

基于双焦透镜的双踪远场自动准直

宗楠^{1,2}, 唐顺兴^{1,2*}, 郭亚晶^{1,2}¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;²上海交通大学, IFSA 协同创新中心, 上海 200240

摘要 在光束传输控制中, 反馈系统需要具有较高的角度分辨率, 以达到自动准直的精度要求, 此外还需要具备一定的角视场, 以降低对初始安装和调试的精度要求。提出了一种基于双焦透镜的双踪远场自动准直方案, 在同一光学系统中实现了高精度和大视场两种角度分辨率的远场图像反馈系统。基于矩阵光学理论对远场图像反馈系统进行数值分析, 给出了双焦透镜的等效传输矩阵, 并分析了双焦透镜的角度分辨率和视场特性。设计并开展实验对基于双焦透镜的双踪远场自动准直方案进行了性能演示, 实验结果表明, 高精度下的角度分辨率约为大视场下角度分辨率的 6.9 倍, 与设计值 (6.6 倍) 基本相符。

关键词 光学设计; 高功率激光; 自动准直; 远场成像; 矩阵光学

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230697

1 引言

多路高功率激光系统可以输出功率超过兆焦耳的纳秒脉宽的脉冲, 已被广泛应用于高能物理实验、惯性约束聚变、天体物理、材料科学等领域。高功率激光系统一般是基于钕玻璃的固体激光系统, 光路长度超过百米, 需要对光束传输的位置和指向进行精密控制。高功率激光系统通常配备有高能拍瓦系统, 用于开展快点火、X 射线诊断、质子加速等研究。高能拍瓦系统一般基于啁啾脉冲放大 (CPA) 技术方案实现^[1-2], 其终端采用大口径光栅作为脉冲压缩器, 并采用离轴抛物面反射镜作为聚焦元件, 二者都对光束与光轴的对准精度提出了极为苛刻的要求。若光束偏离光栅压缩器设计入射方向或离轴抛物面镜入射光轴, 装置输出的脉冲宽度、信噪比、靶面聚焦特性等就会受到一定程度的影响。因此, 无论是高功率激光系统还是高能拍瓦系统, 研究人员均开展了大量的研究, 以期在满足大视场要求的同时保证光束指向反馈控制达到自动准直的精度要求^[3-5]。

大型激光设备的自动准直任务包括两个方面: 一是光束中心和光学元件中心的对准, 二是光束传输方向的精确控制。在进行光束传输方向的闭环控制时, 一般采用会聚透镜焦平面上的探测器来获得平行光束在焦平面上会聚光斑的位置, 即远场位置。通过对实际光束位置与期望光束位置之间的偏差进行计算, 可以获取光束的指向偏差, 然后将其反馈给计算机控制

系统, 便可实现精密的指向控制。受限于探测器尺寸、分辨率以及光学系统的复杂程度, 一般无法在同一光束指向反馈系统中实现高精度、大视场的远场图像反馈。研究人员通常采用如下两种方案来解决该问题: 一是通过精密光机设计来保证较高的初装精度, 从而确保初装结束后远场图像反馈系统可以捕捉到远场光斑; 二是配备双通道远场图像反馈系统, 其中一个通道具有较大的视场角, 通过该通道保证远场光斑进入远场视场, 另外一个通道满足远场图像反馈的高精度调整需求, 从而降低对初装精度的要求。美国国家点火装置 (NIL) 的研究人员设计了在线可替换单元 (LRU) 装调策略, 尤其是中箱体在线精密装调方案, 以实现较高的初装精度^[6], 从而解决了高精度图像反馈系统较小视场角带来的问题。“天光一号”激光装置采用光束分束设计的双通道远场图像反馈系统进行自动准直^[7], 其中一个通道的指向角放大 3 倍用于基本定位, 以保证视场, 另一个通道的指向角放大 8 倍进行准确定位, 以保证精度。该装置虽然在一定程度上解决了自动准直时远场图像反馈系统面临的高精度和大视场之间的矛盾, 但系统复杂程度和研制成本相对较高。

笔者提出了一种基于双焦透镜的双踪远场自动准直方案, 该方案在同一套远场图像反馈系统中既能实现微弧度的高精度远场图像反馈, 又能实现数毫弧度的远场视场, 既降低了初装精度以及对机械结构长期稳定性的要求, 又降低了系统的复杂程度和研制成本。

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-05-20; 录用日期: 2023-06-30; 网络首发日期: 2023-07-15

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助项目 (2019246)、中国科学院 A 类战略性先导科技专项项目 (XDA25020104)

通信作者: *leo@siom.ac.cn

2 基于双焦透镜的远场图像反馈光学系统

2.1 光束精密自动准直方案

光束指向角可以通过远场图像反馈系统进行测量。平行光束与透镜光轴之间的角度偏差为 δ ，远场透镜焦距为 f ，焦平面上远场光斑偏离光轴中心的距离为 Δd ，则光束的角度偏差可写成 $\delta = \Delta d / f^{[8]}$ 。探测器一般采用面阵相机，相机的像元尺寸与远场图像反馈系统等效焦距的比值即为

远场图像反馈系统的像素角分辨率，其在高功率激光系统中一般要求达到数十微弧度量级^[9-10]。探测器靶面尺寸一般为 2000 pixel×2000 pixel 左右，因此远场图像反馈系统所能监测到的最大角度范围一般在数十毫弧度量级，从而对初装精度提出了较高要求^[11-12]。

如图 1 所示，笔者基于二阶“鬼像”原理提出了基于双焦透镜的双踪远场自动准直方案。采用该方案可在同一成像面上获取两个远场图像，其落点表征了不同角度分辨率下的光束指向。

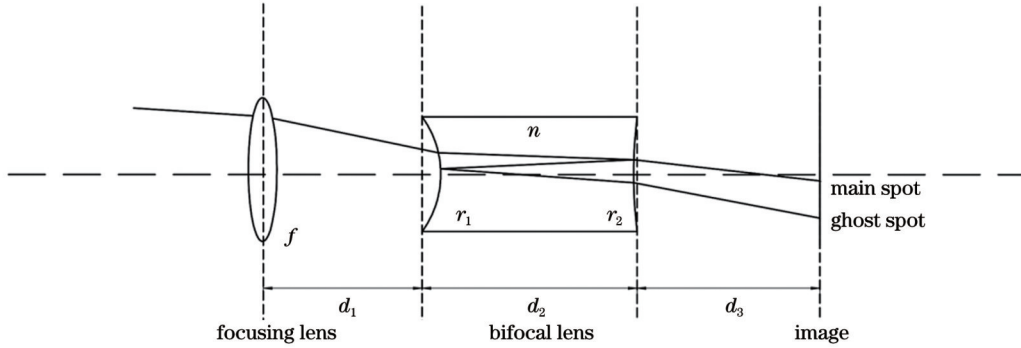


图 1 基于双焦透镜的远场成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a far-field imaging system based on a bifocal lens

该远场图像反馈系统由会聚透镜和双焦透镜组成，双焦透镜前后表面镀分光膜，以获取较强的二阶“鬼光束”。物面发出的平行光束经过会聚透镜后入射双焦透镜，一部分光束直接透过双焦透镜会聚于像面，称为“主光束”，另一部分光束依次经过双焦透镜的后表面和前表面反射形成二阶“鬼光束”。通过匹配双焦透镜的前后表面曲率，二阶“鬼光束”和主光束会聚于同一像面，通过相机可在像

面上同时记录二阶“鬼光束”和主光束两个远场光斑图像。

通过设计会聚透镜、双焦透镜及其相对位置关系，基于双焦透镜的双踪远场图像反馈系统可以实现高精度和大视场的远场图像反馈。

2.2 双焦透镜系统的矩阵光学描述

基于近轴矩阵光学理论^[13-14]，从会聚透镜入射面至像面的传输矩阵 T_M 可以写成

$$T_M = \begin{bmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{r_2} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{nr_1} & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中： f 为会聚透镜的焦距； n 为双焦透镜材料的折射率； r_1, r_2 分别为双焦透镜前后表面的曲率半径； d_1 为双焦透镜前表面至会聚透镜的距离； d_2 为双焦透镜中心厚度； d_3 为双焦透镜后表面至像面的距离。 T_M 可以记为

$$T_M = \begin{bmatrix} f_{M_1}(n, r_1, r_2, d_1, d_2, d_3) & f_{M_2}(n, r_1, r_2, d_1, d_2, d_3) \\ f_{M_3}(n, r_1, r_2, d_1, d_2) & f_{M_4}(n, r_1, r_2, d_1, d_2) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

二阶“鬼光束”传输矩阵 T_G 可写成

$$T_G = \begin{bmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-1}{r_2} & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n_2}{nr_1} & \frac{1}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

T_G 可以记为

$$T_G = \begin{bmatrix} f_{G_1}(n, r_1, r_2, d_1, d_2, d_3) & f_{G_2}(n, r_1, r_2, d_1, d_2, d_3) \\ f_{G_3}(n, r_1, r_2, d_1, d_2) & f_{G_4}(n, r_1, r_2, d_1, d_2) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

该远场图像反馈系统中从会聚透镜入射面至像面之间的光学元件可以等效为焦距为 F 的透镜。需要说明的是，等效透镜的主面与会聚透镜的主面有一定偏差，偏差量记为 L 。将会聚透镜表面至像面的等效光学传输矩阵重写为

$$\begin{bmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & F \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ -\frac{1}{F} & 1 - \frac{L}{F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & F \\ -\frac{1}{F} & 1 - \frac{L}{F} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

比较式(2)、(5)以及式(4)、(5)可以得到 $f_{M_3}(n, r_1, r_2, d_1, d_2) = -\frac{1}{F}$, $f_{G_3}(n, r_1, r_2, d_1, d_2) = \frac{1}{F'}$, 其中 F 为主光束传输光路中等效透镜的有效焦距, F' 为二阶“鬼光束”传输光路中等效透镜的有效焦距。由

于等效透镜的有效焦距不同, 主光束和二阶“鬼光束”具有不同的角度分辨率。为了评估二者角度分辨率的比值, 将双焦透镜后表面简化为平面, 即 $r_2 = \infty$, 则主光束和二阶“鬼光束”角度分辨率的比值 α 可以写成

$$\alpha = \frac{f_{G_3}}{f_{M_3}} = \frac{f(n-1)[1-d_2(4/r_1)] + r_1 + d_1(n-1)[1-d_2(4/r_1)] + 2(nf + nd_1 - 2d_2)}{f(n-1) + r_1 - d_1(n-1)}. \quad (6)$$

可见, 可以通过改变 r_1, n, f, d_1, d_2, d_3 实现不同的主光束与二阶“鬼光束”角度分辨率之比。

2.3 光学仿真分析

如图2所示, 笔者设计了用于演示基于双焦透镜的双踪远场自动准直方案的远场图像反馈实验。为实现较好的演示效果, 在会聚透镜前面配置了一套具有一定角放大率的开普勒式望远系统, 用其对入射光束指向角进行放大。

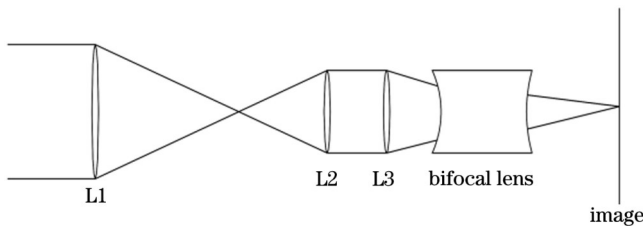


图2 系统总体光学设计

Fig. 2 Overall optical design of the system

图3为光学设计的ZEMAX仿真结果, 其中图3(a)为总体光学结构, 图3(b)为双焦透镜的局部放大结果。镜头设计结果见表1。

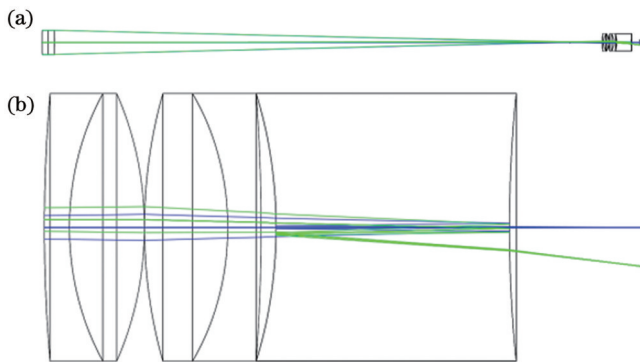


图3 镜头的光学结构。(a) 镜头的总体光学结构; (b) 双焦透镜的光学结构

Fig. 3 Optical construction of the lens. (a) Overall optical construction of the lens; (b) optical construction of the bifocal lens

主光束分别以 0° 和 0.3° 入射远场图像反馈系统, 其在像面上的点列图如图4所示。 0.3° 入射时, 像面上光斑

Parameter	Value
Central wavelength /nm	500–1053
Pupil diameter /mm	12.7
Curvature of the left surface of the lens /mm	50
Curvature of the right surface of the lens /mm	17.54
Transmittance of dielectric film	60%–80% @ 500–1053 nm
Back focal length /mm	8.04

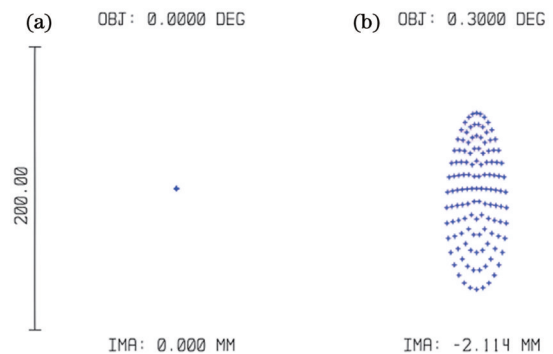


图4 主光斑光线追迹结果。(a) 以 0° 入射; (b) 以 0.3° 入射
Fig. 4 Ray tracing results of the main spot. (a) Incidence at 0° ; (b) incidence at 0.3°

的中心偏移量约为 2.11 mm, 像面上远场光斑位置随入射角度变化的系数为 7.03 mm/°。如果采用像元尺寸为 $4 \mu\text{m}$ 的相机, 则其像素角度分辨率为 $9.96 \mu\text{rad}/\text{pixel}$ 。

二阶“鬼光束”分别以 0° 和 0.04° 入射远场图像反馈系统, 其在像面上的点列图如图5所示。 0.04° 入射时, 像面上光斑的中心偏移量约为 1.86 mm, 像面上远场光斑位置随入射角度变化的系数为 46.5 mm/°。如果采用像元尺寸为 $4 \mu\text{m}$ 的相机, 则其像素角度分辨率为 $1.51 \mu\text{rad}/\text{pixel}$, 角度放大率约为主光束的 6.6 倍。

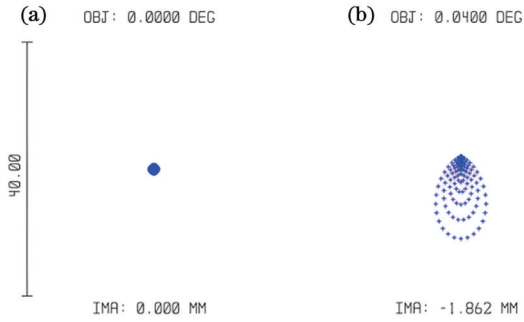


图 5 鬼像光斑光线追迹结果。(a)以 0° 入射;(b)以 0.04° 入射
Fig. 5 Ray tracing results of the ghost spot. (a) Incidence at 0° ; (b) incidence at 0.04°

3 实验设计及结果分析

根据光学设计结果加工了一套远场图像反馈系统进行测试,实验光路如图 6 所示。1064 nm 光纤光源准直为平行光束,扩束后经一对二维电动反射镜进入远场图像反馈系统。相机感光面位于系统像面,用于记录远场光斑。采用 Allied Vision 公司的 Alvium 1800 U-500 相机,其像素尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$,靶面像素数为 $2592 \text{ pixel (H)} \times 1944 \text{ pixel (V)}$ 。

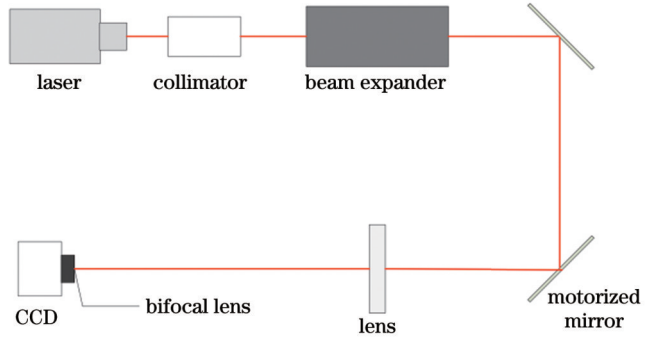
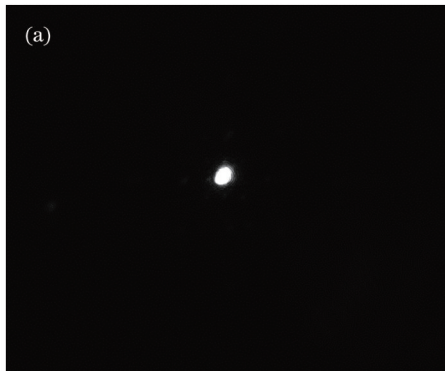


图 6 实验光路图示意

Fig. 6 Schematic diagram of experimental optical system

实验中获得的远场光斑图像如图 7 所示。当光束入射角度偏差较大时,二阶“鬼光束”远场光斑未能进入视场,视场中仅能采集到主光束的远场光斑,如图 7(a)所示。通过主光束远场光斑计算出射光束角度偏差,并将其反馈给控制系统,调节电动反射镜。随着入射光束角度偏差减小,二阶“鬼光束”的远场逐渐出现在视场内,如图 7(b)所示。这时可以通过二阶“鬼光束”远场光斑计算出更为精确的入射光束角度的偏差量,将其反馈给控制系统,便可实现更高精度的光束指向控制。

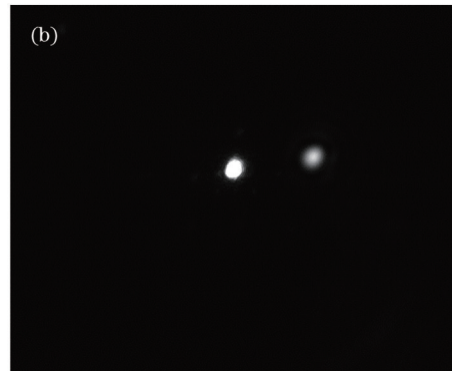


图 7 双光斑图像。(a)入射角较大时仅有主光斑存在于视场内;(b)主光斑与鬼像光斑同时存在于视场内

Fig. 7 Dual-spot images. (a) Only the main spot in the field-of-view; (b) both the main spot and the ghost spot in the field-of-view

绘制出了主光束和二阶“鬼光束”远场光斑中心坐标变化量与入射角度变化量之间的关系曲线,如图 8 所示,

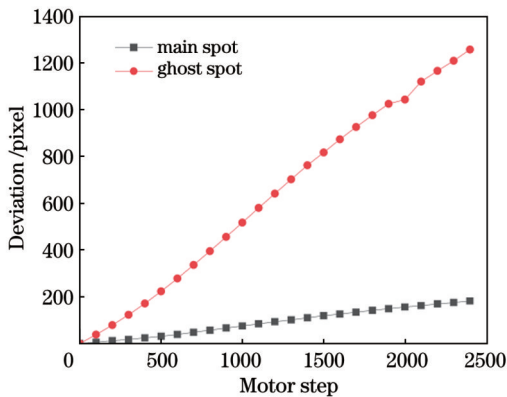


图 8 固定步进值的两光斑的像素偏移量

Fig. 8 Pixel deviations of the two spots with fixed step value

其中远场光斑中心偏离量以像素数表示,入射角度变化量以步进马达步数表示。

通过线性拟合两条曲线的斜率可知,相同入射角下二阶“鬼光束”远场光斑中心坐标变化量约为主光束远场光斑中心坐标变化量的 6.9 倍,与设计结果(放大 6.6 倍)相比偏差约为 4.5%。

由于激光束具有一定的发散角而且小光束具有一定的焦深,实验中的相机感光面与设计像面有一定的轴向位置偏差。进一步的仿真表明,该轴向偏差为 1 mm 和 -1 mm 时,二阶“鬼光束”与主光束角度放大率的比值分别为 6.31 和 6.97,偏差分别为 4.3% 和 5.6%。

4 结 论

笔者提出了一种基于双焦透镜的双踪远场自动准直方案,并给出了双焦透镜的光学设计实例。基于矩

阵光学理论对远场图像反馈系统进行数值分析,给出了双焦透镜等效传输矩阵并模拟了双焦透镜的角度分辨率和视场特性。设计并开展实验对基于双焦透镜的双踪远场自动准直方案进行了性能演示。实验结果表明,远场图像反馈系统的实际效果与设计相符。本设计选择二阶“鬼光束”作为高精度光束指向反馈,设计轻量且集成度高,利用单台相机即实现了与双相机光束指向反馈系统相同的效果。在需要高精度光束指向控制的场景中,可根据所述方法设计出符合实际需求的光束指向反馈系统,从而降低对机械装配精度和机械件长期稳定性的要求,同时降低准直系统的复杂性及研制成本。

参 考 文 献

- [1] Vaupel A, Bodnar N, Webb B, et al. Concepts, performance review, and prospects of table-top, few-cycle optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Optical Engineering*, 2013, 53(5): 051507.
- [2] 赵其镛, 丛振华, 刘兆军, 等. 百微焦飞秒光纤啁啾脉冲放大激光系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0701001.
Zhao Q K, Cong Z H, Liu Z J, et al. Hundred microjoule femtosecond fiber chirped pulse amplification laser system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0701001.
- [3] 陈知非, 姚轲, 范琛, 等. 离轴八程放大器自动准直技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(9): 091004.
Chen Z F, Yao K, Fan C, et al. Automated alignment research on off-axis eight-pass laser amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(9): 091004.
- [4] 王增超, 孟阔, 陈恺, 等. 基于宽带啁啾光纤光栅掺铒光纤激光啁啾脉冲放大方法研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1101002.
Wang Z C, Meng K, Chen K, et al. Research on erbium-doped fiber lasers using chirped pulse amplification method based on broadband chirped fiber grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1101002.
- [5] Leach R R, Beltsar I, Burkhart S, et al. Near field intensity trends of main laser alignment images in the National Ignition Facility (NIF)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9345: 93450D.
- [6] Fred H, Elden A, Erlan B, et al. Beam control and diagnostic functions in the NIF transport spatial filter[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3047: 692-699.
- [7] 李静, 王钊, 胡凤明, 等. 天光一号预放大器自动准直技术研究[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(6): 1112-1116.
Li J, Wang Z, Hu F M, et al. Study on automatic collimation technology of preamplifier for heaven-I [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(6): 1112-1116.
- [8] 陈庆浩, 徐仁芳, 彭增云, 等. 用于激光核聚变装置的光路自动准直[J]. *光学学报*, 1995, 15(5): 531-535.
Chen Q H, Xu R F, Peng Z Y, et al. Automatic optical alinement for laser-fusion facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(5): 531-535.
- [9] 郭嘉富, 王拯洲, 段亚轩, 等. 基于双目标识别和准直数学模型改进的光路自动准直方法[J]. *光子学报*, 2022, 51(11): 1114006.
Guo J F, Wang Z Z, Duan Y X, et al. Automatic collimation method of optical path based on double target identification and improved collimation mathematical model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 1114006.
- [10] 赵维谦, 谭久彬, 邱丽荣, 等. 激光光束特定方向准直方法与技术[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(1): 61-64.
Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R, et al. Laser beam collimation method and technology in given beam direction[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2004, 15(1): 61-64.
- [11] 刘代中, 徐仁芳, 范滇元. 激光聚变装置光束自动准直系统的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(2): 1-5.
Liu D Z, Xu R F, Fan D Y. Evolution of beam automatic alignment system in laser-fusion facility[J]. *Laser & Optronics Progress*, 2004, 41(2): 1-5.
- [12] 高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 等. 神光 II 升级装置远场准直系统研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 065204.
Gao Y Q, Zhu B Q, Liu D Z, et al. Far field auto-alignment system used in SG-II -Up system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 065204.
- [13] 张以谟. *应用光学*[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 65-71.
Zhang Y M. *Applied optics*[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 65-71.
- [14] 石荣宝, 季铁群, 赵知诚, 等. 适于逆光条件的消鬼像镜头光学设计与实验验证[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0922002.
Shi R B, Ji Y Q, Zhao Z C, et al. Optical design and experimental verification of a reduced ghost image lens for backlight condition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0922002.

Dual-Trace Far-Field Automatic Alignment Based on Bifocal Lens

Zong Nan^{1,2}, Tang Shunxing^{1,2*}, Guo Yajing^{1,2}

¹Joint Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Collaborative Innovation Center of IFSA, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract

Objective High-power laser systems are capable of outputting nanosecond pulses with power exceeding megajoule levels, allowing high-temperature and high-density conditions to be achieved in laboratory settings. As a result, they are widely employed in various fields such as high-energy-density physics experiments, inertial confinement fusion, astrophysics, and materials science. Solid-state laser systems based on neodymium glass with long optical path lengths are typically used in high energy laser system, which warrant precise control of beam quality and placement. Researchers have conducted extensive studies to maintain a large field-of-view while improving collimation accuracy. However, owing to the limited resolution and field-of-view of optical systems, it is generally not

feasible to achieve high accuracy and a large field-of-view in the same collimation system. Therefore, a larger field-of-view is often compromised to ensure high automatic collimation accuracy. In such cases, precise mounting and a highly stable mechanical structure are required to ensure that the collimated beam enters the field-of-view. However, given that the limits of mounting accuracy and long-term stability of the mechanism can only reach a few hundred microradians, the outcomes of this approach are limited. In this study, we proposed a dual-trace far-field automatic alignment scheme using a bifocal lens that enables us to achieve microradian collimation accuracy and a field-of-view of several milliradians in the same optical system. This approach significantly reduces the need for precision mounting and long-term stability of the mechanical structure.

Methods Based on the ghost imaging theory of bifocal lenses, this study proposed a scheme for acquiring far-field feedback images with two different angular resolutions on a single camera. The core of the scheme is a bifocal-thick lens with different curvature radii on the left and right surfaces, coated with a 0° spectral dielectric film on both sides. For the off-axis incident beam, owing to the spectral effect of the dielectric film, a second-order ghost image is generated by the secondary reflection of the beam on the right inner surface of the lens; that is, a brighter main spot and a dimmer ghost spot can be obtained simultaneously on the imaging plane. Owing to the multiple reflection and transmission processes, the angular deflection sensitivity of the ghost spot is much greater than that of the main spot; therefore, it exhibits a higher regulation accuracy in the feedback process. The low angular deflection sensitivity of the main spot ensures a field-of-view of several milliradians, whereas the high angular deflection sensitivity of the ghost spot ensures the collimation accuracy of microradians. A single imaging system that incorporates this bifocal lens is sufficient for far-field alignment. This study provided a design example of a bifocal lens and conducted a numerical analysis based on matrix optics theory and ZEMAX. The equivalent transfer matrix of the bifocal lens was used to demonstrate its focusing properties.

Results and Discussions The ray tracing results for the main spot, as obtained from the ZEMAX simulation, are shown in Fig. 4. The offset in the image plane is about 2.11 mm. The ray tracing results for a second-order ghost image in the system are shown in Fig. 5. The offset in the image plane is about 1.86 mm. For the same incident-angle offset, the angular magnification of the second-order ghost image is approximately 6.6 times that of the main spot under the given design parameter. To further verify the feasibility and effectiveness of the design, an experimental optical path was built based on the theoretical design. The experimental optical path is illustrated in Fig. 6. The spot offsets for the same step values obtained in the experiment are shown in Fig. 8. When determining the angular magnification of the spot at the same offset, the angular magnification of the ghost spot is observed to be approximately 6.9 times that of the main spot, which is a deviation of approximately 4.5% compared to the simulated result of 6.6 times.

Conclusions This paper proposed a dual-trace far-field auto-alignment scheme using a bifocal lens and provided a design example to illustrate the implementation of the system. The theoretical results for the lens were analyzed through calculations and simulations, while its imaging performance was experimentally verified. Experimental verification confirms that the imaging performance is consistent with the design specifications. The proposed design leverages the ghost image of an optical lens, thereby enabling multiple imaging with a single bifocal lens in a lightweight and highly integrated manner. Combining this design with existing automatic alignment schemes is expected to reduce the requirements for mechanical mounting and long-term stability, minimize redundancy, and enable practical applications in high-power laser systems.

Key words optical design; high power laser; automatic alignment; far-field imaging; matrix optics