

基于稀疏表示的激光光斑复原方法

黄明柱 富容国 于祥 吕行 马凌芸 张华楠 王鹏

Laser spot restoration method based on sparse representation

HUANG Mingzhu, FU Rongguo, YU Xiang, LYU Xing, MA Lingyun, ZHANG Huanan, WANG Peng

引用本文:

黄明柱, 富容国, 于祥, 等. 基于稀疏表示的激光光斑复原方法[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 543–548. DOI: 10.5768/JAO202445.0310008

HUANG Mingzhu, FU Rongguo, YU Xiang, et al. Laser spot restoration method based on sparse representation[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 543–548. DOI: 10.5768/JAO202445.0310008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于激光光斑分时方法的弹目测角途径设计

Design of missile target angle measurement path based on laser spot time-sharing method

应用光学. 2019, 40(6): 1004–1007 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601012>

短波红外成像系统对激光光斑探测能力分析

Analysis of detection capability of shortwave infrared imaging system on laser spot

应用光学. 2018, 39(4): 574–578 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0406001>

正交狭缝扫描式激光光束质量测量方法研究

Research on measurement method of laser beam quality with orthogonal slit scanning

应用光学. 2020, 41(4): 704–710 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0407003>

基于稀疏光流法的ORB特征匹配优化

ORB feature matching optimization based on sparse optical flow method

应用光学. 2019, 40(4): 583–588 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0402001>

飞秒激光光斑灰度与几何特征的相关性分析

Correlation analysis of gray scale and geometric features of femtosecond laser spot

应用光学. 2020, 41(5): 1108–1116 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0507002>

激光辐照碲镉汞红外焦平面探测器的热应力损伤研究

Thermal-stress damage of MCT infrared focal plane array detector caused by laser irradiation

应用光学. 2018, 39(5): 751–756 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0506003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0543-06

基于稀疏表示的激光光斑复原方法

黄明柱¹, 富容国¹, 于 祥¹, 吕 行¹, 马凌芸¹, 张华楠¹, 王 鹏²

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 2. 江苏曙光光电仪器公司, 江苏 扬州 225000)

摘 要: 使用探测器阵列对远场激光光斑分布进行测量, 是目前评价激光大气传输特性以及激光发射系统性能的重要方法。利用阵列探测器对高能激光系统性能进行评估, 需要准确复原探测器测量所得的激光远场光斑。介绍了一种基于字典学习的阵列探测器激光光斑复原方法。首先利用改进后的线性插值算法对原始低采样光斑进行插值, 其次介绍了 K-SVD (K-singular value decomposition) 字典学习算法, 将所提方法运用到插值后的图像复原中。此外, 用峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 和光斑质心偏移量对复原图像进行量化对比。该算法复原的图像 PSNR 比传统算法高出 4 dB~5 dB, 光斑质心偏差量在 x 轴和 y 轴方向与传统算法相比分别降低了 14.7% 和 12.2%。实验结果表明, 所提方法在视觉和量化指标上都取得了良好的光斑图像复原效果。

关键词: 探测器阵列; 激光光斑; 字典学习; 光斑复原方法

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0310008

Laser spot restoration method based on sparse representation

HUANG Mingzhu¹, FU Rongguo¹, YU Xiang¹, LYU Xing¹, MA Lingyun¹,
ZHANG Huanan¹, WANG Peng²

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Jiangsu Shuguang Optoelectronics Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: An array of detectors was used to measure the distribution of laser spots in the far field, which is an important method for evaluating the laser atmospheric transmission characteristics and the performance of laser emission systems. To evaluate the performance of high-energy laser systems using array detectors, it is necessary to accurately restore the measured far-field laser spots. A laser spot restoration method based on dictionary learning for array detectors was introduced. Firstly, an improved linear interpolation algorithm was used to interpolate the original low-sampled spots. The K-singular value decomposition (K-SVD) dictionary learning algorithm was then implemented to restore the interpolated image, with peak signal-to-noise ratio (PSNR) and centroid shift of the spot being used for quantitatively comparison. The proposed algorithm yields PSNRs of restored images 4 dB~5 dB higher than those with traditional algorithms, and the centroid deviation in both x-axis and y-axis directions is decreased by 14.7% and 12.2%, respectively, when compared to the latter. Experimental results demonstrate that this method produces satisfactory restoration effects on visual and quantitative indicators of spot images.

Key words: array of detectors; laser spot; dictionary learning; spot restoration method

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-10-27

基金项目: 装备预研重点实验室基金 (6142207210202)

作者简介: 黄明柱 (1998—), 女, 硕士, 主要从事激光探测技术、图像处理研究。E-mail: huangmz@njust.edu.cn

通信作者: 富容国 (1970—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光探测技术、红外与微光、激光雷达融合技术研究。

E-mail: frguo@njust.edu.cn

引言

高能高功率激光涉及到多个计量测试问题,包括功率能量、时域脉宽、空间分布、光束质量和光谱参数等,这些参数对于评估高能高功率激光的性能至关重要^[1]。在激光的很多应用场合中,如激光雷达、激光测距等,通常需要通过光学系统来发射激光,然而由于发射光学系统口径的限制,以及受到空气中的扰动及反射与吸收现象的影响,激光经过远距离的大气传输到达靶板上时,光斑形状并不是理想的衍射光斑^[2]。因此需要对靶板测得光斑的参数进行测量,这些参数能够提供有关光斑形态的信息,并用于进一步分析和评估激光系统的质量和性能。

为了对强激光远场光斑参数进行测量,研究人员开发了多种测量方法和技术,摄像法和阵列探测法是目前对远场光斑参数进行测量的主要方法^[3-4]。摄像法是一种相对简便、非接触式的光斑测量技术,它利用摄像设备(例如 CCD 或 CMOS 相机)对激光光斑进行图像采集,并通过图像处理算法提取光斑参数。然而,摄像系统的分辨率有限,镜头的畸变也会对光斑的形状和大小产生影响。因此,对激光光斑的空间分布进行定量测量相对困难,更适合用于实时测量激光光斑的相对空间分布^[5]。阵列探测法利用一个探测器阵列,即由多个接收单元组成的阵列,对激光光斑进行采样和测量^[6]。相对于传统的单点探测方法,阵列探测法的数据采集速度更快,可以同时获取光斑在不同位置上的强度分布信息,从而提供更高的空间分辨率,但也增加了系统的复杂性和成本,空间分辨率和采样能力受到探测器阵列尺寸的限制^[7]。

因此,当使用阵列探测法来获取光斑的远场参数时,我们需要根据少数的已知采样数据来恢复整个光斑的形状^[8]。要得到精确的复原效果,核心在于寻找一种高精度的插值算法来重采集光斑图像^[9]。一般来说,会对探测器阵列系统的输出信号进行线性插值、微分等操作,然而光斑复原的效果往往不如期望的那样精确。经典插值方法有最近邻插值、双线性插值和双三次插值,这类方法复原出的图像缺乏高频信息,比较模糊,且受噪声影响比较严重。以往的去噪方法中,常用的包括均值滤波、中值滤波等方法,然而这些方法处理后得到的结果往往过于平滑,导致细节信息丢失^[10]。之后出现了基于小波变换等的一系列去噪方法,但是

存在超参数调整困难、高频信息丢失等问题。1996 年,OLSHAUSEN B A 等人^[11]提出了 Sparsenet 字典学习方法,通过最大似然估计来计算字典,实现了少量原子的稀疏表示。本文提出一种基于字典学习的插值算法,以便复原得到更加准确的强激光光斑图像。

1 理论分析

探测器阵列靶是测量激光光斑远场时空分布,进而获得各项到靶参数的常用设备。为了对激光信号进行准确测量,阵列探测器需要满足一个前提条件,即确保每个探测器的测量值彼此独立,这意味着至少相邻 2 个探测器的值不相互影响^[12]。为了避免探测器之间相互串扰引起的误差,同时节约成本,相邻的 2 个探测器之间需要有一定的距离,这些间隔导致阵列探测器无法完全接收光斑的分布信息。传统的线性插值方法使用探测器点的测量值作为参考,将加权平均后的计算值作为周围未知像素点的灰度值^[13]。但这种插值方法是基于已知数据点之间的线性关系进行估计的,而实际数据往往存在非线性特征和噪声影响,导致算法可能改变原始已知数据,在插值过程中引入额外的误差。

本文针对上述问题,首先对传统降采样后放大图像的插值方法进行改进,实验过程中接收采样光斑数据时,保留探测器间未知点位置,将其灰度值置为 0,利用周围实际测量所得探测器点的数据进行加权平均,对探测器之间未知点进行插值的同时,不改变已知像素点的灰度值;接着通过学习一组字典来表示和建模图像的结构信息,利用这个字典对插值后含有噪声的图像进行重建,以减少噪声的影响。

1.1 字典学习

字典学习通过学习一组字典来表示图像的结构信息,因此可以更好地保持图像的细节,能够获得更高质量的去噪结果。信号样本为 Y ,可利用字典 D 中的原子 d_k 来组合得到 Y ,并且组合系数满足特定的条件,那么称这个过程为字典学习及稀疏重建,得到如下表达式:

$$Y = DX \quad (1)$$

式中 X 为稀疏矩阵。且存在稀疏优化过程:

$$\min_{D,X} \|Y - DX\|_2^2, \quad \text{s.t.} \|x_i\|_0 \leq T_0 \quad (2)$$

式中: $Y \in \mathbb{R}^{n \times N}$ 为原始样本, n 和 N 分别为实数集合

R 的行数和列数; $D \in \mathbb{R}^{n \times M}$ 为字典矩阵; x_i 为第 i 个样本对应的稀疏系数, T_0 为人工设置的阈值, $\|x_i\|_0 \leq T_0$ 为限制条件, 表示 X 尽可能稀疏。

在自然图像中, 通过字典编码获得的编码系数大多呈现稀疏性, 优化式 (2) 中的稀疏性可以有效消除图像中的不规则噪声, 实现图像的复原。

1.2 K-SVD 字典学习

2006 年, AHARON M 和他的团队提出了 K-SVD 算法^[14], 通过不断更新字典和稀疏编码来获取最优解。利用拉格朗日乘子法将式 (2) 转化为一个无约束的优化问题, 即:

$$\min_{D, X} \|Y - DX\|_2^2 + \lambda \|x_i\|_0 \quad (3)$$

式中: λ 为正则化参数; x_i 为第 i 个样本对应的稀疏系数。

应用 K-SVD 字典学习算法实现字典更新时, 通过确定单个字典原子即字典中的某一列对数据拟合的贡献来逐列依次更新字典^[15]。假设 X 已知并定义更新字典的第 k 列, 记 d_k 为字典 D 的第 k 列, x_T^k 为稀疏矩阵 X 的第 k 行的稀疏系数, 则 d_k 的更新可利用乘以稀疏系数实现, 即:

$$\begin{aligned} \|Y - DX\|_2^2 &= \left\| Y - \sum_{j=1}^M d_j x_T^j \right\|_2^2 = \\ &= \left\| (Y - \sum_{j \neq k} d_j x_T^j) - d_k x_T^k \right\|_2^2 = \\ &= \|E_k - d_k x_T^k\|_2^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: 残差 $E_k = Y - \sum_{j \neq k} d_j x_T^j$, 此时优化问题可以表示为

$$\min_{d_k, x_T^k} \|E_k - d_k x_T^k\|_2^2 \quad (5)$$

对于上述优化问题, 可利用奇异值分解方式求解, 从而得到最佳 d_k 、 x_T^k 。对 E_k 进行奇异值分解, 即:

$$E_k' = U \sum V^T \quad (6)$$

式中: U 、 V 为单位正交矩阵, U 为左奇异矩阵, V 为右奇异矩阵; d_k 为左奇异矩阵 U 的第 1 个列向量; x_T^k 为右奇异矩阵 V 的第 1 个行向量与第 1 个奇异值的乘积。逐列更新字典原子, 直至迭代满足次数或者迭代误差。

2 仿真实验

为验证本文算法的可靠性, 分别对仿真光斑图像和实际光斑图像进行了插值还原。实验所用靶板的探测器分布为每间隔 10 mm 对探测器进行排布, 如图 1 所示。



图 1 阵列探测器排布

Fig. 1 Array detector arrangement

本文使用 Matlab, 根据二维高斯函数创建了一幅分辨率为 50×50 像素的光斑图像, 如图 2(a) 所示, 实验所用靶板探测器布局如图 2 所示, 将光斑进行人工降采样后得到如图 2(b) 所示的光斑图像, 再去除间隔处无像素值的点, 保留探测器点位处像素数, 对降采样后的图像进行整合, 得到分辨率为 25×25 像素的光斑图像, 如图 2(c) 所示。

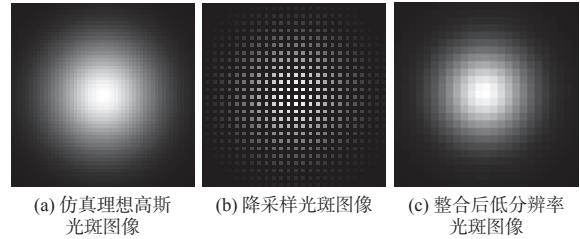


图 2 不同阶段光斑图像

Fig. 2 Spot images at different stages

对整合后的人工采样光斑, 分别利用双线性插值、双立方插值、Lanczos 插值和本文提出的改进插值算法进行处理, 复原结果如图 3 所示。

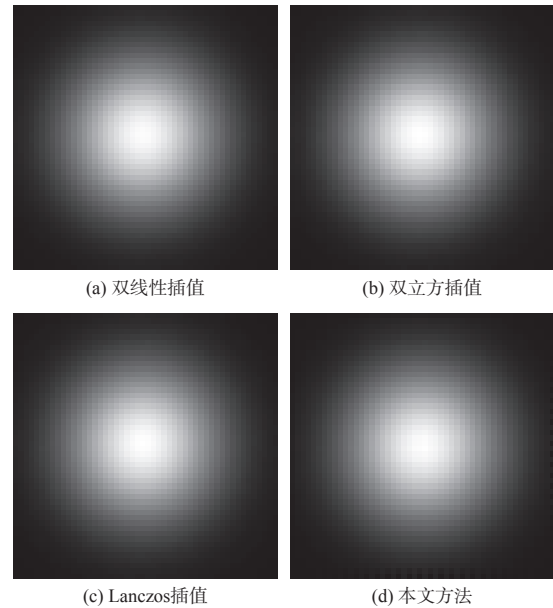


图 3 不同算法得到的复原光斑

Fig. 3 Spot images with different algorithms

利用 K-SVD 字典学习对图 3(d) 光斑图像进行去噪处理, 训练得到的字典图像如图 4 所示, 去噪后的光斑图像如图 5 所示。

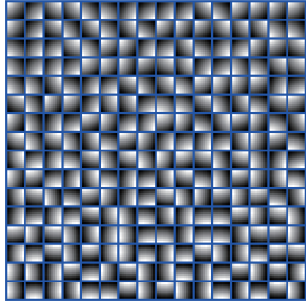


图 4 训练得到的字典图像

Fig. 4 Dictionary image obtained by training

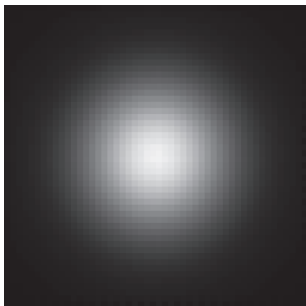


图 5 去噪后的光斑图像

Fig. 5 Spot images after denoising

实验室靶板测得的实际采样光斑如图 6 所示, 分别利用上述 4 种插值算法对其进行插值还原, 得到的复原光斑如图 7 所示。

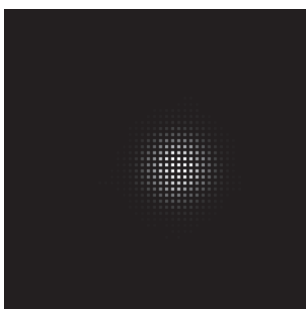
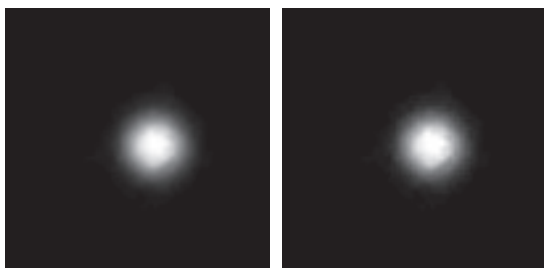


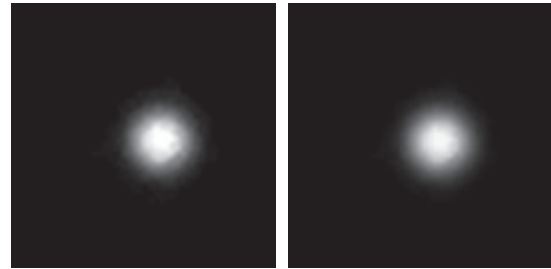
图 6 实际采样光斑

Fig. 6 Actual sampled spot



(a) 双线性插值

(b) 双立方插值



(c) Lanczos插值

(d) 本文方法

图 7 不同算法得到的复原光斑

Fig. 7 Spot images with different algorithms

3 实验结果与分析

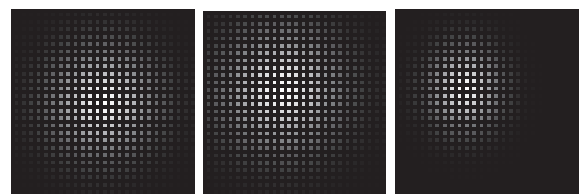
为验证本文算法及评估复原图像的质量, 利用峰值信噪比 (PSNR)^[16] 对图像复原质量进行评价, 它可以用来评价 2 幅图像之间的相似程度。具体公式如下:

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{I_{\text{MAX}}}{E_{\text{MSE}}}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{I_{\text{MAX}}}{\sqrt{E_{\text{MSE}}}}\right) \quad (7)$$

其中,

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (8)$$

式中: E_{MSE} 表示基准图像 $I(i, j)$ 和噪声图像 $K(i, j)$ 之间的均方误差; I_{MAX} 表示图像点颜色的最大数值。 E_{MSE} 越小, R_{PSNR} 越大, 图像质量越好。选取 3 幅不同的仿真光斑采样图像进行实验, 分别为质心位于中心位置的大光斑、质心向左偏移的大光斑以及质心向左偏移的小光斑, 如图 8 所示。



(a) 中心位置大光斑

(b) 质心左移大光斑

(c) 质心左移小光斑

图 8 3 种仿真光斑采样图像

Fig. 8 Three simulated spot sampling images

表 1 为不同算法下 3 幅仿真光斑图像的 PSNR 值。由表 1 可以看出, 本文算法复原光斑图像的 PSNR 值更高, 即复原效果更好。

分析光斑质心坐标也是一种直接有效的评价光斑复原效果的方法。求取光斑质心常用的方法有圆拟合法、灰度质心法、GHT (generalized Hough transform) 和图像矩法^[17]。本文选取灰度质心法计算插值所得光斑的质心, 结果表 2 所示。

表 1 光斑图不同方法复原结果的 PSNR 值
Table 1 PSNR values of spot image restored by

different methods					dB
光斑	双线性插值	双立方插值	Lanczos插值	本文算法	
光斑1	83.1114	82.9951	83.1486	87.9379	
光斑2	83.1034	83.0394	83.1621	87.1776	
光斑3	83.0359	82.9209	83.0657	86.0711	

表 2 不同算法得到的光斑质心坐标

Table 2 Coordinates of spot centroid obtained by different algorithms

光斑	原光斑	双线性插值	双立方插值	Lanczos插值	本文算法
光斑1	(24.50, 24.50)	(24.02, 24.03)	(24.03, 24.03)	(24.03, 24.03)	(24.50, 24.49)
光斑2	(21.42, 21.42)	(20.98, 20.98)	(20.98, 20.98)	(20.99, 20.99)	(21.45, 21.45)
光斑3	(18.39, 21.05)	(17.89, 20.53)	(17.88, 20.52)	(17.89, 20.52)	(18.38, 21.01)
实验光斑	(56.66, 51.86)	(56.16, 51.36)	(56.16, 51.36)	(56.16, 51.36)	(56.66, 51.86)

利用本文算法对连续 50 帧实验图像进行复原,并计算质心坐标偏差,结果如图 9 所示。由图 9 可以看出,本文算法复原的光斑图像,质心坐标在 x 轴和 y 轴方向上的偏差均在 0.16 个像素内,远小于传统插值算法复原光斑的偏差。

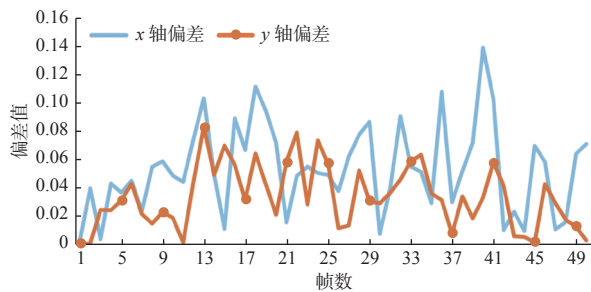


图 9 连续 50 帧图像质心偏差

Fig. 9 Image centroid deviation at 50 consecutive frames

4 结论

本文提出了一种基于字典学习的激光远场光斑复原方法,通过改进的插值算法和字典学习对远场激光光斑图像进行了复原。观察图 7 可以看出,本文算法恢复的激光光斑清晰度相较于其他集中算法有显著提高。与传统的插值复原方法相比,本文复原方法所得光斑的 PSNR 值提高了 4 dB~5 dB,求取所得的光斑质心偏差在 x 轴方向减小了至少 14.7%, y 轴方向减小了至少 12.2%。综上所述,本文所提方法能有效提升通过阵列探测器靶板测量所得远场光斑还原的准确性,能够更好地计算光斑参数,从而更为准确地对高能激光系统性能进行评估。

由表 2 可以看出,利用 3 种传统插值算法复原的光斑在求取光斑质心坐标时, x 轴和 y 轴方向上的偏差均为 0.5 个像素左右。利用本文算法复原的光斑,质心坐标在 x 轴方向上的偏差最大为 0.034 个像素,在 y 轴方向上的偏差最大为 0.041 个像素。

参考文献:

[1] 黎高平, 陈超, 李栋, 等. 高能高功率激光参数测量技术研究[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 645-650.
LI Gaoping, CHEN Chao, LI Dong, et al. Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(4): 645-650.

[2] 庞森. 激光束远场参数高精度测量技术研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2015.
PANG Miao. Research on the high-precision measuring technology for the laser beam's far-field parameters[D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

[3] 张颖新, 王云萍, 王禹. 基于 CCD 的远场激光光斑测量系统开发与应用[J]. 光电技术应用, 2011, 26(4): 11-13.
ZHANG Yingxin, WANG Yunping, WANG Yu. Development and application of far-field laser spot measurement system based on CCD[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(4): 11-13.

[4] 贾养育, 任勐, 吕鸿鹏, 等. 基于探测器阵列的激光远场光斑测量系统[J]. 激光与红外, 2009, 9(12): 1324-1327.
JIA Yangyu, REN Meng, LYU Hongpeng, et al. Laser measurement system of far-field spot based on detector array[J]. Laser & Infrared, 2009, 9(12): 1324-1327.

[5] 李钟敏, 张海庄, 赵纲, 等. CCD 摄像法测量激光远场光斑中图像校正和能量修正算法研究[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(2): 19-21.
LI Zhongmin, ZHANG Haizhuang, ZHAO Gang, et al. Study on image correction and energy correction algorithm in laser far field spot measurement by CCD camera

- method[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(2): 19-21.
- [6] 杨子昊. 远场激光探测阵列信号处理技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- YANG Zihao. Research on signal processing technology of far-field laser detection array[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [7] 黄伟, 马松山, 李晓芹, 等. 复合式激光远场光斑分布定量测量技术研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(8): 1031-1035.
- HUANG Wei, MA Songshan, LI Xiaoqin, et al. Study on quantitative compound measurement of far field spot distribution of laser[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(8): 1031-1035.
- [8] 周鸣. 基于探测器阵列的光斑图像复原研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- ZHOU Ming. Research on spot image restoration based on detector array[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [9] 程乙轮, 何枫, 谭逢富, 等. 探测器阵列靶的激光光斑图像复原方法研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(6): 749-753.
- CHENG Yilun, HE Feng, TAN Fengfu, et al. Research on the laser spot restoration method of detector array target[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(6): 749-753.
- [10] 李清运, 车守全, 王浪威. 基于字典学习的遥感图像去噪方法研究[J]. *山东工业技术*, 2022(4): 77-81.
- LI Qingyun, CHE Shouquan, WANG Langwei. Research on denoising method of remote sensing image based on dictionary learning[J]. *Journal of Shandong Industrial Technology*, 2022(4): 77-81.
- [11] OLSHAUSEN B A, FIELD D J. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images[J]. *Nature*, 1996, 381(6583): 607-609.
- [12] 乔春红, 田国昌, 范承玉, 等. 高功率激光阵列探测器中光强分布复原方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 815-819.
- QIAO Chunhong, TIAN Guochang, FAN Chengyu, et al. Method of irradiance distribution recovery in the array detectors of high-power laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 815-819.
- [13] 钟宝江, 陆志芳, 季家欢. 图像插值技术综述[J]. *数据采集与处理*, 2016, 31(6): 1083-1096.
- ZHONG Baojiang, LU Zhifang, JI Jiahuan. Review on image interpolation techniques[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2016, 31(6): 1083-1096.
- [14] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A M. The K-SVD: an algorithm for designing of over complete dictionaries for sparse representation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(11): 4311-4322.
- [15] 栾峰, 杨帆, 蔡睿智, 等. 基于双字典自适应学习算法的低采样率CT重建[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(12): 1709-1716.
- LUAN Feng, YANG Fan, CAI Ruizhi, et al. Low sampling rate CT reconstruction based on dual dictionary adaptive learning algorithm[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2022, 43(12): 1709-1716.
- [16] 景海钊, 史江林, 邱梦哲, 等. 基于密集残差块生成对抗网络的空间目标图像超分辨率重建[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(17): 2155-2165.
- JING Haizhao, SHI Jianglin, QIU Mengzhe, et al. Super-resolution reconstruction method for space target images based on dense residual block-based GAN[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(17): 2155-2165.
- [17] 李天宇, 王明泉, 郝利华, 等. 基于高斯拟合的信号弹光斑中心定位方法[J]. *激光与红外*, 2022, 52(3): 422-426.
- LI Tianyu, WANG Mingquan, HAO Lihua, et al. Signal flare spot center location method based on Gaussian fitting[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 422-426.