

# 针对ASO-S/HXI光栅摆放角分布的 测试与分析\*

陈 维<sup>1,2†</sup> 苏 杨<sup>1,2‡</sup> 张 哲<sup>1</sup> 李友平<sup>1,2</sup> 甘为群<sup>1,2</sup>  
伍 健<sup>1</sup> 李振同<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

**摘要** 先进天基太阳天文台(ASO-S)卫星的3大载荷之一硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)是一套基于傅立叶变换调制成像技术的望远镜. 它利用91组不同摆放角和节距的光栅子准直器排列摆布, 获得45个基于空间调制的傅立叶变换对, 重建太阳耀斑源30–200 keV的硬X射线像, 最高分辨率可达 $3.1''$ . 在光栅节距已经确定的前提下, 它的摆放角分布仍会影响成像质量. 通过对HXI仪器傅立叶分量 $\mu\nu$ 分布与点扩散函数(PSF)的空间演化关系分析研究, 寻求HXI光栅摆放角的最优分布. 其结果将作为改进HXI仪器设计和开发相应科学分析软件的依据.

**关键词** 太阳: 耀斑, 太阳: X射线, 仪器: 探测器, 技术: 图像处理

**中图分类号:** P111; **文献标识码:** A

## 1 引言

先进天基太阳天文台<sup>[1]</sup> (Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)卫星是我国太阳物理界为第25太阳活动周提出并实施的太阳空间探测卫星计划, 于2017年底正式获得批准立项, 计划2021年中完成卫星的研制, 并于2021年底或2022年上半年择机发射. 硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)<sup>[2]</sup>是ASO-S卫星的3个有效载荷之一, 其主要针对太阳耀斑爆发的硬X射线辐射进行成像观测, 同时还具备能谱和光变观测能力, 观测能段覆盖30–200 keV<sup>[3]</sup>.

太阳硬X射线辐射主要来自耀斑高能电子在太阳大气传输过程中与热等离子体的相互作用<sup>[4]</sup>. 通过对硬X射线的成像、能谱和光变观测, 不仅能够提供这些高能电子的产生、传输以及相互作用过程的直接信息; 同时还可以获得耀斑发生的位置、形态、辐射

2020-03-02收到原稿, 2020-04-29收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(U1631242、11820101002、U1731241、11427803、11921003、U1931138), 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15320300、XDA15320104、XDA15052200、XDA15016800)和江苏双创人才计划资助

<sup>†</sup>w.chen@pmo.ac.cn

<sup>‡</sup>yang.su@pmo.ac.cn

强度以及时间演化等丰富的特征信息; 最终对于研究耀斑的加速机制、了解加速粒子的传输机制、比较耀斑加速电子和加速离子总能量与总数目以及加速源区和粒子作用区能谱的区别等多个方面都具有重要的科学意义<sup>[5-6]</sup>。另一方面, 基于这些观测, 还可以开展对太阳高能粒子事件的爆发研究<sup>[7-8]</sup>, 有助于预防和降低这些灾害性空间天气对人类空间活动的危害和影响。

由于X射线能量较高, 我们很难像光学波段一样对其直接成像。尽管目前在X射线掠入射望远镜的研究上进度可观, 但是在较高观测能量上的研制技术难度较高, 如美国FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager)火箭<sup>[9]</sup>和NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array)卫星<sup>[10]</sup>就应用了这类技术, 不过可观测能量不超过100 keV。目前对硬X射线的成像主要还是使用间接成像探测, 其中准直器调制成像是较为成熟的一种技术方案。自1965年Oda<sup>[11]</sup>提出光栅准直器调制定位方法以来, 光栅型调制准直器在太阳硬X射线源成像探测上已经取得丰富成果。光栅调制准直器望远镜还分为空间调制和时间调制两种类型。空间调制型在空间位置上相对不动, 通过阵列分布足够多的子准直器, 来获得充足的傅立叶变换项, 用以实现傅立叶逆变换, 进而重建源区图像; 时间调制型也是旋转调制型, 利用绕轴旋转来获取多个角度的傅立叶变换项, 进而提高成像质量, 时间调制型准直器需要牺牲时间分辨率, 并需要稳定的探测器系统进行扫描运动。两类望远镜典型的代表分别为日本阳光(Yohkoh)卫星上的硬X射线望远镜(Hard X-ray Telescope, HXT)<sup>[12]</sup>和美国的RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager)卫星<sup>[13]</sup>。

与Yohkoh/HXT类似, HXI采用空间调制傅立叶变换成像原理。按照该原理, 子准直器是实现X射线空间调制的基本单元, 由前后相距一定距离, 正对(即余弦型)或相对平移错开1/4节距(即正弦型)的两个相同节距、相同摆放角的前后光栅组成。其空间分辨率由前后光栅的距离 $L$ 及光栅节距 $p$ 决定, 即 $p/2L$ 。通过选择一系列具有不同节距和多种摆放角度的子准直器组合可实现对太阳X射线流量进行调制测量, 得到一系列的傅立叶分量。虽然对成像而言, 傅立叶分量多多益善, 但傅立叶分量的数量与光栅对的数量成正比, 显然这个数量在设备研制中还受到载荷重量、体积和经费等约束。

通过对这些傅立叶分量进行傅立叶逆变换就可以直接得到源区的基础图像(也称脏图, 含有较多噪声的源图像)。再利用一定的图像重建算法(如CLEAN<sup>[14]</sup>、MEM (Maximum Entropy Method)<sup>[15]</sup>等)对脏图进行处理, 即可获得质量较好的太阳硬X射线源图像。脏图是每个光栅对后端探测器获得的光子数所反映的X射线源位置的概率总和, 它是X射线成像中最基础的图像, 其他图像重建算法需要基于脏图进一步处理和应用。脏图的产生与硬件设计有关, 尤其是光栅节距和摆放角度。针对太阳硬X射线源的统计特征(如流量、源区大小、分离距离), 设置合适的光栅配置, 有助于降低仪器效应、提高成像质量; 尽管空间分辨率越高越好, 但是窄缝光栅的研制成本和技术难度也将大大提高, 在满足科学目标的前提下, 合理的配置还有助于找到性价比最高的方案。

点扩散函数(Point Spread Function, PSF)描述成像系统对点源的响应, 通过它可以展示仪器响应和旁瓣源的信息。我们通过模拟分析不同光栅配置方案下PSF的图像, 寻找光栅配置的最优方案, 为仪器设计及后续科学分析软件参数设置提供依据。本文第2部分介绍了HXI探测器的成像原理, 第3部分给出我们的测试方案以及分析讨论, 文

中最后为总结与展望.

## 2 HXI结构及准直器的成像原理

### 2.1 HXI结构介绍

根据当前设计, HXI由3台结构上独立的单机组成: 准直器、量能器以及电控箱, 如图1所示. 准直器和量能器一起安装在卫星平台舱外的载荷光学基准板上. 电控箱则安装在卫星平台舱内, 通过电缆一方面连接准直器和量能器, 另一方面与卫星平台进行通讯.

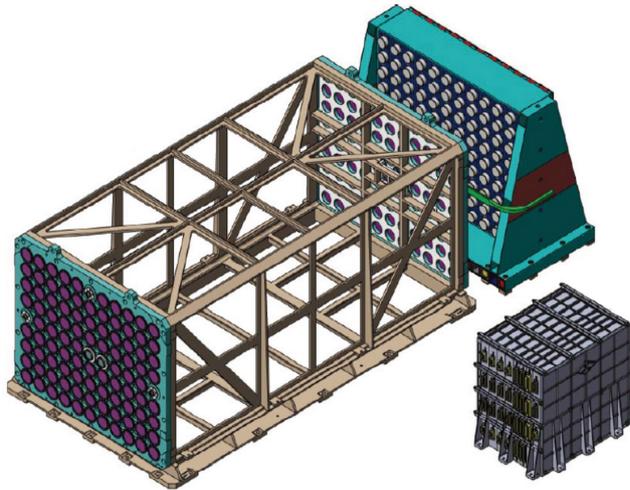


图1 HXI成像仪结构图. 从左到右依次为: 准直器、量能器和电控箱.

Fig. 1 The structure diagram for HXI instrument. From left to right: collimator, calorimeter, and electric control box.

HXI准直器包括承力框架、准直器光栅阵列和指向镜系统3部分, 主要完成X射线光子流量调制、太阳指向测量和准直器自身形变测量的功能. 固定在钛合金框架结构前后两端、间距约为1.2 m的两块基板上分别提供了99个阵列安装位置, 其中91个用于安装子准直器光栅对(其中88个相位差为 $90^\circ$ 的子准直器组成44个正余弦傅立叶分量, 3个相位差为 $120^\circ$ 的子准直器组成一个傅立叶分量), 5个用于安装指向镜系统(前板中配置3个毛玻璃、入射窗和指向镜镜头, 后板中配置2个指向镜相机电控盒), 剩余3个位置为全敞开状态, 用于配合量能器上对应的总流量探测探头. 91个子准直器光栅对具有不同的节距和摆放角, 对X射线的调制共形成45个傅立叶分量.

量能器包括对应准直器光栅阵列的99个溴化镧闪烁体探测单元以及相应的前端采集电子学和供电电路, 对经过准直器调制的X射线光子流量, 总流量以及粒子本底进行高能量分辨探测和采集. 电控箱用来实现准直器和量能器电子学板的供电、科学数据接收、遥控遥测数据传输以及与卫星平台的接口通讯等功能, 由数据管理板、数据处理板、高压电源板和二次电源板等组成.

## 2.2 HXI成像原理

图2为HXI准直器的成像原理示意图. 可以看到, 当X射线光子照射HXI溴化镧探测器时, 一部分光子透过光栅间的狭缝进入探测器, 一部分光子由于光栅的阻挡而无法被探测器探测到. 随着光子入射方向( $\alpha$ )的改变, 它们在探测器上的透过率将会发生变化. 如果准直器光栅中狭板宽( $d_1$ )与狭缝宽( $d_2$ )相等, 光栅节距 $p = d_1 + d_2$ , 那么理想光栅(即光栅厚度为0, 且能够完全吸收X射线)的透过率将呈现完美的周期性三角波, 其值在0-0.5之间变化<sup>[16-17]</sup>. 而在非理想情形下, 透过率还与光子能量、入射方向以及光栅节距、厚度等有关, 本文对此不作深入讨论.

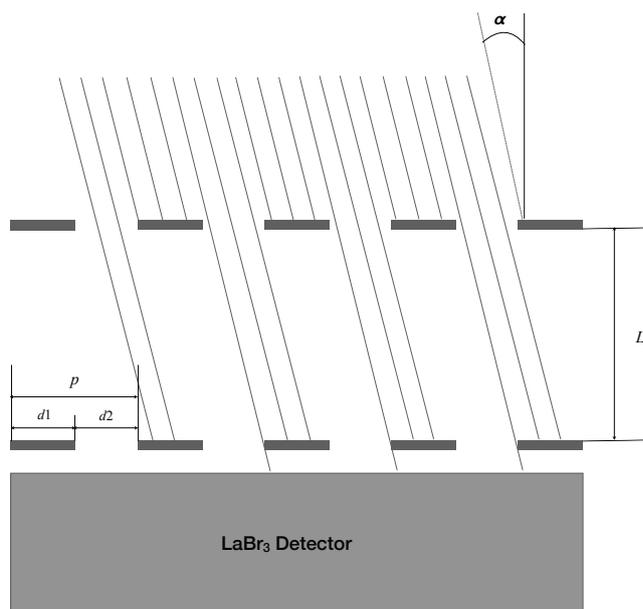


图 2 HXI探测器调制成像原理示意图

Fig. 2 The schematic diagram of modulation imaging for the HXI detector

理想光栅的透过率 $T(\phi)$ 与光子入射角成线性关系的三角周期函数, 其形式如图3所示, 对其进行傅立叶级数展开, 可以得到如下形式<sup>[18]</sup>:

$$\begin{aligned} T(\phi) &= \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos[(2n+1)\phi]}{(2n+1)^2} \\ &= \frac{1}{4} \left[ 1 + \frac{8}{\pi^2} \cos \phi + \frac{8}{9\pi^2} \cos(3\phi) + \frac{8}{25\pi^2} \cos(5\phi) + \dots \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\phi = \frac{2\pi\alpha L}{p}$ ,  $\alpha$ 为入射光子与准直器径向方向夹角,  $L$ 为前后光栅间距. 由于(1)式中包含迅速衰减的高频谐波分量和稳定的直流分量, 因此, 在成像分析过程中, 舍弃高频分量和直流分量并不会明显影响成像结果. 余弦准直器的光栅透过率 $T_c(\phi)$ 从而可近似为:

$$T_c(\phi) \propto \cos(\phi), \quad (2)$$

与余弦准直器对应还有正弦准直器, 两者结构一致, 前后光栅错位 $p/4$ , 对应相位差

为 $\phi = \frac{\pi}{2}$ . 应用类似余弦准直器的方法, 正弦准直器的光栅透过率 $T_s(\phi)$ 可近似为:

$$T_s(\phi) \propto \sin \phi. \quad (3)$$

入射方向 $\alpha$ 与观测区域平面上坐标 $(x, y)$ 的关系可近似为 $\alpha \propto x \cos(\beta) + y \sin(\beta)$ , 其中 $\beta$ 为光栅摆放角, 代入到(2)式和(3)式, 可得

$$\begin{aligned} T_c(\phi) &= \cos[2\pi(x\mu + y\nu)], \\ T_s(\phi) &= \sin[2\pi(x\mu + y\nu)], \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\mu = \frac{2\pi \cos \beta L}{p}$ ,  $\nu = \frac{2\pi \sin \beta L}{p}$ , 它们反映了与准直器长度、光栅节距以及摆放角等硬件参数有关的信息.

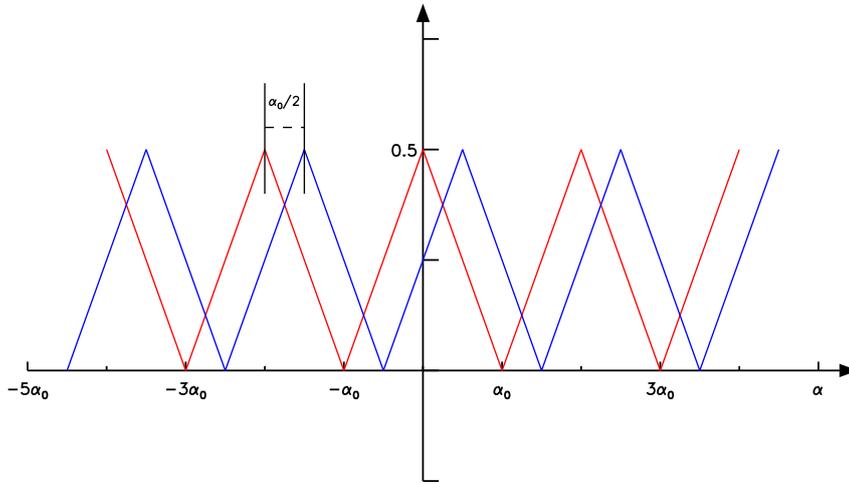


图 3 HXI理想准直器光栅的透过率, 红线和蓝线分别对应余弦和正弦准直器随入射角度变化的透过率.

Fig. 3 The transmittance of the HXI ideal collimator grid. The red and blue lines represent the transmittances of the cosine and sine collimators with the change of incident angle, respectively.

通过一对正余弦准直器组成的傅立叶变换项可表示为:

$$T(\phi) = T_c(\phi) + iT_s(\phi) = e^{i[2\pi(x\mu + y\nu)]}, \quad (5)$$

这个关系式反映了透过率与源区强度的信息, 每一对子准直器的计数是来自太阳平面所有位置的共同贡献. 因此, 它的计数 $V_{mn}$  ( $m, n$ 分别表示光栅节距和摆放角)与源区强度 $B(x, y)$ 的关系可以表示为

$$V_{mn} = \sum_x \sum_y B(x, y) e^{i[2\pi(x\mu + y\nu)]}. \quad (6)$$

而硬X射线成像是傅立叶逆变换的过程, 利用探测器测得的光子计数构建出太阳平面上源区的强度分布, 即实现脏图重建.

$$B(x, y) = \sum_m \sum_n V_{mn} e^{-i[2\pi(x\mu + y\nu)]}. \quad (7)$$

因此, 按照上述变化关系, 可以发现与光栅参数信息相关的 $\mu\nu$ 分布会直接影响重建图像的质量.

### 3 测试与分析

HXI的原始设计方案中(来自《先进天基太阳天文台(ASO-S)卫星有效载荷硬X射线成像仪(HXI)方案设计报告》, 2017年), 准直器系统由10组节距不同的正余弦子准直器构成, 光栅的节距分布为36–800  $\mu\text{m}$ , 每组节距包含3–5种摆放角不等, 总计46对, 共92个子准直器, 详细配置如表1所示. 现方案的节距在原方案的基础上按照硬X射线像的统计属性等科学需求做了调整, 所以需要重新测试和优化其摆放角方案.

表 1 HXI原始方案中光栅配置  
Table 1 Grid configuration for the HXI original design

Grid index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pitch/ $\mu\text{m}$	36	48	66	88	120	160	218	294	398	800
Spatial resolution/"	3.1	4.1	5.7	7.6	10.3	13.8	18.7	25.3	34.2	68.8
Grid numbers	3 $\times$ 2	5 $\times$ 2	3 $\times$ 2							
	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0
	90	36	54	36	54	36	54	36	54	72
Placement angle/ $^{\circ}$	162	72	90	72	90	72	90	72	90	144
		108	126	108	126	108	126	108	126	
		144	162	144	162	144	162	144	162	

#### 3.1 HXI光栅节距

HXI原方案中最大光栅节距仅为800  $\mu\text{m}$ , 对应的空间分辨率不到70". 考虑到耀斑中可能存在较大的硬X射线源, 因此, 我们在最新的光栅设计方案中引入了一组节距更大的光栅, 节距为1224  $\mu\text{m}$ , 对应空间分辨率超过100", 该节距下的其中一个摆放角的傅立叶分量通过相位差为120 $^{\circ}$  (前后光栅错位 $p/3$ )的3个子准直器获得. 此外, 节距的分布做了相应调整, 使得其中6组光栅的分辨率依然优于20". 与此同时, 我们将原方案中节距最小的光栅摆放角从3对增加为4对, 这样的改进将有助于在高分辨观测时提升X射线源的细节信息. 但由于HXI载荷体积、配重以及经费的制约, 光栅的节距和摆放角数量受到限制, 详细信息如表2所示.

由X射线成像原理可知, 在利用傅立叶逆变换重建源区图像过程中, 如果相应的傅立叶分量充分且均匀分布, 有利于获得较优的图像. 因此, 在光栅节距、摆放角数量确定的情况下, 光栅摆放角的分布仍会影响成像质量. 由于光栅节距的改变, 考虑到HXI原先设计的摆放角分布未必最优, 为此我们通过PSF图像对光栅摆放角的分布进行了测试研究.

#### 3.2 测试方案

一般而言, 在空间X射线成像过程中, 首先需要对全日面成像, 定位源区大致所在区域, 然后在小视场内(如256"  $\times$  256"、128"  $\times$  128")进一步进行高分辨成像. HXI成像处理流程类似, 首先选择宽缝的光栅组合进行全日面成像, 找出图像最亮点作为源区中心大致所在位置, 进而小视场内利用全部光栅或者部分窄缝光栅组合对源区进行高分辨成

像, 最后利用其他高级成像算法改进图像质量. 理想的成像仪器, 应该尽可能凸显源区的信息, 并抑制虚假源的影响, 所以它的PSF应具备中心强度下降快、旁瓣强度弱的特征. 我们在配置HXI光栅摆放角方案时也将遵循这样的规则.

表 2 HXI最新方案中光栅配置  
Table 2 HXI grid configuration for the present design

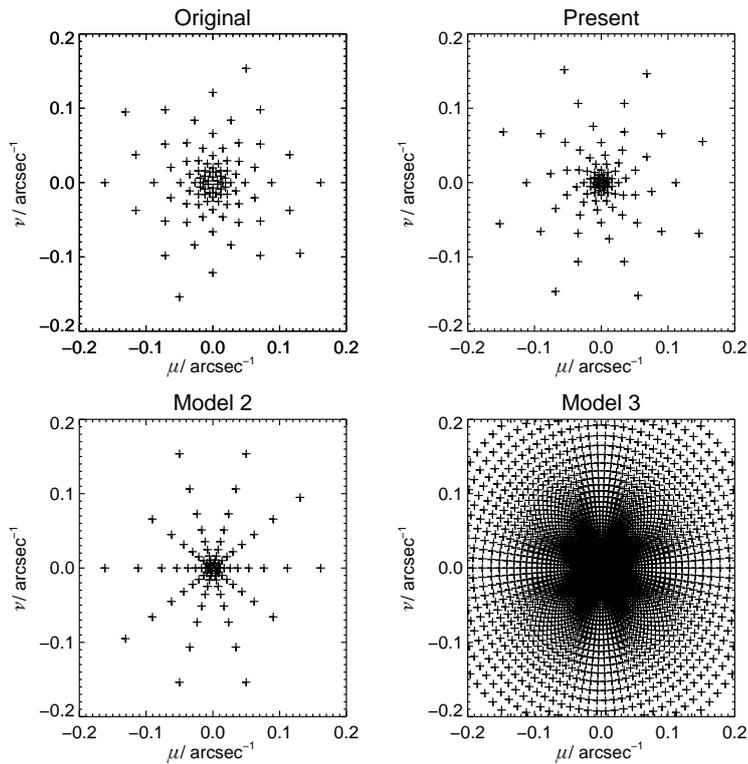
Grid index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pitch/ $\mu\text{m}$	36	52	76	108	156	224	344	524	800	1224
Spatial resolution/"	3.1	4.5	6.5	9.3	13.4	19.3	29.6	45.0	68.8	105.2
Grid numbers	4 $\times$ 2	5 $\times$ 2	3 $\times$ 2	2 $\times$ 2+1 $\times$ 3 <sup>a</sup>						
	20	0	27	18	9	0	18	0	18	48
	65	36	63	54	45	36	54	36	78	108
Placement angle/ $^{\circ}$	110	72	99	90	81	72	90	72	138	168
	155	108	135	126	117	108	126	108		
		144	171	162	153	144	162	144		

<sup>a</sup> One of grid placement contains three sub-collimators with a phase difference of  $120^{\circ}$

图4比较了不同光栅配置下的 $\mu\nu$ 分布, 上方两图显示了原始(Model 0)和当前(Model 1)光栅设计方案的 $\mu\nu$ 分布. 下方两图还特别引入了两种光栅分布模型作为参考. 第1种模型(Model 2)的光栅节距与当前配置一致, 但摆放角较为单一,  $\mu\nu$ 分布不够均匀; 另一种模型则相对理想(Model 3), 它的光栅节距变化区间与当前配置一致, 但是具有丰富的节距数和摆放角, 它的 $\mu\nu$ 分布相对完整且均匀, 从而可以获得更充足的傅立叶分量. 但是由于研制成本的限制, 该模型仅仅作参考.

寻找HXI光栅最优摆放角分布的模拟测试分3步: 第1步, 模拟小视场内(包括 $256'' \times 256''$ 和 $128'' \times 128''$ )所有光栅在不同摆放角下的PSF, 这也基本覆盖了大多数耀斑内硬X射线源的空间尺寸. HXI的前后光栅的节距比有两种模式, 第1组到第6组节距比为1.4, 从第6组开始的节距比为1.5. 因此我们在模拟过程中, 对这两种模式下的摆放角分别取不同的角度差. 另外, 我们在研究中发现, 节距最小和最大的几组光栅的摆放角对小视场内的PSF演化影响较小, 所以这一步的模拟中, 我们假设每种节距下的摆放角均为5组. 第2步, 利用第1步获得的最佳角度差, 改变节距最大的4组宽缝光栅摆放角, 并将第9和第10组光栅设定为4个摆放角, 产生相应的全日面( $2048'' \times 2048''$ ) PSF, 比较其空间演化特征, 找到其中最优的摆放方案. 第3步, 结合第1步和第2步过程中得到的最优方案, 模拟HXI真实摆放角数量下在小视场内的PSF空间演化, 并找出最优方案作为摆放角的最终方案.

为了定量研究PSF的优劣, 我们对PSF中心区域之外的旁瓣源进行了定位和强度测量. 首先将最强旁瓣源的强度作为判断PSF优劣的第1标准, 在第1标准无法区别优劣时, 再将次强旁瓣源的强度作为判断依据, 以此类推, 直到找到最优PSF. 在PSF空间演化的分析中, 我们用中心圆盘覆盖的方式去除中心源的贡献, 随着圆盘直径的增大, 剩余PSF的最大强度值位置逐渐向旁瓣源扩展, PSF空间演化图中的每一个平台也就反映了旁瓣源的位置及其相应强度.

图 4 不同光栅配置模型下的 $\mu\nu$ 分布对比Fig. 4 Comparison of the  $\mu\nu$  distribution under different grid configuration models

### 3.3 分析与讨论

经过大量的模拟计算,我们发现HXI两类节距比下的前后组光栅摆放角的最佳角度差分别为 $9^\circ$ 和 $18^\circ$ ,同时也确定了第1组以及第8组光栅的摆放角与它们相邻光栅间的最佳角度差.光栅最优摆放角的详细方案如表2所示,

图5为最优摆放角方案下的PSF分布,图5右下图显示了PSF强度的空间演化,可以看到在当前配置(Model 1)下,PSF最强的旁瓣源出现在距离点源大约 $20''$ 处,它的强度约为中心强度的30%,随着空间距离增大,旁瓣源强度逐渐下降,在视场边缘下降到15%左右.图5右下图还显示了其他模型的PSF空间演化作为对比.可以看到,原方案(Model 0)中旁瓣源强度比现方案更强,但由于它配置了更多节距较小的光栅,使得其在靠近中心区域的强度下降很快.在摆放角较为单一的方案中(Model 2),旁瓣源的影响非常大,强度高达40%.而在较理想的方案下(Model 3),PSF强度随距离增加迅速减弱,旁瓣源的影响几乎可以忽略不计.

由于大多数耀斑硬X射线源的尺寸在 $2''-20''$ 左右<sup>[19-20]</sup>,我们对PSF的研究可以限制在更小的视场内,如图6左图所示,现方案中PSF的空间演化显示周围旁瓣源的强度可以下降到10%左右.此外,不同的光栅组合也会影响PSF的空间演化(图6右图),选择节距较小的光栅组合,可以使得PSF强度在源区中心下降更快,但是缺少节距较大的光栅时,可能造成较强的旁瓣源影响.因此,为了获得较优的PSF,还需要结合研究对象的实际情

况, 合理配置成像视场和光栅组合方案.

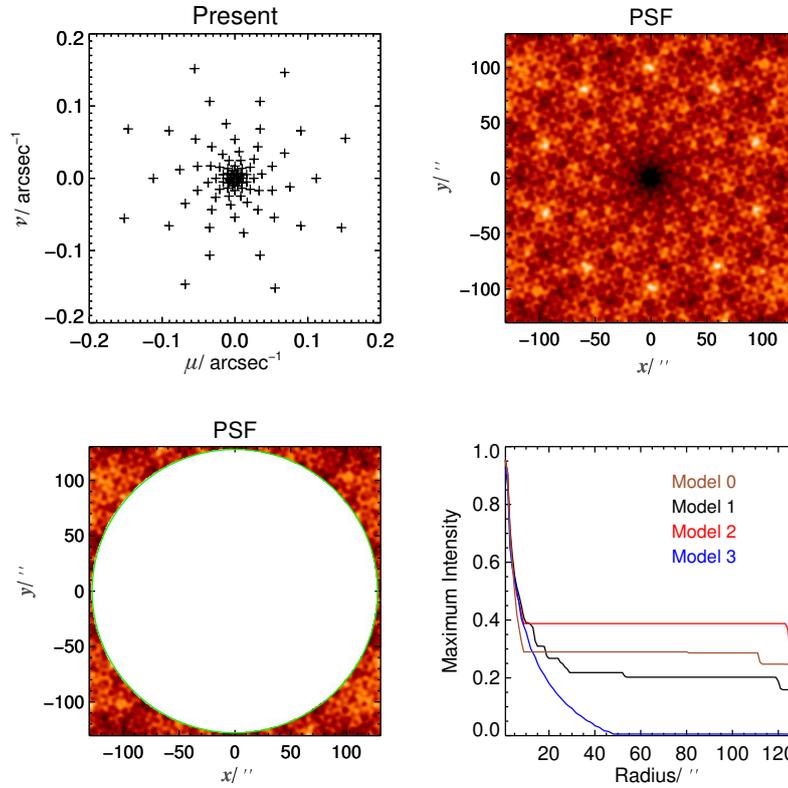


图 5 当前光栅配置模型下的 $\mu\nu$ 分布、PSF以及不同配置模型下旁瓣源强度的空间演化。PSF图中深色代表较高亮度。

Fig. 5 The  $\mu\nu$  distribution, PSF, and the intensity evolution of sidelobe under the different grid configuration models. The dark colors in the PSF image represent higher brightness.

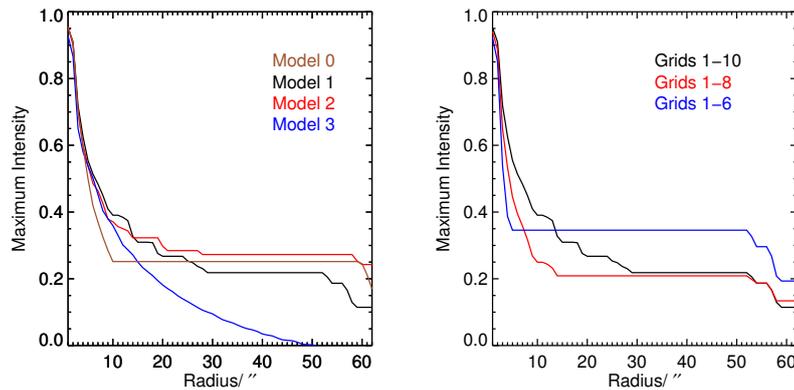


图 6 不同配置模型和不同节距光栅组合下的旁瓣源强度距离中心 $60''$ 内的空间演化。1-10代表编号1至10所有光栅。

Fig. 6 The intensity evolution of the sidelobe in  $60''$  under the different grid configuration models and grid combinations with different pitches. 1-10 represent all grids numbered 1 to 10.

增加光栅节距数量或者配置合理的节距比,可以部分抑制旁瓣源的影响,使得PSF强度在空间演化中连续减弱,避免出现类似平台特征;增加窄缝光栅可以提高空间分辨率,使PSF强度在中心位置附近迅速减弱;而增加摆放角同样也能降低旁瓣源的影响.但无论是增加窄缝光栅或摆放角数量,都将使得准直器的研制成本大幅增加.相对经济的替代方式或许可以跟RHESSI类似,让准直器稳定转动起来,这样就相当于获得一整圈的摆放角.

## 4 总结

由于硬X射线较强的穿透能力,对其直接成像相对困难.通常对于硬X射线采取间接的成像探测.HXI是基于傅立叶变换成像技术的光栅型准直器空间调制硬X射线成像望远镜,通过对空间傅立叶分量的采样,经过傅立叶逆变换来重建X射线源的原始图像.光栅节距和摆放角配置将决定采样点的 $\mu\nu$ 分量分布,影响PSF和脏图质量.脏图是仪器对源信息最直接的响应,它的优劣也将决定重建图像的质量.

本文通过模拟和测试各种光栅摆放角分布下的PSF来寻求最优方案:一方面要求PSF中心强度能够随着距离增加迅速减弱;另一方面,则要求旁瓣源的强度尽可能低.通过大量PSF的模拟分析,给出了HXI当前节距下的最优摆放角方案.除了跟硬件配置有关,PSF的空间演化还与诸多因素相关,如光栅组合、成像视场等.这也启示我们在做成像分析时,需要结合实际情况,将像源大小、视场大小以及光栅组合配置结合起来考虑,以获得更为优化的X射线图像.

PSF空间演化研究在实现HXI光栅摆放角工程需求的同时,也为我们探索未来光栅型准直器探测器提供了宝贵经验.譬如,选择合适的光栅节距比能够降低旁瓣源的影响;增加宽缝光栅能够抑制大视场内的旁瓣效应;采用空间和时间混合调制模式的光栅型准直器可以增加傅立叶空间的采样点,从而提供更优的成像基础等.

致谢 感谢Dr. Gordon Hurford为我们提供宝贵的建议.

## 参 考 文 献

- [1] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. RAA, 2019, 19: 156
- [2] Zhang Z, Chen D Y, Wu J, et al. RAA, 2019, 19: 160
- [3] 张岩, 郭建华, 张永强. 天文学报, 2019, 60: 86
- [4] Raymond J C, Krucker S, Lin R P, et al. SSRv, 2012, 173: 197
- [5] Liu W, Petrosian V, Dennis B R, et al. ApJ, 2008, 676: 704
- [6] Su Y, Veronig A M, Holman G D, et al. NatPh, 2013, 9: 489
- [7] Reames D V. SSRv, 1999, 90: 413
- [8] Petrosian V. ApJ, 2016, 830: 28
- [9] Krucker S, Christe S, Glesener L, et al. SPIE, 2009, 7437: 743705
- [10] Harrison F A, Craig W W, Christensen F E, et al. ApJ, 2013, 770: 103
- [11] Oda M. ApOpt, 1965, 4: 143
- [12] Kosugi T, Makishima K, Murakami T, et al. SoPh, 1991, 136: 17
- [13] Lin R P, Dennis B R, Hurford G J, et al. SoPh, 2002, 210: 3
- [14] Högbom J A. A&AS, 1974, 15: 417
- [15] Sato J, Kosugi T, Makishima K. PASJ, 1999, 51: 127

- [16] 滕藤, 伍健, 常进. 天文学报, 2011, 52: 339
- [17] Teng T, Wu J, Chang J. ChA&A, 2012, 36: 198
- [18] Sakao T. Characteristics of Solar Flare Hard X-ray Sources as Revealed with the Hard X-ray Telescope Aboard the Yohkoh Satellite. Tokyo: University of Tokyo, 1994
- [19] Dennis B R, Pernak R L. ApJ, 2009, 698: 2131
- [20] Warmuth A, Mann G. A&A, 2013, 552: A87

## Tests and Analysis of the Arrangement Configurations for ASO-S/HXI Grids and Their Effect on Imaging

CHEN Wei<sup>1,2</sup> SU Yang<sup>1,2</sup> ZHANG Zhe<sup>1</sup> LI You-ping<sup>1,2</sup> GAN Wei-qun<sup>1,2</sup>  
WU Jian<sup>1</sup> LI Zhen-tong<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory for Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**ABSTRACT** HXI (Hard X-ray Imager), one of the three main payloads of the ASO-S (Advanced Space-based Solar Observatory) satellite, is a Fourier-synthesis imager. It uses 91 sets of grid sub-collimators arranged at different angles and pitches to obtain 45 space-modulated Fourier transform pairs, and to reconstruct the hard X-ray (30–200 keV) images of the solar flare sources, and the resolution can reach as high as  $3.1''$ . On the premise that grids pitch are determined, the arrangement of the grids can still affect the imaging quality. In this paper, the optimal distribution of the grid placement is obtained by analyzing the relationship between the instrument's  $\mu\nu$  distribution of the Fourier components and the corresponding evolution of the point spread function. This result will be used as the basis for improving HXI instrument design and developing scientific analysis software.

**Key words** Sun: flares, Sun: X-rays, instrumentation: detectors, techniques: image processing