

基于多目标图像清晰度评价的 LAMOST 光谱仪离焦诊断方法

张晓杰^{1,2,3}, 魏 炜^{1,2,3*}, 侯永辉^{1,2}, 张 勇^{1,2}, 季杭馨^{1,2}, 李晓飞^{1,2}, 陆启帅^{1,2}, 黄 康^{1,2,3}, 刘玉瑶^{1,2,3}

1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏南京 210042;
2. 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 研究表明,当温度产生一定变化时,会导致大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)光谱仪的内部器件产生热诱导变形,引起 CCD 靶面上的图像离焦模糊,降低了天文数据测量精度,也大大增加了 16 台光谱仪的日常维护难度。基于 LAMOST 运行前拍摄的定标灯谱数据,提出了一种基于多目标图像清晰度评价的离焦诊断方法。该方法通过对不同离焦量下的定标灯谱图像进行分析,提取了一定数量的光斑的半高全宽(FWHM)及其总体分布情况,建立多目标图像清晰度与系统离焦量之间的离焦函数模型,实现对 LAMOST 成像像质的离焦诊断,为后续智能化主动补偿技术的实现提供了技术支撑。介绍了 LAMOST 光谱仪的工作原理及结构,给出了光谱仪对调焦精度的需求;详细介绍了光斑 FWHM 值的测量原理与多目标图像清晰度评价函数的构建方法。与传统图像清晰度评价函数的对比结果显示,文中方法具有更高的清晰度对比率与精度,对定标灯谱图像的离焦诊断误差在 10 μm 以内,有效降低了人为局部诊断带来的误差,提高了 16 台光谱仪系统一致性,有望提高 LAMOST 日常运行效率与光谱仪的长期稳定性。

关键词: 天文技术与方法; 多目标图像清晰度评价; 离焦函数模型; 离焦诊断; 像质校正
中图分类号: P111.21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220238

Defocus diagnosis method of LAMOST spectrograph based on multi-object image definition evaluation

Zhang Xiaojie^{1,2,3}, Wei Wei^{1,2,3*}, Hou Yonghui^{1,2}, Zhang Yong^{1,2}, Ji Hangxin^{1,2}, Li Xiaofei^{1,2},
Lu Qishuai^{1,2}, Huang Kang^{1,2,3}, Liu Yuyao^{1,2,3}

1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
2. CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The research demonstrates that when the temperature changes a lot, the internal components of the large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) spectrographs will produce thermal-induced flexure, which will cause the image blurring of the CCD. Such image blurring reduces the measurement accuracy

收稿日期:2022-04-07; 修订日期:2022-07-07

基金项目:国家自然科学基金(12173061);国家重大科研仪器研制项目(12027802)

作者简介:张晓杰,男,硕士生,主要从事光学设计与数据处理方面的研究。

导师简介:侯永辉,男,研究员,博士,主要从事光学、光谱仪相关技术方面的研究。

通讯作者:魏炜,男,博士生,主要从事天文光干涉、天文光学仪器相关方面的研究。

of astronomical data and greatly increases the difficulty of the daily maintenance of the 16 spectrographs. Therefore, a defocus diagnosis method for multi-object image definition evaluation is proposed based on the calibration lamp spectrum taken by LAMOST. By analyzing the spectrum image under the different defocusing amounts, the half-height full-width (FWHM) and its distribution of spots are obtained to establish the function model between the multi-target image definition and the defocusing amount of the system. It can realize the fast defocus diagnosis of the spectrum image quality of LAMOST and provide a reference for the realization of intelligent active compensation technology of LAMOST spectrograph. In this paper, the principle and structure of the LAMOST spectrograph are introduced, and the demand for the focusing precision of the spectrograph is given. And the measurement principle of FWHM value and the construction method of the multi-object image definition evaluation function are introduced in detail. Compared with the traditional image definition evaluation function, the results show that the proposed method has a higher definition ratio and accuracy. And the defocus diagnosis error of the spectral image is less than 10 μm , which effectively reduces the error caused by artificial diagnosis and improves the consistency of the 16 spectrographs. This method can also improve the daily operation efficiency and long-term stability of the LAMOST spectrographs.

Key words: astronomical technology and methods; multi-object image definition evaluation; focus function model; defocus diagnosis; image quality correction

0 引言

大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜 (LAMOST) 是我国自主创新研制的主动反射型施密特巡天望远镜, 兼具大口径和宽视场的特点。在结构上由反射施密特改正板 MA、球面主镜 MB 和光纤焦面三部分构成, 在对目标天区进行观测时, 星光经 MA 反射到 MB, 再经 MB 聚焦成像到焦面, 焦面上放置有 4000 根光纤, 可将星光分别传输到 16 台光谱仪中。因此, LAMOST 一次曝光最多可获得 4000 个天体的光谱信息, 是目前世界上光谱获取率最高的望远镜之一^[1]。

为了获得高质量的天体光谱, 在成像时光谱仪需保持良好的聚焦。然而, 光谱仪自身受环境温度、湿度和振动变化的影响^[2], 会导致像面焦点发生漂移, 使图像产生离焦模糊, 影响光谱质量。目前, 这种离焦模糊主要通过观测者在正式观测前依次拍摄 16 台光谱仪的定标灯谱并人为进行调焦校正, 这一过程会浪费大量观测时间, 降低望远镜的运行效率, 影响长期的天文观测精度。

传统图像清晰度评价函数包括基于图像梯度的清晰度评价函数, 如 Roberts^[3-4] 函数、Brenner^[3-5] 函数等; 基于频域的评价函数^[6-8], 如 DCT 函数和 DFT 函数; 基于信息熵的清晰度评价函数, 如 Entropy^[5] 函数; 以及基于统计学的清晰度评价函数^[6-8], 如 Vollath

函数, Range 函数等。但是对于包含有数千个光斑的定标灯谱, 这些方法难以做出有效、准确的离焦诊断。

基于以上原因及观测现状, 文中提出了基于多目标图像清晰度评价的 LAMOST 光谱仪离焦诊断方法。通过分析定标灯谱的图像特征, 研究了不同离焦情况下的定标灯谱图像的变化规律, 以基于高斯混合模型的拟合方法计算光斑的 FWHM 值并作为单个光斑的质量评价标准, 以图像中光斑的总体质量作为定标灯谱的多目标图像清晰度评价标准, 构建了光谱仪的离焦诊断模型。

为了验证该模型的准确性, 对比了传统图像清晰度评价方法与文中方法对实际测量光谱数据的性能对比与误差分析, 证明了所提出的方法具有更高的清晰度对比率与精度。

通过文中方法对 LAMOST 光谱仪定标灯谱图像进行离焦诊断, 其误差小于 10 μm , 满足 LAMOST 调焦的技术要求。

1 LAMOST 光谱仪简介

LAMOST 光谱仪采用 VPH (体相位全息) 光栅和 Schmidt 照相机方案设计, 分为红蓝两区, 接收器均采用 4096×4096 CCD, 像元尺寸为 12 μm 。对于每台光谱仪, 有 250 根直径为 0.320 mm 的光纤沿着 144 mm 高度的狭缝排列, 其光束光谱被成像到 CCD 芯片上。

单色图像沿空间方向的半高全宽 (FWHM) 值约为 7~9 pixel, 色散方向上的 FWHM 值约为 5~7 pixel^[9]。

为了实现 LAMOST 光谱仪焦面的快速校准, 设计了 LAMOST 光谱仪电动调焦系统, 其设计方案如图 1 所示。整个系统基于球面镜原结构进行改造, 使用左右对称导轨支撑方案, 通过电机驱动球面镜前后移动进行调焦。系统的调焦精度为 $\pm 20 \mu\text{m}$, 动程为 50 mm。电动调焦系统可以为 CCD 提供对焦调整, 以校正对焦平面, 为 LAMOST 光谱仪提供离焦补偿。

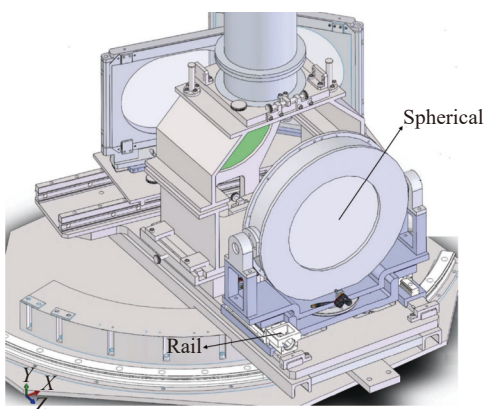


图 1 LAMOST 自动调焦系统结构图

Fig.1 Diagram of LAMOST auto-focusing camera system structure

2 LAMOST 光谱仪成像分析

2.1 LAMOST 光谱仪成像像质分析

LAMOST 共有 16 台光谱仪, 每台光谱仪的狭缝排列了 250 根光纤, 望远镜焦面的光纤接受定标灯光后, CCD 空间方向 (X 方向) 上对应产生 250 根光纤对应的光斑, 色散方向 (Y 方向) 上形成不同波长的光对应的光斑。整幅定标灯谱共有数千个光斑。



(a)

图 2 为 LAMOST 定标灯谱局部图像: 当系统发生离焦时, CCD 成像产生模糊, 整体图像清晰度下降, 需进行离焦诊断。定标灯谱中光斑的质量可以用来评价 LAMOST 光谱仪的图像质量性能^[9], 因此, 基于对单个光斑的质量评价提出了多目标图像清晰度评价的方法, 建立多目标图像清晰度与系统离焦量之间的离焦函数模型对 LAMOST 光谱仪进行离焦诊断。

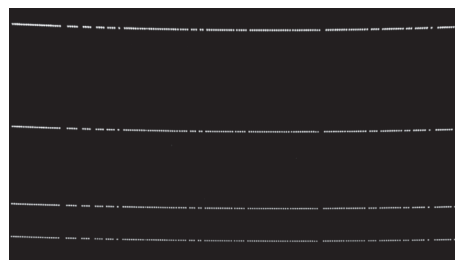


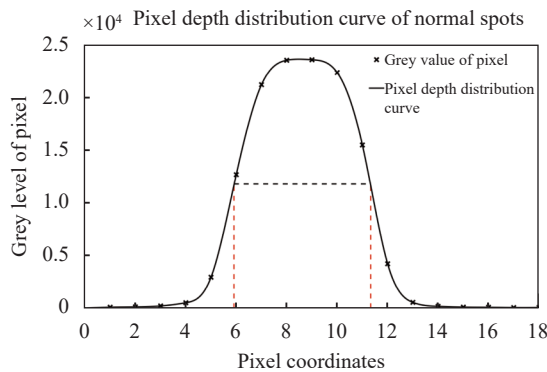
图 2 部分 LAMOST 定标灯谱

Fig.2 A part of the LAMOST spectrometer calibration lamp spectrum

2.2 光斑质量分析

采用 FWHM 值作为光斑的质量评价指标^[9], FWHM 值可以表征光斑的大小并反映光斑的能量集中度, 其值越小表明光斑能量越集中, 质量越好。

图 3 显示了系统处于不同离焦量下定标灯谱图相同位置的光斑图像。根据离焦量的不同, 定标灯谱图中所有光斑可分为三类: 第一类为离焦量 $\Delta f \approx 0 \mu\text{m}$, 即准焦情况, 如图 3(a) 所示的正常光斑; 第二类为离焦量 $\Delta f \leq 150 \mu\text{m}$, 即微离焦情况, 如图 3(c) 所示的弥散光斑; 第三类为离焦量 $\Delta f > 150 \mu\text{m}$, 即过度离焦情况, 如图 3(e) 所示中心出现空腔的光斑; 图 3(b)、(d)、(f) 分别为上述三种情况下光斑在色散方向 (Y 方向) 上的像素深度分布线, FWHM 区域如图中虚线所示。



(b)

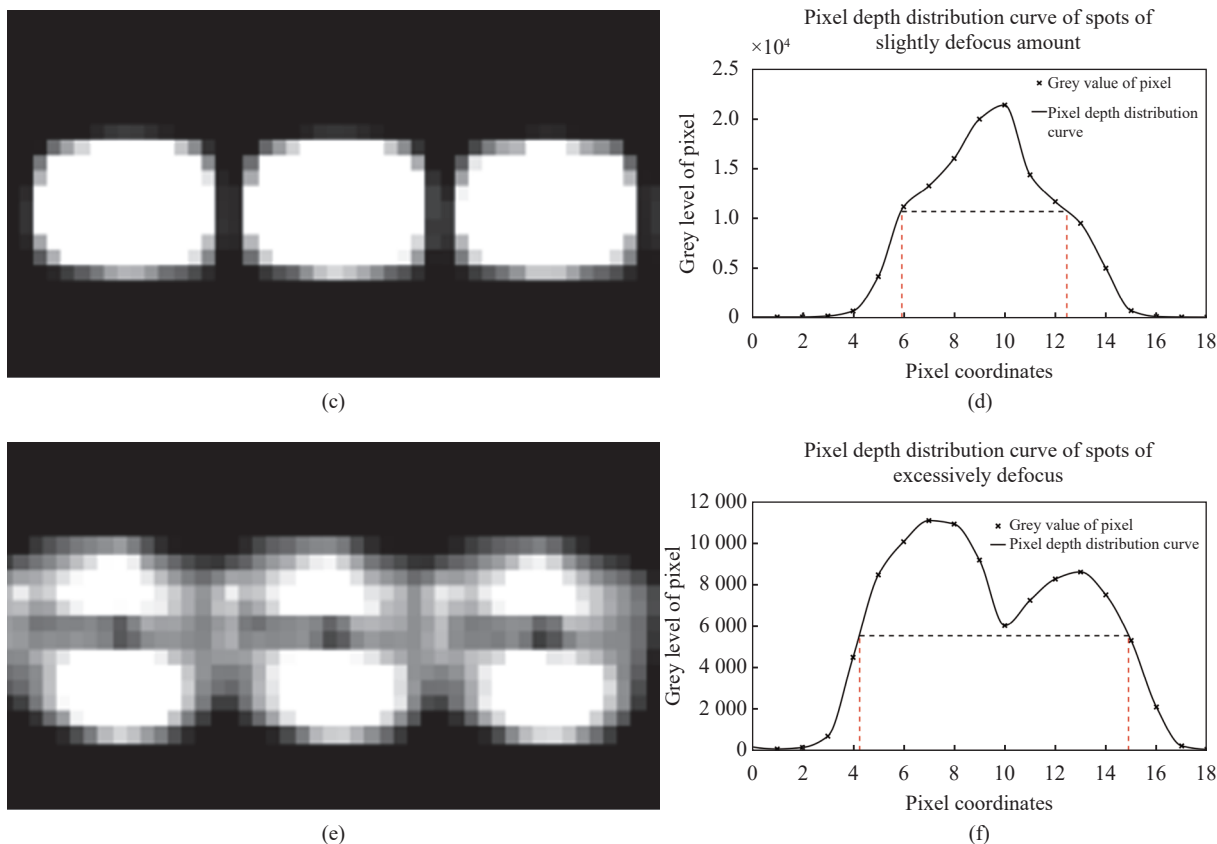


图 3 (a) 正常光斑; (b) 正常光斑在 Y 方向上的像素深度分布曲线; (c) 微离焦光斑; (d) 微离焦光斑在 Y 方向上的像素深度分布曲线; (e) 过度离焦光斑; (f) 过度离焦光斑在 Y 方向上的像素深度分布曲线

Fig.3 (a) Normal spots; (b) Pixel depth distribution curve about normal spots in the Y direction; (c) Spots of slightly defocus; (d) Pixel depth distribution curve about spots of slightly defocus in the Y direction; (e) Spots of excessively defocus; (f) Pixel depth distribution curve about normal spots in the Y direction

选取高斯混合模型^[10-11](GMM) 拟合光斑的像素深度分布曲线, 求出光斑的 FWHM 值, 作为光斑质量的评价标准。

3 光谱图像数据处理和分析

3.1 光斑的选取与中心点的定位

获得原始的定标灯谱后, 对定标灯谱中所有的光斑进行阈值筛选与中心定位, 用于后续对光斑 FWHM 值的计算。

采用基于全局阈值迭代的方法^[12] 选取目标光斑, 并对每个光斑进行轮廓提取, 采用基于最小二乘法的椭圆拟合算法^[13-14] 计算每个光斑的中心点坐标。假设椭圆参数方程为:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0 \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 、 E 为系数。椭圆拟合返回信息为: 椭圆的中心点 (x_0, y_0) , 椭圆的大小 (长轴 a 与短轴 b), 旋转角度 θ , 可表示为公式 (2):

$$\left\{ \begin{aligned} x_0 &= \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ y_0 &= \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \\ a &= \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Cy_0^2 + Bx_0y_0 - 1)}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}} \\ b &= \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Cy_0^2 + Bx_0y_0 - 1)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}} \\ \theta &= \frac{1}{2} \arctan \frac{B}{A - C} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

光斑的信息提取流程如图 4 所示。

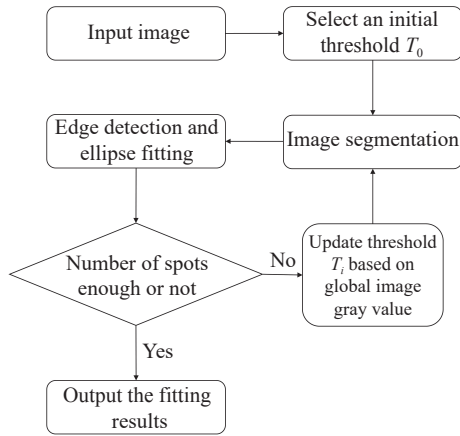


图 4 光斑信息获取流程图

Fig.4 Flow chart of spots information acquisition

3.2 基于高斯混合模型的光斑 FWHM 拟合算法

根据光斑中心点坐标 (x_0, y_0) 计算空间及色散方向上的 FWHM 值。常用的含级数非线性拟合函数包括傅里叶函数 (Fourier)、多项式函数 (Polynomial)、正弦函数 (Sum of Sine)、高斯混合模型 (GMM) 等,理论上通过改变参与拟合的项数,这些函数可以拟合任意类型的分布。

采用高斯混合模型^[10-11]作为拟合函数计算光斑的 FWHM 值。GMM 是多个 Gaussian 的线性组合,通过改变模型中 Gaussian 的个数以及权重,可以使 GMM 满足任意类型的分布。GMM 的公式表达为:

$$p(x) = \sum_{k=1}^k w_k \cdot g\left(x \mid \mu_k \sum_k\right) \quad (3)$$

式中: k 为 GMM 中 Gaussian 个数; w_k 为每个 Gaussian 的权重,且 $0 \leq w_k \leq 1$, $\sum_{k=1}^k w_k = 1$ 。 $g\left(x \mid \mu_k \sum_k\right)$ 为 GMM 中第 k 个 Gaussian 分布。当 $k=1$ 时, GMM 只有一个 Gaussian,即为单高斯分布。

为了验证 GMM 算法的优越性,对比了上述四种方法在低项数 ($N=1, 2, 3$) 下分别对三类光斑的像素深度分布曲线的拟合优度 R^2 ,如表 1 所示。

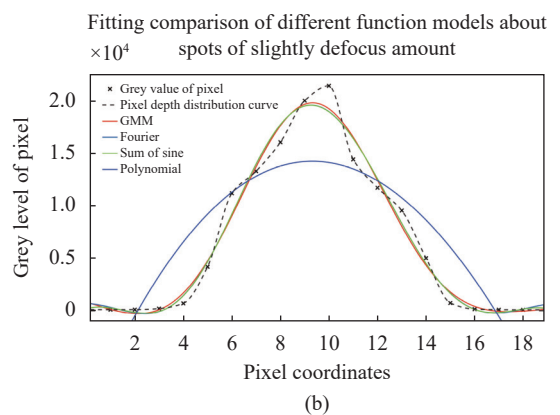
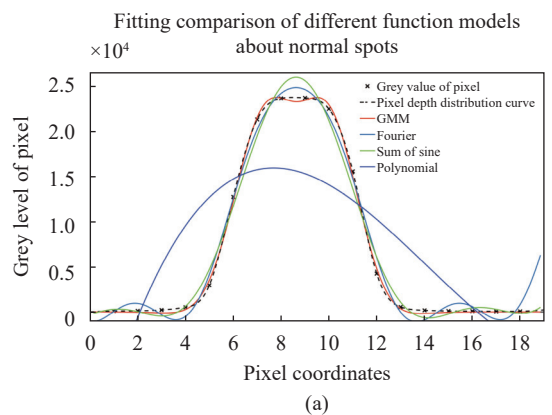
由表 1 可知,四种拟合函数对三类光斑的拟合优度 R^2 均与项数 N 成正相关。当 $N=3$ 时,四种拟合函数对三类光斑的拟合优度最高,拟合效果最好,拟合结果如图 5(a)~(c) 所示。

为了验证各函数模型的拟合精度,计算了当 $N=3$ 时四种函数模型拟合光斑像素深度分布曲线所

表 1 三类光斑在四种函数模型不同项数下的拟合优度
Tab.1 R^2 of three types of spots under the different terms of four functional models

Function model	R^2 of three types of spots			
	Normal	Slightly defocus	Excessively defocus	
Fourier	1	0.91	0.97	0.82
	2	0.98	0.98	0.98
	3	0.99	0.98	0.98
Polynomial	1	0.02	0	0
	2	0.52	0.73	0.82
	3	0.59	0.73	0.83
Sum of sine	1	0.62	0.80	0.82
	2	0.98	0.97	0.95
	3	0.99	0.98	0.98
GMM	1	0.98	0.97	0.76
	2	0.98	0.98	0.98
	3	0.99	0.98	0.98

得的 FWHM 值,并与理论值进行对比,结果如表 2 所示。由表 2 可知,仅有 GMM 和 Fourier 两种方法对三类光斑的 FWHM 值计算误差在 5% 以内。



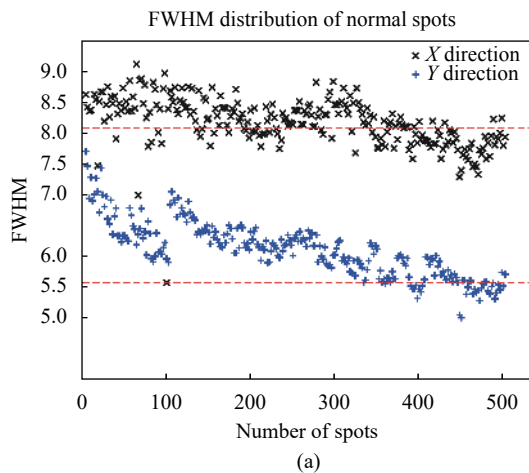
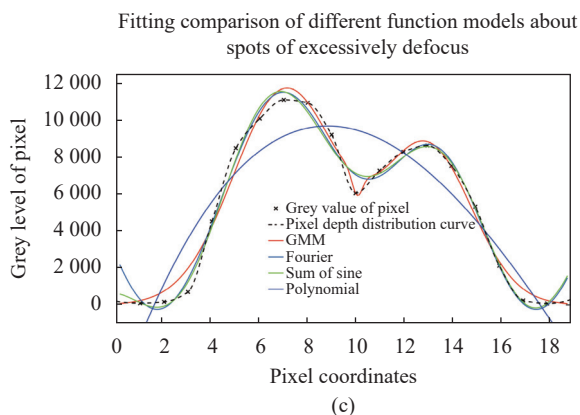


图 5 (a) Y 方向上正常光斑拟合对比; (b) Y 方向上微离焦光斑拟合对比; (c) Y 方向上过度离焦光斑的拟合对比

Fig.5 (a) Fitting comparison of normal spots in the Y direction; (b) Fitting comparison of slightly defocus spots in the Y direction; (c) Fitting comparison of excessively defocus spots in the Y direction

表 2 四种函数模型下三类光斑的 FWHM 值

Tab.2 FWHM values of three types of spots under four functional models

Spot type	FWHM theoretical value	Function model			
		GMM	Fourier	Sum of sine	Polynomial
Normal	5.4	5.3	5.2	4.9	9.4
Slightly defocus	6.5	6.4	6.6	6.6	8.4
Excessively defocus	10.6	10.1	10.4	10.4	11.3

通过分析大量光斑 FWHM 的拟合结果,并综合考虑函数曲线变化趋势与实际观测情况,最终选取 GMM 作为拟合函数,可以适用于不同离焦量下光斑的像素深度分布曲线拟合,对于单峰函数与双峰函数均有很好的拟合效果,且在较小离焦量时有更好的拟合精度,计算结果的误差在 5% 以内。

4 多目标图像清晰度评价

4.1 多目标图像清晰度评价标准

采用 GMM 拟合得到所有光斑对应的 FWHM 值,通过分析 FWHM 值分布情况对定标灯谱进行多目标图像清晰度评价。测量了系统处于正常与离焦情况下定标灯谱中所有光斑的 FWHM 值,分布情况如图 6(a)、(b) 所示。

从图 6(a) 中可以看出,当系统处于准焦位置下光

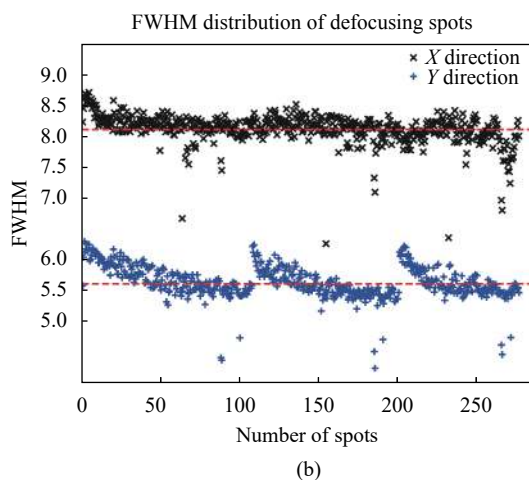


图 6 (a) 正常情况下所有光斑的 FWHM 分布图; (b) 离焦情况下所有光斑的 FWHM 分布图

Fig.6 (a) FWHM distribution of all spots under the normal condition; (b) FWHM distribution of all spots in the defocus

斑 FWHM 值分布集中,且数量较多;从图 6(b) 中可以看出,当系统处于离焦情况下光斑 FWHM 值分布不均匀,且数量较少。

通过测量大量处于准焦位置时的光斑 FWHM 值,得出了正常情况下光斑沿空间方向的 X-FWHM 标准值约为 8.1;沿色散方向的 Y-FWHM 标准值约为 5.6。对于整幅定标灯谱,越多的光斑 FWHM 值接近标准值,表明了系统越接近准焦位置;反之则表明系统远离准焦位置。此外,光斑的识别数量 n_p 同样可以反映定标灯谱的离焦情况。 n_p 随着系统离焦量的增大而减小,如表 3 所示。

综上,定标灯谱中光斑 FWHM 值相对标准值的偏离程度及光斑识别数量 n_p 可以作为定标灯谱图像清晰度评价的指标。

表 3 不同离焦量下光谱识别的光斑数量

Tab.3 The number of spots identified by spectra at different defocus amount

Defocusing distance/ μm	0	25	50	100	125	150	175
Number of spots	553	544	537	468	402	251	150

离均差平方和 (sum of squares of deviation from mean, SS) 可以反映数值的总体离散程度, 放大数据整体的平均偏差, 计算公式为 $SS = \sum (x_i - \bar{x})^2$ 。在 SS 的基础上综合考虑了光斑数量 n_p , 将每幅定标灯谱识别光斑的数目放大到相同数值进行分析, 得到定标灯谱的相对离均差平方和, 记为 RSS, 计算公式如下:

$$RSS = \frac{N_{pi}}{N_{p0}} \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

式中: N_{pi} 表示每幅定标灯谱识别的光斑数目; N_{p0} 表示系统处于准焦位置时定标灯谱的光斑识别量。则定标灯谱在空间及色散方向的相对离均差平方和分别为 $X-RSS$, $Y-RSS$ 。通过定量移动电动调焦系统分析 $X-RSS$, $Y-RSS$ 与离焦量 Δf 之间的对关系, 如图 7 所示。

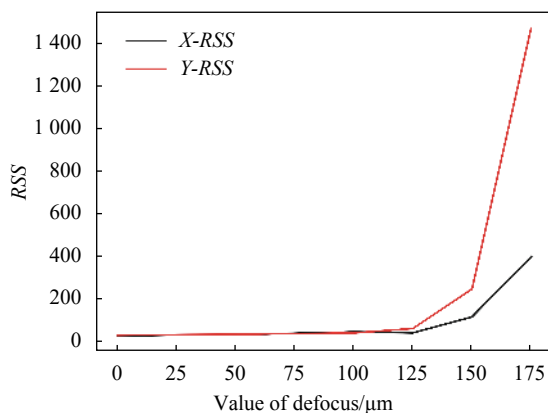


图 7 $X-RSS$, $Y-RSS$ 与离焦量关系图

Fig.7 Relational graph of $X-RSS$, $Y-RSS$ and Δf

由图 7 可知, $X-RSS$, $Y-RSS$ 变化趋势一致, 且 $Y-RSS$ 对离焦量 Δf 的变化更为敏感。因此, 最终选用 $Y-RSS$ 作为定标灯谱的多目标图像清晰度评价标准。

$Y-RSS$ 值越小, 表明定标灯谱图中光斑的总体离散度越小, 图像质量越好; 值越大则表明定标灯谱中光斑总体质量越差, 系统离焦量越大。

4.2 多目标图像清晰度评价模型

以电动调焦系统向远离 CCD 移动的方向为正向, 靠近 CCD 移动的方向为负向, 构建了 $Y-RSS$ 与离焦量 Δf 的离焦函数模型, 如图 8 所示。

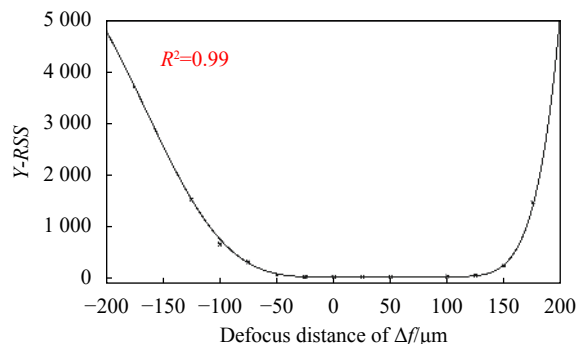


图 8 离焦函数模型图

Fig.8 Diagram of defocus function model

该离焦函数模型的表达式为:

$$\eta = \sum_{i=0}^8 a_i \Delta f^i \quad (5)$$

式中: η 表示 $Y-RSS$ 。该离焦函数模型模型的拟合优度 R^2 为 0.99, 拟合效果良好, 且综合考虑了定标灯谱图中识别光斑的数量以及图像中所有光斑的 FWHM 值分布, 可以实现系统不同离焦量下的定标灯谱图像清晰度评价。

此外, 利用上述模型对 LAMOST 进行离焦补偿时, 还需要判断光谱仪的离焦方向。在某离焦量下拍摄定标灯谱图并计算得到 Y_1-RSS , 正向移动电动调焦系统并拍摄此时的定标灯谱图, 计算得到 Y_2-RSS , 通过比较二者的大小来判断光谱仪的离焦方向: $Y_1-RSS < Y_2-RSS$, 则光谱仪处于正离焦状态; $Y_1-RSS > Y_2-RSS$, 则光谱仪处于负离焦状态; 之后通过上述函数模型计算得到光谱仪的离焦量大小, 通过电动调焦系统驱动球面镜前后移动实现 LAMOST 的离焦补偿。

5 实验结果对比与误差分析

5.1 实验结果对比

为了说明所提出的基于多目标图像清晰度评价的离焦函数具有更好的稳定性与灵敏度, 分别选取了传统四类图像清晰度评价方法中的 Roberts^[3-4] 函数、DCT^[6-8] 函数、Entropy^[5] 函数与 Vollaths^[6-8] 函数与文中的多目标评价方法 (Multi-objective) 进行对比。实

验通过电动调焦系统获取不同离焦量下的定标灯谱,构建不同清晰度评价方法下的对焦评价曲线。由于对焦评价函数数量纲各不相同,为了便于比较,将对焦评价函数值作归一化处理,结果如图 9 所示。

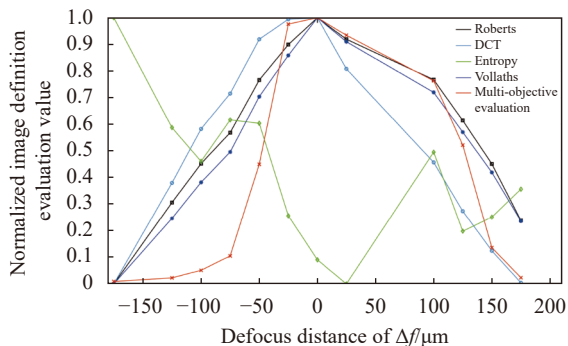


图 9 归一化图像清晰度评价曲线的对比图

Fig.9 Comparison diagram of normalized image definition evaluation curve

为了定量对比所提出的多目标图像清晰度评价方法与传统图像清晰度评价方法的性能,选取了清晰度对比率 R , 灵敏度 M_{SE} 、局部峰值数量 α 、对焦搜索区间 β 性能评价指标^[15]进行对比分析,相关指标的定义如下。

清晰度比率 R 的表达式为:

$$R = f_{max}/f_{min} \quad (6)$$

式中: f_{max} 、 f_{min} 分别表示图像清晰度评价函数的最大值与最小值。 R 越高,说明清晰度评价函数区分正焦与离焦图像的能力越强。

灵敏度 M_{SE} 表示图像清晰度评价函数在最大值附近变化的剧烈程度。 M_{SE} 越大,说明图像清晰度评价函数对图像的清晰度变化越敏感,就越容易对焦成功。灵敏度 M_{SE} 的定义为:

$$M_{SE} = \frac{f_{max} - f(x_{max} + \Delta x)}{f(x_{max} + \Delta x)} \quad (7)$$

式中: $f(x_{max} + \Delta x)$ 为图像清晰度评价函数最大值对应的横坐标 x_{max} 变化 Δx 后的函数值。选取 $\Delta x = 60 \mu m$ 。

α 表示图像清晰度评价函数的局部峰值数量, α 越小,说明图像清晰度评价函数的抗干扰能力越强,稳定性越高。

对焦搜索区间 β 表示当图像清晰度评价函数值取 0.9 时的区间大小 (以电动调焦系统的调节精度 $20 \mu m$ 为一个单位)。搜索区间越小越容易达到准焦位置。

不同图像清晰度评价方法在上述四种指标上的对比结果如表 4 所示。

表 4 图像清晰度函数的评价指标对比

Tab.4 The comparison of image definition function evaluation criterion

Method	R	M_{SE}	α	β
Roberts	1.41	0.18	0	3
DCT	1.67	0.55	0	3
Entropy	1.04	0.86	2	
Vollaths	2.23	0.22	0	2
Multi-objective	108.30	0.17	0	3

由图 9 可知,当离焦量小于 0 时,所提出的多目标图像评价函数曲线在所有曲线的最下方,灵敏度最高; Vollaths 函数次之; Roberts 函数和 DCT 函数的灵敏度稍差于 Vollaths 函数; 离焦量大于 0 时, DCT 函数位于所有曲线下方,灵敏度最高;文中方法与 Vollaths 函数、Roberts 函数灵敏度接近; Entropy 函数则在全局上都表现很差,其趋势无法反映图像离焦量的变化,无法用于天文图像清晰度的评价。

表 4 中的定量评价指标对比表明:文中方法的清晰度对比率 R 远大于其他函数;灵敏度 M_{SE} 均较小,无明显差距;局部峰值 α 与对焦搜索区间 β 除 Entropy 函数外,其他四个函数表现相当。

5.2 误差分析

为了验证多目标图像清晰度评价函数的精度,选取了 Roberts 函数、DCT 函数、Vollaths 函数与文中方法进行误差对比,误差值均取正值,结果如图 10 所示。

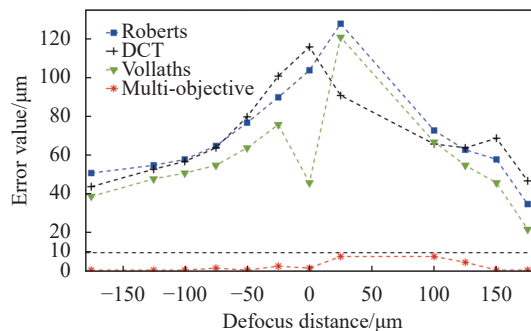


图 10 离焦诊断结果

Fig.10 Results of defocus diagnosis

由图 10 可知,Roberts 函数、DCT 函数与 Vollaths 函数的离焦诊断误差较大,在 40~120 μm 之间,难以

用于实际观测中 LAMOST 光谱仪的离焦诊断;而文中方法对定标灯谱图像的离焦诊断误差均在 $10\ \mu\text{m}$ 以内,远小于其他评价函数的误差值,证明了文中方法相较于传统图像清晰度评价函数具有更高的精度。

综上所述,多目标图像清晰度评价函数具有更高的精度与清晰度对比率,能更好的区分正焦图像与模糊图像,且离焦诊断的误差在 $10\ \mu\text{m}$ 以内,可以满足实际观测中的技术需求。

6 结 论

文中提出了一种基于多目标图像清晰度评价的离焦诊断方法,采用 GMM 作为拟合函数计算单个光斑的 FWHM 值,结果误差在 5% 以内,可以准确评价单个光斑的质量;通过分析所有光斑 FWHM 值的离散程度对定标灯谱图像进行清晰度评价,并构建了图像清晰度 Y -RSS 与系统离焦量 Δf 之间的离焦函数模型,能有效、准确地对定标灯谱进行离焦诊断。相比传统图像清晰度评价函数,文中方法具有更高的精度与清晰度对比率,对定标灯谱的离焦诊断误差在 $10\ \mu\text{m}$ 以内。此外,由于当前 LAMOST 光谱仪的调焦精度为 $20\ \mu\text{m}$,为了满足更高精度的调焦需求,计划未来将在 LAMOST 光谱仪上安装光栅尺作为测量反馈装置,目前在样机上的实验测量精度可达 $2\ \mu\text{m}$,可为文中方法提供更高精度的硬件支撑。

基于多目标的图像清晰度评价方法可以准确地对 LAMOST 光谱仪进行离焦诊断,有效降低了人为局部诊断带来的误差,可以提高 LAMOST 的运行效率及天文参数观测精度,为后续 LAMOST 运行的无人值守与智能化提供技术支撑。

参考文献:

- [1] Su Dingqiang, Cui Xiangqun, Wang Yanan, et al. Large-sky-area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) and its key technology [C]//Proceedings of SPIE, 1998, 3352: 319250.
- [2] Shuo Huang, Hua Zou, Liu Tianjiao, et al. An active flexure compensation method for LAMOST spectrograph based on BP-Neural network [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(3): 18-25.
- [3] Zeng Haifei, Han Changpei, Li Kai, et al. Improved gradient threshold image sharpness evaluation algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(22): 2211001. (in Chinese)
- [4] Xiong Rui, Gu Naiting, Xu Hongyan. An auto-focusing evaluation function adapted to multi-directional gray gradient change [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0418001. (in Chinese)
- [5] Liu Bin, Qiao Qian, Zhang Zimiao, et al. 3D profile measurement based on depth from focus method using high-frequency component variance weighted entropy image sharpness evaluation function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200326. (in Chinese)
- [6] Li Chengchao, Yu Zhanjiang, Li Yiquan, et al. Sharpness evaluation of microscopic detection image for micro parts [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(1): 103-107, 113. (in Chinese)
- [7] Xiang Kui, Gao Jian. Research on the image definition evaluation algorithm in autofocus process [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2019(1): 52-55. (in Chinese)
- [8] You Yuhu, Liu Tong, Liu Jiawen. Survey of the auto-focus methods based on image processing [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(2): 132-136. (in Chinese)
- [9] Hou Yonghui, Zhu Yongtian, Hu Zhongwen, et al. Performance and sensitivity of low-resolution spectrographs for LAMOST [C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III, SPIE, 2010, 7735: 177-185.
- [10] Xing Chengbin, Gong Shengsheng, Yu Xiaoliang, et al. Application of gaussian mixture clustering to moving surface fitting filter classification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20200501. (in Chinese)
- [11] Tao Zhiyong, Liu Xiaofang, Wang Hezhang. Clustering algorithm of gaussian mixture model based on density peaks [J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(12): 3433-3437, 3443. (in Chinese)
- [12] Shan Deqiang, Hu Chao, Liu Feifei. Threshold analysis and center point extraction of spot images [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2020, 48(7): 1753-1756. (in Chinese)
- [13] Zhang Jing, Wu Youyu. Locating algorithm of optical fiber spot center based on FPGA [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 769-774. (in Chinese)
- [14] Pan Deng, Li Yanli, Gao Dong, et al. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipsesfitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1410001. (in Chinese)
- [15] Zhai YongPing, Zhou Dongxiang, Liu Yunhui, et al. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0418002. (in Chinese)