

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413517

基于曲面插值的光学系统点扩散函数重构

程雪, 刘晓华, 傅雨田, 陈永和

(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200080)

摘要: 光学系统点扩散函数的数据采样和拟合重构过程中, 引入的背景噪声及外部干扰会导致仪器测量结果的误差。传统的固定目标函数点扩散函数拟合算法自适应性较弱, 在光学仪器的测试过程中, 无法有效还原光斑形态, 这些误差项对仪器的图像质量分析结果造成了一定的影响。针对此问题, 提出了一种适用于光学成像系统的点扩散函数计算方法, 针对不同光斑形态进行能量获取和重构, 有效地保留了光斑的原始形态。利用光斑图像数据进行三次样条插值计算, 构造亚像元级数据矩阵, 对不同位置光斑进行杂散光抑制处理和质心修正, 获得更接近真实光斑形态的三维曲面。考虑传感器精度差异, 调节步长控制能量集中度对应的光斑半径, 能够满足不同的测试需求。高斯光斑仿真分析与实验室测试结果表明, 与高斯拟合法、最近邻插值法和盲去卷积法相比, 所提方法更接近实际情况, 曲面插值法误差仅为 $|\varepsilon| = 0.0002$, 像质观测区域内偏离率 $< 5\%$, 能够提供较为准确的能量集中度结果。算法对点扩散函数形态变化较为敏感, 能够有效分辨小尺寸光斑内存在的多峰, 常温测试条件下也具有较高的精度, 在仪器干扰源定位、光学调焦等方面具有工程应用价值, 为光学成像系统的研制和性能分析提供了理论计算方法。

关键词: 点扩散函数; 3次样条插值; 目标函数; 能量集中度; 成像系统

中图分类号: TH743 TP73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Point spread function reconstruction for optical system based on surface interpolation

Cheng Xue, Liu Xiaohua, Fu Yutian, Chen Yonghe

(Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200080, China)

Abstract: In the process of data sampling and fitting reconstruction of optical system point spread function, the background noise and external interference will cause the error measurement results of instrument. The traditional fixed objective function point spread function fitting algorithm exhibits poor adaptability, making it difficult to accurately restore the morphology of light spots during optical instrument testing. These error terms will affect the analysis results of image quality to some extent. To solve this problem, a calculation method of point spread function for optical imaging system is proposed. The energy acquisition and reconstruction are carried out according to different spot morphology, and the original shape of spot is preserved effectively. Through the cubic spline interpolation of spot image data, the subpixel matrix is constructed. By performing scattered light suppression and centroid correction on different positions of light spots, we can obtain a three-dimensional surface closer to the real spot shape. Considering sensor accuracy variations, the method adjusts step size to control the spot radius corresponding to encircled energy, accommodating different testing requirements. Gaussian spot simulation analysis and laboratory test results show that, compared with Gaussian fitting method, nearest neighbor interpolation method and blind deconvolution method, the method proposed in this paper is closer to the actual situation. The error of algorithm based on surface interpolation is only, $|\varepsilon| = 0.0002$, the deviation rate within the observation area of image quality is less than 5%. This method can provide more accurate capability concentration results. The algorithm is sensitive to the morphological changes of the point spread function and can effectively distinguish the presence of multiple peaks in small size spot. It also has high accuracy under normal temperature test conditions. The algorithm has engineering applications in the field of interference source location and optical focusing, and provides a theoretical foundation for the development and performance analysis of optical imaging systems.

Keywords: point spread function; cubic spline interpolation; objective function; encircled energy; imaging system

0 引 言

空间光学成像是航天遥感中的重要应用,对于对地遥感、深空探测和空间天文等方面都具有重要的意义^[1-3]。随着空间遥感应用技术的发展,对于光学系统成像质量的要求也越来越高。航天载荷系统在成像过程中,受到太阳、大气、光学系统和探测器等诸多因素的影响,遥感图像会出现模糊、失真等现象。不同机理产生的影响能够通过点扩散函数体现出来,对点扩散函数进行分析,可以了解成像系统的状态和特性。理想光学系统的点扩散函数是由光的衍射现象造成的^[4-5]。光学系统的成像过程可以理解为图像与系统点扩散函数(point spread function, PSF)的卷积,再加上仪器内部噪声与背景噪声。点扩散函数在光学设计、图像校正和系统调试等方面都有着重要的作用。尤其是在系统研制过程中,点扩散函数的结果能够帮助评估和优化仪器性能,根据光源响应改善成像质量。实际点扩散函数受到衍射、像差、离焦、杂光以及空间采样等多种因素影响,是光学系统成像质量的最直接体现^[6],由此计算得到的能量集中度也是系统成像能力的重要指标。

常见的点扩散函数标定方法为实拍点光源法、ZEMAX 仿真法、盲估计法和基于先验知识估计法等。相应的估计方法主要分为基于高斯拟合^[7]和基于卷积运算^[8]两个方面,包含同态滤波法^[9]、刃边法^[10]等。宋俊儒等^[11-12]对点目标光斑进行高斯拟合,再对结果矩阵进行两次反卷积,能够降低能量集中度的计算误差,但测量方法以高斯分布作为目标函数,对于不规则光斑的适应性较弱。文献[13]利用信号和噪声的先验知识,建立了质心定位噪声等效角模型,但是算法的精度依赖于点扩散函数的结果。Wohlberg 等^[14]提出了一种广角天文图像的点扩散函数估计方法,能够准确估计 PSF,保证了测量结果的真实性;Wang 等^[15]提出了一种通用时空超分辨率映射(spatiotemporal super-resolution mapping, SSM)模型,充分考虑了点扩散函数效应的基于时间尺度依赖性。图像的修正需求是推动点扩散重构算法改进的重要因素^[16-17],文献[18]提出了一种基于模拟太赫兹时间光谱的点扩散函数与 Lucy-Richardson 方法相结合的图像离焦恢复方法;安康等^[19]结合刀口法重建 PSF,校正图像信号串扰;为了改善理想和实际点扩散函数不匹配引起的图像修正问题,文献[20]利用局部梯度和卷积核消除了卷积效应。这些图像算法都是基于点扩散函数进行的改进,由此可见点扩散函数的准确测量对于遥感成像技术的发展具有重要的意义^[21-23]。

目前国内外针对点扩散函数图像优化处理的研究已

经比较充分了,但是关于仪器研制过程中相关性能参数的准确测量方面的研究还比较少。为了提高仪器研制中的测试精度,文献[24]提出了针对焦平面红外成像系统的传函测试方法,能够有效评价几何成像性能;文献[25]提出了一种基于深度小波循环神经网络的星图超分辨率重建方法,用于提升质心定位精度。现有的实验室测量方法大多采用以固定分布作为目标函数进行拟合,而实际的成像过程中,各项影响因素所遵循的分布情况不同,传统方法需要先验知识,灵活性较差,在系统不处于正常工作的情况下,会产生较大的偏差,从而影响仪器的测量和校正效果。在巡天光学设施多通道成像仪的研制过程中,需要进行精密的光学像质测量,由于探测器焦面的光斑尺寸小,仪器指标要求高,微小的误差也会对测试结果造成明显的影响。考虑到这一情况,本研究提出了一种基于曲面插值的光学系统能量集中度计算方法,能够较为准确的重构点扩散函数,为仪器的评价工作提供有效的数据支撑。

1 点扩散函数重构方法

1.1 光斑点扩散函数模型

一般情况下,满足光学相机成像条件的光斑点扩散函数近似为高斯分布,假设样本矩阵内各像元的坐标表示为 (x, y) ,此时的光斑模型可以用式(1)近似表示。

$$h(x, y) = \pi \cdot \xi^2 \exp(-(\pi\xi)^2 \cdot (x^2 + y^2)) \quad (1)$$

其中, ξ 表示光学响应指数。

利用点扩散函数的拟合结果,可以计算能量集中度,即以点目标的能量弥散斑的质心为中心,逐渐扩大半径形成的圆形区域内的能量分布。计算中通常以光斑质心为中心,计算各步长区域半径内能量占光斑总能量的比例,用像元个数表示对应能量集中的区域半径。假设样本矩阵维度为 $m \times n$,光斑的总能量 E_{all} 如式(2)所示。

$$E_{all} = \sum_{x=-m/2}^{x=m/2} \sum_{y=-n/2}^{y=n/2} h(x, y) \quad (2)$$

以质心为中心,长度为 R 的矩形区域内的能量集中度表示为:

$$E_{rate} = \sum_{x=-R/2}^{x=R/2} \sum_{y=-R/2}^{y=R/2} h(x, y) / E_{all} \quad (3)$$

光学相机处于较理想的状态时光斑近似为高斯分布。在光学系统实际装调与测试过程中,大多数位置处于离焦状态,可能出现质心跨像元、能量离散度大以及多峰等情况,此时如果继续使用高斯分布计算能量集中度,会产生较大的误差。

将像元均分为次像元是另一种较为常用的能量集中度测量方法。首先确定光斑的质心位置。

$$\begin{cases} X = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot h(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) dx dy} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (x \cdot h(x, y))}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n h(x, y)} \\ Y = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y \cdot h(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) dx dy} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (y \cdot h(x, y))}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n h(x, y)} \end{cases} \quad (4)$$

假设像元尺寸为单位1,设置步长为 $step$,以质心为中心,提取光斑区域内的 $m \times n$ 个像元,分别将每个像元均分为 $(1/step) \times (1/step)$ 个亚像元,灰度值为 $h(x, y)/((1/step) \cdot (1/step))$ 。能量集中度的计算方法与式(3)相同。

在实验室装调测试过程中,受到能量扩散,跨像元,像元间及像元内响应不均匀性等因素的影响,会产生多峰的情况,以高斯模型作为目标函数的计算方法无法分辨多个峰值,可能会引起误判最佳调焦位置的情况,降低相机成像的分辨能力;亚像元能量均分的方法与点扩散函数存在较大的偏差,不适用于精细调焦;在质心跨像元的情况下,先确定质心位置再进行插值的方式,会引入质心偏差导致的噪声,引起测量误差。

为了解决以上问题对仪器实验测试造成的影响,提出了一种基于曲面插值的光学系统点扩散函数能量集中度计算方法,能够重构出更为接近真实光斑形态的点扩散函数,提高调焦精度,对于仪器成像质量有较明显的提升作用。

1.2 基于曲面插值的点扩散函数矩阵重构方法

假设曲面上包含光斑的数据矩阵维度为 $m \times n$ (m 代表行数, n 代表列数),矩阵中的各元素作为曲面插值的节点,得到的拟合结果包含了光斑矩阵内的所有数据。针对三维的曲面插值,需要分别对矩阵的行和列数据进行插值计算,得到亚像元插值结果,再将亚像元值作为节点进行二次插值计算。

光斑矩阵内各节点的坐标表示为 $x_{i,j}$,对应的灰度值为 $y_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n$)。以节点坐标为边界,将光斑矩阵划分成每列 $m-1$ 个区间,每行 $n-1$ 个区间。在任意一个区间 $[x_{i,j}, x_{i+1,j}]$ 内,亚像元坐标和码值的关系可以表示为:

$$\begin{cases} S_{i,j}(x) = a_{i,j} + b_{i,j}(x - x_{i,j}) + c_{i,j}(x - x_{i,j})^2 + d_{i,j}(x - x_{i,j})^3 \\ S'_{i,j}(x) = b_{i,j} + 2c_{i,j}(x - x_{i,j}) + 3d_{i,j}(x - x_{i,j})^2 \\ S''_{i,j}(x) = 2c_{i,j} + 6d_{i,j}(x - x_{i,j}) \end{cases} \quad (5)$$

根据三次样条方程的插值条件,式(5)需要满足插值连续性和微分连续性,如式(6)~(9)所示。

$$S_{i,j}(x_{i,j}) = y_{i,j}, \quad i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

$$\lim_{x \rightarrow x_{i,j}} S_{i,j}(x) = S_{i,j}(x_{i,j}) = y_{i,j}, \quad i=1,2,\dots,m-1, \quad j=1,2,\dots,n-1 \quad (7)$$

$$\lim_{x \rightarrow x_{i,j}} S'_{i,j}(x) = S'_{i,j}(x_{i,j}), \quad i=1,2,\dots,m-1, \quad j=1,2,\dots,n-1 \quad (8)$$

$$\lim_{x \rightarrow x_{i,j}} S''_{i,j}(x) = S''_{i,j}(x_{i,j}), \quad i=1,2,\dots,m-1, \quad j=1,2,\dots,n-1 \quad (9)$$

假设步长 $step = x_{i+1,j} - x_{i,j} = x_{i,j+1} - x_{i,j}$,根据式(5)~(9),可以得到行和列各区间内插值曲线的系数分别为:

$$\begin{cases} a_{i,j} = y_{i,j}, \quad i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \\ b_{1,2,\dots,m,j} = (y_{i,j+1} - y_{i,j})/step - step \cdot \omega_j/2 - step \cdot (\omega_{j+1} - \omega_j)/6, \quad j=1,2,\dots,n-1 \\ b_{i,1,2,\dots,n} = (y_{i+1,j} - y_{i,j})/step - step \cdot \omega_i/2 - step \cdot (\omega_{i+1} - \omega_i)/6, \quad i=1,2,\dots,m-1 \\ c_{i,j} = \omega_i/2 \\ d_{1,2,\dots,m,j} = (\omega_{j+1} - \omega_j)/(6 \cdot step), \quad j=1,2,\dots,n-1 \\ d_{i,1,2,\dots,n} = (\omega_{i+1} - \omega_i)/(6 \cdot step), \quad i=1,2,\dots,m-1 \end{cases} \quad (10)$$

考虑到光斑的三维拟合函数近似为高斯分布,因此矩阵满足自由边界条件:

$$\begin{cases} S''_{1,j}(x_{1,j}) = 0, \quad j=1,2,\dots,n-1 \\ S''_{m-1,j}(x_{m-1,j}) = 0, \quad j=1,2,\dots,n-1 \\ S''_{i,1}(x_{i,1}) = 0, \quad i=1,2,\dots,m-1 \\ S''_{i,n-1}(x_{i,n-1}) = 0, \quad i=1,2,\dots,m-1 \end{cases} \quad (11)$$

根据式(10)和(11)可以求出 ω 的值。将得到的亚像元码值作为节点,进行像元内的插值计算。为了便于表述,以任意一组亚像元插值结果作为节点,区间表示为 $[x'_{i,j}, x'_{i+1,j}]$,步长设置为 k' ,曲线拟合数据同样需要满足插值连续性和微分连续性。

$$\begin{cases} S_i(x_i) = y_i, \quad i=1,2,\dots,m \\ S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1}) \\ S''_i(x_{i+1}) = S''_{i+1}(x_{i+1}), \quad i=1,2,\dots,m-2 \end{cases} \quad (12)$$

根据非节点边界条件,可以得到:

$$\begin{cases} S'''_1(x_1) = S'''_2(x_1) \\ S'''_{m-2}(x_{m-1}) = S'''_{m-1}(x_{m-1}) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(12)和(13)可以得到各像元内的亚像元码值,利用式(4)进行光斑质心的二次定位,可以得到曲面插值后的光斑位置,并以此质心为中心计算能量集中度。点扩散函数的算法流程如图1所示。重构算法分为预处理和能量集中度计算两部分。预处理阶段去除图像数据的背景噪声,去掉奇异点对总能量的影响,对图像进行寻点处理,筛选靶标在探测器焦面上的有效成像坐标;点扩散函数重构阶段,对光斑区域进行背景校正,利用曲面插

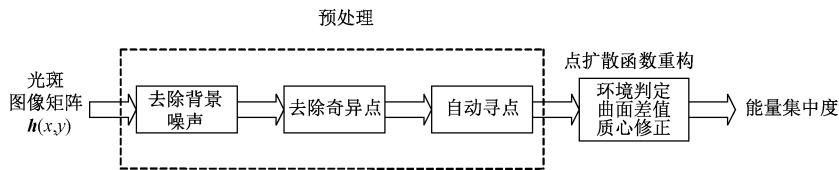


图 1 算法设计系统框架

Fig. 1 Framework of algorithm design system

值方法重构光斑总能量区域,重新计算质心位置。以质心为中心,得到能量集中度结果。

2 测量实验与结果

2.1 数值仿真与分析

为了验证算法的有效性,将本研究提出的曲面插值点

扩散矩阵重构方法与最近邻插值法、盲去卷积法进行对比分析。通过控制变量的方法,比较不同条件下的算法性能的变化。在理想状态下,以高斯分布作为目标函数生成模拟光斑,模拟光源高斯拟合得到的结果作为标准值,此时光斑的点扩散函数满足式(1)。为了便于叙述,将文中提出的方法简称为曲面插值法。对模拟光斑的灰度值进行拟合并计算能量集中度,所得到的结果如图 2 所示。

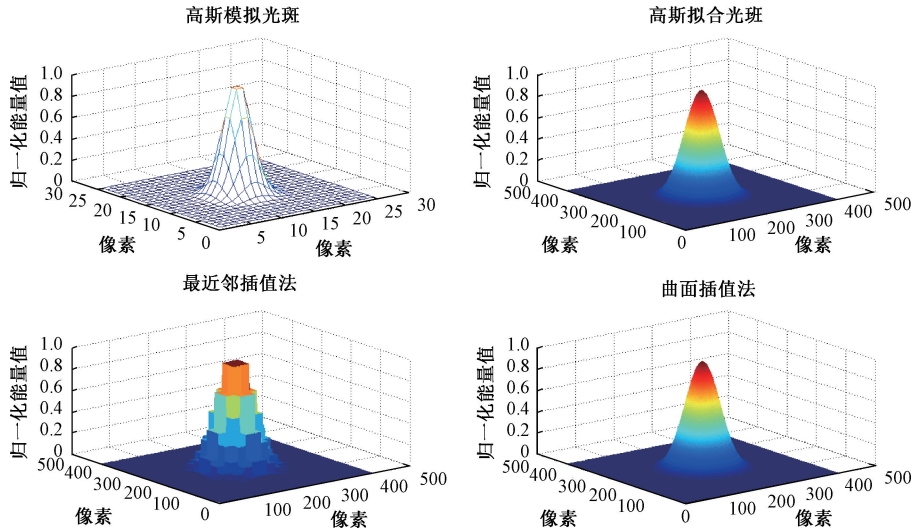


图 2 高斯光斑重构图像

Fig. 2 Gaussian spot reconstruction image

由于插值方法遍历样本点,包含了光斑样本的全部数据,均方根误差不能作为算法性能参数。系统仿真中,光斑是以高斯分布为目标函数模拟得到的,高斯拟合法具有相同的目标函数,能够基本还原光斑形态,因此可以将高斯拟合得到的光斑作为标准值。盲去卷积法是一种恢复被卷积过的图像信号的方法,不适用于理想的模拟光斑重构,因此图 2 中仅对两种插值方法得到的像质进行对比,在后面的讨论中将加入噪声的影响。从图 2 中可以看出,曲面插值法的拟合图形与基准光斑近似,而最近邻插值法的图形不光滑,在计算能量集中度时会产生较大的误差。

模拟光斑样本矩阵的维度为 25×25 ,计算光斑的能量集中度。从图 3 中可以看出,曲面插值法的能量集中度曲线与基准光斑基本重合,最近邻插值法结果存在一定的偏差,在能量集中度中间段较为明显,此段为像质测

试时的关注区域。与基准光斑能量集中度结果相比,最近邻插值法的最大误差 $|\varepsilon| = 0.013\ 6$,而曲面插值法仅为 $|\varepsilon| = 0.000\ 2$ 。

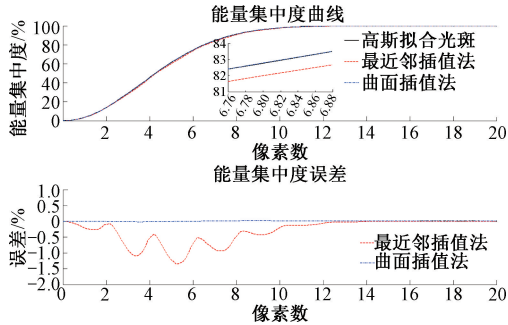


图 3 高斯光斑能量集中度曲线

Fig. 3 Gaussian spot encircled energy curve

成像过程中会引入仪器噪声,实际的光斑并不是标准高斯分布,为了构建更为接近实际成像效果的光斑,在高斯光斑中加入白噪声。图 4 中 4 幅图分别为理想状态下的高斯模拟光斑、传感器采集的光斑、随机生成的白噪声

声和加入白噪声的光斑。从图 4 中可以看出,理想光斑能量分布集中,形状较为规则;而加入白噪声后,光斑的能量发散,不再集中于光斑质心,且光斑边缘模糊不平整,出现离焦状态,将导致分辨率下降。

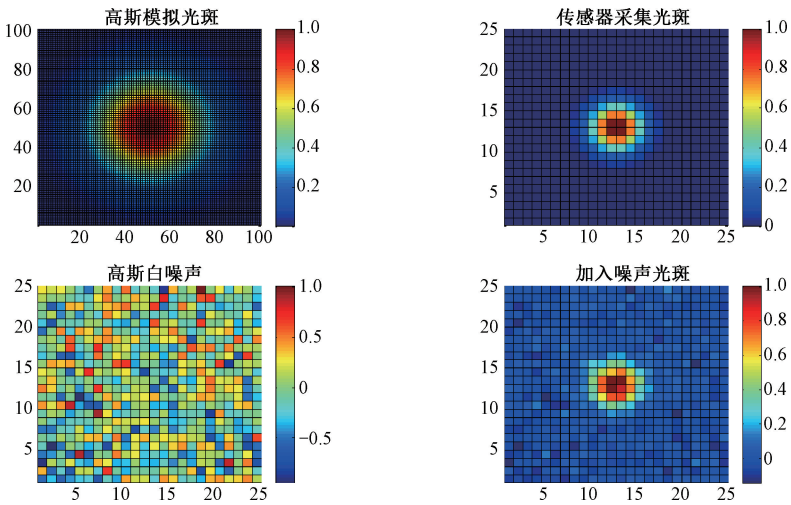


图 4 高斯光斑加入白噪声

Fig. 4 Gaussian spot with white noise added

在图 4 的模拟光斑中分别加入方差为 0.01^2 、 0.05^2 、 0.1^2 和 0.2^2 的 4 种随机生成的白噪声,利用曲面插值法、最近邻插值法和盲去卷积法分别对加白噪声光斑进行重构并计算能量集中度,将得到的结果与原始光斑对比,结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,白噪声方差为 0.2^2 时,3 种方法得到的能量集中度结果均与原始光斑存在明显差异;曲面插值法其他 3 种

情况的曲线与光斑能量集中度曲线具有较好的一致性;最近邻插值法的结果与曲面插值法较为接近,精确度相对较低。这是由于插值重构方法包含了光斑矩阵的全部样本值,其精度差异体现在插值算法与质心位置校正。而盲去卷积法由于初值估计、迭代次数等因素的影响,出现过拟合现象,结果曲线与基准值存在一定的偏离。

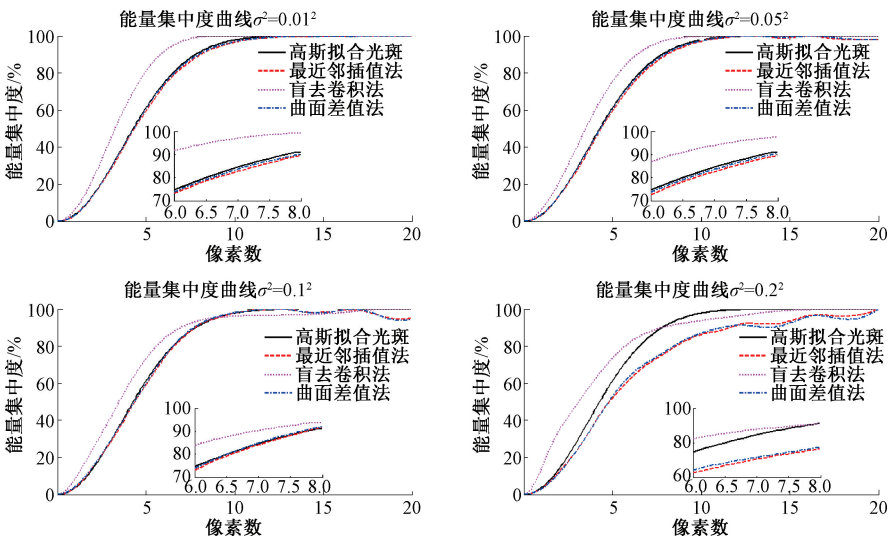


图 5 加噪声高斯光斑能量集中度曲线

Fig. 5 Encircled energy curve of Gaussian spot with noise added

图 6 所示为曲面插值法在不同噪声方差情况下的偏离率。噪声方差为 0.01^2 和 0.05^2 时,计算结果相对于光

斑的偏离率 $< 5\%$;在像质观测的关注区域内,噪声方差为 0.1^2 的偏离率也能达到 5% 以内。由此可见,曲面插值

方法具有较好的抗干扰性能,能够较为准确的体现出仪器在正常工作条件下的性能指标。

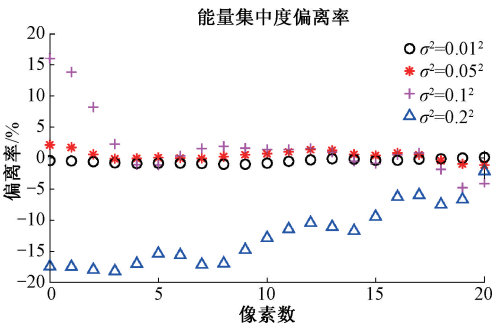


图 6 不同噪声方差下的能量集中度偏离率
Fig.6 Encircled energy bias ratio under different noise variances

为了研究光斑的尺寸对算法精度的影响,模拟光斑环绕能量的 80% (encircled energy 80%, EE80), EE80 = 10、16、22 和 28 这 4 种参数下的光斑,分别用文中提到的方法重构光斑并绘制能量集中度曲线。模拟光斑的基函数为高斯分布,可以将高斯拟合算法得到的能量集中度曲线作为标准值。从图 7 可以看出,曲面插值法的能量集中度曲线基本与高斯拟合结果重合,而最近邻插值法在光斑尺寸较小时会产生较明显的偏差,尤其在 EE80 附近,随着光斑的增大,两种重构方法结果趋于一致。由此可见,曲面插值法在测试中的适用范围更广泛,对于高分辨率、大面阵具有很好的分析能力。

将探测器的采样步长增大到 2 倍,得到的能量集中度曲线如图 8 所示。

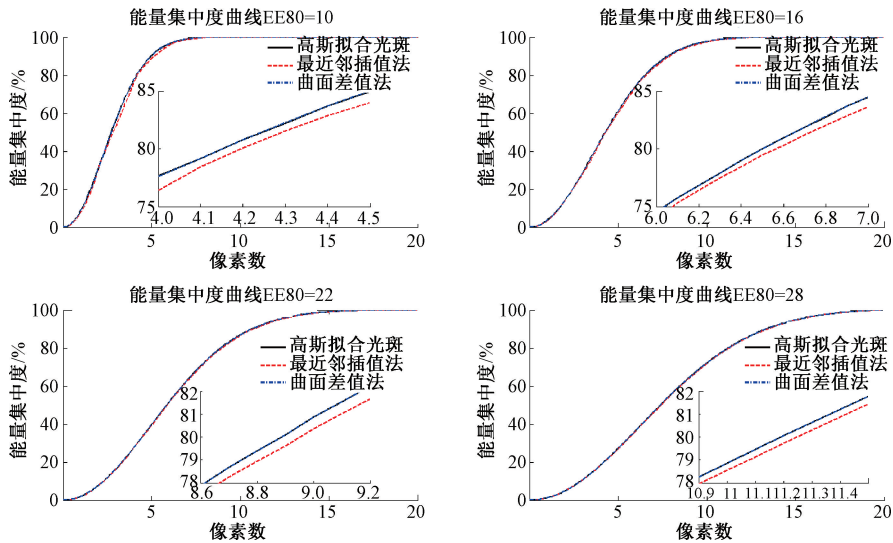


图 7 不同 EE80 的能量集中度曲线
Fig.7 Encircled energy curve under different EE80

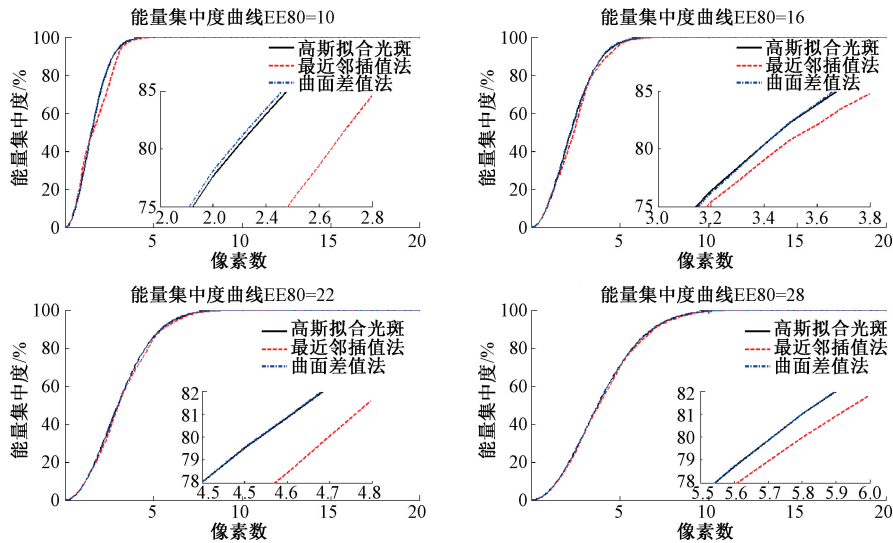


图 8 两倍采样步长能量集中度曲线
Fig.8 Encircled energy curve of double sampling step

从图 8 中可以看出,两种算法随模拟光斑能量集中度的变化趋势与图 7 中一致。相同光斑尺寸的情况下,随着采样步长的增大,最近邻插值法的能量集中度结果与标准值的偏差更为明显,算法性能下降严重;而曲面插

值法并未出现明显的差异。将两种步长下的不同参数光斑偏离率进行对比,所得到的结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出,曲面插值法对于步长的敏感性较低,适用于多种尺寸相机的测试。

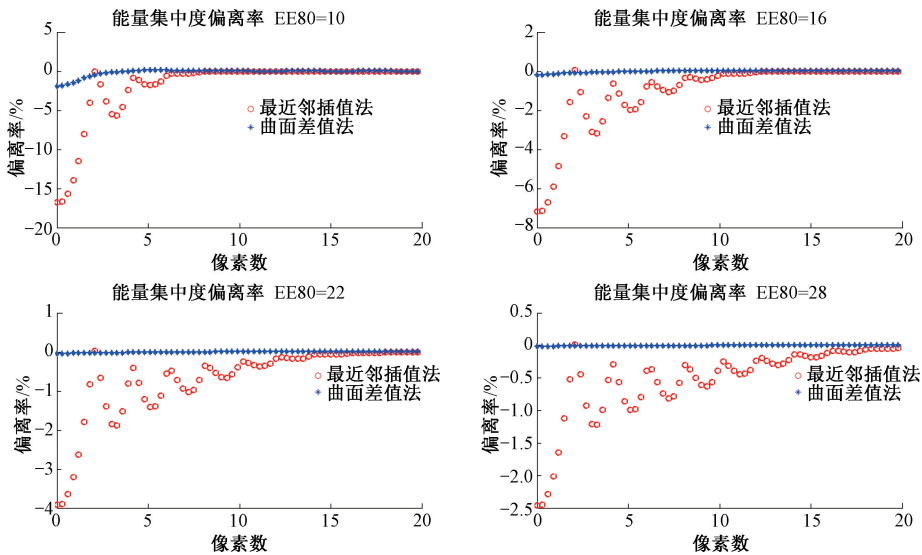


图 9 能量集中度偏离率
Fig. 9 Encircled energy deviation rate

2.2 相机实验数据处理

实验相机为焦平面凝视相机,实验环境为环境洁净度 10 万级的恒温实验室,主要的实验仪器包括光源,成像系统,靶标,真空罐和地检设备。低温真空环境采用 KM1 真空环境模拟试验装置,光源为 Energetiq-99。实验布置如图 10 所示,光源为外场平行光源,经过星点靶标生成光斑,由成像系统光电转换后,图像码值存入地检设

备。在测试过程中会出现离焦、多峰等情况,通过实验室数据验证曲面插值法的可行性。

理想状态下,光斑近似为高斯分布,但是当仪器的工作环境发生变化,如成像系统平台产生抖动,此时光斑的点扩散函数离散性增强,目标能量分散在多个像元内。此时需要对能量集中度进行准确测量,重构光斑图像,定位实验条件项中存在的问题。图 11 中 5 幅图从左至右分别为实验测试得到的光斑图像、高斯拟合法重构的光斑图像、最近邻插值法重构的光斑图像、盲去卷积法重构的光斑图像和曲面插值法重构的光斑图像。可以看出,实测数据的光斑形态接近于高斯分布与门信号的卷积,高斯拟合结果损失了一部分光斑形态特征,明显与实测数据差异较大,在图像中存在干扰时更为明显,测试结果对于实验的调试会造成一定的影响;最近邻插值法是均分亚像元方法,虽然保留了光斑的二维形态,但是在能量域上的精度较低,特别是在光斑过小且边界斜率变化较快时,测试精度会出现明显下降,算法存在一定的局限性,仅适用于精度要求不高的测试,这种情况也存在于盲去卷积法,由于算法对噪声和模糊度的敏感性较高,对信号重构的准确性造成了影响;而曲面插值法具有平滑作用,更接近真实的光斑形态,对于避免欠采样导致的像质结果降低有一定的效果。

通过调节光学系统的成像位置,当靶标在像平面上能够形成清晰的像时,光斑能量集中于一个像素内,可以得到效果较好的拟合图像。图 12 为实验室测试得到的

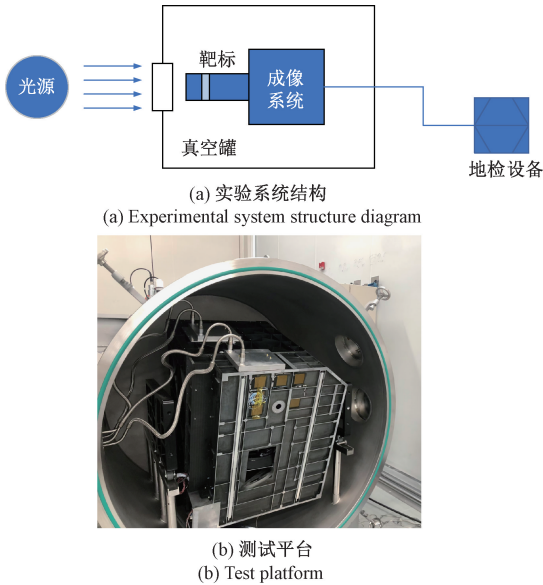


图 10 实验室测试系统
Fig. 10 Experimental test system

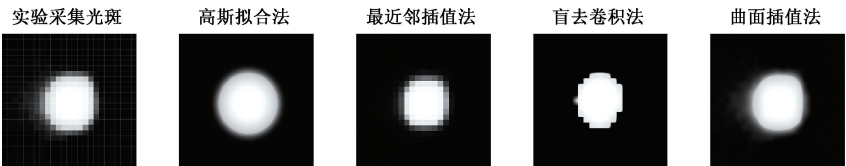


图 11 实验室测试光斑拟合及重构图像
Fig. 11 Tested spot fitting and reconstruction

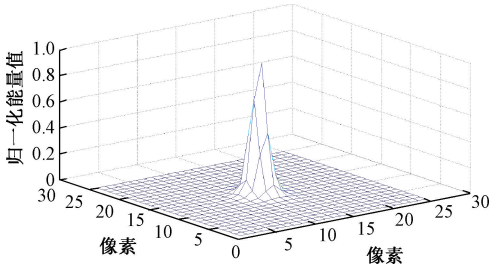
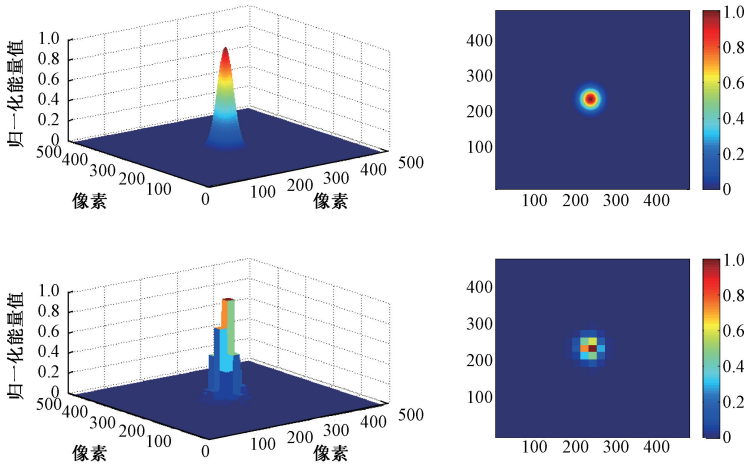
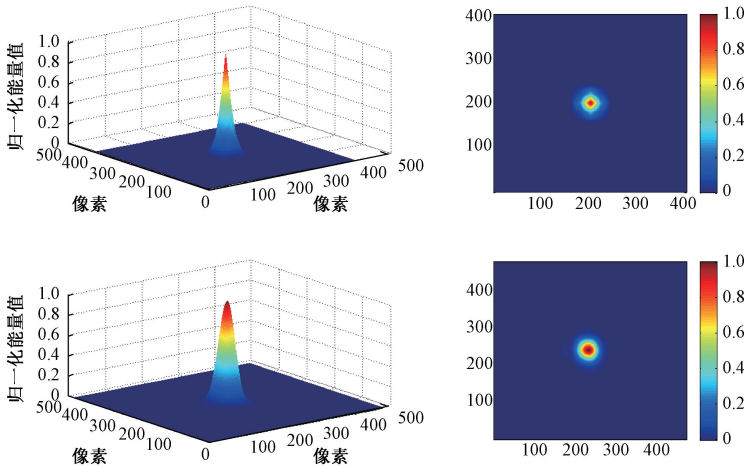


图 12 实验室单峰光斑
Fig. 12 Tested unimodal spot

光斑矩阵。图中的光斑形态不满足标准高斯分布,且存在椭率。图 13(a)和(b)分别是高斯拟合法、最近邻插值法、盲去卷积法和曲面插值法对图 12 进行重构的图像。可以看出,两种插值方法保留了光斑周围能量的分布情况,比较真实的反应了实际光斑的弥散情况;盲去卷积法由于多次迭代去模糊的处理,重构的光斑在几何形态上与真实光斑存在一定的差异,此方法更适用于后端的图像处理,在仪器研制期间,曲面插值法能够适应不同形态的光斑,点扩散函数的重构结果能够基本保



(a) 高斯拟合法与最近邻插值法重构图像
(a) Gaussian fitting method and nearest neighbor interpolation method reconstruction image



(b) 盲去卷积法与曲面插值法重构图像
(b) Blind deconvolution method and surface interpolation method reconstruction image

图 13 实验室数据重构图像
Fig. 13 Tested spot reconstruction image

留仪器中的各项干扰因素,有利于仪器的问题定位、调试和性能判定。

图 14 为 4 种重构方法得到的能量集中度曲线,可以看出拟合方法得到的能量集中度曲线整体高于插值方法。这是由于拟合方法利用目标函数,滤除了部分背景噪声,而插值方法保留了光斑周围的能量起伏,这种情况从图 13 中像素平面重构图像中也可以看出。最近邻法结果与曲面插值法较为接近,但是最近邻法没有考虑亚像元级别的非均匀性,因此精度上略低于曲面插值法。

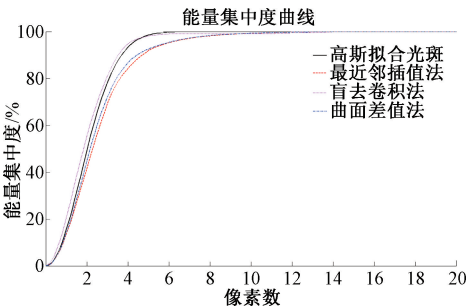


图 14 4 种重构方法能量集中度曲线

Fig. 14 Encircled energy curve of four reconstruction method

测试焦平面不同位置的成像情况,利用 4 种重构方法计算 EE80 对应的像素结果,对所得到的样本数据进行统计,得到的分布曲线如图 15 所示。图 15 结果与图 14 相对应,4 种方法具有相似分布形态。两种拟合方法得到的 EE80 对应光斑尺寸更小,无法完整的体现仪器当前状态。曲面插值法与盲区卷积法的分布形态最为接近,且能够有效适应仪器不同工作状态下的成像结果。

当光斑质心出现跨像元情况时,受到像元间非均匀性的影响,可能出现双峰的情况;如果成像时处于离焦位置,这种情况会更为明显,甚至出现多峰。如图 16 所示

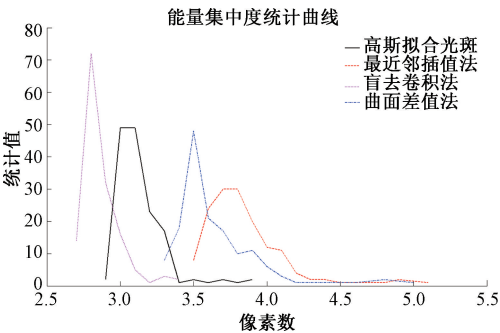


图 15 4 种重构方法能量集中度统计曲线

Fig. 15 Encircled energy statistical curve of four reconstruction method

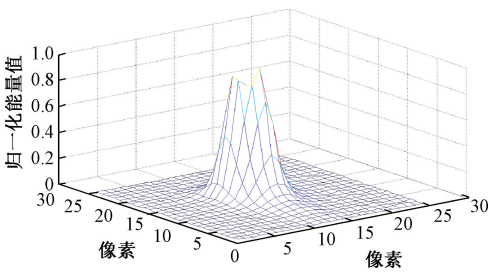
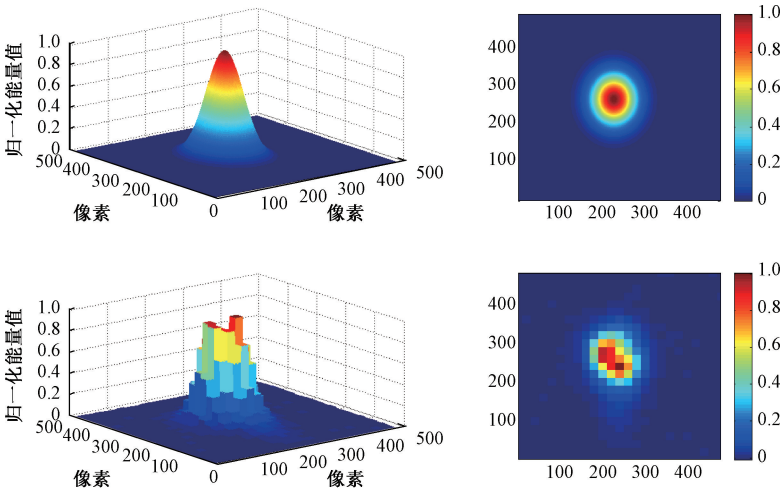


图 16 实验室多峰光斑

Fig. 16 Tested multimodal spot

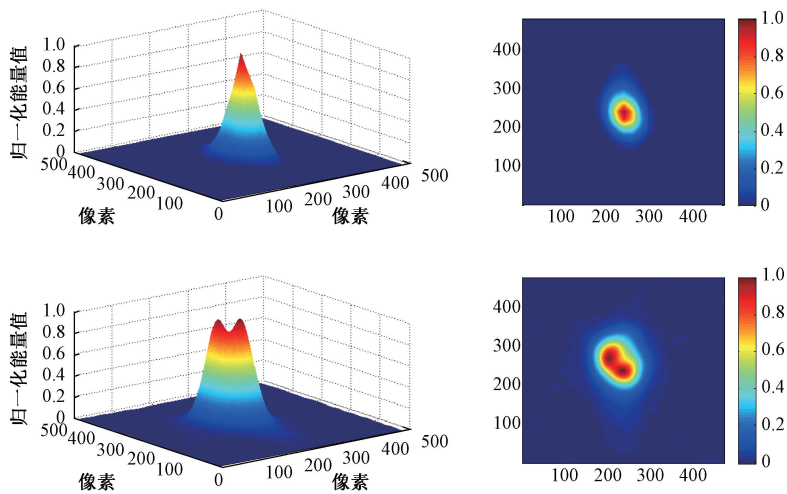
为实测数据的三维图像,从图中可以明显看出,受到像差、杂光、衍射等效应的影响,光斑出现了两个峰值。在实验室测试过程中,需要准确重构出光斑形态,才能够定位仪器问题。

图 17 为数据的重构结果,最近邻插值法和曲面插值法都能够分辨出光斑的两个峰值。盲去卷积法需要有足够的先验信息,否则会出现图 17 中无法分辨两个峰值的情况;此时的光斑不满足高斯分布,因此高斯拟合得



(a) 高斯拟合法与最近邻插值法重构图像

(a) Gaussian fitting method and nearest neighbor interpolation method reconstruction image



(b) 盲去卷积法与曲面插值法重构图像
(b) Blind deconvolution method and surface interpolation method reconstruction image

图 17 实验室多峰光斑及重构图像

Fig. 17 Tested multimodal spot and reconstruction image

到的结果不能作为标准值。仪器调试中,在测试环境不理想的情况下,盲去卷积法和高斯拟合法的点扩散函数重构结果存在漏报的情况,将离焦位置误判为最佳调焦位置或漏掉仪器内部的干扰项。根据 2.1 节中的仿真分析和图 11 的光斑重构图像可以看出,曲面插值法在小尺寸光斑多峰情况中具有更好的分辨能力,并且具有更高的测试精度,能够适应由仪器内部、外部环境因素等造成的点扩散函数形态变换,直观呈现成像质量。

在实验室仪器测试中,前期常温调试的有效性是非常重要的。通过常温下对仪器焦距进行粗调,保持在一个较好的成像位置,可以在一定程度上缩短真空罐内测试时间,更好的对仪器控温。室温 22℃ 条件下成像系统的调焦数据结果如表 1 所示。

表 1 不同调焦位置质心及像质结果

Table 1 Centroid and image quality of different focusing positions

调焦位置	质心	像素数
+60	0.60, -0.50	5.5
+40	0.35, -0.05	5
+20	0.25, -0.15	4.7
0	0, 0	4.6
-20	0.65, -2.15	5.9
-40	0.50, -2.10	6.6
-60	0.65, -1.95	7.3

设置调焦步长基数为 $step$, 调焦位置以 20 倍 $step$ 作为步长移动。从表 1 可以看出,随着调焦位置的变化,像质曲线出现波谷,由此可以判断仪器在调焦位置 0 时具有较好的成像效果。以此时的质心位置作为基准,可以看出质心位置存在微小变化,这是由于光斑随着调焦过程存在漂移,通过质心重构方法,能够准确地找到质心,提高光斑重构准确性。从图 18 中可以看出,由于曲面插值法的精度更高,在调焦过程中更为清晰的显示出了 EE80 的变化;高斯拟合法与盲去卷积法在正向 0~60 倍的调节过程中结果变化不明显,无法在测试中提供准确的反馈。

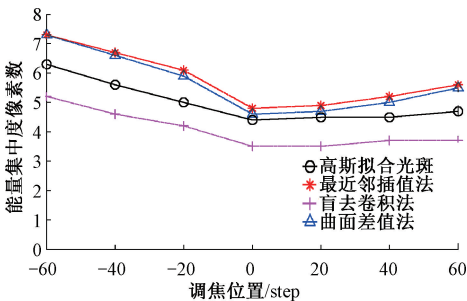


图 18 4 种重构方法的调焦曲线

Fig. 18 Focus curve of four reconstruction method

3 结 论

为了提升光学成像系统调试的准确性,本研究提出了一种基于曲面插值的光学系统点扩散函数能量集中度

算法。相比于传统算法,本研究提出的方法能够重构出更为接近实际光斑的点扩散函数拟合结果,从而得到较为准确的能量集中度结果,为仪器的调试和成像质量的评测提供了数据支持。

从仿真和实验数据结果能够看出,本研究所提出的插值重构方法,对于仪器的抖动、离焦等造成的点扩散函数变形等情况较为敏感,并且对于多峰情况也具有明显优于传统测试方法的分辨能力,能够有效的帮助定位问题,提高测试效率。实验数据表明:曲面插值法误差仅为 $|\varepsilon| = 0.000\ 2$,像质观测区域内偏离率 $< 5\%$,质心修正精度为 0.01 个像元,基本满足仪器测量的需求,为后续系统的目标分辨能力的评测与提升也提供了一定的依据。

参考文献

- [1] SONG M, ZHONG Y F, MA AI L, et al. Multiobjective subpixel mapping with multiple shifted hyperspectral images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(11):8176-8191.
- [2] 曾富强,张贞凯,方梦瑶. 基于改进 ResNet18 的遥感图像舰船目标识别 [J]. *电子测量技术*, 2024, 47(12):164-172.
ZENG F Q, ZHANG ZH K, FANG M Y. Ship target recognition in remote sensing images based on improved ResNet18 [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(12):164-172.
- [3] PENG X, LIU EN H, TIAN SH L, et al. Study of high-precision velocimetry technique based on absorption spectrum for deep space exploration [J]. *Acta Astronautica*, 2022, 199(10):327-336.
- [4] ALI H F, GHONEIM S M. Satellite-based silica mapping as an essential mineral for clean energy transition: Remote sensing mineral exploration as a climate change adaptation approach [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2022, 196(12):264-274.
- [5] SCHREINER S, CULIBRK D, BANDECCHI M, et al. Soil monitoring for precision farming using hyperspectral remote sensing and soil sensors [J]. *Automatisierungstechnik: Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, 2021, 69(4):325-335.
- [6] ZHAN D ZH, LI W L, YIN X Q, et al. PSF estimation method of simple-lens camera using normal sinh-arcsinh model based on noise image pairs [J]. *IEEE Access*, 2021, 9:49338-49353.
- [7] WANG B, SHI Y Y, SHENG W, et al. Imaging through thick scattering media based on envelope-informed learning with a simulated training dataset [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(15):4049-4056.
- [8] TSCHUDI C, SCHMID H M. Quantitative polarimetry of the disk around HD 169142 [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2021, 655:A37.
- [9] 王欣,徐平平,吴菲. 基于指数同态滤波耦合细节锐化规则的红外图像增强算法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(10):9-16.
WANG X, XU P P, WU F. Infrared image enhancement algorithm based on exponential homomorphic filtering coupled with detail sharpening rule [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2021, 35(10):9-16.
- [10] 唐荻音,崔润昊,邸军伟,等. 基于非特定图像的红外成像系统调制传递函数自动测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(7):267-278.
TANG D Y, CUI R H, DI J W, et al. Automatic measurement method for modulation transfer function in infrared imaging system based on non-specific images [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(7):267-278.
- [11] 宋俊儒,邢辉,裴景洋,等. 低温镜头能量集中度测试及其误差分析 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(7):236-242.
SONG J R, XING H, PEI J Y, et al. Measurement and error analysis of encircled energy of cryogenic lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7):236-242.
- [12] 杨天远,周峰,行麦玲. 一种点目标探测系统能量集中度计算方法 [J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(2):41-47.
YANG T Y, ZHOU F, XING M L. A method for calculating the energy concentration degree of point target detection system [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(2):41-47.
- [13] 刘负负,王旭,张亮. 面阵探测器点目标探测随机误差度量方法研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(4):49-56.
LIU F F, WANG X, ZHANG L. Measurement method of random errors in spot target detection by flat-panel detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4):49-56.
- [14] WOHLBERG B, WOZNIAK P. PSF estimation in

- crowded astronomical imagery as a convolutional dictionary learning problem[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021, 28:374-378.
- [15] WANG P, SHEN X, ZHANG G. Spatiotemporal super-resolution mapping by considering the point spread function effect [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19:1-5.
- [16] 刘建军,郝敏钊,李建朝,等. 融合图像局部和退化表征信息的盲超分辨率重建[J]. 国外电子测量技术, 2023,42(1):112-118.
- LIU J J, HAO M CH, LI J ZH, et al. Blind super-resolution reconstruction based on fusion of local information and degradation representation of image[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 112-118.
- [17] DAI M L, JIAN Y CH, ZHAO X H, et al. The simulation and application of large depth of field 3D points reconstruction based on PSF and MOGA improved network[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 181(10):108383.
- [18] CUI Z Y, REN J J, LI L J, et al. Defocusing recovery technology of terahertz image based on 3-D PSF simulations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72:1-10.
- [19] 安康,舒好,卢艳平,等. 基于图像反卷积的平板探测器信号串扰校正[J]. 仪器仪表学报,2023,44(7):194-202.
- AN K, SHU H, LU Y P, et al. Signal crosstalk correction for flat panel detector based on image deconvolution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(7):194-202.
- [20] HU W D, XU ZH H, JIANG H Y, et al. Image restoration algorithm for terahertz FMCW radar imaging[J]. Applied Optics, 2023, 62(20):5399-5408.
- [21] TANG H Y, LIAO ZH Y, JIANG J S, et al. Simulation method for multichromatic light spots in mosaic aperture telescopes with large image planes during deployment[J]. Applied Optics, 2024, 63(14):3770-3778.
- [22] WONG S M, ONG S, CHAN C S, et al. On-orbit spatial characterization based on satellite image structure[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2019, 13(1):016510.
- [23] GUO L L, WU Z P, ZHANG L G, et al. New approach to measure the on-orbit point spread function for spaceborne imagers [J]. Optical Engineering, 2013, 52(3):033602.
- [24] 孔健,傅雨田,赵跃进. 基于焦平面探测器的红外相机成像模型和静态传函测试方法研究[J]. 红外与毫米波学报,2022,41(6):1072-1080.
- KONG J, FU Y T, ZHAO Y J. Research on imaging model of infrared camera with focal plane detector and its MTF measuring method [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022,41(6):1072-1080.
- [25] 王雯蕊,张泉,高源蓬,等. 基于多图超分辨率重建的精细导星仪星点质心定位精度提升方法[J]. 仪器仪表学报,2024,45(3):306-314.
- WANG W R, ZHANG Q, GAO Y P, et al. Precision improvement method of star centroid positioning based on multi-image super-resolution reconstruction for fine guide sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(3):306-314.

作者简介



程雪,2011 年于西北工业大学获得学士学位,2015 年于西北工业大学获得硕士学位,2020 年于西北工业大学获得博士学位,现为中国科学院上海技术物理研究所工程师,主要研究方向为定标以及图像数字信号

处理。

E-mail:chengxue@mail.sitp.ac.cn

Cheng Xue received her B.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2011, received her M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2015, received her Ph.D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2020. Now she is an engineer at Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include calibration and image digital signal processing.



刘晓华(通信作者),1992 年于河南科技大学获得学士学位,1997 年于河南科技大学获得硕士学位,2000 年于中国科学院获得博士学位,现为中国科学院上海技术物理研究所研究员,主要研究方向为光电技术。

E-mail:xhliuz@sohu.com

Liu Xiaohua (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 1992, received his M. Sc. degree from Henan University of

Science and Technology in 1997, received his Ph. D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2000. Now he is a researcher at Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences. His main research interest is photoelectric technology.

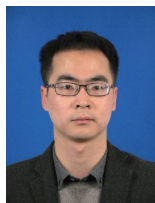


傅雨田, 1990 年于浙江大学获得学士学位, 1996 年于中国科学院上海技术物理研究所获得硕士学位, 1999 年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位, 现为中国科学院上海技术物理研究所研究员, 主要研究方向为空间遥感和天文光学仪器。

E-mail: yutianfu@mail. sitp. ac. cn

Fu Yutian received his B. Sc. degree from Zhejiang University in 1990, received his M. Sc. degree from Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences in 1996, received his Ph. D. degree from Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences in 1999. Now he is a researcher

at Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences. His main research interests include space remote sensing and astronomical optical instrument.



陈永和, 2003 年于中国科学技术大学获得学士学位, 2006 年于中国科学院研究生院获得硕士学位, 2017 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院上海技术物理研究所高级工程师, 主要研究方向为空间高灵敏度光电系统。

E-mail: chen Yonghe@mail. sitp. ac. cn

Chen Yonghe received his B. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 2003, received his M. Sc. degree from Graduate School of Chinese Academy of Sciences in 2006, received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2017. Now he is a senior engineer at Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences. His main research interest is space high sensitivity photoelectric system.