,以输出电流的有无表示数字信号的1和0,同样经电流-电压转换和比较器转换为LVCMOS信号。这些转换后的数字信号最终传输至以ZYNQ 7020 SoC (System-on-a-Chip)为核心的主控板进行采样控制和处理,SoC板与计算机经千兆以太网传输数据和命令。具体的数据采集过程为:上电后,SoC首先配置ASIC,然后在收到上位机开始数据采集的命令后,对击中通道数信号进行连续监测,当有通道被击中时,启动模数转换和地址信号采集,采集完成后,继续监测集中通道数信号,同时将数据缓存并发送至上位机。

该系统中,SoC对击中通道数信号进行 $10\ \text{MHz}$ 采样,而该信号的时间误差不超过快成形时间,因此每层CZT探测器测得的事件时间误差不超过 $0.4\ \mu\text{s}$ 。在本工作中,对于一次康普顿散射事件而言,散射事件和沉积事件分别发生在两层CZT探测器中,本系统在数据分析时通过时间符合筛选事件,即要求上下两层的信号时间差不超过 $0.4\ \mu\text{s}$ 。

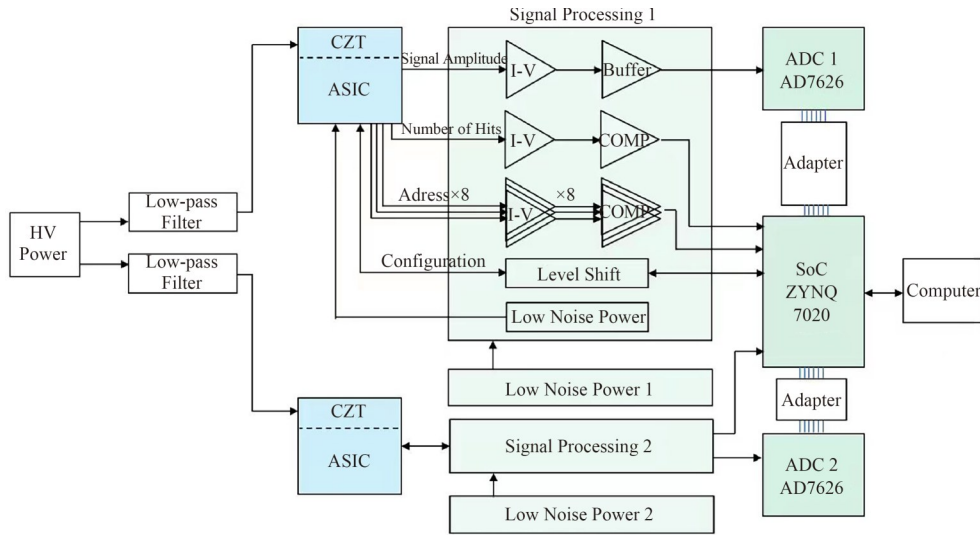


图6 康普顿散射探测电子学系统设计框图  
Fig.6 Block diagram of the electronic system design scheme for Compton scattering detection

### 2.3 系统实现

康普顿相机实物如图7所示,前端包括两块CZT探测器、ASIC封装板、信号处理板和低压电源板,为减小CZT正后方的电路对康普顿散射的影响,两块CZT探测器面对面放置;后端由左至右依次为ADC板、转接板和SoC板。前后端通过同轴线和HDMI线缆连接。整个系统置于铝屏蔽箱中。

### 3 重建算法实现

获取到足够多的康普顿散射事件信息后,需要采用合适的成像算法重建放射源的位置信息。20世纪90年代以来,国内外研发了多种图像重建算法,大致可以分为两类:直接解析法和统计法。解析法有常用的反投影法、滤波反投影法、锥面投影法和应用球谐函数的锥束投影法等;统计法则将图像重建问题转变为统计估计问题,常用的有列表模式最

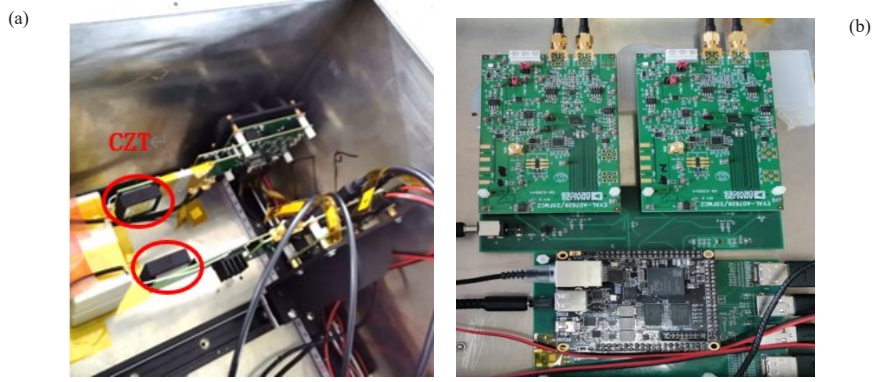


图7 康普顿成像系统实物图 (a)前端,(b)后端  
Fig.7 Snapshot of the Compton imaging system (a) Front-end, (b) Back-end

大期望算法(List-mode Maximum Likelihood Expectation Maximization, LM-MLEM)<sup>[18]</sup>、随机源集算法(Stochastic Origin Ensembles, SOE)<sup>[19]</sup>等。考虑到本工作研发系统主要针对核设施场所的辐射热点成像,对实时性、成像速度等要求不高,但对成像精度要求较高,因此采用LM-MLEM算法进行图像重建。

在康普顿散射成像问题中,成像空间被划分为 $N_v$ 个离散的网格,对康普顿成像使用LM-MLEM算法就是使用迭代计算估计源强 $\lambda_j(j=1, 2, \dots, N_v)$ 分布,该源强分布最可能得到测量的康普顿成像事件 $x_i(i=1, 2, \dots, N_v)$ 。具体的迭代公式可以表示如下<sup>[20]</sup>:

$$\lambda_j^{(l+1)} = \frac{\lambda_j^{(l)}}{S_j} \sum_{i=1}^{N_v} \frac{t_{ij}}{\sum_{k=1}^{N_v} t_{ik} \cdot \lambda_k^{(l)}} \quad (3)$$

式中: $j$ 表示成像空间像素网格序号; $i$ 表示测量的康普顿有效成像事件序号,假设共采集到 $N_v$ 个有效成像事件; $l$ 为极大似然迭代步数, $l=0$ 时, $\lambda_j^{(0)}$ 表示极大似然迭代初值,本计算中取前期研究中直接反投影法得到的成像空间中各像素网格的强度估计值作为极大似然迭代法初值。

$t_{ij}$ 和 $S_j$ 是极大似然最大期望算法中重要的两个成像算法参数,其中: $S_j$ 表示像素网格 $j$ 中发射一个光子并被探测到成为一次有效事件的概率,称之为灵敏度因子,其可以通过对现有成像系统探测器结构进行蒙特卡罗模拟或理论计算方法得到; $t_{ij}$ 表示像素网格 $j$ 中发射一个光子并被探测到为有效事件 $i$ 的概率,称之为系统矩阵,假定 $M$ 为成像空间中任一像素网格中心, $V_1$ 、 $V_2$ 和 $E_1$ 、 $E_2$ 分别为两层探测器中发生相互作用位置及能量沉积值,若忽略像素网格体积,则系统矩阵 $t_{ij}$ 计算方法如式(4)所示:

$$t_{ij} = K(\delta_M, E_{\text{total}}) \cdot \frac{|\cos(\theta_{V_2V_1})|}{\|V_2V_1\|} \cdot \frac{|\cos(\theta_{V_1M})|}{\|V_1M\|^2} \cdot h_i(M) \quad (4)$$

$$|\delta_M - \beta_i| \leq 3 \cdot \sigma_{\beta_i} \quad (5)$$

式中: $\delta_M$ 为 $\theta_{V_2V_1} \sim \theta_{V_1M}$ 之间的角度; $K(\delta_M, E_{\text{total}})$ 表示入射粒子能量为 $E_{\text{total}}$ 、康普顿散射角为 $\delta_M$ 时对应的康普顿散射截面; $\frac{|\cos(\theta_{V_2V_1})|}{\|V_2V_1\|}$ 表示以第一次相互作用位置的探测器单元为顶点,对第二次相互作用位置

的探测器单元张开的平面角; $\frac{|\cos(\theta_{V_1M})|}{\|V_1M\|^2}$ 表示以 $M$ 为顶点,对第一次相互作用位置的探测器单元张开的立体角; $h_i(M)$ 为整个探测器系统能量不确定性对康普顿散射角的修正因子,一般认为其满足高斯分布,其中均值为康普顿散射角计算值 $\beta_i$ ,标准差为 $\sigma_{\beta_i}$ :

$$h_i(M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\beta_i}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\delta_M - \beta_i}{\sigma_{\beta_i}}\right)^2\right) \quad (6)$$

$$\cos\beta_i = 1 - m_e c^2 \cdot \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2}\right) \quad (7)$$

$$\sigma_{\beta_i} = \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2 \cdot \sin\beta_i} \cdot \sqrt{\sigma_{E_1}^2 + \frac{E_1^2(2E_2 + E_1)}{E_2^4} \sigma_{E_2}^2} \quad (8)$$

采用C/C++语言编写成像程序,采用ROOT的绘图类显示结果。在数据采集完成后,首先对原始事件进行筛选,得到有效的能量全沉积事件,然后计算这些康普顿散射事件的系统矩阵 $t_{ij}$ ,最后进行多次迭代估计源强分布。对于二维成像研究,采用球面坐标系划分成像空间网格,如图8所示,成像空间以第一层探测器中心为原点,成像范围取正方向 $2\pi$ 立体角,前锥角 $\theta$ 取值范围为 $0 \sim \pi/2$ ,侧向方位角 $\varphi$ 取值范围为 $0 \sim 2\pi$ ,网格间距 $2^\circ$ ,共划分8 100个像素网格;对于三维成像研究,采用直角坐标系划分成像空间网格,成像范围 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ,网格间距 $20 \text{ cm}$ ,共划分125 000个像素网格。



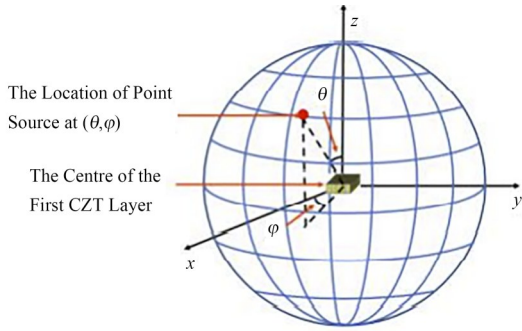


图8 成像空间设置示意图  
Fig.8 Schematic diagram of imaging space setting

## 4 实验研究

### 4.1 成像性能实验测试

#### 4.1.1 二维成像角分辨能力测试

受实验条件所限,对成像系统的二维成像角分辨能力测试采用一个点源分别测试等效为两个点源的方法进行,测试中成像系统两层 CZT 对心布置,间距为 2.3 cm,保持探测器中心与<sup>137</sup>Cs ( $1.11 \times 10^8$  Bq)点源距离为 1 m,通过改变放射源相对于探测器的 $\theta$ 或 $\phi$ 角度来测试其在不同方向的角分辨本领。每个点数据采集时间为 10 min。图9给出了等效的两个<sup>137</sup>Cs点源分别在 $\theta$ 、 $\phi$ 方向相隔不同

角度时的成像测试结果。图中极坐标的极径表示 $\theta$ 方向,极角表示 $\phi$ 方向。由图9可见,当源在 $\theta$ 方向约为 $30^\circ$ 入射时,该成像系统在 $\theta$ 方向的角分辨率约为 $15^\circ$ ;当源在 $\phi$ 方向约 $200^\circ$ 入射时,该成像系统在 $\phi$ 方向的角分辨率约为 $20^\circ$ 。

#### 4.1.2 三维位置识别功能测试

受限于探测器有效面积,康普顿相机在近场成像情况(放射源距离探测器几个 cm)下可直接获得源三维位置信息,但放射源距离探测器较远时,由于纵深方向分辨迅速恶化,其纵深位置识别功能受到限制。为实现较好的远场三维位置识别效果,本工作采用移动成像装置的方法展开三维位置识别功能测试,测试中成像系统两层探测器间距为 6.3 cm,保证探测器平面正对前方,使<sup>137</sup>Cs点源分别位于(0 cm, 0 cm, 500 cm)、(0 cm, 0 cm, 600 cm)处,移动成像装置使其分别在(-283 cm, 0 cm, 0 cm)、(420 cm, 0 cm, 0 cm)、(0 cm, 180 cm, 0 cm)三个位置处进行成像测量。每个点数据采集时间约为 23 h。图10给出了对该成像系统三维位置识别功能的测试结果。由图10可见,最终源三维坐标分别定位于(-30 cm, -30 cm, 490 cm)和(-10 cm, -30 cm, 590 cm),与其实际位置偏差在 30 cm 以内。因此通过该种方式,该成像装置可以确定 5 m 外的<sup>137</sup>Cs点源三维位置信息,具有点源三维位置识别功能。

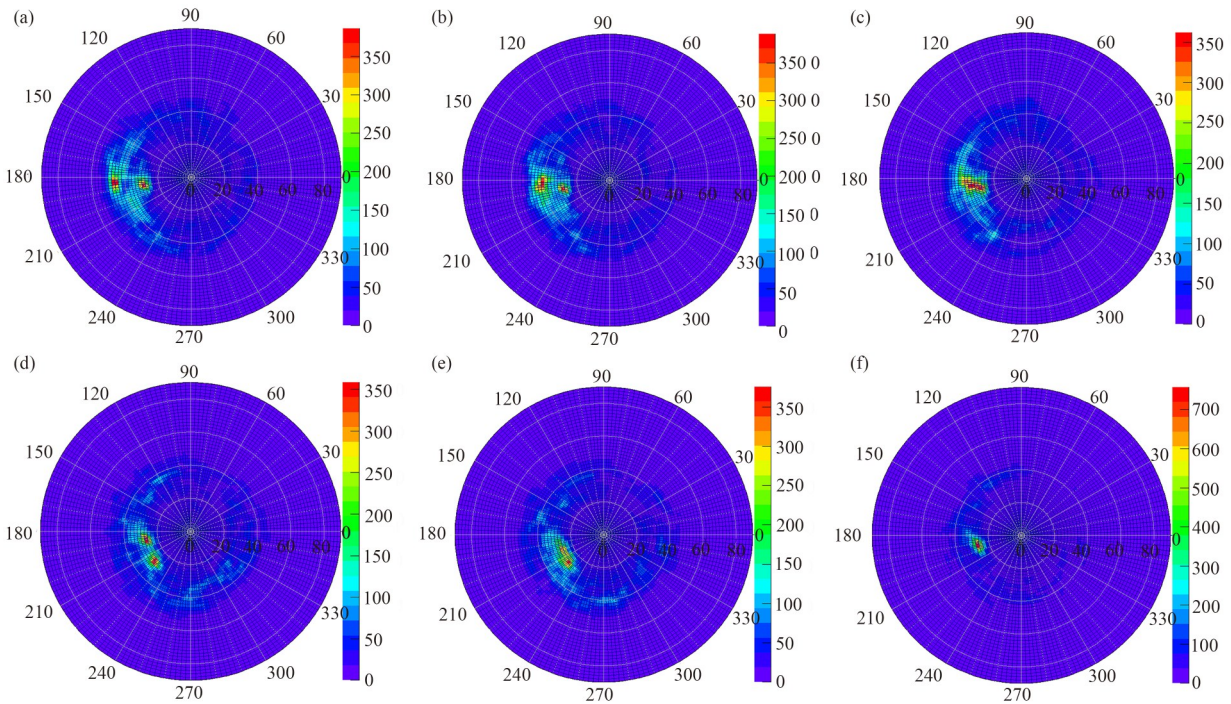


图9 成像系统角分辨测试结果  
Fig.9 Angle resolution results of the imaging systems  
(a) Approximately  $20^\circ$  apart for  $\theta$ , (b) Approximately  $15^\circ$  apart for  $\theta$ , (c) Approximately  $10^\circ$  apart for  $\theta$ , (d) Approximately  $30^\circ$  apart for  $\phi$ , (e) Approximately  $20^\circ$  apart for  $\phi$ , (f) Approximately  $10^\circ$  apart for  $\phi$

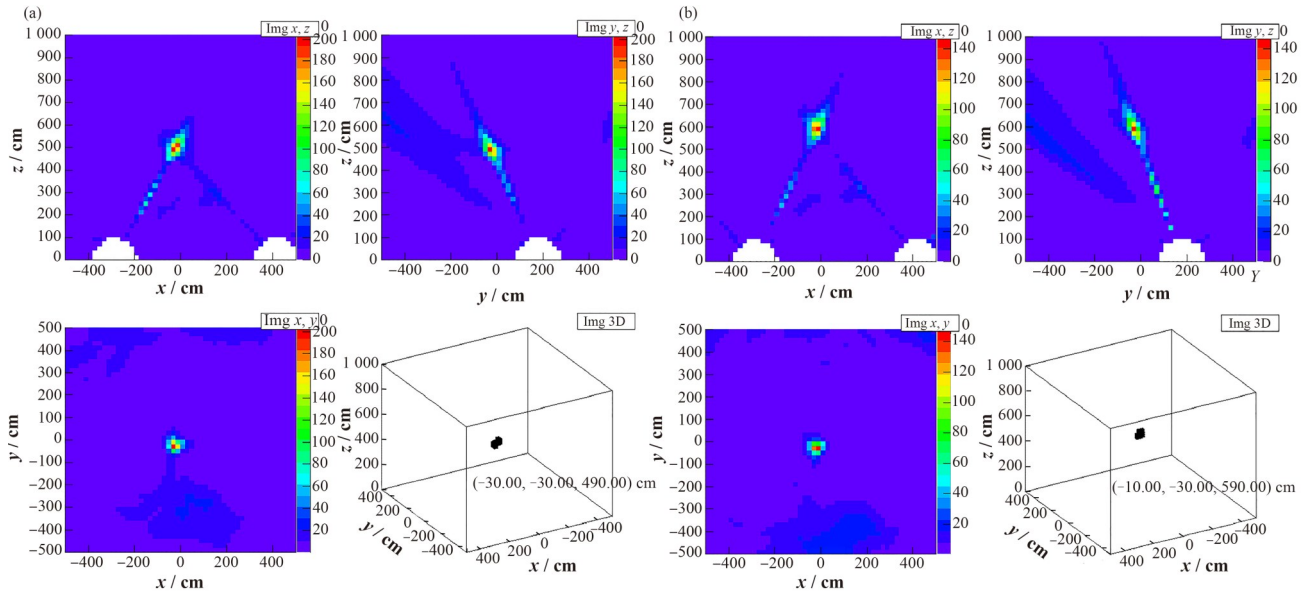


图 10 成像系统三维位置识别功能测试结果 (a) 源位于(0 cm, 0 cm, 500 cm)处, (b) 源位于(0 cm, 0 cm, 600 cm)处

Fig.10 Results of the 3D position recognition function of the imaging system

(a) The source is located at (0 cm, 0 cm, 500 cm), (b) The source is located at (0 cm, 0 cm, 600 cm)

## 4.2 成像角分辨率影响因素的实验研究

### 4.2.1 层间距

测试中成像系统两层 CZT 对心布置, 将散射、吸收层间距由 2.3 cm 增大到 6.3 cm, 保持探测器中

心与  $^{137}\text{Cs}$  点源距离为 1 m, 每个点数据采集时间分别取 45 min。图 11 给出了增加层间距后, 等效的两个  $^{137}\text{Cs}$  点源分别在  $\theta$ 、 $\varphi$  方向相隔不同角度时的成像测试结果。由图 11 可见, 当层间距增加后, 源在  $\theta$  方

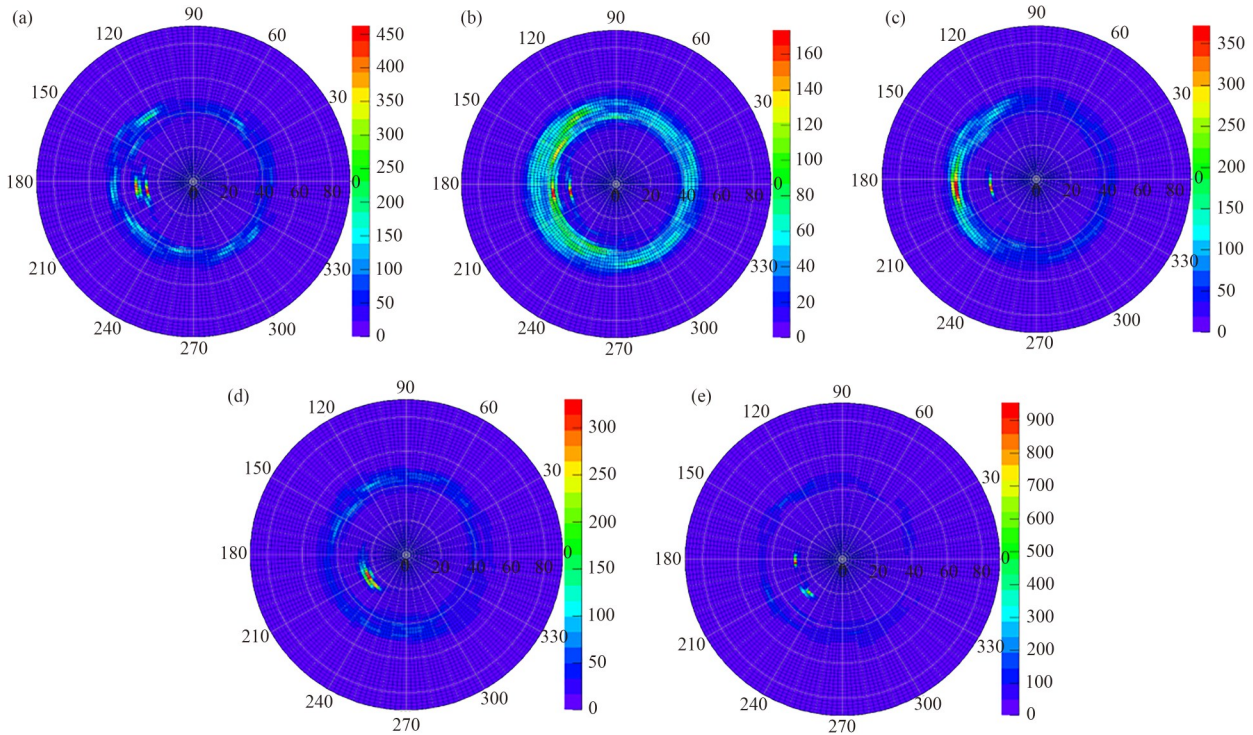


图 11 增大层间距后成像系统角分辨率测试结果

(a)  $\theta$  方向相隔约  $5^\circ$ , (b)  $\theta$  方向相隔约  $10^\circ$ , (c)  $\theta$  方向相隔约  $20^\circ$ , (d)  $\varphi$  方向相隔约  $30^\circ$ , (e)  $\varphi$  方向相隔约  $40^\circ$

Fig.11 Angular resolution test results of the imaging system after increasing the layer spacing

(a) Approximately  $5^\circ$  apart for  $\theta$ , (b) Approximately  $10^\circ$  apart for  $\theta$ , (c) Approximately  $20^\circ$  apart for  $\theta$ , (d) Approximately  $30^\circ$  apart for  $\varphi$ , (e) Approximately  $40^\circ$  apart for  $\varphi$



向约为 $30^\circ$ 入射时,成像系统 $\theta$ 方向角分辨率由约 $15^\circ$ 改善为小于 $5^\circ$ ,但 $\varphi$ 方向角分辨率由约 $20^\circ$ 恶化为约 $40^\circ$ 。由此可以得出结论:增加成像系统层间距,数据采集时间延长,成像效率变低,系统 $\theta$ 方向角分辨本领得到改善,但 $\varphi$ 方向角分辨本领被恶化。

#### 4.2.2 吸收层探测面积

测试中成像系统两层CZT对心布置,散射、吸收层间距取6.3 cm不变,保持探测器中心与 $^{137}\text{Cs}$ 点源距离为1 m,采取移动成像装置中吸收层探测器与散射层探测器相对位置的方法来间接增大吸收层探测器的有效探测面积。移动方式如图12所示,吸收层探测器固定不动,散射层探测器在探测平面从中心位置点依次移动到九宫格的相邻8个位置点,每个点数据采集时间约为45 min,相当于其探测面积扩大至原单块面积的9倍。图13给出了增大吸收

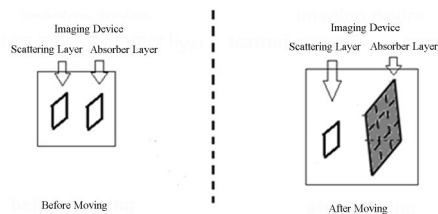


图12 成像装置吸收层移动方式示意图  
Fig.12 Schematic diagram of the moving mode for the absorber layer of imaging device

层探测面积后,等效的两个 $^{137}\text{Cs}$ 点源分别在 $\theta$ 、 $\varphi$ 方向相隔不同角度时的成像测试结果。由图13可见,当吸收层探测器探测面积由 $6.45\text{ cm}^2$ 增大至 $58.06\text{ cm}^2$ 后,系统在 $\theta$ 方向角分辨率约为 $5^\circ$ ,改善不明显;但 $\varphi$ 方向角分辨率由原来约 $40^\circ$ 改善为约 $10^\circ$ 。由此可以得出结论:增大吸收层探测面积将有效改善系统 $\varphi$ 方向角分辨本领。

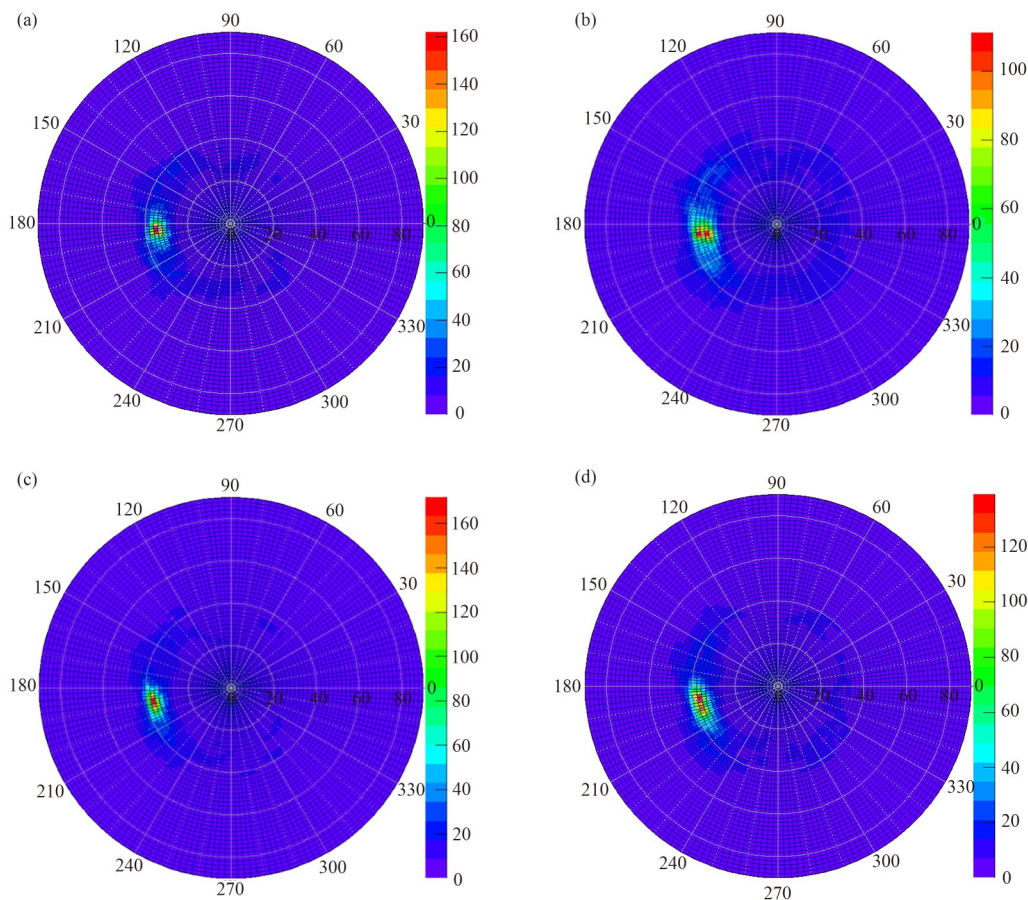


图13 不同吸收层探测面积成像系统角分辨率测试结果  
(a)  $\theta$ 方向相隔 $4^\circ$ , (b)  $\theta$ 方向相隔 $5^\circ$ , (c)  $\varphi$ 方向相隔约 $8^\circ$ , (d)  $\varphi$ 方向相隔约 $10^\circ$   
Fig.13 Angular resolution test results of imaging systems with different absorption layer detection area  
(a) Approximately  $4^\circ$  apart for  $\theta$ , (b) Approximately  $5^\circ$  apart for  $\theta$ , (c) Approximately  $8^\circ$  apart for  $\varphi$ , (d) Approximately  $10^\circ$  apart for  $\varphi$

#### 4.2.3 成像角分辨性能试验小结

表1总结给出了对该成像系统角分辨性能的实验测试结果。结果显示:当成像系统层间距为

6.3 cm,吸收层探测面积为 $58.06\text{ cm}^2$ 时,该成像系统 $\theta$ 、 $\varphi$ 方向的角分辨率约为 $10^\circ$ 。



表1 成像系统角分辨性能实验测试结果  
Table 1 Experimental test results of angular resolution performance for the imaging system

层间距 Layer spacing / cm	吸收层探测面积 Area of absorption layer / cm <sup>2</sup>	$\theta$ 方向角分辨率 Angular resolution for $\theta / (^\circ)$	$\varphi$ 方向角分辨率 Angular resolution for $\varphi / (^\circ)$
2.3	6.45	10~15 (入射角约30° Incidence angle is about 30°)	10~20 (入射角约200° Incidence angle is about 200°)
6.3	6.45	<5 (入射角约30° Incidence angle is about 30°)	30~40 (入射角约185° Incidence angle is about 185°)
6.3	58.06	4~5 (入射角约30° Incidence angle is about 30°)	10 (入射角约185° Incidence angle is about 185°)
		5~10 (入射角约75° Incidence angle is about 75°)	

## 5 结语

本工作研发了一套双层分离式康普顿相机,构建了配套像素型CZT探测器的采用多通道核信号处理专用芯片的读出电子学系统,开发了基于LM-MLEM算法的图像成像算法程序,对影响该系统成像性能的若干因素进行了实验测试,测试结果表明该系统探测器的能量分辨率约为3%(FWHM@662 keV),能确定5 m外的<sup>137</sup>Cs点源三维位置信息,经优化后的 $\theta$ 、 $\varphi$ 方向角分辨率约为10°。本研究成功实现了分离式结构康普顿相机原理,为后续系统样机性能的进一步优化及实际工程化应用奠定了基础。

基于本工作对双层分离式结构康普顿相机成像性能的研究,未来可从以下两方面入手对该成像系统成像性能展开优化:一是改进读出电子学系统,实现作用点在单层探测器中深度信息的获取及处理,校正成像位置误差;二是考虑采取第二层探测器包围式布置结构,或适当调整第二层探测器晶体布局及排布形式,改善系统成像角分辨能力。此外,在对系统三维成像方面,虽然目前该成像系统已通过移动探测器位置的方式实测证明具有三维位置识别功能,但在三维纵深位置分辨能力的量化改善上,还有待于进一步深入研究。

**作者贡献声明** 王薇:负责康普顿相机角分辨的研究模拟,实验方案的制定,具体实验实施及数据处理,论文的撰写;李兴隆:负责康普顿相机电子学的

搭建,芯片开发,重建算法编写及具体实验实施;吴建华:负责康普顿相机性能的模拟及部分实验实施;庞洪超:负责项目整体实施方案的选取及指导性技术支持;骆志平:负责项目研究选题,整体研究方向把控。

## 参考文献

- Pinkau K. Notizen: die messung solarer und atmosphärischer neutronen[J]. Zeitschrift Für Naturforschung A, 1966, 21(12): 2100 - 2101. DOI: 10.1515/zna-1966-1216.
- 杨靖, 谭放, 吴玉迟, 等. 康普顿相机的应用现状与发展趋势[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(9): 966 - 969, 973. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.09.020. YANG Jing, TAN Fang, WU Yuchi, *et al.* Application status and development trend of Compton camera[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(9): 966 - 969, 973. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.09.020.
- Takeda S, Harayama A, Ichinohe Y, *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 - 211. DOI: 10.1016/j.nima.2014.11.119.
- Wahl C G, Kaye W R, Wang W Y, *et al.* The Polaris-H imaging spectrometer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 784: 377 - 381. DOI: 10.1016/j.nima.2014.12.110.
- Montémont G, Bohuslav P, Dubosq J, *et al.* NuVISION: a portable multimode gamma camera based on HiSPECT imaging module[J]. 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2017: 1 - 3. DOI: 10.1109/NSSMIC.2017.8532713.
- 刘毅. 康普顿散射成像探测器的研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. LIU Yi. Development of Compton scattering imaging detector[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- 刘伍丰, 刘相满, 唐述文, 等. 下一代康普顿望远镜的量能器探测单元研究[J]. 核技术, 2020, 43(1): 010203. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010203. LIU Wufeng, LIU Xiangman, TANG Shuwen, *et al.* Study of the detection unit of the calorimeter for the next generation Compton telescope[J]. Nuclear Techniques,

- 2020, **43**(1): 010203. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010203](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010203).
- 8 傅健强. 碲锌镉探测器若干关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.  
FU Jianqiang. Research on the key techniques of CdZnTe detector[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- 9 Liu Y L, Fu J Q, Li Y L, *et al.* Preliminary results of a Compton camera based on a single 3D position-sensitive CZT detector[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(10): 145. DOI: [10.1007/s41365-018-0483-0](https://doi.org/10.1007/s41365-018-0483-0).
- 10 刘益林. 基于三维位置灵敏碲锌镉探测器的康普顿成像研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.  
LIU Yilin. Research on Compton imaging base on a 3-D position sensitive CdZnTe detector[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- 11 王薇, 李传龙, 吴建华, 等. 康普顿成像系统角分辨率影响因素的理论及模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(12): 2471 - 2477.  
WANG Wei, LI Chuanlong, WU Jianhua, *et al.* Theoretical and simulation study on factor affecting angular resolution of Compton imaging system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(12): 2471 - 2477.
- 12 张迎增. 康普顿成像精度影响机制与提升方法[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.  
ZHANG Yingzeng. Influence mechanism and improvement method of Compton imaging accuracy[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2019.
- 13 丁长骥, 毛本将, 袁永刚, 等. 康普顿相机的GEANT4模拟与反投影图像重建[J]. 核技术, 2015, **38**(11): 110402. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110402](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110402).  
DING Changji, MAO Benjiang, YUAN Yonggang, *et al.* GEANT4 simulation and imaging reconstruction by backprojection algorithm for Compton camera[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(11): 110402. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110402](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110402).
- 14 高歌. 基于 Geant4 的康普顿相机的蒙特卡洛模拟与图像重建[D]. 太原: 中国辐射防护研究院, 2018.  
GAO Ge. Monte Carlo simulation and image reconstruction of Compton camera based on Geant4[D]. Taiyuan: China Institute for Radiation Protection, 2018.
- 15 Barrett H H, Eskin J D, Barber H B. Charge transport in arrays of semiconductor gamma-ray detectors[J]. Physical Review Letters, 1995, **75**(1): 156 - 159. DOI: [10.1103/physrevlett.75.156](https://doi.org/10.1103/physrevlett.75.156).
- 16 李兴隆, 王薇, 吴建华, 等. 用于康普顿相机的成像探测系统研制[J]. 中国辐射卫生, 2020, **29**(5): 519 - 523, 529. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.019](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.019).  
LI Xinglong, WANG Wei, WU Jianhua, *et al.* Development of detection system for Compton camera[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2020, **29**(5): 519 - 523, 529. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.019](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.019).
- 17 Studen A, Chesi E, Cindro V, *et al.* A silicon PET probe [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, **648**: S255 - S258. DOI: [10.1016/j.nima.2010.11.073](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.11.073).
- 18 Barrett H H, White T, Parra L C. List-mode likelihood[J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision, 1997, **14**(11): 2914 - 2923. DOI: [10.1364/josaa.14.002914](https://doi.org/10.1364/josaa.14.002914).
- 19 Andreyev A, Sitek A, Celler A. Fast image reconstruction for Compton camera using stochastic origin ensemble approach[J]. Medical Physics, 2011, **38**(1): 429 - 438. DOI: [10.1118/1.3528170](https://doi.org/10.1118/1.3528170).
- 20 Hilaire E, Sarrut D, Peyrin F, *et al.* Proton therapy monitoring by Compton imaging: influence of the large energy spectrum of the prompt- $\gamma$  radiation[J]. Physics in Medicine and Biology, 2016, **61**(8): 3127 - 3146. DOI: [10.1088/0031-9155/61/8/3127](https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/8/3127).