

文章编号 1004-924X(2017)05-1368-10

# 广角望远镜实时自动调焦的清晰度评价方法

苑嘉辉<sup>1,2</sup>, 蔡洪波<sup>1\*</sup>, 刘 奇<sup>1,2</sup>, 魏建彦<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台 空间天文与技术重点实验室, 北京 100012;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** SVOM 天文卫星附属的地基广角相机阵(GWAC)含有 36 个广角望远镜,其短时标的高精度自动观测建立在实时自动调焦的基础上,本文将对广角望远镜实时自动调焦的图像清晰度评价方法进行研究和实现。文章首先比较研究了常用望远镜图像清晰度评价方法的原理及在 GWAC 系统上的适用性,得出基于星像能量集中度的两种方法:星像 50% 能量半径、PSF 的 FWHM 值适用于 GWAC 系统。区别于常用天文软件包 IRAF 费时的算法,本文提出了基于点源强度分布进行 PSF 拟合计算 FWHM 的方法,并进一步探究了诸如拟合模型、选星标准、定心精度、拟合半径、插值方法、插值间隔、FWHM 后处理等关键方法参数对 FWHM 计算精度与速度的影响。最终得到一套适用于 GWAC 实时自动调焦的清晰度评价方法,并用 C++ 编程实现。本文中方法 FWHM 计算误差为 0.046 pixel,精度与 IRAF 相当,计算焦点位置一致;单图(挑选后约 300 颗星)计算时间为 0.67 s,约为 IRAF 计算时间的 1/20,满足 GWAC 系统自动调焦的精度与实时性需求。研究结果在 GWAC 系统中得到应用,并可为其他自动化望远镜观测系统提供参考。

**关键词:** 图像清晰度;自动调焦;点扩散函数;广角望远镜;能量集中度

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1368

## Definition evaluation method for real-time auto-focusing of wide-angle telescope

YUAN Jia-hui<sup>1,2</sup>, CAI Hong-bo<sup>1\*</sup>, LIU Qi<sup>1,2</sup>, WEI Jian-yan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Space Astronomy and Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)  
\* Corresponding author, E-mail: chb@bao.ac.cn

**Abstract:** Ground Wide Angle Cameras (GWAC) of the astronomy satellite SVOM contains 36 wide-angle telescopes, and its high-precision automatic observation of short exposure is established on real-time auto-focusing, in this paper, we focus on the research and realization of image definition evaluation for real-time auto-focusing on GWAC. At first, principles of image definition evaluation methods of common telescope and applicability on GWAC system were researched, thus two kinds of methods based on encircled energy of star image were obtained, namely radius of 50% energy of stars and the full width of half maximum (FWHM) of point spread function (PSF), were suitable for GWAC system. Different from time-consuming algorithm of common astronomy software package

收稿日期:2016-12-13;修订日期:2017-01-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1331202, No. U1531134);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB845800)

IRAF, method of calculating FWHM via PSF fitting calculation based on source intensity distribution was proposed, and further influence of key method parameters such as fitting model, star-choosing standard, centring precision, fitting radius, interpolation method, imterpolation interval, FWHM after-treatment, etc on calculation precision and speed of FWHM was researched. A set of definition evaluation methods that are applicable to GWAC real-time automatic focusing were acquired in the last, and it is realized by C++ programming. Calculation error of FWHM method in the paper is 0.046 pixel, the precision is equal to IRAF approximately and calculated focus location is the same; calculation time of single graph (about 300 stars after selection) is 0.67 s which is 1/20 of calculation time for IRAF. It satisfies precision and real-time requirements of automatic focusing for GWAC system. The research results have been applied in GWAC system and provide reference for other automatic observing system of telescope.

**Key words:** image resolution; automatic focusing; point spread function; wide-angle telescope; energy concentration degree

## 1 引言

地基广角相机阵(Ground Wide Angle Cameras, GWAC)是中法合作研制的天文卫星 SVOM 的地基观测设备,主要用于观测伽玛暴光学对应体以及各种短时标暂现源和剧烈变化天体<sup>[1]</sup>。GWAC 由 36 个光学广角望远镜组成,每个望远镜配备一台  $4\text{ k} \times 4\text{ k}$  的 CCD 相机,拼接成约 5 000 平方度的瞬时观测视场,约每 15 s 拍摄 1 次,能同时监测约 500 万颗天体。GWAC 发现的暂现源由 2 台 60 cm 望远镜和 1 台 30 cm 望远镜进行后随多波段观测。GWAC 在视场、短时标监测等方面与国际同类天文设备相比,处于遥遥领先的地位,有可能开启光学天文大视场短时标监测的新时代,并取得原创性的天文学新发现<sup>[2]</sup>。

对于 GWAC 来说,探测能力是影响其科学产出的最主要因素之一。通常,探测能力每深一个星等,可探测源的数目大约增加 3 倍。GWAC 的主要噪声来源于背景噪声,而背景噪声与星像半径成正比,因此,星像在探测器平面上的能量集中度将直接影响探测的极限星等。望远镜工作过程中,受指向、温度等因素的影响,焦点位置会发生移动,导致星像能量集中度降低。为了使 GWAC 系统在观测过程中的探测能力保持在探测极限附近,像质实时监控与精确调焦起着关键性的作用。

GWAC 系统的 36 台相机同时工作,手动调焦无法满足需求,必须实现实时自动调焦。36 台相机每隔 15 s 曝光一次,科学目标要在此时间内完成星像提取、认证,及通过对星像特征进行分

析,识别出暂现源,然后,快速触发 60 cm 望远镜的后随观测。由于科学数据处理比较复杂,需要占用大量的处理时间,因此系统分配给自动调焦的处理时间小于 2 s。然而,即使为每台 CCD 配备一台处理器,对于 2 s 内完成  $4\text{ k} \times 4\text{ k}$  的 CCD 图像的调焦相关计算而言,仍然是一个很大的挑战。

黄垒等已经在 GWAC 样机上实现了一套自动调焦系统,该系统由步进电机位置开环系统和图像清晰度评价系统组成<sup>[3]</sup>。在其调焦系统中图像清晰度评价方法采用的是 IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) 天文软件包计算点源星像的半高全宽 (FWHM) 值。IRAF 由美国国家光学天文台开发及维护,用于光学天文数据处理及分析,其数据处理算法受到天文领域科研人员的普遍认可。但由于 IRAF 软件包系统庞大,占用了过多的计算机系统资源,测试表明其完成  $4\text{ k} \times 4\text{ k}$  图像清晰度评价的时间约为 12 s,远不能满足系统的实时性要求。因此研究一套快速、精确的图像清晰度评价系统对于 GWAC 而言显得尤为重要。图像清晰度评价函数的研究也是目前工程领域的热点之一<sup>[4-7]</sup>。

本文首先对望远镜自动调焦常用的图像清晰度评价函数展开研究,并评估了其在 GWAC 所代表的广角望远镜的适用性;通过分析 IRAF 算法过慢的原因,提出使用点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 强度分布拟合计算 FWHM 的方法,以实现算法加速,并展开了全面的算法研究和优化;最后本文将从精度和速度两方面对系统的图像清晰度评价方法进行性能评估并给出结论。

## 2 常用望远镜清晰度评价方法在 GWAC 上的适用性研究

用于自动调焦的图像清晰度评价函数应具有无偏性、单峰性、灵敏度高、信噪比好、高效性等特点<sup>[5-7]</sup>。而望远镜的成像对象主要为点源,其具有特殊性。目前望远镜自动调焦中的图像清晰度评价方法主要有以下几种:基于图像熵值的评价方法、基于点源形态如点源圆度的评价方法、基于点源能量分布的评价方法包括 50% 能量半径、PSF 拟合计算 FWHM 值等。下面将对各个方法的原理进行分析,并研究其在 GWAC 系统上的适用性。

为了定量评估不同方法的性能,本文利用实际 GWAC 系统中的一组望远镜系统、以  $5 \mu\text{m}$  为步长获得了一组从离焦到最佳焦面再到离焦的图像,作为测试数据。在这组测试数据上,分析上述各种方法是否满足清晰度评价函数的标准。IRAF 算法得到的焦点位置在序列图像中标号为 30 的图像所对应的光轴位置处,通过目视检查,确定此点附近为光学系统焦点所在区域。GWAC 系统焦深为  $28 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>,约包含 6 帧调焦测试图像,最佳焦面附近  $\pm 2$  幅图像均可认为是最佳像质图像。

### 2.1 图像熵方法

图像能量的定义如下:

$$E(D) = \sum_x \sum_y I(x, y). \quad (1)$$

图像熵的定义如下:

$$H(D) = - \sum_x \sum_y I(x, y) \ln[I(x, y)]. \quad (2)$$

根据香农信息理论有,在能量相同的情况下,熵越大代表图像的细节信息越多;信息量越大,对应的调焦效果越好<sup>[8]</sup>。对于天文图像而言,在同样的曝光时间下,接收的能量相同时,对焦越好的图像熵值越大。

图像熵方法的结果见图 1,图 1 中横坐标为调焦测试图像序列号,纵坐标为图像熵值的计算结果。从图 1 可知,利用图像熵值方法显然不能准确测量系统焦面位置,其结果不适于作为系统的调焦判据。

结果分析:广角望远镜图像中星像所占面积较小,结构化、细节化信息不够丰富。若统计全图的图像熵,则星像的能量变化将淹没在所占像素比例更多的背景变化中,熵值对调焦过程不够敏感,无法作为系统的图像清晰度评价函数。

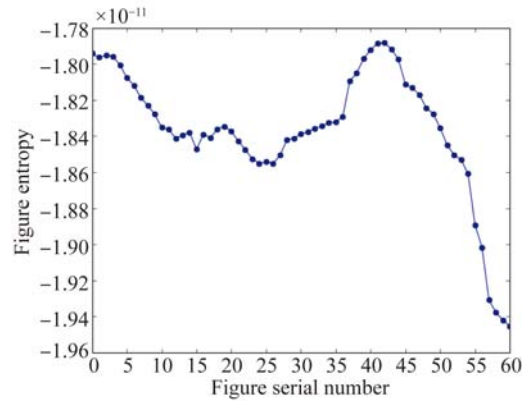


图 1 图像熵方法的结果

Fig. 1 Figure's entropy results

### 2.2 点源的圆度

由于望远镜的成像对象主要为点源,其经过大气、光学系统后会形成一定范围的圆斑。在离焦过程中点源形状会发生改变,因此可以将星像在图像中的圆度作为图像清晰度评价指标来指导调焦<sup>[9]</sup>。

用星像的长轴与短轴比表示星的圆度。Stobie 等人<sup>[10]</sup>研究发现星像长轴(A)与短轴(B)的计算方法如下:

$$A^2 = \frac{\overline{x^2 + y^2}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\overline{x^2 - y^2}}{2}\right)^2 + \overline{xy^2}}, \quad (3)$$

$$B^2 = \frac{\overline{x^2 + y^2}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\overline{x^2 - y^2}}{2}\right)^2 + \overline{xy^2}}. \quad (4)$$

点源圆度的结果如图 2 所示,图 2 中,横坐标为调焦测试图像序列号,纵坐标为点圆度的计算结果。由图 2 可知,点源的圆度对于调焦过程不够敏感,无法作为系统的清晰度评价函数。

结果分析:由于 GWAC 系统的超大视场设计,其星像为欠采样状态,星像占据的像素范围很小,而星像圆度主要受星像中心落在像素内位置的影响,因此其对于调焦过程不敏感,无法作为清晰度评价函数。

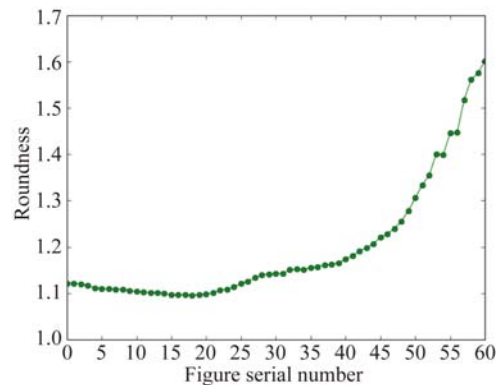


图 2 点源圆度的结果

Fig. 2 Roundness result of point source

### 2.3 点源能量集中度方法

点源能量集中度与望远镜探测能力直接相关,是望远镜自动调焦的指导依据。因此基于星像能量集中度统计的算法与望远镜调焦的最终目的直接相关,原理上更适用于望远镜系统。

主要有两种方法用于表征点源能量集中度:50%能量半径、PSF 拟合计算 FWHM。

#### 2.3.1 50%能量的半径

随着离焦程度的加剧,星像能量逐渐弥散,可将星像一定百分比能量所占孔径的大小作为清晰度评价函数来指导调焦。目前望远镜调焦应用的是 HFD(Half Flux Diameter)<sup>[11]</sup>,即计算星像 50%能量所占半径的两倍来指导调焦。本文中直接使用 50%能量的半径值进行分析。

50%能量半径是通过孔径测光计算得到的,运算过程为:a.以细密的孔径间隔对星像进行二维插值,利用孔径测光计算星像能量的增长曲线;b.对能量增长曲线进行插值,计算 50%能量对应孔径。50%能量半径的结果见图 3,图 3 中横坐标为调焦图序列号,纵坐标为孔径测光计算的星像 50%能量的半径。由图 3 可以看出,孔径测光方法找到的焦点位置为 29 且为单峰,在系统焦深范围内,满足清晰度评价函数需求。

结果分析:星像 50%能量所占半径可以反应星像的弥散程度,而且可以直接表征图像的离焦程度,从而可作为图像清晰度评价函数。

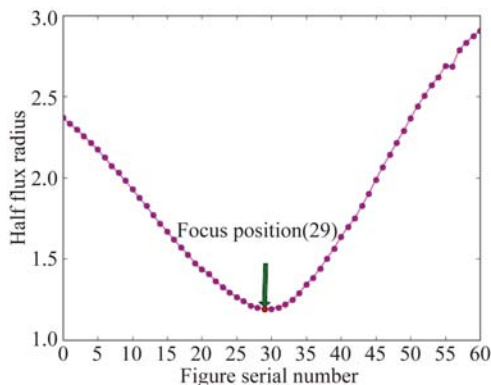


图 3 50%能量半径的结果

Fig. 3 Result of radius enclosing 50% energy

#### 2.3.2 PSF 函数拟合计算 FWHM 的方法

PSF 函数用于描述输入的点源由于大气、光

学系统等作用的影响在图像上形成散斑的轮廓。PSF 在传统成像光学中是一种典型的分析方法。PSF 的 FWHM 值可以反映出 PSF 的尖锐程度,因此直接与星像轮廓的能量集中度相关。以 Gaussian 函数的 PSF 模型为例,PSF 函数的强度分布可以表示为:

$$P(r) = H * \exp\left[-\frac{r^2}{2\delta^2}\right], \quad (5)$$

其中  $\delta$  代表了轮廓的形状,其大小直接与轮廓变化即能量集中度的变化相关。而 FWHM 值为:

$$FWHM = 2 * \sqrt{2 \ln 2} * \delta. \quad (6)$$

因此,理论上 FWHM 值直接代表了轮廓能量集中度的情况。

单帧图像 PSF 拟合计算 FWHM 的过程是将星像所在一定范围内流量变化规律用解析函数表示,再根据解析函数的 FWHM 的数学定义计算 FWHM。

IRAF 计算出的 FWHM 结果如图 4 所示。由图 4 中曲线可以看出,IRAF 计算的 FWHM 值曲线平滑稳定,且能够找到正确的焦点位置,满足系统调焦需求。

结果分析:PSF 拟合计算 FWHM 的原理是用适合的轮廓代表星像能量的分布情况、用 FWHM 表征轮廓的变化,从而直接反应星像能量集中度的变化,可以作为调焦所用清晰度评价函数。

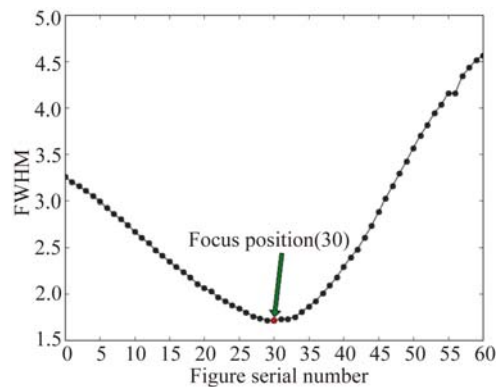


图 4 PSF 函数 FWHM 值的结果

Fig. 4 FWHM result

### 2.4 小结

各种方法在广角望远镜上是否适用及其原因如表 1 所示。

表 1 不同清晰度评价方法适用性结果

Tab.1 Comparison results of applicability for various methods

	适用性	具体说明
图像熵	否	欠采样星像占图像比例太少,熵值不能反应星像能量变化
点的圆度	否	欠采样星像的圆度受星像中心在像素不同位置影响较大,对离焦过程不敏感
50%能量的半径	是	50%能量所占孔径的变化直接反应星像能量弥散的程度,从而表征星像能量集中度随调焦过程的变化
PSF 函数 FWHM	是	用 PSF 描述星像轮廓,FWHM 值反应 PSF 的尖锐程度,从而直接反应星像能量集中度的变化

由表 1 可以得出,两种基于星像能量集中度的算法:孔径测光法计算 50%能量半径、PSF 函数拟合计算 FWHM 均满足作为调焦所需清晰度评价函数的要求。

IRAF 中对于两种方法均得以实现,但其单帧计算时间均在 10 s 左右(约 300 颗星),显然不满足系统的实时性需求。

通过阅读 IRAF 的技术文献[13-14]发现,IRAF 计算 50%能量半径与 FWHM 值都是建立在孔径测光的基础上:首先进行二维插值,然后通过多孔径测光得到能量增长曲线,前者是对能量增长曲线进行插值,计算 50%能量对应的半径,后者是对归一化的能量增长曲线进行拟合,从而利用得到的模型参数计算 FWHM 值。

而在二维插值、多孔径测光得到能量增长曲线的过程中,插值精度必须到亚像元级才能满足精确调焦的需求。以 IRAF 系统为例,其孔径测光进行亚像元插值的间隔如公式(9)所示<sup>[14]</sup>。对于 GWAC 欠采样系统,其星像所占范围少,为保证精度,必须进行细密插值与测光。因此孔径测光得到能量增长曲线的过程计算量很大,运算时间过长。

$$\left. \begin{matrix} d_r \\ d_x \\ d_y \end{matrix} \right\} = \begin{cases} 0.05 (r < 1) \\ 0.10 (r < 2) \\ 0.20 (r < 4) \\ 0.50 (r < 9) \\ 1.00 (r > 9) \end{cases} \quad (7)$$

考虑到 GWAC 系统对于实时性的特殊要求,本文不采用 IRAF 的 FWHM 计算方法,即没有进行孔径测光,而是对强度分布进行轮廓拟合计算 FWHM,并对拟合算法进行了研究和优化,

以在精度和速度上达到了系统需求。下一章将进行进一步说明。

### 3 PSF 拟合过程算法研究及主要参数对 FWHM 的影响分析

本章将对 PSF 拟合计算 FWHM 过程中的关键算法和参数进行研究与优化,涉及到的主要方面为:望远镜 PSF 选型、源数据处理、数据拟合、FWHM 后处理等。

#### 3.1 PSF 拟合模型选择

一般常用 Gaussian 模型作为 PSF 函数,而研究发现,Moffat 模型更适用于欠采样图像<sup>[15-16]</sup>。

Gaussian 模型如公式(5)所示,其 FWHM 计算公式见式(6)。

Moffat 函数形式表示的 PSF 函数强度分布如下:

$$P(r) = I_0 * \left[ 1 + \frac{r^2}{\alpha^2} \right]^{-\beta} + B, \quad (8)$$

其中  $I_0$  为中心的亮度值,  $B$  为背景值,  $\alpha$  值与 FWHM 相关,  $\beta$  的值决定了曲线的轮廓,受大气视宁度的影响。Moffat 函数的 FWHM 的计算公式如下:

$$FWHM = 2\alpha \sqrt{2^{\frac{1}{\beta}} - 1}. \quad (9)$$

对于 GWAC 系统,Gaussian 模型与 Moffat 模型拟合的平均相对残差如图 5 所示(彩图见期刊电子版),图 5 中  $x$  轴为调焦序列图号,  $y$  轴为模型拟合相对残差。可以看出,Moffat 模型的相对残差明显小于 Gaussian 模型,这也证实了 Bendinelli, O 等人的研究结果<sup>[15-16]</sup>。

因此,在 GWAC 的 PSF 拟合中选用 Moffat 模型。

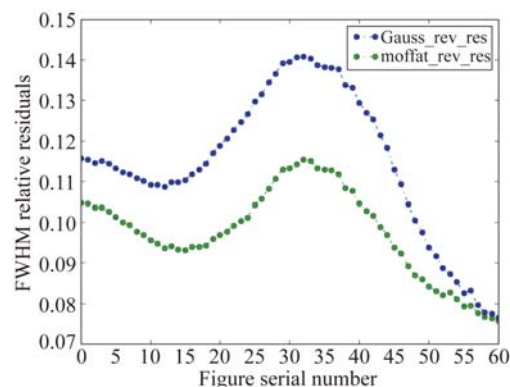


图 5 Gaussian 模型与 Moffat 模型拟合残差比较  
Fig.5 Fitting residual comparison between Gaussian model and Moffat model

### 3.2 源数据处理

#### 3.2.1 代表星的选取

调焦的代表星需满足信噪比高、孤立、不饱和、非边缘、在视场中分布均匀的要求,像质差的星像会造成 PSF 拟合误差增大,对 FWHM 值精度影响较大。IRAF 没有针对调焦的自主选星功能,针对 GWAC 系统,本文方法的具体实现步骤为:

选取 CCD 图像中亮度高于 30 倍天光背景起伏的星,剔除饱和星与边缘星,再将剩余的星按照中心像素亮度从大到小排序。

将图像分为均匀的  $3 \times 3$  个区域,将列表中星按亮度顺序分区域进行选择,保证每个区域的代表星数量相同,从而保证选星的均匀性。

按照上面的标准,在单帧图像中均匀选取 300 颗星作为调焦代表星。

#### 3.2.2 星像定心精度

针对定心误差对 FWHM 误差的影响展开研究,以确定系统对定心精度的阈值,并验证常用二维重心法是否满足系统要求。

首先模拟产生了 FWHM 分别为 1.2, 1.3, ..., 2.0 的图像,通过在上述图像上叠加不同大小的噪声统计 FWHM 的误差  $\Delta FWHM$  与中心误差  $\Delta R$  的关系。FWHM 在 1.2~2.0 范围内, $\Delta FWHM$  与  $\Delta R$  的关系用二次多项式进行拟合,拟合后的曲线如图 6(彩图见期刊电子版)所示。当系统移除焦深范围外时,其 FWHM 值的相对变化幅度为 3%左右。图 6 中, $x$  轴表示  $\Delta R$ , $y$  轴表示  $\Delta FWHM$ ,根据  $\Delta FWHM$  与  $\Delta R$  的关系曲线计算  $\Delta FWHM$  增加 3%时的值,其中最小值为 0.109 5 pixel。因此,定心精度在 0.1 pixel 之内,对模拟图像 FWHM 值带来的误差影响控制在 3%以内。

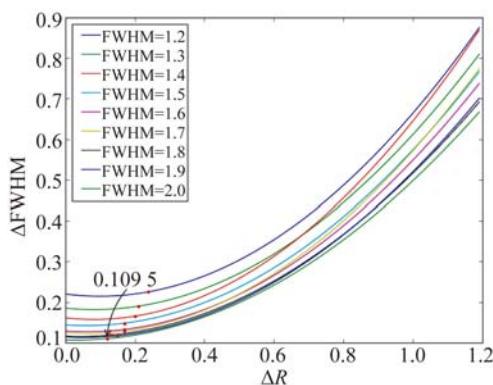


图 6 定心精度对 FWHM 偏差的影响

Fig. 6 Influence of centering precision on FWHM

利用模拟图像统计常用二维重心法星像中心的定心精度,如表 2 所示。对于欠采样图像,二维重心法定心精度在 0.01 pixel 左右,小于 0.1 pixel,因此二维重心法星像中心的计算精度满足系统需求。

表 2 二维重心法定心精度

Tab.2 Centering precision of two-dimensional gravity method (pixel)

FWHM	$\Delta R$	FWHM	$\Delta R$
1.2	0.013 7	1.7	0.011 2
1.3	0.012 1	1.8	0.011 8
1.4	0.011 5	1.9	0.012 2
1.5	0.010 6	2.0	0.011 6
1.6	0.010 2		

#### 3.2.3 星像背景值的计算

星像背景值是通过统计距离星像中心一定距离的环形区域的像素值得到的,Bertin 等人研究发现,根据下面的公式,计算的星像背景值的精度较高<sup>[10]</sup>:

$$Background = \begin{cases} 2.5 median - 1.5 mean & (median < mean) \\ mean & (median \geq mean) \end{cases} \quad (10)$$

### 3.3 拟合过程优化

在确定了使用 Moffat 函数作为 PSF 模型的基础上,针对拟合过程中的关键参数和方法进行了选择和优化。

#### 3.3.1 FWHM 拟合半径的选择

拟合半径的选择影响拟合数据点的数目与分布情况,本文基于模拟图像评价了不同拟合半径下 FWHM 的计算误差。

使用拟合半径  $R=1 \sim 6$  对 FWHM=1.2~2.0 的模拟图像进行拟合,FWHM 误差统计结果见表 3。

表 3 不同拟合半径时 FWHM 的值计算误差

Tab.3 Residuals of FWHM with various fitting radius

拟合半径	R=1	R=2	R=3	R=4	R=5	R=6
FWHM 误差	0.396 0	0.198 3	0.151 7	0.163 0	0.163 1	0.163 4

从表中可以看出:  $R=1, 2$  时, FWHM 的统计误差很大;  $R=3$  时 FWHM 的误差值最小;  $R=4, 5, 6$  时, FWHM 的误差值非常接近, 且较  $R=3$  时有小幅增加。

这说明 GWAC 系统星像能量基本集中在  $R=3$  的范围内, 再增大拟合半径只是增加更多星像边缘趋于 0 的数据点, 对于轮廓影响不大。综上所述, 选择拟合半径  $R=3$ 。

### 3.3.2 插值间隔的选择

由于 GWAC 图像具有欠采样的特点, 考虑先对图像进行插值再做拟合<sup>[17]</sup>, 文中比较了单像素内均匀插值点  $N$  为 1, 2, 5, 10 时对 FWHM 的计算精度与速度的影响, 插值方法为双三次样条插值。

所比较的 6 种插值方案插值点 ( $N$ ) 依次增多, 计算量以  $N^2$  的规律增长, 表 4 中为每像素内均匀插入 1, 2, 5, 10 个点以及不插值 ( $N=0$ ) 情况下, 每幅图 (约 300 颗星) 的运算时间和误差。

由上可知,  $N$  值直接影响到拟合的运行速度, 单像素内插值点数  $N=1$  较不插值 ( $N=0$ ) 时的 FWHM 值误差减小了 0.05 左右, 但插值点数  $N=2, 5$  较  $N=1$  误差降低了 0.005, 对于误差的进一步降低效果甚微,  $N=10$  时误差反而增大。

表 4 不同插值间隔计算时间

Tab. 4 Running times of interpolation method with different interpolation intervals

	$N=0$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$
时间/s	0.31	0.67	1.57	4.28	8.72
误差/pixel	0.234	0.183	0.178	0.175	0.186

综合考虑 GWAC 系统实时性需求, 插值间隔选择均匀插值  $N=1$ 。

### 3.3.3 拟合数据插值方法的选择

关于插值方法的选择, 为比较简化插值方法对运算速度和精度的影响, 测试比较了双线性插值与双三次样条插值在单像素内均匀插入 1 个点的情况下的速度与精度。

300 颗星插值计算所需时间和精度如表 5 所示, 双线性插值法虽然在插值时间上小于双三次样条法, 但其拟合误差几乎是双三次样条的两倍。而双三次样条插值所需时间仅占拟合总需求

(2 s) 的 5%, 综合考虑精度与速度的需求, 选择双三次样条作为插值方法。

表 5 不同插值方法的插值时间与 FWHM 计算误差

Tab. 5 Running times and precision of different interpolation methods

	插值时间(300 颗星/s)	误差
双线性插值	0.020	0.311
双三次样条插值	0.095	0.183

### 3.3.4 Moffat 函数拟合数学方法的选择

Moffat 函数的拟合需进行非线性最小二乘法拟合, 常用的算法有梯度下降法、高斯-牛顿算法、LM 算法等。LM 算法是高斯-牛顿算法的一种优化算法, 其通过在拟合过程中加入非负阻尼系数解决高斯-牛顿算法中 Jacobi 矩阵有可能非满秩的问题。在迭代过程中, 通过动态设定阻尼系数的大小, 实现了在不同区域对收敛速度的调节, 从而使收敛速度远超过梯度下降法<sup>[18-20]</sup>。因此本文中选用 LM 算法进行 PSF 函数拟合。

### 3.4 FWHM 值后处理过程

FWHM 值的后处理可以分为剔除与经验性改正两个过程。

剔除过程是将拟合过程中检验出来的不适于进行 PSF 拟合的占像素范围过少的星的结果剔除, 以及对没有成功拟合的 FWHM 结果进行剔除。

统计发现, FWHM 大于结果均值  $3\sigma$  的星绝大部分为有相邻星干扰的星, 如图 8 所示。因此在选星阶段通过与星表交叉的方式去除有相邻星的星的耗费时间为分钟量级, 因此通过拟合后剔除 FWHM 大于均值  $3\sigma$  范围外的星这一操作, 可有效降低星场密集带来的影响。

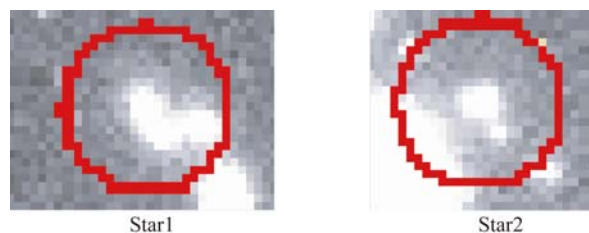


图 7 密集星示例

Fig. 7 Examples of dense stars

对于欠采样星像而言,根据 IRAF 的研究知,需对 FWHM 计算值进行经验性改正<sup>[11]</sup>。经验性改正是利用模拟图像拟合得到的 FWHM 值的偏差( $\Delta$ FWHM)与星像中心距离像素中心的距离( $d$ )的关系,对 FWHM 结果进行改正。

本文中算法得到的  $\Delta$ FWHM 与  $d$  的分布特性如图 8,其中  $x$  轴为星像中心距离其所在像素的像素中心的距离( $d$ ), $y$  轴表示 FWHM 误差。

分析发现,在 FWHM 小于等于 1.5 范围内 FWHM 拟合误差随  $d$  的变化规律比较明显,以及由于图像欠采样本身的影响,FWHM 真值越小时,拟合出的 FWHM 值越弥散。

当 FWHM 大于 1.6 时,偏差基本不随  $d$  变化,FWHM 拟合值较 FWHM 真值偏大。

本文通过模拟图像建立了 FWHM 在 1.2~2.0 内的 FWHM 残差与  $d$  的线性关系,在实际图像中,通过全图 FWHM 均值确定经验性改正参数,对拟合得到的 FWHM 值进行经验性改正。

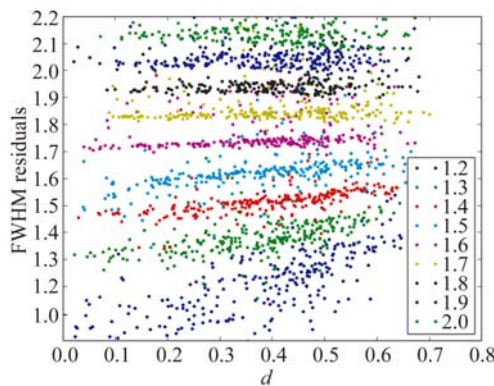


图 8 模拟欠采样图像 FWHM 拟合残差与星像中心距离像素中心距离( $d$ )的关系

Fig. 8 Relationship between FWHM fitting residuals and distance of star center to pixel center( $d$ )

### 3.5 小结

本文对采用 PSF 函数强度分布进行拟合过程中对 FWHM 值影响较大的算法和参数进行了详细研究。

研究发现,拟合模型、拟合半径、插值数学方法以及插值间隔对 FWHM 的计算精度影响较大。

拟合过程占运算时间的绝大部分,插值间隔的设置以及拟合半径的大小决定了拟合数据点的多少,直接影响运算时间。

而 FWHM 的经验性改正则是为了改善基于

模拟图像拟合的规律对欠采样星像 FWHM 值的整体偏差有所降低的问题。

## 4 算法实现与评估

### 4.1 算法流程图

针对 GWAC 系统,图像清晰度评价系统的的核心数据处理流程如图 9 所示。

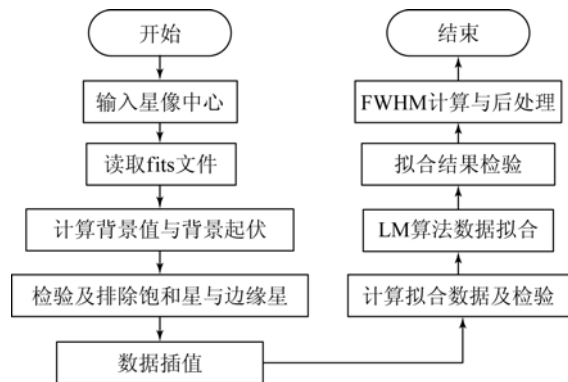


图 9 数据处理流程图

Fig. 9 Data processing procedure

### 4.2 运算结果比较

#### 4.2.1 计算精度比较

本文将最终拟合结果的精度与 IRAF 的计算结果从以下两个方面进行比较:a. 将比较结果作为调焦清晰度评价方法的有效性;b. 比较对于模拟欠采样图像 FWHM 的误差大小。

图 10 中  $x$  轴为调焦序列图号, $y$  轴为 FWHM 值。由图 10 可知,本文结果与 IRAF 计算的 FWHM 值趋势一致,焦点位置相同,而且曲线平滑,满足自动调焦清晰度评价函数的要求。

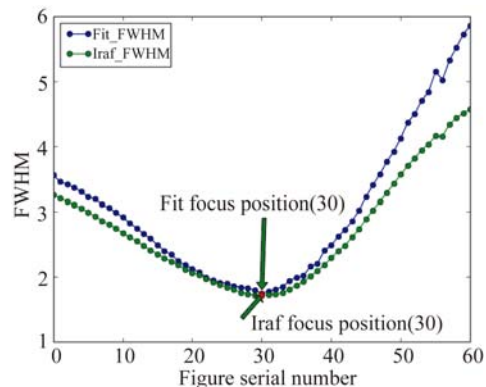


图 10 调焦序列图上结果比较

Fig. 10 FWHM result on focusing figures comparing with IRAF's result

对于 FWHM 在 1.2~2.0 内的模拟图像,利用本文方法与 IRAF 计算 FWHM 的误差结果,见表 6。可以看出,IRAF 经细密孔径测光后再进行拟合的精度很高,而本文算法精度与 IRAF 相当,满足系统精度需求。

表 6 模拟图像 FWHM 计算误差

Tab. 6 FWHM residuals of two kinds of methods on simulated stars

	IRAF	本文
误差(pixel)	0.032	0.046

#### 4.2.2 计算时间比较

表 7 为本文方法和 IRAF 计算每幅图中约 300 颗星 FWHM 的时间,由表 7 可知,本文方法的计算时间仅为 IRAF 的 1/20 左右,实时性远优于 IRAF,且能够满足 GWAC 系统清晰度评价过程小于 2 s 的要求。

表 7 运算时间比较

Tab. 7 Time consuming comparison of twokinds of methods

方法	IRAF	本文
时间(秒/300 颗星)	12.61	0.67

#### 参考文献:

- [1] PAUL J, WEI J, BASA S, *et al.*. The Chinese-French SVOM mission for gamma-ray burst studies [J]. *CRPhy*, 2011, 12:298-308.
- [2] WEI J, CORDIER B, ANTIER S, *et al.*. The deep and transient universe in the SVOM Era: new challenges and opportunities-scientific prospects of the SVOM mission [J]. *arXiv*, 2016, arXiv:1610.06892.
- [3] 黄垒, 辛立平, 韩旭辉, 等. 广角天文望远镜的自动调焦[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 174-183.  
HUANG L, XIN L P, HAN X H, *et al.*. Auto-focusing of wide-angle astronomical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 174-183(in Chinese)
- [4] 陈芳, 张存继, 韩延祥, 等. 简单图像的快速聚焦[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 220-227.  
CHEN F, ZHANG C J, HAN Y X, *et al.*. Fast focus on simple images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 220-227. (in Chinese)
- [5] 洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函

## 5 结 论

星像能量集中度与望远镜探测能力直接相关,是自动调焦的最终目标。经验证,基于能量集中度的两种方法:50%能量的半径、PSF 拟合计算 FWHM 法在精度上都满足广角望远镜自动调焦所需的清晰度评价方法的要求。本文提出了省去孔径测光得到能量增长曲线的过程,对强度模型进行 PSF 拟合计算 FWHM 的方法。在精度和速度上结合广角望远镜实际需求进行研究与优化。最终结果在模拟图像上误差为 0.046 pixel,精度与 IRAF 相当;焦点位置计算准确;单图(挑选约 300 颗星)运算时间为 0.67 s,约为 IRAF 时间的 1/20,满足系统实时调焦的需求。本文对适用于望远镜的清晰度评价函数展开研究,并提出了一种有效的图像清晰度评价方法,可以为其他望远镜系统的自动调焦提供参考。孔径测光计算 50%能量半径的算法在本文中验证了其结果可行性。对算法的进一步优化与加速可在接下来的工作中展开。

数的分析与改进[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3401-3408.

HONG Y ZH, REN G Q, SUN J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3401-3408. (in Chinese)

- [6] 丁健生, 史国权, 石广丰. 基于图像清晰度检测的光栅刻划平台调平装置[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 819-825.

DING J SH, SHI G Q, SHI G F. Grating ruling platform leveling device based on image clarity measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 819-825. (in Chinese)

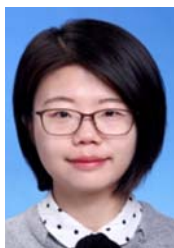
- [7] 金雪, 马卫红. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. *光学仪器*, 2012, 34(1): 59-64.

JIN X, MA W H. Study on image definition evaluation function in auto-focusing process [J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(1): 59-64. (in Chinese)

- [8] 郭玲华, 丁晓青, 方卯发. 空间太阳望远镜在轨自动调焦的最小图像熵判据[J]. *光学技术*, 2003, 29(4): 391-393.

- GUO L H, DING X Q, FANG M F. Using the minimum entropy as a criterion for the in-orbit automatic focusing of space solar telescope [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(4):391-393. (in Chinese)
- [9] 李晓燕,朱庆生. 一种基于图像清晰度评价的天文望远镜自动调焦系统[J]. *天文研究与技术*, 2008, 5(3): 294-298.
- LI X Y, ZHU Q SH. An automatic focusing system of astronomical telescope based on image definition evaluation [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, 5(3):294-298. (in Chinese)
- [10] BERTIN E, ARNOUITS S. SExtractor: Software for source extraction [J]. *Astronomy & Astrophysics Supplement*, 1996, 117:393-404.
- [11] TANG P Y, LIU J J, ZHANG G Y, *et al.*. Automatic focusing system of BSST in Antarctic [J]. *SPIE*, 2015, 9678: 16-21.
- [12] 施展,樊祥,程正东,等. 关联成像的点扩散函数分析法[J]. *红外与激光工程*, 2016(11):339-344.
- SHI ZH, FAN X, CHENG ZH D, *et al.*. PSF analysis of correlated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016(11):339-344. (in Chinese)
- [13] VALDES F. PSFMEASURE/STARFOCUS: PSF measuring algorithms [J]. *ASPC*, 1994 (61): 284-287.
- [14] VALDES F. PSFMEASURE/STARFOCUS: Psfmeasure/starfocus; IRAF PSF measuring tasks [J]. *ASPC*, 1994(61):280-283.
- [15] BENDINELLI O, PARMEGGIANI G, ZAVATTI F. CCD star images: on the determination of moffat's PSF shape parameters [J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 1988(9):17-24.
- [16] LI B SH, LI G L, CHENG J, *et al.*. The point spread function reconstruction by using Moffatlets-I [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, 16(9): 139.
- [17] FRASER W, ALEXANDERSEN M, SCHWAMB M E, *et al.*. TRIPPY: trailed image photometry in python [J]. *The Astronomical Journal*, 2016, 151(6):151-158.
- [18] PUJOL J. The solution of nonlinear inverse problems and the Levenberg-Marquardt method [J]. *Geophysics*, 2007, 72(4): W1.
- [19] 李鹏程,徐青,邢帅,等. 全局收敛 LM 的激光雷达波形数据分解方法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8):2262-2267.
- LI P CH, XU Q, XING SH, *et al.*. Full-waveform LiDAR data decomposition method based on global convergent LM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8):2262-2267. (in Chinese)
- [20] KHAMATNUROVA M Y, GRIBANOV K G. Levenberg-Marquardt method with simultaneous calculations of averaging kernels and errors for methane retrieval from IASI spectra [J]. *SPIE*, 2015, 9680:71-77.

#### 作者简介:



苑嘉辉(1989—),女,山东德州人,博士研究生,2011年于华中科技大学获得学士学位,主要从事天文技术与方法的研究。E-mail: yuanjh@bao. ac. cn



蔡洪波(1976—),男,湖南邵阳人,博士,高级工程师,2005年于中国科学院国家天文台获得博士学位,主要从事天文图像处理、星载实时处理的研究。E-mail: chb@bao. ac. cn