

文章编号 1004-924X(2026)12-1830-13

红外焦平面空间性能参数自适应检测系统设计

刘玲志¹, 刘长明², 庄新港², 杨忠明^{1*}

(1. 山东大学 信息科学与工程学院、山东省激光技术与应用重点实验室,
山东 青岛 266237;

2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要:为满足红外焦平面探测器对整体靶面响应不均匀性及像元间信号串扰问题的测试需求,设计了红外焦平面空间性能参数自适应检测系统。该系统以 1 550 nm 激光为光源,利用伽利略型非球面透镜组将高斯光束整形为平顶光束,再经开普勒型扩束系统对该平顶光束扩束,获得直径大于 25 mm、均匀性高于 96% 的匀化光束,以满足红外焦平面探测器靶面响应不均匀性测试需求;为了生成高质量小光点,利用自适应光学系统校正波前像差,经过物镜聚焦后得到直径小于 5 μm 的小光点,以满足红外焦平面探测器像元间信号串扰的精确测量需求。实验结果表明:匀化光束均匀性为 96.08%,小光点直径为 4.4 μm 。该系统集成两种功能于一体,为红外焦平面探测器的空间性能测试提供了有效的实验手段。

关键词: 匀化光束;红外小光点;非球面透镜组;自适应光学;红外焦平面探测器

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20263412. 1830

CSTR: 32169. 14. OPE. 20263412. 1830

Design of an infrared focal plane spatial performance parameter adaptive detection system

LIU Lingzhi¹, LIU Changming², ZHUANG Xingang², YANG Zhongming^{1*}

(1. School of Information Science and Engineering, Key Laboratory for Laser Technologies and Applications, Shandong University, Qingdao 266237, China;

2. The 41st Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

* Corresponding author, E-mail: zhongming.yang@sdu.edu.cn

Abstract: To meet the testing requirements for the overall target surface response non-uniformity and inter-pixel signal crosstalk of infrared focal plane detectors, this paper designed an infrared focal plane spatial performance parameter adaptive detection system. The system employed a 1 550 nm laser as the light source, used a Galilean aspheric lens group to shape the Gaussian beam into a flat-top beam, and then expanded the flat-top beam through a Keplerian beam expander to obtain a homogenized beam with a diameter greater than 25 mm and uniformity exceeding 96%, fulfilling the testing needs for the target surface response non-uniformity of infrared focal plane detectors. To generate high-quality small light spots, the system utilized an adaptive optical system to correct wavefront aberrations, and after focusing through the ob-

收稿日期: 2026-04-13; 修订日期: 2026-05-14.

基金项目: 国家重点研发计划子课题(No. 2023YFF0722400); 国家自然科学基金(No. 62175131)

jective lens, a small light spot with a diameter less than $5\text{ }\mu\text{m}$ was obtained, meeting the precise measurement requirements for inter-pixel signal crosstalk in infrared focal plane detectors. Experimental results indicate that the uniformity of homogenized beam reaches 96.08%, and the diameter of the light spot is $4.4\text{ }\mu\text{m}$. This system integrates both functions into one unit, providing an effective experimental tool for performance testing of infrared focal plane detectors.

Key words: homogenized beam; infrared small spot; aspheric lens group; adaptive optics; infrared focal plane detector

1 引言

随着红外焦平面探测器在分辨率、灵敏度及阵列规模上的快速提升,对其材料均匀性与像元一致性的要求也愈加严格,检测红外焦平面探测器靶面阵列中各像元的性能差异已成为评价探测器空间性能的重要环节^[1-3]。为系统评估红外焦平面探测器的空间性能,针对探测器整体靶面响应不均匀性测试,通常采用大面积匀化光束照射整个靶面,测量每个像元响应不一致性;针对探测器像元之间信号串扰测试,通常采用直径小于探测器像元尺寸的小光点,入射到探测器靶面单个像元内,通过测量相邻像元串扰信号进行检测。因此,能够生成大面积匀化光束与微米级小光点的光学系统,是同时满足上述两类测试需求的必要基础。

常用的匀化光束获取方法^[4]主要包括光阑整形、液晶空间光调制器、微透镜阵列以及非球面透镜组等。光阑整形^[5-7]是最早采用的一种方法,其通过物理遮挡光束边缘来获得近似均匀的光强分布。然而,这种方法能量损失较大,效率较低。液晶空间光调制器^[8-10]则利用液晶的旋光性和双折射效应,通过电压调节每个像素的透过率,从而灵活实现多种光强分布。尽管该方法调节灵活、响应快速,但其成本较高、损伤阈值较低,且受像素尺寸和间隙影响,一般适用于低能量光束的实时调控。微透镜阵列^[11-13]则是另一种常用的匀化方案,利用微透镜阵列和一块凸透镜实现光束匀化,微透镜阵列每个单元焦斑可视为点光源,这些点光源相位相同,将形成多光束干涉图样,为了提高光束匀化性,需要引入额外器件消除相干性^[14],如旋转毛玻璃等,增加了系统的复杂度和不稳定性。非球面透镜组^[15-16]是一种经典的光束整

形手段,由一个凹面镜与一个凸面镜组成将准直高斯光束整形为平顶光束。早在 1965 年, Frieden^[17]就提出了使用两片非球面透镜将高斯光束整形为均匀分布的光束的理论。近年来,研究者在此基础上进一步优化^[18-20],通过能量守恒原理建立入射与出射面的坐标映射关系,并借助光学设计软件如 ZEMAX 进行系统优化与加工,最终实现了从高斯光束到平顶光束的高效转换。相比较而言,非球面透镜组光束匀化方法结构简单、实现相对容易。本文采用非球面透镜组进行光束整形,将高斯光束转换为平顶光束,再通过开普勒型扩束系统将其扩展为大尺寸匀化光束^[21],该方法在保持良好均匀性的同时,可以获得大尺寸匀化光束,能够实现较高的能量利用率与系统稳定性,满足红外焦平面探测器靶面响应不均匀性测试等实际应用需求。

生成高质量小光点通常需借助聚焦系统,但光束在传播过程中容易因大气扰动等原因引入波前像差,使聚焦光斑受到影响。存在像差时,焦点结构会发生偏移且光强分布不对称,多数研究均证实像差会显著劣化聚焦区域的能量集中度^[22-26]。自适应光学是最早由美国天文学家 H. W. Backock^[27]在 1953 年提出的对湍流等引起的波前畸变进行实时补偿的技术,利用波前探测器对畸变相位进行测量后,用波前校正器件产生与波前畸变共轭的相位,实现对畸变波前的补偿与校正。为抑制像差对聚焦光斑质量的影响,本文引入自适应光学技术,利用夏克-哈特曼波前传感器^[28]检测进入聚焦系统前的波前畸变,将波前像差用泽尼克多项式表征后转换为控制电压施加于变形镜,从而实时校正波前,得到高质量红外小光点,满足红外焦平面探测器靶面像元串扰测试等实际应用需求。

针对红外焦平面探测器的空间性能测试需求,本文设计了一款红外焦平面空间性能参数自适应检测系统,结合大尺寸匀化光束和红外小光点生成技术,采用非球面透镜组整形、开普勒型扩束系统扩束得到大尺寸、高均匀性匀化光束,采用自适应光学技术消除波前畸变并利用光束聚焦系统得到高质量红外小光点,同时满足红外焦平面探测器靶面响应不均匀性以及像元串扰测试需求。

2 光学系统设计与基本原理

2.1 光学系统总体结构设计

本文设计的红外焦平面空间性能参数自适应检测系统可以生成匀化光束和红外小光点以满足红外焦平面探测器靶面响应不均匀性以及像元串扰测试需求。该系统结合自适应光学系统、光束匀化系统以及光束聚焦系统,利用自适应光学系统校正波前畸变,生成高质量小光点,以及大面积匀化光束,解决高密度红外焦平面探测器在像元间串扰和响应不均匀性测试中对光源提出的双重需求,如图 1 所示。激光器输出的光束,经过大气扰动引入波前畸变,由自适应光学系统对大气扰动引入的波前畸变进行测量并校正,经过自适应光学系统得到的高质量光束,分别进入光束匀化系统以及光束聚焦系统生成匀化光束和小光点,同时满足红外焦平面探测器靶面响应不均匀性以及像元串扰测试需求。

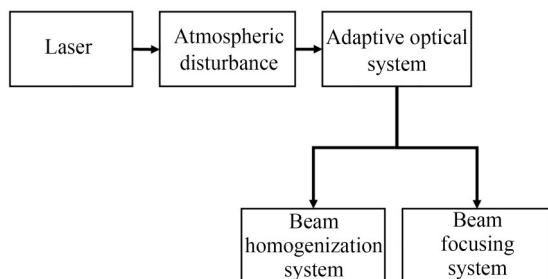


图 1 红外焦平面空间性能参数自适应检测系统组成框图
Fig. 1 Block diagram of adaptive detection system for spatial performance parameters of infrared focal plane

红外焦平面空间性能参数自适应检测系统

光学布局如图 2 所示,由 1 550 nm 激光器、光纤准直器、半波片、偏振分束镜、 $\lambda/4$ 波片、变形镜、缩束/扩束准直透镜组件、分束镜、观测相机、聚焦物镜、非球面透镜组、反射镜组件、夏克-哈特曼波前传感器、红色十字激光器等组成。1 550 nm 激光器输出的线偏振高斯光束经透射式光纤准直器准直进入自适应光学系统。该光束依次通过半波片、偏振分束镜和 $\lambda/4$ 波片后,入射至变形镜;通过旋转半波片可调节光束的偏振方向,从而控制经偏振分束镜透射至变形镜的光强。透射后的线偏振光经 $\lambda/4$ 波片转变为圆偏振光,经变形镜调制反射后,其圆偏振旋向发生反转;该光束再次通过 $\lambda/4$ 波片,偏振态发生变化,随后被偏振分束镜反射并导入后续光路。光束经过透镜 1 与透镜 2、透镜 3、透镜 6 的组合将光束缩束至匹配尺寸,分别进入哈特曼波前传感器、非球面透镜组和聚焦物镜。光束经过透镜 1 与透镜 2 组合后,缩束为合适尺寸入射到夏克-哈特曼波前传感器内,夏克-哈特曼波前传感器将探测到的波前像差以泽尼克系数表征,并转换为相应电压信号反馈至变形镜,实现波前像差的实时闭环校正。

经过波前校正的光斑,经过分束镜 1 的透射后进入光束聚焦系统,透镜 1 与透镜 6 的组合将

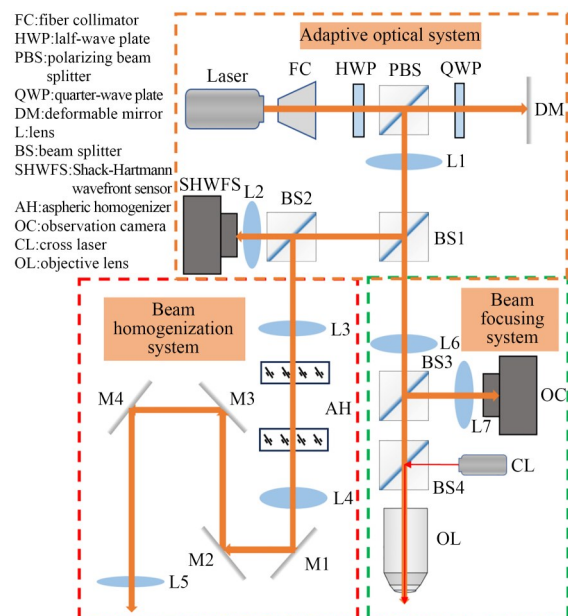


图 2 红外焦平面空间性能参数自适应检测系统光学布局
Fig. 2 Optical layout of adaptive detection system for spatial performance parameters of infrared focal plane

光束缩束至合适尺寸入射到聚焦物镜内,会聚为近红外小光点入射到红外焦平面探测器靶面上,并反射回原光路;反射光经分束镜 3 反射后,经过透镜 7 成像,入射到对准观测相机内,在对准观测相机上对红外小光点照射到的红外焦平面探测器靶面进行成像;650 nm 粗对准十字激光器发射发散的红色十字激光,经过分束镜 4 反射进入聚焦物镜,照射到探测器靶面上,作为红外小光点粗对准调节光路。

经过波前校正的光斑,经过分束镜 2 反射后进入光束匀化系统,透镜 1 与透镜 3 的组合将光束缩束至与非球面透镜组匹配的入射光束尺寸,高斯分布的光束经过非球面透镜组后,整形为平顶光束;透镜 4 与透镜 5 组合成开普勒型扩束系统,在不影响光束均匀性前提下,将平顶光束尺寸扩束,作为红外焦平面探测器探测效率一致性检测测试光束出射。

2.2 自适应光学系统

自适应光学系统通常由波前传感器、波前处理计算机和波前校正器三个核心部分组成。系统中,波前传感器负责将接收到的光信号转换为图像信号,并通过计算提取波前信息。波

前处理计算机则负责波前复原与校正电压计算。当光束经过大气湍流等因素导致波前畸变后,畸变波前首先进入波前传感器进行实时测量。传感器将采集到的图像数据传输至波前处理计算机,计算机通过相应的矩阵运算求解出需施加于波前校正器的校正电压向量。该校正电压经高压放大器放大后,驱动变形镜产生相应的面形变化,从而调整反射光束的波前相位,有效补偿波前畸变,最终使输出光束的质量得到显著提升。

2.2.1 夏克-哈特曼波前传感器

本文采用课题组自主研发的夏克-哈特曼波前传感器,理论波前检测能力为 0.01λ 。该传感器采用了一种基于图像相似度的新型检测技术,无需改变哈特曼传感器结构或添加辅助设备,通过利用图像相似性作为光斑追踪的先验信息,结合如图 3 所示的序列光斑对准算法(Sequential Spot Alignment Algorithm, SSA)^[28],经过预处理、校准和匹配三个部分实现光斑与子孔径之间的精确匹配,实现波前重建,其动态范围较传统区域重建和模态重建方法可提高 2~14 倍。

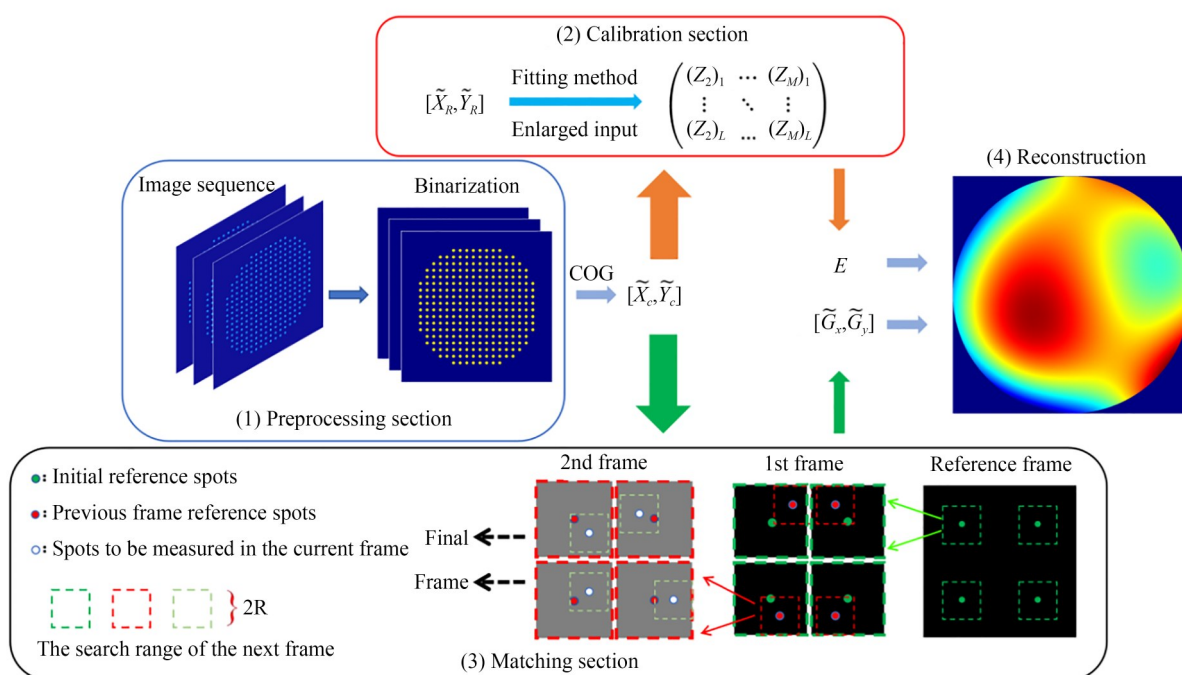


图 3 序列光斑对准算法(SSA)流程图

Fig. 3 SSA-SHWFS process diagram

在 $N \times N$ 像素网格中,对于单个子孔径,若第 i 个像素的坐标为 (x_i, y_i) 、光强为 I_i ,则光斑中心 (X_c, Y_c) 可通过公式(1)计算:

$$\begin{cases} X_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i I_i}{\sum_{i=1}^N I_i} \\ Y_c = \frac{\sum_{i=1}^N y_i I_i}{\sum_{i=1}^N I_i} \end{cases} \quad (1)$$

子孔径内的平均斜率,记为 (G_x, G_y) ,由以下公式表示:

$$G_x = \frac{\Delta X}{f} = \frac{X_c - X_0}{f}, \quad (2)$$

$$G_y = \frac{\Delta Y}{f} = \frac{Y_c - Y_0}{f}, \quad (3)$$

其中: (X_0, Y_0) 表示参考波前的质心坐标,表示微透镜的焦距。入射波前 $\Phi(x, y)$ 通过 M 项泽尼克多项式级数展开如下:

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=2}^M a_k Z_k(x, y), \quad (4)$$

其中: Z_k 为第 k 项泽尼克多项式, a_k 为对应系数。波前斜率与泽尼克系数之间的关系以矩阵形式表示为:

$$G = EA, \quad (5)$$

其中: G 为斜率向量, $A = \{a_2 \ a_3 \ \dots \ a_M\}$ (平移项通常设为0)表示泽尼克系数向量。重建矩阵 E 为:

$$E = \begin{pmatrix} (Z_{2x})_1 & (Z_{3x})_1 & \dots & (Z_{Mx})_1 \\ (Z_{2y})_1 & (Z_{3y})_1 & \dots & (Z_{My})_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (Z_{2x})_L & (Z_{3x})_L & \dots & (Z_{Mx})_L \\ (Z_{2y})_L & (Z_{3y})_L & \dots & (Z_{My})_L \end{pmatrix} L. \quad (6)$$

假设微透镜阵列包含 L 个子透镜。元素 $(Z_{Mx})_L$ 表示第 M 项泽尼克多项式下第 L 个子孔径在 x 方向的斜率值,而 $(Z_{My})_L$ 表示同一子孔径在 y 方向的斜率值。为计算波前相位,需在设定各泽尼克系数为特定值时,计算每个子孔径在两个方向上的平均斜率,并将这些值归一化后作为矩阵 E 的元素。随后,通过求解 E 的广义逆矩阵 E^+ 得到系数向量 A ,从而计算波前相位。

泽尼克系数的变化与质心位移的变化并非严格线性关系,这种非线性使得通过最小二乘法求解方程(5)来获取泽尼克系数的方法变得复杂。为解决这一问题,对一定系数范围内计算得

到的结果进行了线性拟合,以平衡不同系数的影响。

该矩阵元素 $(Z_{M\delta})_L$ 通过光斑位移向量 $\tilde{\Delta}$ 与系数向量 $\widetilde{Co}_M$ 的最小二乘拟合确定:

$$\min \left\{ \left\| \tilde{\Delta} - \widetilde{Co}_M \cdot (Z_{M\delta})_L \right\|_2 \right\}, \delta = x, y, \quad (7)$$

其中, $\|\dots\|_2$ 表示计算 L2 范数运算。与传统方法相比,该线性拟合方法精度提升了近 2.5 倍。

当探测器像素尺寸更小且微透镜焦距更大时,夏克-哈特曼波前传感器对波前变化的敏感性提高。这种增强的敏感性要求以更高精度计算矩阵 E 中的元素。为满足此要求,在傅里叶衍射计算中将放大后的子孔径波前 U_{in} 应用两次快速傅里叶变换算法,以模拟光斑偏移。观察面的复振幅分布 U_{out} 为:

$$U_{out} = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \{ U_{in} \} \exp \left[jkf \left(1 - \frac{\lambda^2}{2} (\zeta^2 + \eta^2) \right) \right] \right\}, \quad (8)$$

其中: $\mathcal{F}\{\dots\}$ 和 $\mathcal{F}^{-1}\{\dots\}$ 分别表示傅里叶变换与逆变换运算, ζ 和 η 表示两个方向的频率分量, j 为虚数单位, k 为波矢, λ 表示波长, f 为微透镜阵列的焦距。相较于传统方法,重建矩阵 E 的精确计算使夏克-哈特曼波前传感器精度提升了近一个数量级。

2.2.2 波前校正器

波前校正器主要通过控制计算机传递的控制电压信号产生相应的镜面运动实现对波前畸变的补偿。在自适应光学系统中,计算变形镜校正电压的常用方法是直接斜率法。该方法利用哈特曼波前传感器测得的波前斜率数据,与系统预先标定得到的响应矩阵相乘,从而直接计算出所需的校正电压。其计算关系可表示为:

$$S = RV, \quad (9)$$

其中: V 是对变形镜施加的驱动电压向量, S 是波前探测器得到斜率向量, R 是响应矩阵,其值为对促动器依次施加单位电压,波前探测器的斜率变化量所构造的矩阵。实际应用时,首先通过上述标定过程获取系统响应矩阵 R ;在校正阶段,根据实时测得的波前斜率向量与响应矩阵,求解最小二乘解,即可得到所需的驱动电压向量。

$$V = (R^T R)^{-1} R^T S. \quad (10)$$

经计算得到校正电压后,可通过高压驱动电

路将低压控制信号转换为对应的高压驱动信号,施加于变形镜的各促动器。变形镜镜面在电压驱动下产生相应的面形变化,从而实时拟合入射的畸变波前,补偿光学系统的像差,最终输出波前质量显著提升的激光光束。

2.3 非球面光束匀化系统

非球面光束匀化系统通常由两片非球面透镜构成,前片改变入射光束分布,后片将光束准直输出,常见结构包括开普勒型与伽利略型两种,本文选用伽利略型结构。如图 4 所示,波长为 λ 的输入光束与输出光束关于光轴对称,光轴沿 z 方向。两片非球面透镜的垂轴截面坐标分别记为 r 和 R ,两镜面间距为 d ,透镜材料折射率为 n 。输入光束与输出光束在两截面上的光强分布分别表示为 $f(r)$ 与 $I(R)$ 。根据能量守恒定律,并对光强分布进行归一化处理,可建立如下关系式^[15-16]:

$$2\pi \int_0^\infty f(r) r dr = 2\pi \int_0^\infty I(R) R dR = 1, \quad (11)$$

其中: r 和 R 一一对应,给定任意 r 值只能得到唯一的 R , r 与 R 的函数关系表示为 $R=h(r)$ 。输入高斯光束光强分布函数可表示为:

$$f(r) = \frac{2}{\pi \omega_0^2} \exp\left(-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^2\right), \quad (12)$$

其中: ω_0 是高斯光束束腰半径。考虑数值可积分性,输出平顶光束光强分布使用平顶洛伦兹函数表示:

$$I(R) = \frac{1}{\pi R_0^2 \left[1 + \left(\frac{R}{R_0}\right)^q\right]^{1+\frac{2}{q}}}, \quad (13)$$

其中: R_0 为平顶光束半高宽; q 为平顶洛伦兹函数阶数。

根据能量守恒定律,输入高斯光束光强分布

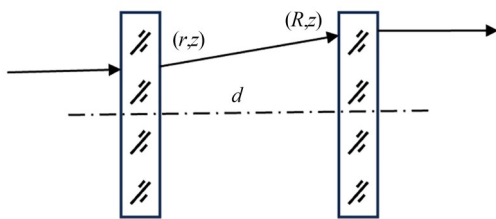


图 4 非球面透镜组结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of aspheric lens group structure

与输出平顶光束光强分布有以下关系:

$$\int_0^x f(x) x dx = \int_0^R I(x) x dx. \quad (14)$$

将式(12)与式(13)代入式(14),求解微分方程后,可得两个非球面坐标 r 与 R 之间的映射函数:

$$R = h(r) = \frac{R_0 \sqrt{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^2\right]}}{\sqrt{1 - \left\{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^2\right]\right\}^{q/2}}}, \quad (15)$$

$$r = h^{-1}(R) = \omega_0 \sqrt{-\frac{1}{2} \ln \left\{1 - \left[1 + \left(\frac{R}{R_0}\right)^q\right]^{\frac{2}{q}}\right\}}. \quad (16)$$

将映射函数代入以下光线追踪函数式即可得到两个非球面透镜的数值解 $z(r)$ 和 $z(R)$:

$$z(r) = \int_0^r \frac{1}{\sqrt{(n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d^2}{h(r) - r}\right]^2}} dr, \quad (17)$$

$$z(R) = \int_0^R \frac{1}{\sqrt{(n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{R h^{-1}(R)}\right]^2}} dR. \quad (18)$$

2.4 光束聚焦系统

图 5 表示光束经过透镜聚焦的原理示意图, $P(\theta)$ 是透镜的切趾函数,是表示光束经过透镜后光场的分布,它表示的是图 5 中汇聚在波面 W 上

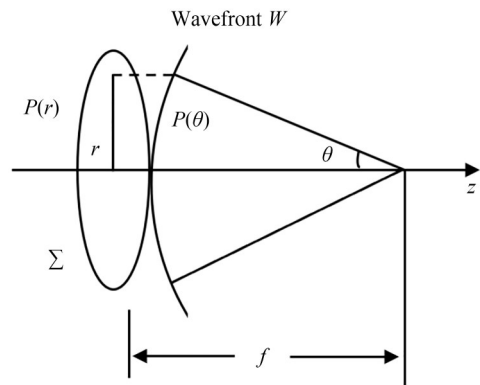


图 5 光束经过透镜聚焦原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of beam focusing through a lens

的光线密度。 $P(r)$ 表示的是透镜的光瞳函数, r 是透镜的半径, f 是焦距, θ 是光束最大会聚角。

当平面波经过透镜进行聚焦形成球面波时,其在距离透镜中心半径为 r 处的电场强度分布满足公式(19)^[25-26]:

$$r/f = g(\theta), \quad (19)$$

其中:入射函数 $g(\theta)$ 表示入射光线经过透镜会聚后的波前分布。当入射光束通过透镜会聚后,在透镜前的位置 r 处,入射光场的能量可以用 $P^2(\theta)dS$ 表示,其中代表在会聚波前的一个无限小面元。

从图5聚焦系统几何关系得出:

$$dS_0 = 2\pi r dr, \quad (20)$$

$$dS = 2\pi f^2 \sin \theta d\theta. \quad (21)$$

根据守恒定律并化简,可得切趾函数表达式为:

$$P(\theta) = P(r) \sqrt{\frac{g'(\theta)g(\theta)}{\sin \theta}}. \quad (22)$$

2.5 光束均匀性

光束均匀性,以符号 U 表示,采用均方根(Root Mean Square, RMS)方法进行量化,该方法为评估光束均匀性提供了稳健的度量标准。光束均匀性是评估光束整形过程质量与效果的关键参数,其均匀性直接关系到在需要稳定强度分布的应用中的性能表现。光束均匀性的计算

$$CT(i, j) = \frac{1}{4} \left[\frac{V_{NB}(i-1, j) + V_{NB}(i+1, j) + V_{NB}(i, j-1) + V_{NB}(i, j+1)}{V_{LC}(i, j)} \right], \quad (25)$$

其中: $CT(i, j)$ 为第 i 行第 j 列的待测像元对相邻像元的平均串扰, $V_{LC}(i, j)$ 为待测像元信号, $V_{NB}(i \pm 1, j)$ 与 $V_{NB}(i, j \pm 1)$ 为该待测像元相邻上下左右四个像元的信号。

3 机械设计与装调测试

3.1 机械结构设计

为了对红外焦平面探测器整体靶面响应不均匀性及像元间信号串扰问题进行集成化测试,根据设计的红外焦平面空间性能参数自适应检测系统光学布局,设计了如图6所示的机械结构,该机械结构由光纤准直器、半波片、偏振分束镜、 $\lambda/4$ 波片、变形镜、缩束/扩束准直透镜组件、分束镜、观测相机、聚焦物镜、非球面透镜组、反射镜组件、夏克-哈特曼波前传感器、红色十字激光器

公式依据标准 ISO 13694:2018^[29]:

$$U = \frac{1}{I_{avg}} \sqrt{\frac{1}{S} \int_S (I(x, y) - I_{avg})^2 dx dy}, \quad (23)$$

其中: I_{avg} 代表匀化光束待测区域内的平均光强, S 表示匀化光束待测区域横截面的总面积, $I(x, y)$ 表示特定横截面位置 (x, y) 处的光强。

2.6 红外焦平面探测器响应不均匀性计算

在红外焦平面器件性能测评中,探测器的像元不均匀性 UR 的计算依据标准 GB/T 17444-2013^[30]:

$$UR = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i, j) - \bar{R}]^2} \times 100\%, \quad (24)$$

其中: $\bar{R}$ 为探测器像元响应率, M 为探测器像元总行数, N 为探测器像元总列数, d 为探测器像元响应率小于平均响应率50%的像元数即死像元数, h 为探测器像元噪声大于平均噪声5倍的像元数即过热像元数。

2.7 红外焦平面探测器像元串扰计算

在红外焦平面探测器空间性能评测中,探测器像元间串扰 CT 的计算依据标准 GB/T 17444-2013^[30]:

等组成。1 550 nm 激光器输出的线偏振高斯光束通过光纤连接光纤准直器输出直径约 11.8 mm 的准直光束,进入自适应光学系统。该光束依次通过半波片、偏振分束镜和 $\lambda/4$ 波片后,入射至变形镜;通过旋转半波片可调节光束的偏振方向,从而控制经偏振分束镜透射至变形镜的光强。透射后的线偏振光经 $\lambda/4$ 波片转变为圆偏振光,经变形镜调制反射后,其圆偏振旋向发生反转;该光束再次通过 $\lambda/4$ 波片,偏振态发生变化,随后被偏振分束镜反射并导入后续光路。光束经过透镜1与透镜2、透镜3、透镜6的组合将光束缩束至合适尺寸,光束经过透镜1与透镜2组合后,缩束为直径约为 5.9 mm 的高斯光束入射到夏克-哈特曼波前传感器内,夏克-哈特曼波前传感器将探测到的波前像差以泽尼克系数表征,并转换为相应电压信号反馈至变形镜,实现波前像差的

实时闭环校正。

经过波前校正的光斑,经过分束镜 1 透射后进入光束聚焦系统,透镜 1 与透镜 6 的组合将光束缩束至直径约为 5.9 mm 的高斯光束入射到聚焦物镜内,会聚为直径 5 μm 以内的近红外小光点入射到红外焦平面探测器靶面上,并反射回原光路;反射光返回分束镜 3,反射光经过透镜 7 后,入射到对准观测相机内,在对准观测相机上对红外小光点照射到的红外焦平面探测器靶面进行成像;650 nm 粗对准十字激光器发射发散的红色十字激光,经过分束镜 4 反射进入聚焦物镜,

照射到探测器靶面上,作为红外小光点粗对准调节光路。

经过波前校正的光斑,经过分束镜 2 反射后进入光束匀化系统,透镜 1 与透镜 3 的组合将光束缩束至非球面透镜组所需的 6.4~6.5 mm 入射光束尺寸,高斯分布的光束经过非球面透镜组后,整形为直径 6.2 mm 的平顶光束;透镜 4 与透镜 5 组合成开普勒型扩束系统,在不影响光束均匀性前提下,将平顶光束尺寸扩束至直径 25 mm 以上,作为红外焦平面探测器探测效率一致性检测测试光束出射。

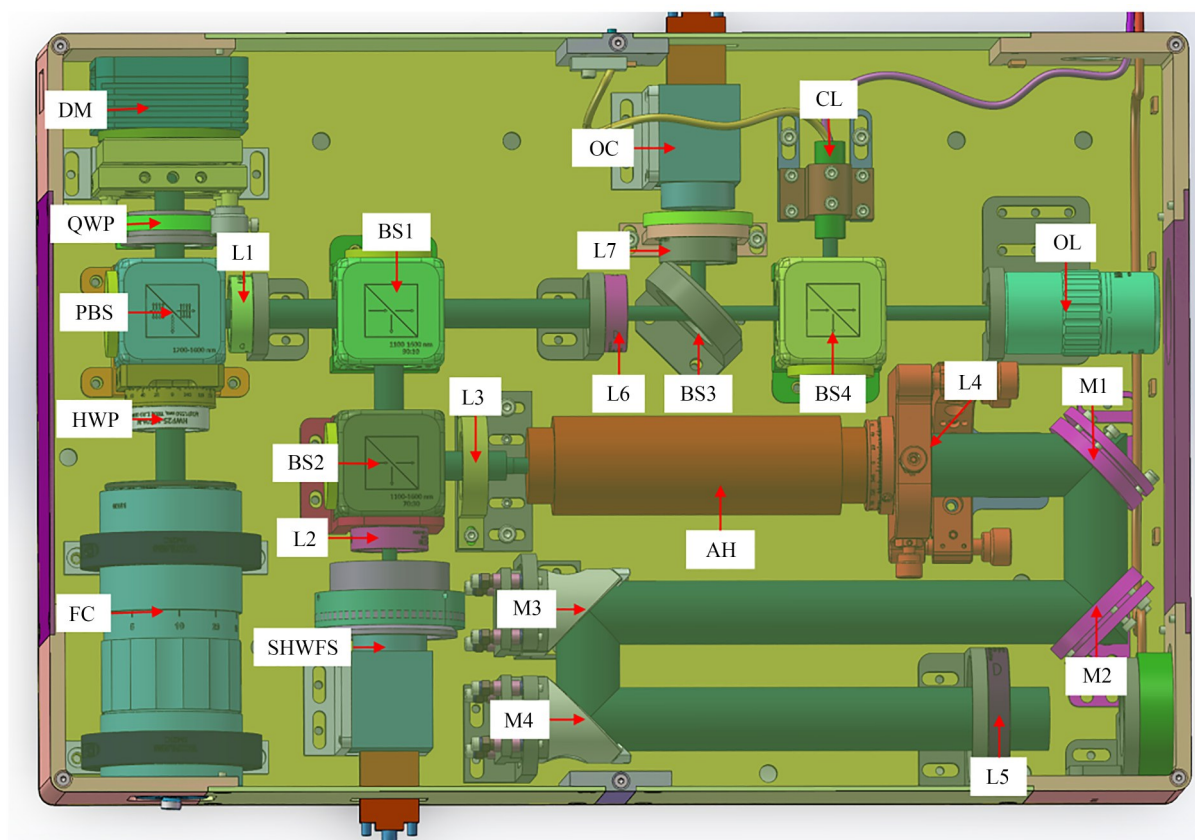


图 6 机械结构设计

Fig. 6 Design of mechanical structure

3.2 光学系统装调与测试

根据设计的机械机构加工了实验样机,如图 7 所示。自适应光学系统使用课题组自主研发的夏克-哈特曼波前传感器^[28]检测波前像差,如图 8 所示,其工作波长 400~1 800 nm,微透镜阵列子单元尺寸 319 μm ×319 μm 、焦距 25.5 mm,波前检测精度优于 0.01 λ (RMS);采用

DMH40/M-P01 压电变形镜对波前畸变进行校正,其光瞳直径为 14 mm,拥有 40 个压电驱动器,波前校正范围大于 0.645 λ (@1 550 nm)。光束聚焦系统使用 MPLNAPO50XVIR 聚焦物镜对近红外光斑进行聚焦,其工作波长 480~1 800 nm,放大倍率为 50 倍;辅助对准十字激光器工作波长为 650 nm。光束匀化系统采用

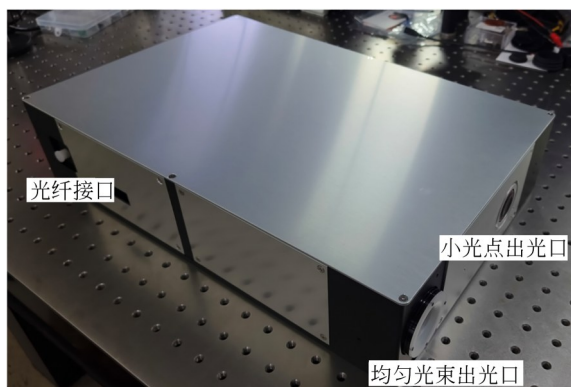


图7 红外焦平面空间性能参数自适应检测系统

Fig. 7 Infrared focal plane parameter adaptive detection system



图8 自研夏克-哈特曼波前传感器

Fig. 8 Self-developed Shack-Hartmann wavefront sensor

π shaper6_6_1550非球面光束匀化器将高斯光束整形为平顶光束,其工作波长为1 500~1 600 nm,工作口径为6.4~6.5 mm($1/e^2$),输出平顶光束半高全宽直径为6.2 mm。

为了验证自适应光学系统校正大气扰动和系统本身光学元件引入的波前像差的能力,如图9所示,分别是不启动自适应光学系统和启动自适应光学系统校正波前像差的波前图,成功将光束波前像差从0.038 2λ (RMS)校正到0.021 8λ (RMS),证明了自适应光学系统校正波前像差的能力。为了验证自适应光学系统校正波前像差前后对系统聚焦光束能力的提升,如图10所示,分别是光束聚焦系统对经过自适应光学系统波前校正前后的光束进行聚焦,成功得到的红外聚焦光斑,使用BP209-IR2/M扫描狭缝式光束轮廓仪检测该聚焦光斑直径大小,得到小光点直径分别为4.6 μm ($1/e^2$)和4.4 μm ($1/e^2$),验证了自适应光学系统对光束聚焦系统聚焦光束能力的提升。

为了对探测器像元间信号串扰进行检测,需

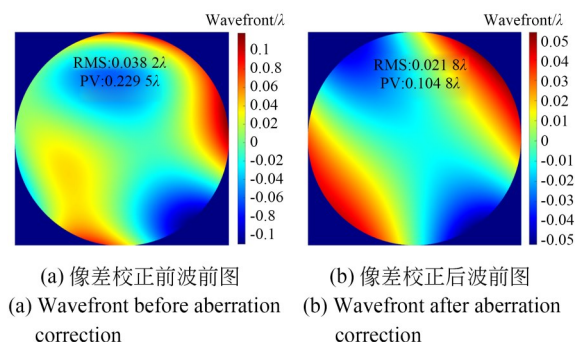


图9 自适应光学系统波前像差校正结果

Fig. 9 Correction results of wavefront aberrations of adaptive optical systems

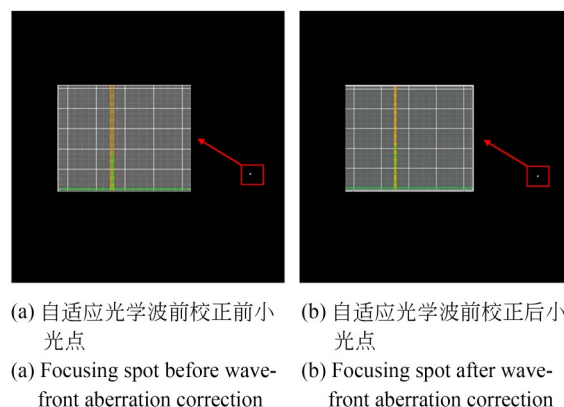


图10 小光点直径测试结果

Fig. 10 Test results of the focusing spot

要将红外小光斑精确聚焦到探测器单个像元内,为此设计了观测相机,通过对小光点照射到的探测器靶面进行成像,直接观测小光点照射范围:当红外小光点未精确聚焦到红外探测器(Win-CamD-UCD23,像素尺寸6.45 μm)单个像元内

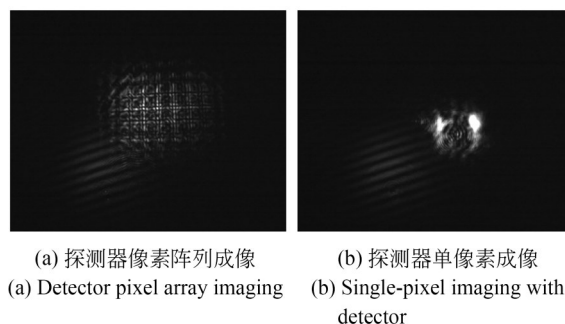


图11 小光点对准观测相机成像

Fig. 11 Image formed by the observation camera

时,其同时照射到探测器靶面多个像元上,如图 11(a)所示,观测相机可同时观测到多个像元像;当红外小光点精确聚焦到探测器单个像元内时,如图 11(b)所示,观测相机仅可观测到单个像元像,此时可对探测器像元间串扰进行测试。利用得到的红外小光点对 64×64 红外焦平面探测器(像元尺寸 $100\times 100\text{ }\mu\text{m}$)进行像元间串扰测试,利用式(25)计算得到探测器像元间串扰为 6.08%。

非球面光束匀化系统利用非球面匀化器将高斯光束整形为直径 6.2 mm 的平顶光束,并利用开普勒型扩束系统,将其扩束为直径 25 mm 以上的匀化光束。图 12 为使用像元尺寸 $3.45\text{ }\mu\text{m}$ 、分辨率为 $2\,560\times 2\,048$ 的红外相机采集的匀化光束,利用标准 ISO 13694:2018^[29]即式(23)计算得到匀化光束均匀性为 96.08%。图 13 为利用系

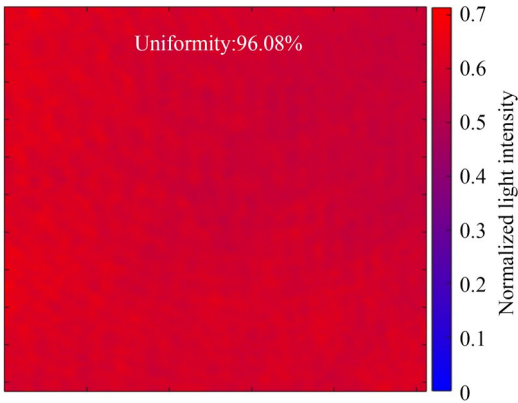


图 12 相机采集匀化光束
Fig. 12 Uniform beam captured by camera

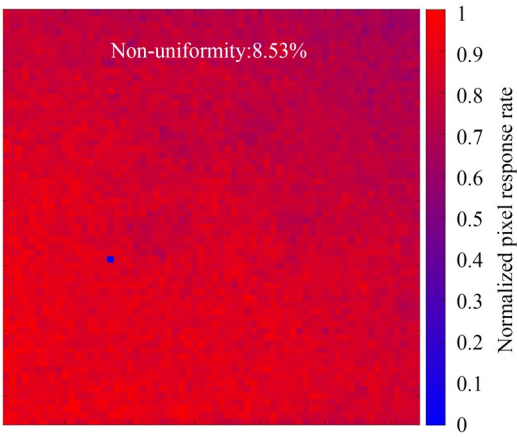


图 13 红外焦平面探测器响应不均匀性测试结果
Fig. 13 Test results of response non-uniformity for infra-red focal plane detectors

统生成的匀化光束对 64×64 红外焦平面探测器(像元尺寸 $100\times 100\text{ }\mu\text{m}$)响应不均匀性进行测试得到的测试结果,利用标准 GB/T 13584-2011^[30]即式(24)计算得到红外焦平面探测器响应不均匀性为 8.53%。

如表 1 所示,为本文光束匀化方法与现有三种主流技术对比。液晶空间光调制器、非球面透镜组和微透镜阵列光束匀化技术,光束均匀性均未达到 96%,且光束尺寸偏小。在红外焦平面探测器空间性能参数测试方面,现有三种主流技术不能满足对匀化光束的大尺寸、高均匀性的测试需求,因此本文所提光束匀化方法在红外焦平面探测器空间性能参数测试方面更具优势。

表 1 本文方法和现有技术对比
Tab. 1 Comparison of this work with existing technologies

	本文方法	液晶空间光调制器 ^[9]	非球面透镜 ^[19]	微透镜阵列 ^[13]
匀化光束均匀性	96.08%	95.3%	95.69%	87.6%
匀化光束尺寸/mm	$\Phi 25$	8×8	$\Phi 1$	7×5

4 结 论

本文设计并加工了一套集成化的高精度红外焦平面空间性能参数自适应检测系统,该系统能

够利用自适应光学系统校正波前畸变,从而生成了光斑直径 $4.4\text{ }\mu\text{m}$ 、波前像差 $0.021\,8\lambda(\text{RMS})$ 的高质量小光点,以及直径大于 25 mm、均匀性 96.08% 的大面积匀化光束。该系统有效解决了

高密度红外焦平面探测器在像元间串扰和响应不均匀性测试中对光源提出的双重需求,为探测器性能的精确量化评估提供了可靠手段。与分立测试方案相比,本系统在保持光学性能先进的同时,显著提升了测试集成度与操作效率。未来将通过优化系统稳定性并扩展其测试适用范围,进一步支撑高性能红外焦平面探测器研制与评测工作。

参考文献:

- [1] 叶振华,周文洪,胡伟达,等. 碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(1): 4-7.
YE Z H, ZHOU W H, HU W D, *et al.* Spectral study on response of HgCdTe ir two-color detector arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(1): 4-7. (in Chinese)
- [2] 李日忠,黄俊斌,秦石乔. 四象限光电探测器象限间一致性测量方法[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2610-2612.
LI R Z, HUANG J B, QIN S Q. Measuring the response coherence between the four quadrants of quadrant photo detector[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(6): 2610-2612. (in Chinese)
- [3] 聂安然,裴桢炜,孙晓兵,等. 分焦面偏振探测器的串扰研究[J]. 光学学报, 2025(5): 0504001.
NIE A R, QIU Z W, SUN X B, *et al.* Crosstalk of division of focal plane polarization detectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025(5): 0504001. (in Chinese)
- [4] 元岩,朱英杰,张晶,等. 激光光束整形技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(5): 0500005.
QI Y, ZHU Y J, ZHANG J, *et al.* Research progress of laser beam shaping technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(5): 0500005. (in Chinese)
- [5] SIZOVA I, MOSKALEV T, MIKHEEV L. Laser beam shaping with circular serrated apertures. I. Spatial filtering [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(18): 4905-4909.
- [6] SIZOVA I, MOSKALEV T, STAVROVSKII D. Correction of shape distortions in laser beams apodized with circular serrated apertures [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(16): 4861-4870.
- [7] 罗时荣,吕百达. 三维平顶高斯光束通过环形光阑的传输特性[J]. 激光技术, 2000, 24(4): 1213.
LUO S R, LÜ B D. Propagation of three-dimensional flattened Gaussian beams through an annular aperture [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(4): 1213. (in Chinese)
- [8] 王妹懿,刘智,林鹏,等. 基于液晶空间光调制器的激光束散角控制技术[J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1430-1438.
WANG S Y, LIU Z, LIN P, *et al.* Laser beam scatter angle control technology based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(11): 1430-1438. (in Chinese)
- [9] 陈重琳. 利用液晶空间光调制器将激光整形为平顶光束的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
CHEN CH L. *Investigation on Flat-top Laser Beam Shaping Using Liquid Crystal Spatial Light Modulator*[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 陈怀新,隋展,陈赅培,等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1103-1106.
CHEN H X, SUI Z, CHEN Z P, *et al.* Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9): 1103-1106. (in Chinese)
- [11] TAI Y H, MIYAMOTO T. Experimental characterization of high tolerance to beam irradiation conditions of light beam power receiving module for optical wireless power transmission equipped with a

作者贡献声明:

刘玲志:算法实现,实验验证,论文构思和撰写;

刘长明:资源获取,实验指导;

庄新港:资源获取,项目管理;

杨忠明:实验指导,项目管理,论文构思与审核,资源获取。

- fly-eye lens system[J]. *Energies*, 2022, 15(19): 7388.
- [12] 郑建洲, 于清旭, 关寿华. 正交光楔列阵光学系统的小尺度不均匀性[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 38.
ZHENG J Z, YU Q X, GUAN S H. Small-scale non-uniformity of cross segmented wedge array focus system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 38. (in Chinese)
- [13] 刘荣战. 基于微透镜阵列的蓝光匀化系统设计及实验研究[J]. 激光技术, 2024, 48(4): 499-504.
LIU R Z. Design and experimental research of blue light homogenization system based on microlens array[J]. *Laser Technology*, 2024, 48(4): 499-504. (in Chinese)
- [14] HARDER I, LANO M, LINDLEIN N, *et al.* Homogenization and beam shaping with microlens arrays[J]. *Photon Management*, 2004, 5456: 99.
- [15] 陈凯, 李平雪, 陈檬, 等. 高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计和面形参数分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(3): 032201.
CHEN K, LI P X, CHEN M, *et al.* Design and analysis of surface parameters of aspheric lenses system converting Gaussian beam to flat-top beam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(3): 032201. (in Chinese)
- [16] 钟旭森, 唐晓军, 王钢. 整形为平顶洛伦兹光束的非球面透镜组研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(4): 515-518.
ZHONG X S, TANG X J, WANG G. Study on aspheric lens group in laser beam shaping system[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(4): 515-518. (in Chinese)
- [17] FRIEDEN B R. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(11): 1400-1403.
- [18] EKIMENKOVA A S, OREKHOVA M K, VOZNESENSKAYA A O, *et al.* Design of an optical system for a laser beam shaping system based on aspheric polymer lenses[J]. *Journal of Optical Technology*, 2020, 87(11): 698-702.
- [19] BI J F, ENGARNEVIS A, ZHANG J Y, *et al.* Flat-top beam shaping and optimization based on a single aspheric lens[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 183: 112391.
- [20] 高瑞含. 高斯光束整形技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
GAO Y H. *Research of Gaussian Beam Shaping* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [21] LASKIN A, LASKIN V. Imaging techniques with refractive beam shaping optics[J]. *Laser Beam Shaping XIII*, 2012, 8490: 84900J.
- [22] SINGH R K, SENTHILKUMARAN P, SINGH K. Tight focusing of vortex beams in presence of primary astigmatism[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(3): 576-588.
- [23] SINGH R K, SENTHILKUMARAN P, SINGH K. Structure of a tightly focused vortex beam in the presence of primary coma[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8): 1501-1510.
- [24] KHONINA S N, KOTLYAR V V, WANG Y. Diffractive optical element matched with Zernike basis[J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2001, 11(2): 442-445.
- [25] 樊硕. 偏振与相位调制矢量光束紧聚焦特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
FAN S. *Research on Tight Focusing Characteristics of Polarized and Phase Modulated Vector Beams* [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023. (in Chinese)
- [26] 李硕. 轴对称偏振光束紧聚焦特性研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2024.
LI S. *Study on Tight Focusing Characteristics of Axisymmetric Polarized Light Beam* [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2024. (in Chinese)
- [27] BABCOCK H W. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1953, 65: 229.
- [28] DENG Y X, HE W L, XIN L, *et al.* Sequential spot alignment algorithm: Enhancing dynamic range of Shack-Hartmann sensors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 190: 108952.

- [29] International Organization for Standardization. Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam power (energy) density distribution: ISO 13694: 2018 [S].

2018.

- [30] 红外焦平面阵列参数测试方法 现行 standard_GB/T 17444-2013[标准]: GB/T 17444—2013[S].

作者简介:



刘玲志(1996—),男,山东枣庄人,博士研究生,主要从事光学干涉检测、光束匀化等方面的研究。E-mail: 202214041@mail.sdu.edu

通讯作者:



杨忠明(1987—),男,山东德州人,教授,博士生导师,2017年于南京理工大学获得博士学位,主要从事光学精密测试技术、光学系统设计、太赫兹波束调控技术等方面的研究。E-mail: zhongming.yang@sdu.edu.cn