

利用作用深度信息提高正电子断层 成像仪分辨率一致性*

刘华锋

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2005 年 11 月 28 日收到 2006 年 1 月 20 日收到修改稿)

获取作用深度信息是设计小动物正电子断层成像仪的关键技术之一. 我们利用新设计的含有作用深度信息的探测器, 从模拟与实验两个方面观测了作用深度信息对于分辨率一致性的影响. 结果表明: 在 γ 射线垂直入射时, 深度编码探测器和一般的无深度检出机能的探测器 均获得了高分辨率, 而 γ 射线斜入射时, 深度编码探测器与一般的探测器相比能提供更好的空间分辨率.

关键词: 作用深度, 空间分辨率, 正电子断层成像仪

PACC: 2940T, 2940M

1. 引 言

正电子发射断层成像仪器(positron emission tomography, PET)是生物学、生理学和认知科学不可缺少的设备, 并且成为分子生命科学研究的最新武器. PET 系统中探测器成环状配置, 处于视野四周的 γ 射线将斜入射到探测器的晶体上, 这些 γ 射线极有可能透射过这个晶体与相邻的晶体产生作用或在第一个晶体中由于 Compton 散射而产生的二次 γ 射线与相邻的晶体产生作用. 这些作用造成了用于图像重建的投影数据符合线的不确定性, 因而使得空间分辨率从中心到视野的四周呈下降趋势^[1]. 随着采用狭小晶体来提高空间分辨率, 使 PET 探测器环视场空间分辨率不一致性问题更为突出. 迄今为止, 为了解决分辨率一致性的问题, 提出了多种带有作用深度(depth of interaction, DOI)信息的探测器的解决方案^[2,3].

在本文中, 我们从模拟与实验研究两个方面对比了我们新设计的两层深度编码探测器与普通探测器在系统分辨率的性能差异, 详细讨论了作用深度信息对于提高分辨率一致性的作用.

2. 材料与方 法

2.1. 实验研究

我们所设计的深度编码探测器由两层闪烁晶体阵列和 PS-PMT 相结合组成. 假设下层晶体阵列为 $n \times m$ 维, 则上层晶体阵列为 $(n-1) \times (m-1)$ 维, 上下两层晶体单元的尺寸相同. 上层晶体的位置相对于下层晶体在 X 和 Y 方向上都有半个阵列单元的错位, 也就使得上层的晶体刚好位于下层 2×2 晶体组成的阵列的中心位置, 如图 1(a)所示^[4].

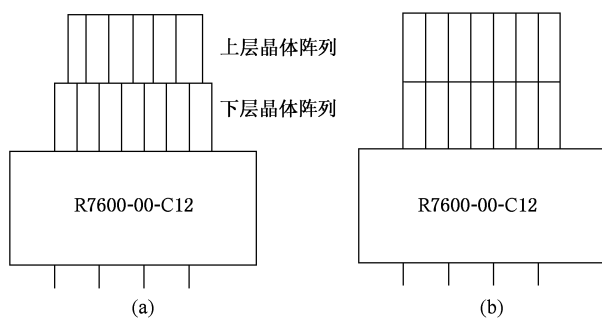


图 1 实验中使用的深度编码探测器(a)和普通探测器(b)

在实验中, 我们把 6×6 LSO 晶体阵列放置在

* 国家创新群体科学基金(批准号 60021201)和浙江省科技计划(批准号 2005C21019)资助的课题.

7×7 LSO 晶体阵列的上面,它的位置相对于 7×7 LSO 阵列在 X 和 Y 方向上均有半个阵列单元的错位,7×7 LSO 阵列的另一端面 and R7600-00-C12 耦合.单个晶体的尺寸为 1.8mm×1.8mm×10mm,所有端面均经过镜面抛光.为了对比,我们同样构造两

个没有 DOI 信息的探测器,它们是由上层阵列相对下层阵列位置上没有任何移动的两层 7×7 LSO 阵列构成,与 DOI 探测器使用相同的 LSO 晶体,如图 1 (b)所示.所有测试均使用 ²²Na 点辐射源,LSO 晶体在暗室里至少存放 24h,以消除余辉效应.

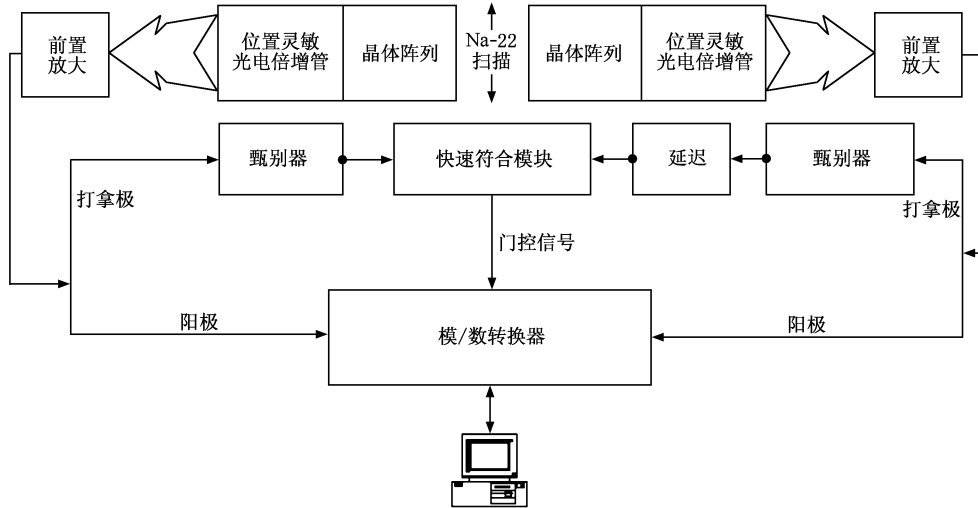


图 2 符合一致响应函数测试装置

图 2 是符合一致响应函数(coincidence response functions , CRF)的测试装置. PS-PMT 的倍增级经放大后输入到快速符合一致模块(fast coincidence , FC)模块 FC 判断是否是符合一致事件,若为符合一致事件则产生门控信号为(analog-to-digital converter)ADC 开门. ADC 的作用是把输入的模拟信号转换为 12 位的数字信号.计算机通过 GPIB 接口采集数据.探测对分别放置在直径 110 mm/160mm 的环上不同位置,相应的 γ 射线入射角分别为 0° , 15° 和 30° . ²²Na 点辐射源沿中线以 0.25 mm 的间隔扫描通过整个探测器对,在每个时间位置上采集的符合计数事件为 20000 次.在测量过程中,10 mm 厚的钨片放置在 LSO 阵列的两旁以消除那些从 LSO 晶体侧面入射的 γ 射线.按照上述步骤,分别对 DOI 探测器和不带 DOI 信息的探测器进行了测试.

2.2. 计算机程序模拟^[5]

基于线性衰减模型,我们设计了 PET 系统的模拟器.图 3 (a)是用于模拟器的探测器模型.探测器阵列的单个闪烁晶体的尺寸为:u(宽度)×l(长度)×d(深度).晶体之间相距 t.

假设探测器微分概率密度函数为 $g(x)$,x 为距视野中心的距离.如图 3 (b)所示, γ 射线斜入射时,

总是要穿过前面 n 个晶体(在这些晶体内行走的长度称为吸收长度 l_{abs}),最后才第 m 个晶体吸收(在这个晶体内行走的长度称为有效长度 l_{eff}).因此,可以写出探测器微分概率密度函数一般形式

$$g(x) = e^{-\mu l_{\text{abs}}}(1 - e^{-\mu l_{\text{eff}}}), \quad (1)$$

μ 为晶体的总线性衰减系数. γ 射线垂直入射时, $g(x)$ 简化为: $g(x) = 1 - e^{-\mu l_{\text{eff}}}$.

我们把符合探测器对组成的系统视为线性的,然后写出其输入-输出关系

$$f(X, \epsilon) = g(x), g(X + \epsilon(X - x)) = \int_0^{x_0} g(x)g(X + \epsilon(X - x))dx, \quad (2)$$

这里 $\epsilon = \frac{r_2}{r_1}$ 即点辐射源相对符合探测器对的位置, x_0 为在入射角一定的条件下,投影区域有效的道数宽度, $f(X, \epsilon)$ 即为符合一致函数.参照 R. Lecomte 等人的工作^[6],可推导出这个线性系统的半幅值全宽度(FWHM)的值.设 $MTF(v)$ 为系统的调制传递函数,则空间分辨率为

$$R = \frac{1}{\int_v MTF(v) dv} = \frac{[\int_x f(x) dx]}{[\int_x f(x)] dx}, \quad (3)$$

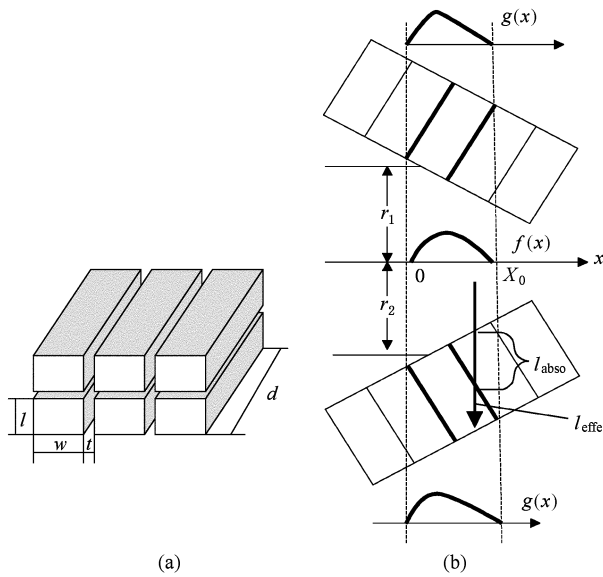


图 3 (a)用于模拟器的探测器模型 (b)CRF 曲线计算示意图

3. 结果和讨论

我们设计的 DOI 探测器基本原理为 :如果 γ 射

线与上层的晶体发生相互作用 ,将产生光子 .这些光子通过与该晶体紧密相关的下层的 2×2 晶体阵列的传输到 PS-PMT 的光阴极上 .激励光电阴极发射出光电子 ,光电子被各倍增级倍增放大 ,最后经阳极输出 .可以知道 ,上层晶体的闪烁光分布的重心则位于 2×2 晶体阵列的中心位置 .另一方面如果 γ 射线被下层的一个晶体所吸收 ,则产生的光子直接被 PS-PMT 采集和放大后 ,闪烁光分布的重心位于该晶体本身的中心位置上 .如此 ,就获得了 γ 射线作用深度信息 .

对于 DOI 探测器 ,有两种符合的组合形式 :即上层阵列的元素与上层阵列的元素连线 (U Vs U) ,下层阵列的元素与下层阵列的元素连线 (L Vs L) .每个元素的能量窗口设置为 300—700 keV .光子同时到达相向放置的探测器的同一位置才为“真”的符合一致数据 ,而其他的数据则舍弃不用 .实验测得的 CRF 曲线 ,经高斯拟合后 ,计算了其平均 FWHM 数值 .结果列在了表格 1 中 .图 4 给出了 γ 射线在 30° 入射时 ,测量所得 DOI 探测器和普通型探测器的平滑后的 CRF 曲线 .

表 1 DOI 探测器与普通探测器的 FWHM 测试数据

探测器对距离/cm	γ 射线入射角度($^\circ$)	DOI 探测器 FWHM/mm	普通探测器 FWHM/mm
11	$\theta = 0$	1.32 (U Vs U)	1.41
		1.38 (L Vs L)	
	$\theta = 15$	2.14 (U Vs U)	
		2.38 (L Vs L)	
	$\theta = 30$	3.34 (U Vs U)	
		3.46 (L Vs L)	
16	$\theta = 0$	1.36 (U Vs U)	1.53
		1.49 (L Vs L)	
	$\theta = 15^\circ$	2.31 (U Vs U)	
		2.46 (L Vs L)	
	$\theta = 30^\circ$	3.41 (U Vs U)	
		3.61 (L Vs L)	

把 CRF 曲线的平均 FWHM 数值作为距视野中心的距离 ,即相应 γ 射线入射角度的函数曲线显示在图 5 中 .我们依据 2.2 所描述的计算机模拟思想计算的 FWHM 数值也在图中给出了 .对于没有深度检出机能的一般的探测器 ,CRF 曲线的 FWHM 数值随着 γ 射线入射角度的增大 ,空间分辨率呈现快速下降的趋势(从 1.4mm 上接近 5mm) ;而对于

DOI 探测器 ,在同等的条件下 ,其空间分辨率从 1.4mm 上升为 3.6mm . γ 射线垂直入射时 ,DOI 探测器和不带 DOI 信息的探测器均具有高空间分辨率 ,但是对于 γ 射线斜入射时 ,与不带 DOI 信息的探测器相比 ,DOI 探测器大大提高了空间分辨率的一致性 .这项实验清楚地表明我们新设计的 DOI 探测器能够提高 PET 系统的视野四周的空间分辨率 .

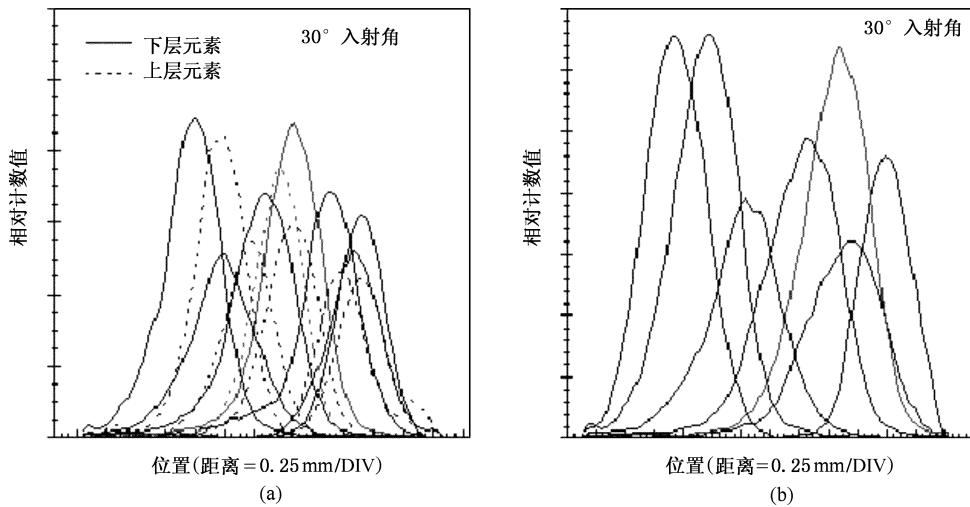


图 4 γ 射线入射角度为 30° 时 DOI 探测器的 CRF 曲线 (a) 与普通探测器的 CRF 曲线 (b)

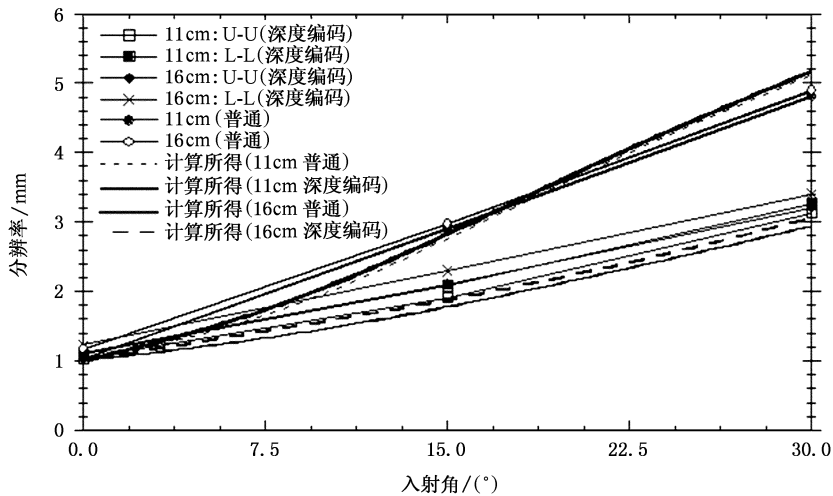


图 5 深度编码探测器的空间分辨率与一般探测器的对比图

4. 结 论

利用新设计的深度编码探测器,从理论计算与实验两个方面讨论了作用深度信息对于离心分辨率

的影响.实验结果表明:在 γ 射线垂直入射时,深度编码探测器和一般的无深度检出机能的探测器,均获得了高分辨率,而在 γ 射线斜入射时 DOI 探测器大大提高了空间分辨率的一致性.

[1] Ziegler I S 2005 *Proceed. of IEEE*. **93** 763
 [2] Inadama N, Murayama H, Omura T, Yamashita T, Yamamoto S, Ishibashi H, Kawai H, Omi K, Umehara T, Kasahara T 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 629
 [3] Orita N, Murayama H, Kawai H, Inadama N, Tsuda T 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 8
 [4] Liu H, Omura T, Watanabe M, Yamashita T 2001 *Nucl. Instru. & Meth. A* **459** 182

[5] Lecomte R, Schmitt D, Lamoureux G 1984 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 556
 [6] Lawrence R, Neil A, Thompson C et al 1984 *Nucl. Instru. and Meth. A* **227** 361
 [7] Xu R K, Guo C, Wen S K, Xia G X et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2140 (in Chinese) [徐荣昆、郭存、温树槐、夏广新等 2003 物理学报 **52** 2140]

Improving the off-center resolution in position emission tomography using depth-of-interaction information^{*}

Liu Hua-Feng

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 ,China*)

(Received 28 November 2005 ; revised manuscript received 20 January 2006)

Abstract

It is well known that if the depth of interaction(DOI) within the crystal can be measured , the parallax error can be corrected and the resolution should be uniform throughout the field of view . We have investigated the spatial resolution of off-center sources in a positron emission tomography (PET) ring detector configuration using our proposed DOI detector . It is confirmed that the depth-encoding detector provides better spatial resolution for the oblique incidence of gamma-rays .

Keywords : depth of interaction , spatial resolution , PET

PACC : 2940T , 2940M

^{*} Project supported by National Natural Science Foundation of China for Innovative Research Groups(Grant No. 60021201) and Research and Development Program of Zhejiang Province(Grant No. 2005C21019) .