

太阳硬 X 射线成像望远镜模拟研究 *

滕 藤^{1,2,3†} 伍 健^{1,2} 常 进^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 调制准直器型太阳硬 X 射线成像望远镜是目前较为通用的太阳观测设备. 空间调制望远镜是基于中心轴不旋转的望远镜, 适用于 3 轴稳定的卫星. 针对我国可能的太阳观测计划, 给出并比较了两组空间调制望远镜的配置方案, 然后利用 GEANT4 高能物理通用软件模拟实际光子的计数情况, 使用 MATLAB 实现图像重建. 比较模拟光子计数得到的重建图与几何方法计算光子数得到的重建图, 结果表明 GEANT4 仿真模拟得到的结果更接近实际. 最后, 还给出了初步可行的方案.

关键词 望远镜, 太阳: X 射线, 太阳: 耀斑, 技术: 图像处理, 方法: 其它诸多方面
中图分类号: P 171; **文献标识码:** A

1 引言

太阳高能辐射观测和研究一直是太阳研究领域的热点, 而对太阳高能辐射的观测可分为成像观测和谱观测, 他们提供了揭示耀斑能量释放之谜的线索. 对太阳硬 X 射线、 γ 射线观测, 由于其能量较高, 一般无法采用“镜”的光学系统. 早期都是采用准直器直接成像, 如 SMM/HXIS (Solar Maximum Mission/Hard X-ray Imaging Spectrometer)^[1], 但是这种成像方法技术要求较高; 后来有了复合准直器间接成像技术, 并被广泛认同, 成为 X 射线成像观测的首选方案; 但最近有人提出在掠射望远镜的镜面上镀多层膜, 这样可以使观测能段提高到 100 keV^[2].

编码孔成像、傅立叶变换成像都属于复合准直器技术的范畴. 编码孔成像原理类似于小孔成像原理, 其空间分辨率由探测器位置分辨率和探测器到编码孔板的距离决定. 如探测器元为 1 mm, 要达到 4'' 的空间分辨率, 探测器与编码孔板之间的距离要在 50 m 以上^[3], 这对卫星平台要求很高, 因此限制了这一技术在太阳观测中的应用. 傅立叶变换成像是采用双准直器系统探测光子随时间或空间的变化, 通过对入射光子的调制, 测量源分布的特定傅立叶成分, 对这些傅立叶成分进行傅立叶逆变换就可以得到脏图 (即没有经过处理, 含有较多噪声的源的图像), 再对脏图进行图像处理, 最终可获得质量较好

2010-12-07 收到原稿, 2011-02-25 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10973046) 资助

† tengteng@pmo.ac.cn

的源的图像. 这种方法与编码孔成像的方法相比, 不需要有高空间分辨率的探测器, 也不要求有较大的探测器 / 孔径间距, 同时又具有高灵敏度和高可靠性.

傅立叶成像技术有多种实现方式, 其中空间调制准直器和时间调制准直器是目前广泛使用的硬件配置. 何谓准直器将在第 2 章中具体介绍, 这里主要介绍空间与时间的区别. 所谓空间调制准直器是指整个调制系统在空间位置上相对不动, 通过阵列足够多不同摆放角度、不同节距的准直器, 来获得充足的傅立叶变换项, 以实现傅立叶逆变换, 进而重建出耀斑的源图. 即准直系统不需要旋转, 每个子准直器的空间位置是固定的. 可以理解为牺牲空间以换取时间. 子准直器越多, 成像的分辨率也就越高. 所谓时间调制准直器, 即旋转调制准直器, 阵列的准直器不区分角度, 只有节距不同, 如果不旋转准直系统, 则只能获得一个角度上的傅立叶变换项, 因此通过绕一定的轴旋转准直系统来获得更多 (其他角度) 的傅立叶变换项, 从而提高空间分辨率, 但与此同时必然降低了时间分辨率. 因此需要牺牲时间以获得较高的空间分辨率.

从 1980 年第 1 张硬 X 射线图像到今天几 MeV 的光子图像, 空间分辨率从 $8''$ 到 $2.3''$, 太阳高能成像已经取得了长足的发展. Yohkoh/HXT (Hard X-ray Telescope)、RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) 是星载太阳高能望远镜的成功范例, 也分别是空间调制技术、时间调制技术的典型代表. 但是时间分辨率和空间分辨率始终是矛盾的, 要根据科学目标、观测对象、卫星要求等, 作出权衡并选择合适的硬件配制和调制方式.

针对我国在不久的将来可能进行的对日空间观测, 我们对空间调制准直器型硬 X 射线成像望远镜进行了仿真模拟研究.

2 图像重建原理

光子通过太阳望远镜的准直系统被探测器接收, 再对所有探测器接收到的光子数进行相应的傅立叶变换, 继而得到观测区域的太阳表面的耀斑图像^[4]. 一套准直系统由多个子准直器组成, 每一个子准直器由前后相距 L 的两组平行光栅组成, 每个光栅由平行阵列、行距相同、X 射线不透明的狭板组成. 图 1(a) 和图 1(b) 分别给出了子准直器的剖面图及光栅的俯视图. 图 1(a) 中最下方的是探测器, 用于记录光子数及光子能量. 对于一套准直系统而言, 每个子准直器后方都有一个探测器, 因此, 有几个子准直器就有几个探测器. 图 1(b) 中的黑色条纹表示光栅的狭板, 宽为 d_1 , 白色条纹表示狭缝, 宽为 d_2 , 狭板间距为 $p = d_1 + d_2$ (术语称节距), α 是入射光线在与狭缝垂直的平面内与法线方向的夹角, 即入射角度.

由于模拟的探测器是用于对日观测的, 而太阳对其的张角很小, 仅为半度左右, 因此由于光线倾斜入射对探测器有效面积的影响几乎可以忽略不计. 在重建的过程中, 做以下两点假设: 第一, 假定光栅都是理想的, 所谓理想是指狭板厚度为零且对任何强度的硬 X 射线完全吸收; 第二, 假定感兴趣的成像区域位于探测器视场的中心部位, 且比视场小得多, 以至于视场造成的透射率截距问题可以忽略不计. 基于以上两点假设, 当 $d_1 = d_2$ 时, 理想光栅的透射率在 $0 \sim 50\%$ 之间呈周期性三角波形, 峰值为 50% . 则准直

器的中心区域的透射率 T 可表示为图 2.

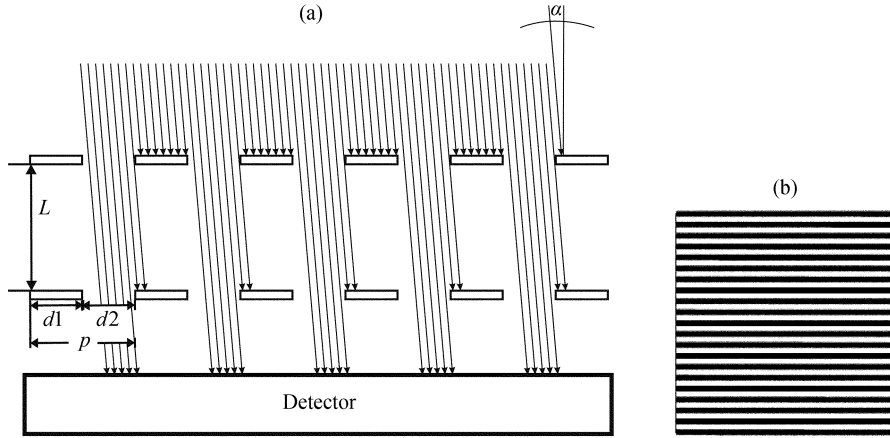


图 1 准直系统示意图. 子准直器 / 子探测器的剖面图 (a) 和光栅的俯视图 (b)

Fig. 1 Sketch of collimator system. Profile of subcollimator/subdetector (a) and planform of grating (b)

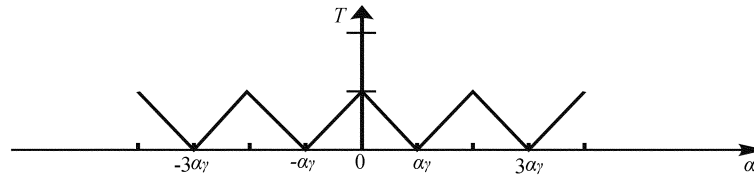


图 2 余弦准直器的透射率

Fig. 2 Transmissivity of cosine collimator

对该周期函数进行傅立叶级数展开, 得到

$$T(\alpha) = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \cos\left(\frac{\pi\alpha}{\alpha_\gamma}\right) + \frac{2}{9\pi^2} \cos\left(\frac{3\pi\alpha}{\alpha_\gamma}\right) + \frac{2}{25\pi^2} \cos\left(\frac{5\pi\alpha}{\alpha_\gamma}\right) + \dots, \quad (1)$$

其中 $\alpha_\gamma = d/L$, 缝宽 $d = p/2$, 透射率由 α 决定. 忽略直流分量及高次谐波不会对成像造成偏差^[5], 令 $\Phi = 2\pi\alpha L/p$, 因此有

$$T(\alpha) = \cos\left(\frac{2\pi}{p}\alpha L\right) = \cos(\Phi) = T(\Phi). \quad (2)$$

因为透射率的表达式为余弦函数, 因此称该准直器为余弦准直器. 与余弦准直器相对应的是正弦准直器, 顾名思义, 相位上与余弦准直器相差 $\pi/2$ 个相位. 结构上一致, 只是前后光栅的相对位置稍有变化, 余弦准直器前后光栅的狭缝与狭板两两相对, 而正弦准直器前后光栅的狭板和狭缝相对位置差 $p/4$ 的距离, 区别如图 3 所示.

余弦准直器和正弦准直器的透射率可分别表示如下:

$$T_c = \cos(\Phi) = \cos\left(\frac{2\pi}{p}\alpha L\right), \quad (3)$$

$$T_s = \sin(\Phi) = \sin\left(\frac{2\pi}{p}\alpha L\right). \quad (4)$$

其中下标 c 表示余弦准直器, s 表示正弦准直器.

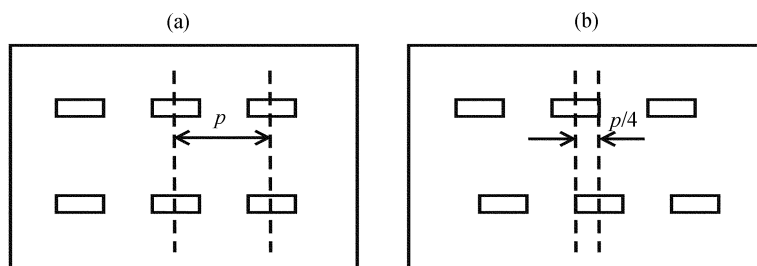


图 3 余弦 (a) 和正弦 (b) 准直器剖面示意图

Fig. 3 Sketches of cosine collimator (a) and sine collimator (b)

正、余弦准直器共同构成一对子准直器, 每一对子准直器相当于一个傅立叶变换项, 一套准直系统由多个摆放角度不同、节距不同的子准直器构成, 将空间域平面上的每个点变换到频域平面上. 简言之, 准直系统就相当于一个傅立叶正变换的过程^[4]. 准直系统 / 探测器与太阳表面的模拟示意图及光栅的摆放示意图分别如图 4 和图 5 所示, 以 4×4 个余弦子准直器为例说明, 正弦准直器同理, 图 5 中只给出了余弦准直器. 光栅的摆放角度 β 为偏离 y 轴正向的角度.

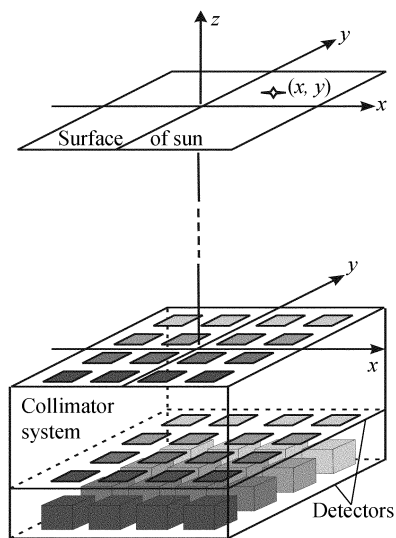


图 4 准直系统 / 探测器的几何模拟示意图
Fig. 4 Geometric sketch of the collimator system/detector

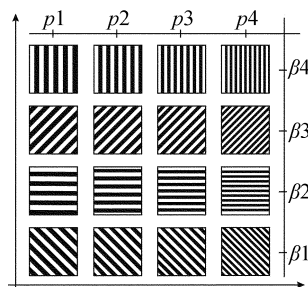


图 5 光栅的摆放示意图
Fig. 5 Positions of the collimators

重建图像的分辨率 D 由 p_{\min} (最小节距) 和 L 决定, $D = p_{\min}/L$; 综合孔径 M 由 p_{\max} (最大节距) 和 L 决定, $M = p_{\max}/L$. 视场由光栅板的大小决定, 正方形的光栅边长与 L 的比值就是视场的大小, 光栅的节距、摆放角度及视场将在 3.1 节中详细介绍.

首先我们讨论单个点源的最简单情况, 将图 4 中位于 (x, y) 处、入射角为 α' (入射光线与 z 轴的夹角) 的点源, 投影到光栅坐标系中, 如图 6 所示, AO 为 α' 的投影, $AC = x$, $AB = y$, 则 AD 即为 α 的投影. 将 α' 转换为 α , 有

$$\alpha = AD = AE + ED = \frac{x}{\cos \beta} + (y - x \tan \beta) \sin \beta = x \cos \beta + y \sin \beta. \quad (5)$$

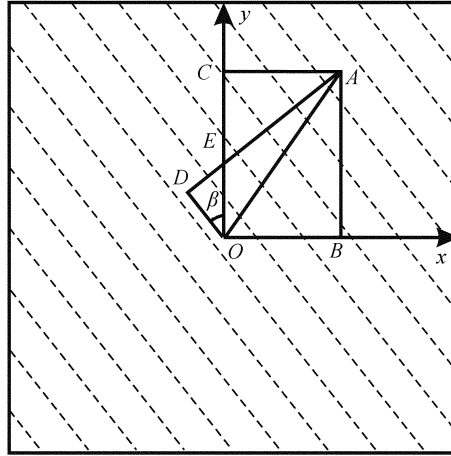


图 6 入射角的几何投影图

Fig. 6 Geometric projection of incidence angle

假设源的强度为 N , 则每个探测器计得的光子数为

$$V_c = N \cdot T_c = N \cdot \cos(2\pi(xu + yv)), \quad (6)$$

$$V_s = N \cdot T_s = N \cdot \sin(2\pi(xu + yv)), \quad (7)$$

其中 $u = \frac{L \cos \beta}{p}$, $v = \frac{L \sin \beta}{p}$. 然而, 实际源可能是多个点源, 也可能是面源, 这里我们把源平面理解为若干单个点源的叠加, 则每个探测器测得的光子数视为若干单个点源透射光子数的叠加. 设源平面的光子强度分布为 $B(x, y)$, 则探测器测得的光子数可表示为:

$$V_c = \sum_x \sum_y B(x, y) T_c, \quad (8)$$

$$V_s = \sum_x \sum_y B(x, y) T_s. \quad (9)$$

将 (9) 式乘 i 加上 (8) 式有

$$V = V_c + iV_s = \sum_x \sum_y B(x, y) (T_c + iT_s) = \sum_x \sum_y B(x, y) \exp(2\pi i(xu + yv)). \quad (10)$$

实际上, 源平面的光子强度 $B(x, y)$ 的分布是未知的, 探测器计得的光子数 V 才是已知的. (10) 式属于二维离散傅立叶正变换, 则求 $B(x, y)$ 即为二维离散傅立叶逆变换. 由此可见, 硬 X 射线成像的过程实质就是傅立叶逆变换的过程^[6-8].

$$B(x, y) = \sum_m \sum_n V \exp(-2\pi i(xu + yv)). \quad (11)$$

3 GEANT4 模拟调制准直系统对入射光的调制

GEANT4¹ 是用于模拟粒子与物质相互作用的物理过程的软件, 是基于面向对象技术和 C++ 语言而开发的. 其应用领域包括高能物理和核物理、加速器模拟以及医疗领域和空间科学的研究等领域.

欲用 GEANT4 进行光子计数的模拟, 必须提供以下信息: 探测器的几何信息 (包括几何结构和材料信息)、原初事例产生、粒子与介质的相互作用. 除上述 3 个 C++ 类之外, 还可以定义一些动作类来控制模拟过程及获取模拟过程中产生的信息.

3.1 光栅的选择

由于不同能量的光子在材料中的射程不同, 不同材料对相同能量的光子的阻挡能力也不同, 因此, 几何阴影并不能完全阻挡住入射光子. 换句话说, 用理想的几何方法无法得到真实的探测器响应, 所以需要考虑实际测量中可能存在的几种情况:

(1) 对相同能量的入射光子, 不同的材料阻挡的情况不同: 美国国际标准局² 给出了各种材料对不同能量的光子的吸收情况, 经过比较钨 (W) 和钼 (Mo) 两种材料, 钨的阻挡能力更强一些.

(2) 对不同能量的入射光子, 相同的材料阻挡情况不同: 随着入射光子能量的增加, 一定厚度的栅板材料对光子的阻挡本领减弱.

(3) 在栅板足够厚的情况下, 假设光子倾斜入射, 光子也可以从边缘透射.

首先比较不同厚度的不同材料对 X 射线的阻挡能力, 这里以 W 和 Mo 为例作比较. 由 (12) 式可以计算出 X 射线对物质的透射率:

$$I/I_0 = \exp[-(\mu/\rho)x] = \exp[-(\mu/\rho)\rho t], \quad (12)$$

其中 I_0 和 I 分别为入射强度和出射强度, μ 为质量吸收系数, ρ 是物质密度, x 为质量厚度, t 为厚度. 假设透射率 I/I_0 低于 10% 即认为对 X 射线不透明, 计算得到的结果为: 对能量低于 100 keV 的光子只需 1 mm 的钨就可以阻挡, 钼则需要 2 mm; 对能量达到 300 keV 的光子需约 4 mm 的钨板可以阻挡, 钼则需要约 9.5 mm; 对能量高达 500 keV 的光子需 9 mm 的钨才可以阻挡, 钼则需要 26 mm; 对于更高能量的光子需要多厚的相应材料才能保证光子不能透射, 可参见表 1. 为使成像的能量范围在几 keV 到 300 keV 左右, 选择 4 mm 厚的钨板.

¹<http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/IntroductionToGeant4/html/index.html>

²<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/chap2.html>

表 1 钨 (W) 和钼 (Mo) 对光子的透射率 (单位: %)

Table 1 Transmissivity of Tungsten (W) and Molybdenum (Mo) for photons (unit: %)

Energy(keV)	Tungsten(W): thickness(mm)								
	1	1.6	3.7	6.2	9	11	15	18	20
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
200	21.92	8.82	0.396	0.01	0	0	0	0	0
300	53.44	36.7	9.84	2.06	0.36	0.1	0.01	0	0
400	69.8	55.1	25.2	9.93	3.5	1.66	0.37	0.12	0.06
500	76.59	65.27	37.28	19.14	9.07	5.32	1.83	0.82	0.48
600	80.94	71.29	45.72	36.95	14.91	9.76	4.19	2.22	1.46
800	85.55	77.9	56.13	38	24.54	17.96	9.62	6.02	4.41
1000	97.98	81.47	62.26	45.21	31.58	24.45	14.65	9.98	7.72
Energy(keV)	Molybdenum(Mo): thickness(mm)								
	1	2.1	9.5	17	22	26	29	25	40
50	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
80	9.02	1.48	0	0	0	0	0	0	0
100	26.08	9.52	0	0	0	0	0	0	0
200	74.29	59.45	9.51	1.49	0.43	0.16	0.08	0.02	0
300	84.44	74.38	26.21	9.11	4.5	2.56	1.68	0.72	0.36
400	87.95	79.88	36.18	16.22	9.5	6.19	4.49	2.36	1.38
500	89.72	82.7	42.36	21.5	13.68	9.53	7.26	4.22	2.69
600	90.82	84.48	46.66	25.56	17.11	12.42	9.76	6.03	4.04
800	92.2	86.76	52.59	31.66	22.58	17.23	14.06	9.37	6.68
1000	93.09	88.26	56.74	36.27	26.92	21.2	17.73	12.39	9.2

为重建出均匀的源像, 节距的选择方式为 $p_1 : p_2 : \dots : p_n = n : (n - 1) : \dots : 1$, 其中 n 为正整数, 即节距的种数. 根据节距的这种选择方式, 最小节距一经确定, 则最大节距也随之确定. 目前受刻缝的技术水平限制, 最小的光缝宽度只能做到 $15 \mu\text{m}$, 即 $P_{\min} = 30 \mu\text{m}$, 因此前后光栅的距离及节距的种数决定了分辨率与综合孔径.

表 2 给出经过比较后得出的两种比较合适的光栅选择: 选择 I 是 8 种节距、8 种摆放角度的光栅组合, 前后光栅的距离为 77 cm, 综合孔径范围为 $64''$, 角分辨率可达到 $8''$; 选择 II 是 10 种节距、10 种摆放角度的光栅组合, 前后光栅的距离为 124 cm, 综合孔径范围为 $60''$, 角分辨率可达到 $6''$. 这里需要说明, 如果正、余弦准直器按 $n \times n$ 个来配置的话, 就需要 $2n \times n$ 个子准直器. 实验证明, 全光栅的配置下成像质量固然要好一些, 但是半光栅配置的成像质量也足以满足要求, 因此为了减轻重量及成本, 这里均采用半光栅的配置.

表 2 光栅节距及摆放角度的选择

Choice I $L = 0.77 \text{ m}$	$p(\mu\text{m})$								$M(\prime\prime)$	$D(\prime\prime)$		
	240	120	80	60	48	40	34.3	30				
0	1	1	0	1	1	0	1	1				
30	0	0	1	0	1	1	0	1				
45	1	1	0	0	0	0	0	0				
$\beta(^{\circ})$ 60	0	0	1	1	0	1	1	0	64	8		
90	1	1	0	1	1	0	1	1				
120	0	0	1	0	1	1	0	1				
135	1	1	0	0	0	0	0	0				
150	0	0	1	1	0	1	0	0				
Choice II $L = 1.24 \text{ m}$	$p(\mu\text{m})$										$M(\prime\prime)$	$D(\prime\prime)$
	360	180	120	90	72	60	51.4	45	40	36		
0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
18	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0		
36	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1		
$\beta(^{\circ})$ 54	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1		
72	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	60	6
90	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1		
108	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0		
126	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1		
144	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1		
162	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0		

表 2 中的 1 和 0 分别表示此处有光栅和无光栅。另外, 为获得全日面的观测视场, 正方形的光栅边长应大于 2 cm, 因此模拟过程中栅板的大小定为 3 cm×3 cm。图 7 为以选择 II 为例, 用 GEANT4 模拟出的空间望远镜的准直系统和探测器部分。图中黄色方框为探测器 (100 个), 上下两层蓝色方框即为准直系统。一个蓝色方框代表一个光栅, 上下相对的两个光栅就组成了一个子准直器。共 100 个子准直器, 正、余弦各 50 个。图 7 的准直系统大小与实际大小的缩放比例为 1:15。

3.2 比较不同光栅数组成的成像质量

以坐标原点为起点, 假设点 (24'', 48'') 处有一个点源, 那么 3.1 节中的两种选择重建出的图像分别如图 8(a) 和 8(b)。图 8(a) 中每格表示 8'', 综合孔径范围为 (64'', 64''); 图 8(b) 中每格表示 6'', 综合孔径范围为 (60'', 60'')。

不同光栅数组成的对于单个点源的重建图影响不明显, 下面比较多个点源的重建图。图 9(a) 是对 (24'', 24'')、(32'', 32'')、(40'', 24'') 和 (24'', 40'') 4 点成像, 图 9(b) 是对 (24'', 24'')、(30'', 30'')、(36'', 24'') 和 (24'', 36'') 4 点成像; 可见, 图 9(b) 的分辨率明显高于图 9(a)。由此可见, 当前后光栅的距离一定时, 光栅的个数越多, 图像的分辨率越高。

此图像重建算法^[9]不仅适用于对单个点源的重建, 也可以用于对线源的图像重建, 图 10(a) 是表 2 中选择 I 对 8'' 线源的重建图, 图 10(b) 是选择 II 对 6'' 线源的重建图。由图 8~10 可知, 该重建算法也普遍适用于面源的重建。

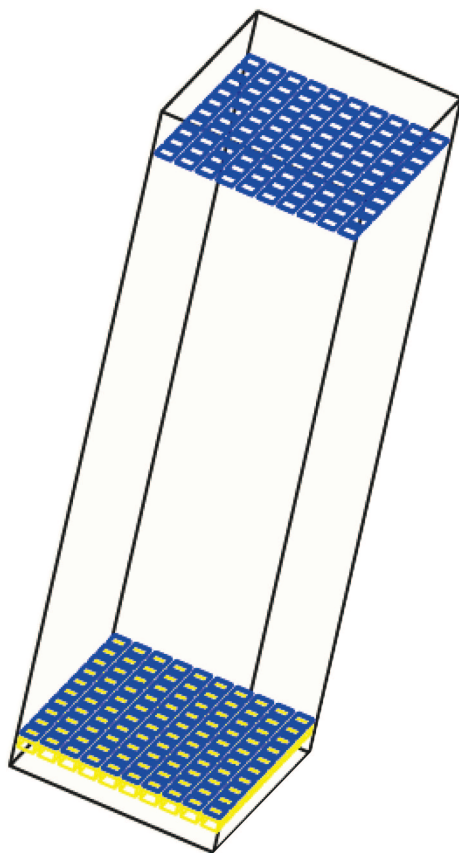


图 7 GEANT4 模拟的准直系统

Fig. 7 Collimator system simulated by GEANT4

3.3 比较几何光子计数与 GEANT4 光子计数

首先, 模拟最简单的情况. 无穷远处的点源到达准直器系统前为一束平行的光子, 假设这束光子共有 1 000 个事例, 分别记录 10 次不同能量范围的光子计数, 选择某个准直器透射的光子数做比较, 见表 3.

由于光子垂直入射, 光子的透射率应为 50%, 由 10 次光子计数的平均值可见, 能量超过 300 keV 的光子, 计数率偏高. 因此, GEANT4 模拟光子计数时, 光子的入射能量需设置为 300 keV 以下. 比较表 2 中的两种选择, 综合孔径均为 $1'$ 左右, 而选择 II 的分辨率高一些, 因此我们对选择 II 进行 GEANT4 模拟计数并重建源像, 将得到的重建图 (图 11(a)) 与几何计算光子数并重建得到的图像 (图 11(b)) 比较, 发现: GEANT4 模拟得到的光子计数更符合实际, 噪声更多, 更接近实际. 图 11 中的两张图都是对 $(24'', 24'')$ 、 $(48'', 48'')$ 2 点成像.

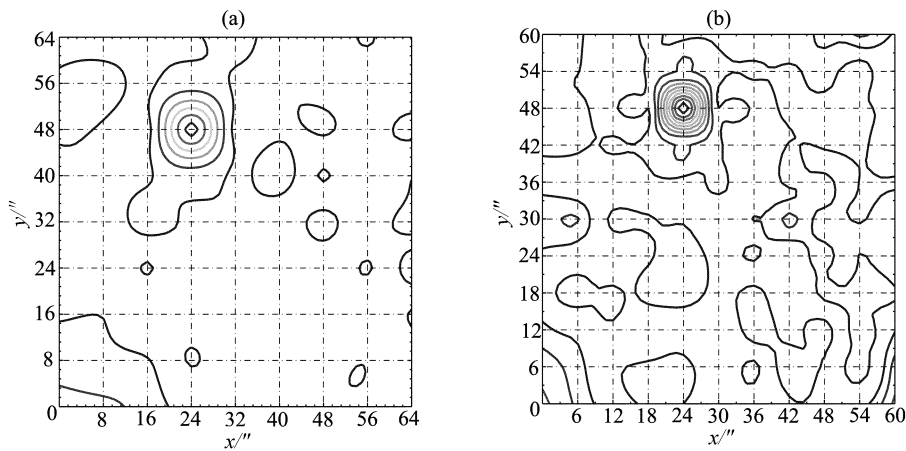


图 8 单点源重建图: (a) 选择 I 重建出的图像, (b) 选择 II 重建出的图像.

Fig.8 Reconstruction images of single point source: (a) Choice I, (b) Choice II

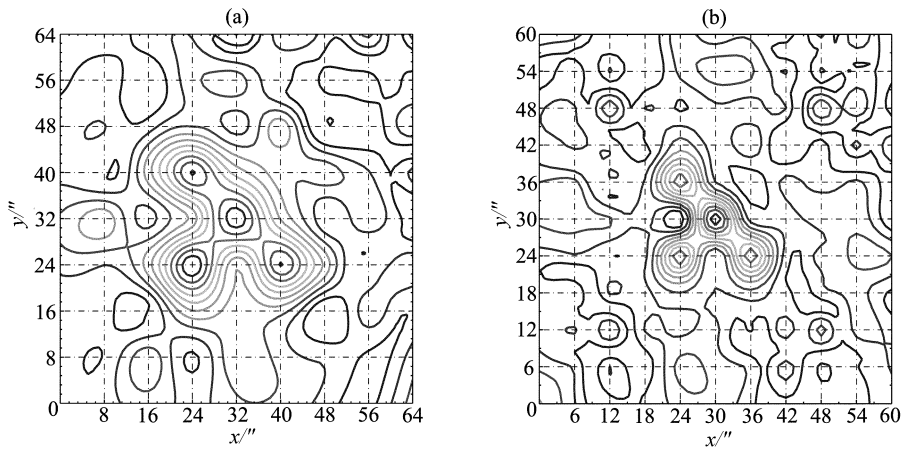


图 9 多点源重建图: (a) 选择 I 重建出的图像, (b) 选择 II 重建出的图像

Fig.9 Reconstruction images of multipoint source: (a) Choice I, (b) Choice II

图 8 ~ 11 都是仅由傅立叶逆变换直接得到的图像, 是未经过任何处理的脏图. 为了得到更清晰的图像, 可以采用各种图像处理算法: 如 CLEAN 算法、MEM 算法、PIXON 算法和 FORWARD-FIT 算法等进行进一步处理. 这里我们采用 CLEAN 算法, 对图 11(a) 处理后得到图 12, 分辨率可达 $6''$. 处理后得到的图像可以将部分噪声去掉, 对更为复杂的源像处理可以考虑其他算法, 以获得更高的角分辨率.

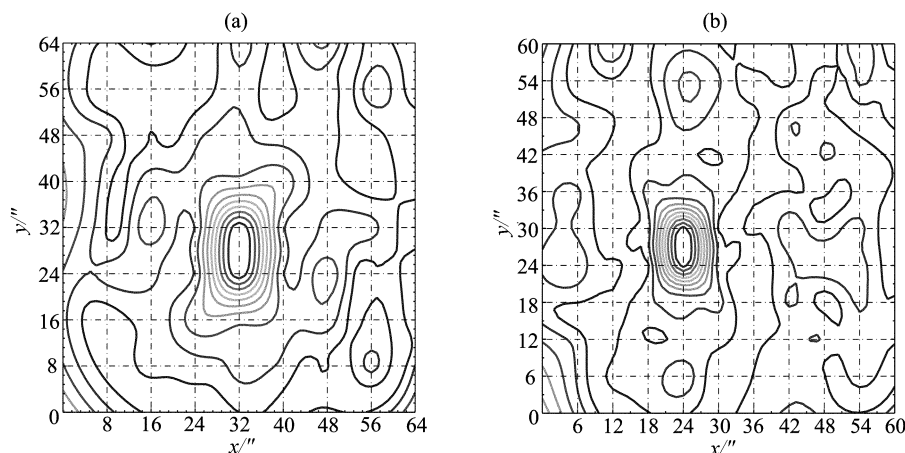


图 10 线源的重建图: (a) 选择 I 对 $8''$ 线源的重建图, (b) 选择 II 对 $6''$ 线源的重建图

Fig. 10 Reconstruction images of linear source: (a) Choice I for the source with a size of $8''$, (b) Choice II for the source with a size of $6''$

表 3 子准直器对不同能量范围光子的透射情况

Table 3 Transmission of sub-collimator for photons in different energy ranges

	Energy range(keV)				
	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500
	490	511	502	533	561
	497	485	527	507	575
	493	496	520	541	562
	511	510	524	516	566
	492	484	527	510	550
	502	473	527	545	539
	508	482	486	525	556
	480	490	527	505	559
	485	493	490	515	586
	466	496	488	520	587
Average	492.4	492	511.8	521.7	564.1

4 结论

经过 GEANT4 模拟太阳硬 X 射线望远镜的成像过程, 计得的光子数由 MATLAB 重建图像并进行处理, 拟定方案如下: 采用 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 4\text{ mm}$ 的前后两层平行的钨板, 材料为碘化铯的探测器记录光子数, 光栅的摆放角度及节距的大小可参考表 2 中的选择 II, 共 50 对子准直器 (50 个正弦子准直器, 50 个余弦子准直器), 整个准直系统的大小约为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 140\text{ cm}$, 重建图像的分辨率为 $6''$, 综合孔径为 $60''$, 视场为全日面.

上述图像重建都是基于中心轴不旋转的望远镜, 即空间调制望远镜, 适用于 3 轴稳

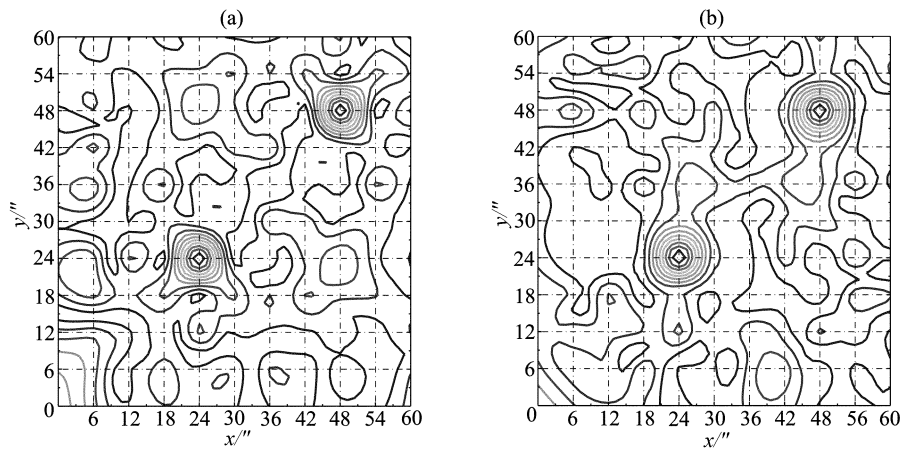


图 11 脏图: (a) GEANT4 模拟光子数得到的重建图, (b) 几何计算光子数得到的重建图

Fig. 11 Dirty maps: Reconstruction images of photons simulated by GEANT4 (a) and photons calculated with geometric algorithm (b)

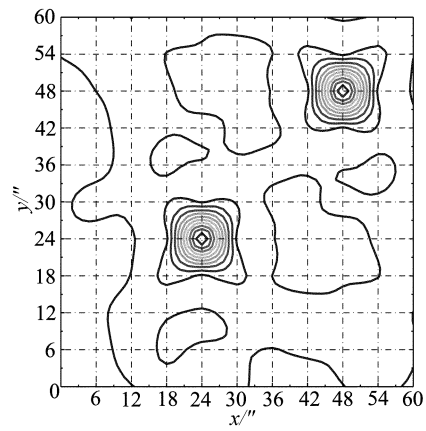


图 12 经 CLEAN 算法处理后的图像 (角分辨率为 $6''$)

Fig. 12 Clean map image obtained with the CLEAN algorithm (angular resolution is $6''$)

定的卫星. 如果望远镜的中心轴能够旋转, 像 RHESSI 一样工作在自旋卫星上, 在太阳耀斑发生变化的时间范围内, 多次绕一定的轴旋转准直系统, 那么得到的傅立叶项将远远多于固定不动的准直系统, 重建图像的分辨率也将会大大提高.

本文主要针对图像的重建问题加以讨论说明, 对图像的处理仍需进一步考虑, 这里只简单给出了 CLEAN 算法的处理结果.

参 考 文 献

- [1] van Beek H F, Hoyng P, Lafleur B, et al. SoPh, 1980, 65: 39
- [2] Christensen F E, Hornstrup A, Westergaard N J, et al. SPIE, 1992, 1546: 160
- [3] Prince T A, Hurford G, Hudson H S, et al. SoPh, 1988, 118: 269
- [4] Hurford G J, Schmahl E J, Schwartz R A, et al. SoPh, 2002, 210: 61
- [5] Kosugi T, Makishima K, Murakami T, et al. SoPh, 1991, 136: 17
- [6] Mitra S K. 孙洪, 译. 数字信号处理 — 基于计算机的方法. 第 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2007: 188-192
- [7] 孙即祥. 图像压缩与投影重建. 北京: 科学出版社, 2005: 178-179
- [8] Herman G T. 谢宗钧, 译. 投影法图像重建 — 实现和应用. 北京: 国防工业出版社, 1992: 1-86
- [9] 朱 翠, 王富东. 计算机应用与软件, 2006, 23: 141

A Simulation Research on the Solar Hard X-Ray Imaging Telescope

TENG Teng^{1,2,3} WU Jian^{1,2} CHANG Jin^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT High-energy phenomena always play an important role in solar research field. Observations of hard X-ray/gamma-ray can be divided into images and spectra, both of which give clues to reveal the secret of the energy release of solar flares. Instead of conventional imaging technique using mirrors or lens, which cannot work in energy above a few keV, direct imaging, coded aperture and Fourier transform are used for high-energy imaging. Fourier transform technique stands out because of its high sensitivity and high reliability. It can be implemented in various hardware configurations, among which spatial modulation collimator and rotating modulation collimator are widely used. Modulation collimator type hard X-ray imaging telescope is currently widely used in solar observation. For the possible Chinese solar mission in the near future, we make a design of hard X-ray imaging telescope using the common simulation software, GEANT4. The results are closer to the fact compared with the traditional geometric algorithm. An executable design is also proposed at last.

Key words telescopes, sun: X-rays, sun: flares, techniques: image processing, methods: miscellaneous