doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2020.04.009

# ASO-S/HXI太阳指向镜算法研究\*

喻福<sup>1,2†</sup> 苏杨<sup>1,2,3</sup> 张哲<sup>1,3</sup> 黄 宇<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)
(3 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)

**摘要** 硬X射线成像是研究太阳耀斑等爆发现象的重要手段.由于采用调制成像而非 直接成像的原因,X射线图像在日面上的位置需要借助太阳指向镜提供的仪器指向的日 面坐标来确定.因此,指向信息对于耀斑定位实现多波段研究,理解太阳耀斑的物理过程 具有重要的科学意义.在此对两种太阳指向镜指向信息的获取算法进行了测试.结合太 阳指向镜的设计方案,首先利用SDO (Solar Dynamics Observatory)/AIA (Atmospheric Imaging Assembly) 4500 Å的数据产生测试图像,其次对其进行二值化处理,分别提取日 面轮廓和4个边角指定区域面积;最后分别利用最小二乘法和四象限法对太阳中心坐标进 行反演.初步结果显示最小二乘法受随机噪声影响小,定位精度相对稳定约为0.25",并可 提供四象限法解算的初值;后者的精度可以优于0.14″,但受随机噪声影响较大.两种算法 的精度都显著优于硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)太阳指向镜的设计要求,可 为指向数据在将来科学分析中的实际应用提供参考.

关键词 仪器: 太阳指向镜, 计算方法: 四象限法, 计算方法: 最小二乘法 中图分类号: P111; 文献标识码: A

# 1 引言

先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)是中国首 颗太阳专用观测卫星<sup>[1]</sup>,硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)作为其3台载荷之一, 主要负责在30-200 keV能段对耀斑源区进行成像、能谱和光变观测,以研究耀斑磁重 联中的能量释放和高能电子加速等物理过程<sup>[2]</sup>.由于在该能段上仅能看到耀斑区域,而 无法获得全日面像,因此无法获知源区在日面上的位置.因此太阳指向镜作为HXI的 组成部分,可实现对太阳中心位置的精确测量,提供指向中心坐标,并结合平台的旋转 指向,以便对耀斑X射线源进行定位<sup>[2]</sup>.指向镜的本质在于使用CCD (Charge-coupled Device)/CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)探测器对太阳进行可见 光成像,再将得到的太阳光斑像近似为圆形,进而对圆的中心和半径参数进行计算.太阳

 $^{\dagger}fuyu@pmo.ac.cn$ 

<sup>2020-03-17</sup>收到原稿, 2020-04-27收到修改稿

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(U1631242、U1731241、11820101002、11427803),中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15320300、XDA15320104、XDA15052200),江苏双创计划资助

在可见光的辐射主要来自光球,其边缘附近的辐射强度随日心角距增加变化非常陡峭, 形成锐利的太阳边缘<sup>[3]</sup>,这有利于提取太阳像的圆形轮廓特征.

HXI太阳指向镜的原理与太阳导行镜<sup>[4-5]</sup>相似(但无需反馈环节),都需计算日面中心 在探测器视场中的坐标位置,或者相对偏移量.而太阳望远镜的导行模式主要经过了点、 线、面的发展过程<sup>[6-8]</sup>.在20世纪90年代以前多采用以太阳边缘对称的4个点来导行跟 踪的四象限探测器法,如早期的怀柔多通道望远镜<sup>[6]</sup>;到80年代以后线阵探测器技术逐 渐完善,德国GCT<sup>[9]</sup> (Gregory Coudé Telescope)、日本Yohkoh<sup>[10]</sup>和美国RHESSI<sup>[11-12]</sup> (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager)均采用此方法.特别需要指 出的是,正是由于RHESSI对指向(日面边缘)的高精度测量,为了解太阳的实际形状提 供了最精确的结果<sup>[13]</sup>.而今随着计算机处理能力的提高,面阵探测器得到广泛使用, 如SOHO<sup>[14]</sup> (Solar and Heliospheric Observatory).面阵探测器的优点在于能够获取 更多太阳的信息以及利用图像处理技术,更精确地反演日面中心位置.例如文献[7]提 到的全日面像相关算法和质心算法,测试显示其在*x*和*y*方向检测精度的均方差分别约 为0.0271"和0.0101"与0.1142"和0.0828".

根据设计要求(来自《先进天基太阳天文台卫星(ASO-S)硬X射线成像仪初样设计 报告》, 2019年, 文件编号KX-07-HXI00-JB-04), HXI太阳指向镜中心位置的测量精度 要优于2".由于定位精度越高, 越有利于多波段的数据分析, 因此我们在本文中设定测 试目标精度为1".由于数据量、采样率等方面的要求和限制条件, 我们无法下传所有的 图像.为了节省在轨计算资源和减少传输的数据量, 提出了四象限法和边缘拟合法两种 独立又可以结合的测量方法.为此, CMOS探测器每次曝光完成后, 太阳指向镜将对图 像进行在轨二值化处理, 再采集两种数据下传, 分别是14行数据和4个边角的面积, 而中 心坐标的计算在地面完成.其中, 指向镜在轨记录的14行像元值用于获得太阳边缘, 再 利用最小二乘法进行拟合, 得到太阳中心参数.而CMOS 4个正方形边角区域记录的像 元值为1的数量, 用于四象限法的计算.本文中, 我们利用MATLAB软件和SDO (Solar Dynamic Observatory)/AIA (Atmospheric Imaging Assembly)<sup>[15]</sup> 4500 Å Level 1.0的数 据主要针对算法本身进行了测试和评估.

## 2 太阳指向镜测量原理

太阳指向镜的镜头部分安装在HXI载荷准直器框架的前基板上, 焦距 $f \approx 1200$  mm<sup>[2]</sup>. 当HXI对太阳观测时, 太阳光斑成像如图1所示. 其中, 正方形*ABCD*为尺 寸2048×2048 pixel的CMOS探测器, 太阳光斑像的尺寸与CMOS的尺寸相当, 如红色圆 所示. 然而地球绕日公转轨道为椭圆, 近日点为1.471×10<sup>8</sup> km、远日点为1.521×10<sup>8</sup> km<sup>[3]</sup>, 且太阳半径为696342 km<sup>[16]</sup>. 因此, 太阳视直径随地球绕日公转轨道变化最大 为32.55′, 最小为31.48′, 这会导致在CMOS上的成像随之变化. 再考虑到HXI指向镜光轴 相对于平台指向的最大偏差(约为142 pixel)等因素, 对应在CMOS上成像光斑的边缘被 限制在绿色和黄色圆之间, 对应的半径分别为 $R_{max} = 1174.6$  pixel和 $R_{min} = 857.1$  pixel. 平行于x轴的14条红色虚线与太阳像边缘的交点作为边缘拟合法的数据点. 4个边角上正 方形的边长被选为L = 445 pixel, 从而保证太阳像无论如何移动(在设计安装误差范围 内), 太阳边缘都与4个区域的内边长有两个交点. 正方形阴影区被二值化并分别求和后,



理论上对应于图1中深色区域的面积S1、S2、S3、S4,以此作为四象限法解算的基础.

图 1 太阳指向镜算法原理图. 正方形ABCD为2048×2048 pixel CMOS探测器, 红色圆为太阳像光斑, 绿色圆和黄色圆之间为仪器允许的光斑边缘移动的区域. 其中, 在H ( $\approx$  278 pixel)范围内选取了5行数据; 其他各符号的定义见2.2节.

Fig. 1 Principle diagram of solar aspect system algorithm. The square ABCD is a CMOS detector with size of  $2048 \times 2048$  pixels. The red circle represents the image of the solar disk with its limb limited between the green and yellow circles. And five rows of data are selected in the range of  $H \approx 278$  pixel). See Sec.2.2 for the definitions of more symbols.

#### 2.1 边缘拟合法

最小二乘法(Least Square Method, LSM)是用于曲线拟合最常用的方法, 拟合过程快速简便, 且拟合精度相对较高. 文献[17]中利用最小二乘圆拟合法对激光光斑轮廓进行拟合, 从而定出了其中心坐标和半径. 该方法同样可以用于指向镜成像的日面边缘拟合. 设太阳像光斑的中心坐标为(*x*<sub>0</sub>, *y*<sub>0</sub>), 半径为*r*<sub>0</sub>, 则满足的圆方程为:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_0^2.$$
<sup>(1)</sup>

设(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>)为从太阳像光斑边缘提取的第i个坐标点,将其代入(1)式并取残差为:

$$\varepsilon_i = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r_0^2,$$
 (2)

再求残差平方和函数:

$$Q = \sum \varepsilon_i^2 = \sum \left[ (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r_0^2 \right]^2,$$
(3)

根据最小二乘原理,有:

$$\frac{\partial Q}{\partial x_0} = \frac{\partial Q}{\partial y_0} = \frac{\partial Q}{\partial r_0} = 0.$$
(4)

最后,解出满足(4)式的方程组,可以得到圆的中心坐标和半径参数<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} x_{0} = \left[ \left( \overline{x^{2}}\bar{x} + \bar{x}\overline{y^{2}} - \overline{x^{3}} - \overline{xy^{2}} \right) \left( \bar{y}^{2} - \overline{y^{2}} \right) - \left( \overline{x^{2}}\bar{y} + \bar{y}\overline{y^{2}} - \overline{y^{3}} - \overline{x^{2}y} \right) \left( \bar{x}\bar{y} - \overline{xy} \right) \right] G^{-1}, \\ y_{0} = \left[ \left( \overline{x^{2}}\bar{y} + \bar{y}\overline{y^{2}} - \overline{y^{3}} - \overline{x^{2}y} \right) \left( \bar{x}^{2} - \overline{x^{2}} \right) - \left( \overline{x^{2}}\bar{x} + \bar{x}\overline{y^{2}} - \overline{x^{3}} - \overline{xy^{2}} \right) \left( \bar{x}\bar{y} - \overline{xy} \right) \right] G^{-1}, \\ r_{0} = \sqrt{x_{0}^{2} + y_{0}^{2} - 2\bar{x}x_{0} - 2\bar{y}y_{0} + \overline{x^{2}} + \overline{y^{2}}}. \end{cases}$$

$$\tag{5}$$

其中,  $G = 2\left(\bar{x}^2 - \overline{x^2}\right)\left(\bar{y}^2 - \overline{y^2}\right) - 2(\bar{x}\bar{y} - \overline{xy})^2$ ,  $\overline{x^m y^n} = N^{-1}\sum_{i=1}^N x_i^m y_i^n$ , m、n为整数, N为参与拟合的坐标点的数量.

#### 2.2 四象限法

此处的方法同传统四象限法不同,但由于算法本身的特征仍然称之为四象限法(Four Quadrant Method, FQM),其原理如图1所示.太阳光斑像(红色圆面)分别与CMOS探测器4个角的正方形阴影区域相交,对应的面积记为*S*<sub>1</sub>、*S*<sub>2</sub>、*S*<sub>3</sub>、*S*<sub>4</sub>,而该面积又可由红色圆的参数:圆心坐标*O*(*x*<sub>0</sub>, *y*<sub>0</sub>)和半径*r*<sub>0</sub>决定.以面积*S*<sub>1</sub>的计算为例,其面积等于扇形*OA*<sub>1</sub>*B*<sub>1</sub>的面积减去三角形*OP*<sub>1</sub>*A*<sub>1</sub>和*OP*<sub>1</sub>*B*<sub>1</sub>的面积,即

$$S_1 = S_{\beta \mathcal{B} O A_1 B_1} - S_{\triangle O P_1 A_1} - S_{\triangle O P_1 B_1}.$$

基于此,且以CMOS探测器阵列的顶点A为坐标原点,向右和向下为正方向,建立直角坐标系,则4个阴影区域的面积S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>满足

$$S_{1} = \frac{1}{2} \left( r_{0}^{2} \theta_{1} - a_{1} h_{11} - b_{1} h_{12} \right), \qquad S_{2} = \frac{1}{2} \left( r_{0}^{2} \theta_{2} - a_{2} h_{21} - b_{2} h_{22} \right), S_{3} = \frac{1}{2} \left( r_{0}^{2} \theta_{3} - a_{3} h_{31} - b_{3} h_{32} \right), \qquad S_{4} = \frac{1}{2} \left( r_{0}^{2} \theta_{4} - a_{4} h_{41} - b_{4} h_{42} \right).$$
(6)

其中,带有下标的θ、h、a、b为中间参量,分别表示扇形对应的圆心角、三角形的高和

底边长度. 而面积S1、S2、S3、S4分别对应下面4组关系:

$$\begin{aligned} h_{11} &= x_0 - L , h_{12} = y_0 - L , & h_{21} = 2048 - L - x_0 , h_{22} = y_0 - L , \\ \theta_{11} &= \arcsin\left(\frac{h_{11}}{r_0}\right), \theta_{12} = \arcsin\left(\frac{h_{12}}{r_0}\right), & \theta_{21} = \arcsin\left(\frac{h_{21}}{r_0}\right), \theta_{22} = \arcsin\left(\frac{h_{22}}{r_0}\right), \\ \theta_{1} &= \frac{\pi}{2} - \theta_{11} - \theta_{12} , & \theta_{2} = \frac{\pi}{2} - \theta_{21} - \theta_{22} , \\ a_{1} &= L - y_0 + \sqrt{r_0^2 - h_{11}^2} , & a_{2} = L - y_0 + \sqrt{r_0^2 - h_{21}^2} , \\ b_{1} &= L - x_0 + \sqrt{r_0^2 - h_{12}^2} ; & b_{2} = L - x_0 + \sqrt{r_0^2 - h_{22}^2} ; \\ h_{31} &= x_0 - L , h_{32} = 2048 - L - y_0 , & h_{41} = 2048 - L - x_0 , h_{42} = 2048 - L - y_0 , \\ \theta_{31} &= \arcsin\left(\frac{h_{31}}{r_0}\right), \theta_{32} = \arcsin\left(\frac{h_{32}}{r_0}\right), & \theta_{41} = \arcsin\left(\frac{h_{41}}{r_0}\right), \theta_{42} = \arcsin\left(\frac{h_{42}}{r_0}\right), \\ \theta_{3} &= \frac{\pi}{2} - \theta_{31} - \theta_{32} , & \theta_{4} = \frac{\pi}{2} - \theta_{41} - \theta_{42} , \\ a_{3} &= L + y_0 - 2048 + \sqrt{r_0^2 - h_{31}^2} , & a_{4} = L + y_0 - 2048 + \sqrt{r_0^2 - h_{41}^2} , \\ b_{3} &= L - x_0 + \sqrt{r_0^2 - h_{32}^2} ; & b_{4} = L + x_0 - 2048 + \sqrt{r_0^2 - h_{42}^2} . \end{aligned}$$

再将各中间参量的表达式(7)式分别代入面积*S*<sub>1</sub>、*S*<sub>2</sub>、*S*<sub>3</sub>、*S*<sub>4</sub>对应的表达式(6)式中,则可以得到以太阳中心位置(*x*<sub>0</sub>, *y*<sub>0</sub>)和半径*r*<sub>0</sub>为参数的方程组(8)式,即太阳的中心位置由面积*S*<sub>1</sub>、*S*<sub>2</sub>、*S*<sub>3</sub>、*S*<sub>4</sub>可以定出.

$$\begin{aligned} S_{1} &= \frac{1}{2} \left\{ r_{0}^{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{x_{0} - 445}{r_{0}}\right) - \arcsin\left(\frac{y_{0} - 445}{r_{0}}\right) \right] - (x_{0} - 445) \right. \\ &\left[ \sqrt{r_{0}^{2} - (x_{0} - 445)^{2}} - y_{0} + 445 \right] - (y_{0} - 445) \left[ \sqrt{r_{0}^{2} - (y_{0} - 445)^{2}} - x_{0} + 445 \right] \right\}, \\ S_{2} &= \frac{1}{2} \left\{ r_{0}^{2} \left[ \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{x_{0} - 1603}{r_{0}}\right) - \arcsin\left(\frac{y_{0} - 445}{r_{0}}\right) \right] + (x_{0} - 1603) \right. \\ &\left[ \sqrt{r_{0}^{2} - (x_{0} - 1603)^{2}} - y_{0} + 445 \right] - (y_{0} - 445) \left[ \sqrt{r_{0}^{2} - (y_{0} - 445)^{2}} + x_{0} - 1603 \right] \right\}, \\ S_{3} &= \frac{1}{2} \left\{ r_{0}^{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{x_{0} - 445}{r_{0}}\right) + \arcsin\left(\frac{y_{0} - 1603}{r_{0}}\right) \right] - (x_{0} - 445) \right. \\ &\left[ \sqrt{r_{0}^{2} - (x_{0} - 445)^{2}} + y_{0} - 1603 \right] + (y_{0} - 1603) \left[ \sqrt{r_{0}^{2} - (y_{0} - 1603)^{2}} - x_{0} + 445 \right] \right\}, \\ S_{4} &= \frac{1}{2} \left\{ r_{0}^{2} \left[ \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{x_{0} - 1603}{r_{0}}\right) + \arcsin\left(\frac{y_{0} - 1603}{r_{0}}\right) \right] + (x_{0} - 1603) \left. \left[ \sqrt{r_{0}^{2} - (x_{0} - 1603)^{2}} + y_{0} - 1603 \right] + (y_{0} - 1603) \left[ \sqrt{r_{0}^{2} - (y_{0} - 1603)^{2}} + x_{0} - 1603 \right] \right\}. \end{aligned}$$

在解算时,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 为CMOS探测器测量的已知量,由于方程组含有4个方程 和3个未知数,且是含有反三角函数的复杂方程,所以考虑利用MATLAB的fsolve<sup>1</sup>函数 进行数值求解.fsolve可用于求解非线性方程组,需要给定初值,求解时可使用边缘拟合 法得到的( $x_0, y_0, r_0$ )作为数值求解的初值.此外,可以考虑两种做法:FQM<sup>1</sup>,将(8)式和 已知的面积 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 开方后再数值求解;FQM<sup>2</sup>,考虑降低噪声的情况,将(8)式按 如下方式改写构成新的方程组: ( $S_1+S_2$ )-( $S_3+S_4$ ), ( $S_1+S_3$ )-( $S_2+S_4$ ),  $S_1-S_4, S_2-S_3$ .

 $<sup>{\</sup>rm ^{1}fsolve,\ https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fsolve.html}$ 

## 3 算法实现与误差评估

#### 3.1 数据来源与测试方法

(1)由于指向镜数据来自太阳可见光,为使测试尽量接近真实情况,选择了SDO/AIA 4500 Å Level 1.0的光球数据,该数据没有作despike<sup>2</sup>处理.此外4500 Å的数据尺寸大小为4096×4096 pixel,可以使用imresize函数将其缩放到2048×2048 pixel.若在缩放前先进行裁剪,则可以控制生成的太阳像半径大小r<sub>0</sub>;

(2)为了评定指向镜算法的精度,首先直接读取fits文件为2维数组像元亮度值(Digital Number, DN),经裁剪和缩放作为第1张AIA图像(日面中心在图像中心附近),并计算其日面中心为( $X_0, Y_0$ ). 其次对图像沿x和y方向平移( $\delta_x, \delta_y$ )以产生大量测试图像,其理论中心为( $X_T, Y_T$ ) = ( $X_0 + \delta_x, Y_0 + \delta_y$ ). 其中 $\delta_x, \delta_y$ 从-150 pixel到150 pixel按3 pixel等间隔选取,且满足 $\sqrt{(X_T - 1024.5)^2 + (Y_T - 1024.5)^2} \leq 142$  pixel,即指向镜光轴相对于平台指向的最大偏差条件;

(3)另一方面,通过算法计算出测试图像的日面中心坐标(X,Y),再用计算得到的坐标与理论坐标相减得到x和y方向的误差(X – X<sub>T</sub>,Y – Y<sub>T</sub>),则算法的误差可以表示为<sup>[6]</sup>

$$\Delta_{\rm T} = \sqrt{(X - X_{\rm T})^2 + (Y - Y_{\rm T})^2}.$$

此外,一般认为图像是由一个个方格状的像素单元组成,方格的数量与像素的数量对应.为了反映这种认知,可以将CMOS图像的坐标原点(即A点)改为(0.5,0.5) pixel.于是对于2048×2048 pixel的CMOS探测器,其中心在(1024.5,1024.5) pixel,故在解算后需要对原中心坐标作+0.5的修正;

(4)根据太阳在CMOS探测器上成像光斑大小的可能变化,最小直径为1997.8 pixel, 最大直径为2065.7 pixel,故设置了8组不同半径大小的AIA图像进行测试, r<sub>0</sub>分别约 为: 998、1004、1009、1014、1019、1024、1029、1035 pixel.此外考虑了图像二值化 时的阈值和噪声影响,噪声是在图像二值化之后添加的.关于添加噪声,首先随机产 生2048×2048的只含有0和1的二值化矩阵.其中1表示噪点,其数量与0和1总数量的比 值p定义为噪声比例.然后再将噪声矩阵与二值化后的AIA图像做"或"逻辑运算,得到具 有一定噪声水平p的测试图像.

#### 3.2 测试结果与分析

为了探索随机噪声对指向镜算法精度的影响,图2中给出了四象限法的两种解法 FQM<sup>1</sup>和FQM<sup>2</sup>以及LSM的误差随噪声的变化规律.其中横坐标的噪声比例在0%-1%间 等间距取10个点,在2%-5%间等间距取4个点.图中每一个噪声比例下对应的蓝色\*点来 自821张偏移测试图像.这些测试图像从-150 pixel到150 pixel按9 pixel等间隔产生且满 足指向镜光轴最大偏差条件.这些误差点总体上对误差的上限有一个限制.而紫红色的 线条是测试图像在约70 pixel固定偏移下,其平均误差随噪声比例的变化曲线.这说明随 着噪声的增加,FQM算法的误差呈增大趋势.此外,图3也给出了FQM和LSM的误差随 噪声比例和图像偏移量的分布图.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>despike, https://www.lmsal.com/sdodocs/doc/rep/sdod180/fid258/zip/entry/index.html



图 2 不同比例随机噪声下的指向镜算法误差(阈值= 1500 DN, r<sub>0</sub> = 1014 pixel). 每个噪声比例下的蓝色\*点来自 于821张测试图像,紫红色线条是偏移约为70 pixel测试图像的平均误差曲线. (a)和(b)中的子图是满足误差小于1 pixel (红色直线以下)的局部放大图.

Fig. 2 The error of solar aspect system algorithm under different proportions of random noise (threshold = 1500 DN,  $r_0 = 1014$  pixel). The blue points \* under each noise ratio are the errors of 821 test images, and the magenta curve is the average error of the test image with 70 pixel offset. The subgraphs in (a) and (b) are the local enlarged ones satisfying the error less than 1 pixel (under the red line).

由图2可知, FQM<sup>1</sup>和FQM<sup>2</sup>满足误差小于1 pixel的噪声比例分别约为0.1%和0.85% (对于偏移量为70 pixel的图像, FQM能忍受的噪声上限分别约为0.4%和1.6%). 而LSM的 误差随噪声的变化相对稳定且小于0.4 pixel. 此外, 由图2 (a)的子图可知FQM<sup>1</sup>的误差 是随噪声逐渐增加的, 在大约小于0.02%的噪声水平时, 此方法的精度优于FQM<sup>2</sup>和LSM. 而LSM对噪声的适应性以及精度总体上好于FQM, 故后面的测试主要基于FQM<sup>1</sup>和LSM, 当然3种计算方法可以用来相互验证.





Fig. 3 The error distribution of FQM and LSM with noise percentage and image offset in Fig. 2.

基于图2和图3的初步分析, 接着做了更细致的测试. 图4给出了对边缘拟合法和四象 限法在固定阈值、随机阈值和附加随机噪声情况下的6种测试结果. 其中横坐标为8组不 同半径 $r_0$ 测试图像的统一编号, 大约56000张. 纵坐标为算法误差 $\Delta_T$ 的浮动范围. 表1也 给出了相应误差的统计结果, 包括均方根(Root Mean Square, RMS)、平均值、极值以 及99.5%分位值.



图 4 太阳指向镜算法在不同条件下的误差分布: (a)和(b)为固定阈值1500 DN, (c)和(d)在1200-1900 DN之间随机 取阈值, (e)和(f)除了随机阈值外再附加0.05%的随机噪声.

Fig. 4 The error distribution of solar aspect system algorithm under different conditions: (a) and (b) with fixed thresholds of 1500 DN, (c) and (d) with random thresholds of 1200-1900 DN, (e) and (f) with noise percentage of 0.05% in addition to random thresholds.

表 1 太阳指向镜算法的误差评估: LSM和FQM<sup>1</sup> **Table 1 Error evaluation of solar aspect system algorithm: LSM and FQM<sup>1</sup>** Method Fixed threshold = 1500 DN Threshold from 1200 to 1900 DN poise<sup>b</sup> n = 0.01% poise n = 0.01%

Method	Fixed threshold = $1500$ DN		Threshold from $1200\ {\rm to}\ 1900\ {\rm DN}$		$noise^b$ $p = 0.01\%$		noise $p=0.05\%$	
Index <sup>a</sup>	LSM	$FQM^1$	LSM	$FQM^1$	LSM	$FQM^1$	LSM	$FQM^1$
Root mean square	0.0920	0.0228	0.1084	0.0597	0.1084	0.0754	0.1086	0.2263
Mean value	0.0822	0.0203	0.0964	0.0520	0.0964	0.0681	0.0965	0.2010
Peak value	0.2928	0.0599	0.3485	0.1622	0.3678	0.2549	0.3430	0.7978
99.5%-fractile	0.2092	0.0486	0.2470	0.1350	0.2472	0.1633	0.2481	0.5251

<sup>a</sup> The unit is pixel, and 1 pixel = 0.9454'', or approximately 1 pixel  $\approx 1''$ .

 $^{\rm b}$  The ratio of additional noise is 0.01%, corresponding to about 20 noise points in each 445  $\times 445$  pixels region.

结合图4和表1可知,在固定阈值下四象限法的误差最小,误差为0.05"以内的数据占99.5%,最大误差不超过0.06",优于边缘拟合法的结果.在单独考虑随机阈值以及 再附加0.01%的随机噪声情况下,FQM<sup>1</sup>的各项指标依然优于LSM.当对测试图像添 加0.05%的噪声时,FQM<sup>1</sup>的极值误差接近0.8",相对于LSM增加更为显著.添加随机噪 声后的图4 (f)的误差分布相对于无噪声的图4 (d)变化更明显.不过根据图4 (f),极值 误差与太阳像的半径和偏移量有关系,故误差的评估也需要借助其他统计量,如RMS误 差为0.23".由于四象限法的精度取决于CMOS上太阳像经二值化后4个边角的面积, 可以预计随着噪声的继续增加,FQM对面积的分辨变差会导致误差增大,这也与图2 (a)和(b)的结果相符.而对于LSM,比较图4 (a)、(c)和(e)可知,其误差波动都比较随机 均匀,再结合表1中LSM的统计结果,有无噪声相差不大;也符合图2 (c)的预期.

图5选取了图4 (e)和(f)中半径r<sub>0</sub>=1014 pixel的数据点,画出了LSM和FQM<sup>1</sup>的误差 随图像偏移量的分布.其中横、纵坐标分别为沿x和y方向的图像偏移量,左图为边缘拟 合法,其误差分布相对均匀.右图为四象限法,根据色值可知通常在太阳图像的偏移量 较小的时候其误差较小.该结果也可与图2和图3的分析相互印证.



图 5 太阳指向镜算法误差随图像偏移量的分布. 对应图4 (e)和4 (f)中 $r_0 = 1014$  pixel的测试数据.



# 4 总结与讨论

我们针对HXI的耀斑源区定位需求以及HXI太阳镜指向精度优于2"的设计要求,在 查阅和借鉴太阳导行镜相关资料的基础上,对两种基础算法,即最小二乘法和四象限法 的测量精度及其受噪点水平的影响进行了测试.测试时利用了SDO/AIA 4500 Å的Level 1.0数据.

总体而言,边缘拟合法和四象限法的精度(在0.05%噪声下RMS误差分别约为0.11″和0.23″)均优于2″的设计要求和1″的测试目标,且可提供独立测量结果,用于交叉验证. 四象限法依赖于4个角的面积对太阳中心坐标的约束,所以其精度对面积的变化比较敏 感.前面提到的两种解法,FQM<sup>1</sup>可以达到最高精度时的噪声容忍约为0.02%,FQM<sup>2</sup>虽 然能够容忍约0.85%的噪声,但是精度总体不如LSM好.而边缘拟合法的定位精度虽然 相对略低,但是由于该算法是基于拟合太阳像的边缘点数据,其所选取的14行像素相对 于总的2048行像素而言,在概率上能保证具有较强的抗随机噪声能力.

但需要指出的是HXI太阳指向镜在轨提取太阳图像时,将无法对原始数据作复杂的 矫正处理,故在二值化后如果还存在较多噪点,则边缘拟合法会更适合作为指向镜算法. 就测试使用的SDO/AIA 4500Å Level 1.0数据而言,四象限法的FQM<sup>1</sup>解法在低噪声时 的指向精度更高.但Level 1.0数据是Level 0数据经过一定处理得到的,当前测试中,我们 尚未考虑这两种数据的具体差异,所以测试会有局限性,特别是对于四象限算法.在本文 所得结果的基础上,我们将进一步优化算法,如采用穷举矩阵方法以及改进四象限法方 程组的求解方法等,以改进太阳中心位置的测量精度.

#### 参考文献

- [1]~Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. RAA, 2019, 19: 156
- $\left[2\right]~$  Zhang Z, Chen D Y, Wu J, et al. RAA, 2019, 19: 160
- [3] 林元章. 太阳物理导论. 北京: 科学出版社, 2000: 269-271
- [4] 温卫斌, 李怀峰, 孙才红, 等. 光电工程, 2005, 32: 1
- [5] 陈炳龙, 方禹鑫, 邓雷, 等. 天文学报, 2020, 61: 32
- [6] 胡柯良.面阵CCD导行和嵌入式系统在高时空分辨率太阳磁场观测中的应用研究.北京:中国科学院国家天文台, 2004: 9-25
- [7] 邓林华. 一米红外太阳望远镜光电导行系统的研究. 昆明: 中国科学院研究生院(云南天文台), 2009
- [8] 郭晶晶,杨云飞,冯松,等.科学通报,2016,61:1112
- [9] Küveler G, Wiehr E, Thomas D, et al. SoPh, 1998, 182: 247
- $\left[10\right]$ Wülser J P, Hudson H S, Nishio M, et al. So<br/>Ph, 1998, 180: 131
- [11] Henneck R, Bialkowski J, Burri F, et al. SPIE, 1999, 3765: 771
- $\left[12\right]$ Fivian M, Bialkowski J, Hajdas W, et al. SPIE, 2000, 4012: 518
- $\left[13\right]$  Fivian M D, Hudson H S, Lin R P, et al. Science, 2008, 322: 560
- $\left[14\right]$  Thompson W, Carter M. SoPh, 1998, 178: 71
- [15] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. SoPh, 2012, 275: 17
- [16] Emilio M, Kuhn J R, Bush R I, et al. ApJ, 2012, 750: 135
- [17] 孔兵, 王昭, 谭玉山. 红外与激光工程, 2002, 31: 275

# Research on the Solar Aspect System Algorithm of ASO-S/HXI

YU Fu<sup>1,2</sup> SU Yang<sup>1,2,3</sup> ZHANG Zhe<sup>1,3</sup> HUANG Yu<sup>1,2,3</sup>

(1 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)

(3 Key Laboratory for Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

**ABSTRACT** In this paper, we test two methods for obtaining the coordinate of the solar disk center for the Hard X-ray Imager (HXI), one of the three payloads onboard the Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S) satellite. HXI is an important means to study solar flares and other eruptions. However, due to the modulation-based indirect imaging rather than direct imaging, the position of the X-ray source on the solar disk should be determined by the coordinate of the solar disk pointed by the instrument which is provided by the solar aspect system. Therefore, the solar aspect information is of great scientific significance for the location of solar flares and the realization of multi-wavelength research to understand the physical processes of solar flares. Combined with the design scheme of the solar aspect system, a test image is first generated from the data of SDO (Solar Dynamics Observatory)/AIA (Atmospheric Imaging Assembly) 4500 Å. Then, the binarization processing is used to obtain the solar limb and the specified area of four corners. Finally, the least square method and the four quadrant method are used to calculate the coordinates of the disk center. The preliminary results show that the least square method has a relatively stable accuracy of about 0.25 arcsec, which is less affected by random noise, and can be used as the initial values for the four quadrant method. The accuracy of the latter can be better than 0.14 arcsec, but it is easily affected by random noise. The accuracies of both algorithms are significantly better than the design requirement of the solar aspect system in HXI, which can provide reference for the practical application of solar aspect data in future scientific analysis.

**Key words** instrumentation: solar aspect system, computing method: four quadrant method, computing method: least square method