

激光远场聚焦特性实验研究

张合勇^{1,2} 郭 劲¹ 赵 帅^{1,2} 王挺峰¹ 邵俊峰¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033
²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为使发射光束以会聚形式传播,进行了室外 450 m 和 300 m 激光聚焦实验。将扩束准直后的光束通过伽利略望远系统,采用精密位移台调整负透镜与正透镜间距,实现不同距离的光斑聚焦。然后用功率计测量 450 m 焦点处的功率均值为 47.67 mW,标准偏差 0.67 mW。并利用光束质量分析仪测量聚焦光斑的能量分布。进而采用 Matlab 中 EDGE 函数以及 Sobel 算子进行边界提取,同时进行中值滤波和 53H 法滤波,最后得到在给定边界提取阈值下的光斑直径为 5.56 mm,标准偏差为 0.24 mm;光斑中心漂移 0.56 mm,占光斑直径 10.43%。实验测量聚焦光斑能量损失严重,初步分析为 3 个因素:受限孔径衍射、激光传输衰减、像差引起光斑弥散。其中衍射和像差引起的衰减占主导,如果进行系统优化设计,可使这两项影响降至最小,通过初步实验研究,为后期进行系统设计提供数据参考。

关键词 图像处理;远场会聚;Sobel 算子;53H 滤波;质心抖动

中图分类号 TN012 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0302005

Experimental Property Research of Far-Field Focusing of Laser Beam

Zhang Heyong^{1,2} Guo Jin¹ Zhao Shuai^{1,2} Wang Tingfeng¹ Shao Junfeng¹

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to lead the laser beam transmit in the atmosphere convergently, an experiment of laser focus at a distance of 450 m and 300 m has been operated in outdoor place. The actual manipulations are as follows: Firstly, the laser is collimated by a beam expander, then the near-parallel laser beam transmits through a Galileo telescope system, and the distance between the concave lens and the convex lens can be tuned through a precise displacement platform, so the focus of the system can change due to the tiny displacement of the concave lens. Secondly, the average power of the laser spot can be measured using power meter, and the power is 47.67 mW and the standard deviation is 0.67 mW while the focal length is 450 m. Thirdly, the energy distribution is found through a laser beam analyzer. The spot images are saved by using the beam analyzer, then the saved image can be processed with Matlab software afterwards. The functions named EDGE and Sobel operator are used in the pre-processing of saving image, then method of median filter is used in the course of image de-noising and 53H filter is adopted in the signal analysis. The diameter of laser spot is obtained by the methods above, and the diameter is 5.56 mm and the standard deviation is 0.24 mm. The spot center excursion is 0.56 mm, and it is 10.43% of the total diameter of the laser spot. At last, the key factors of the energy dissipation in the focusing system can be summarized as follows: restriction of the diffraction limit, attenuation in the atmosphere, and geometrical aberration of optical system. The diffraction limit and the geometrical aberration are significant in the three factors above, so we can reduce the impact of the both factors during the design of optical system. The reliable referenced data of the design of the system can be acquired through the primary experimental research.

Key words image processing; far-field focusing; Sobel operator; 53H filter; centroid drift

OCIS codes 100.0100; 140.0140; 120.0120

收稿日期: 2010-09-20; 收到修改稿日期: 2010-11-04

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新项目(O98Y32C100)资助课题。

作者简介: 张合勇(1982),男,博士研究生,主要从事激光主动探测方面的研究。E-mail: yonghezhang@126.com

导师简介: 郭劲(1964),男,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗总体技术方面的研究。

E-mail: Guojing_1964@163.com

1 引 言

随着激光技术的发展,许多激光应用领域要求激光束能在大气中远距离传输,如光动力飞行器、激光武器、激光通信、激光雷达等^[1,2]。一般要求激光束在大气中的传输距离为数十米到数千米,甚至数十千米。在传输过程中,激光束与大气中的分子、气溶胶粒子等发生相互作用,产生线性与非线性效应。其中线性效应主要有:大气中的气体分子和大气气溶胶粒子的吸收、散射导致的辐射能量损失,大气湍流导致的激光束的扩展与漂移以及相干变化^[3~8]。非线性效应主要是大气非线性热畸变和受激拉曼散射。这些因素严重影响激光束的远场聚焦特性,使激光束产生漂移,焦距、焦深、焦点功率密度产生变化,对激光的进一步应用十分不利。由于在大气中传输造成光束质量下降,因此自适应光学补偿变得十分重要,在某些条件下,通过加大发射口径使得光束达到衍射极限,从而取消了波前补偿^[9],此时需要

几米口径的望远镜,困难较大。对高斯光束的远场聚焦,有不少学者进行了聚焦光斑最小化的研究^[10],认为聚焦过程中光斑束腰移动比测量光斑的最大功率密度更有实际意义。在研究过程中,需要用到图像处理中的边缘检测技术,过去在这方面研究相对较多^[11,12],但均用在另外的场合,诸如激光主动成像或者虹膜识别,在激光聚焦领域内还没有利用图像处理中的边缘提取以及中值滤波方法。本文忽略大气湍流影响,对450 m和300 m处光斑聚焦进行研究,得到焦点位置处的激光功率,并通过对采集的光斑图样进行图像处理分析,最终得到光斑的功率变化和质心抖动。为实现远距离、高功率激光聚焦提供参考。

2 实验装置

激光远场聚焦原理如图1所示。

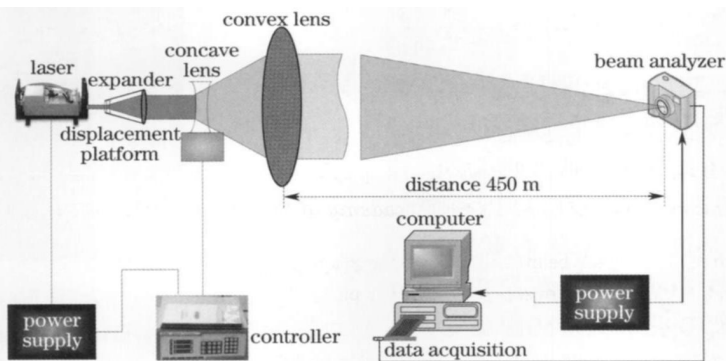


图1 激光聚焦装置图

Fig. 1 Sketch map of laser focusing

将发射激光扩束后,近似于平行出射,光斑直径为30 mm,经焦距400 mm凹透镜发散后进入焦距为1500 mm凸透镜,此时出口光斑直径125 mm,按理论计算,凹透镜和凸透镜间距在1100 mm时,出射平行光。本系统的目的是将光斑在远场进行聚焦,获得较大的功率密度,此时需要精密位移平台调整凹透镜位置,以满足在不同距离处聚焦要求。整个系统参数如表1所示。

根据组合系统焦距计算公式

$$= \frac{1}{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}}, \quad (1)$$

式中 为组合系统物方焦距, f_1 , f_2 分别为第一和第二个光学系统物方焦距, d 为第一个光学系统像方焦点到第二个光学系统物方焦点距离,由左向右为正。两个系统间的相对位置有时用两个主平面之间的距离 d 表示。 d 的符号规则为:以第一个系统的

表1 聚焦系统参数

Table 1 Parameter of laser focusing system

No.	Parameter	Value
1	Wavelength / nm	532
2	Laser power / mW	250
3	System focus / mm	1100
4	Displacement precision / μm	2.5
5	Distance / m	450
6	Beam analyzer	OPHIR USB SP620U
7	Maximum beam / mm	7.1 5.4
8	Pixel spacing / μm	4.4 4.4
9	Number of effective pixels	1600 1200
10	System dynamic range / dB	60
11	Frame rate (at full resolution) / (frame/s)	8.3

像方主点为起点,到第二个系统物方主点的距离,由

左向右为正。由此可得 d 和 f 之间的关系为

$$d = f_1 + f_2 \quad (2)$$

或者

$$d = f_2 - f_1 \quad (3)$$

代入焦距公式可得

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (4)$$

将 $\frac{1}{f} = -\frac{n_2}{n_3}$ 代入(4)式, 公式两边同乘以 n_3 , 得

$$\frac{n_3}{f} = \frac{n_2}{f_1} + \frac{n_3}{f_2} - \frac{n_3 d}{f_1 f_2} = -\frac{n_1}{f} \quad (5)$$

当两系统位于同一介质中时, $n_1 = n_2 = n_3$, (5)式可得

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} = -\frac{1}{f} \quad (6)$$

现以本实验中参数为例, 分析两透镜间距 d 变化对组合系统焦距的影响。对(6)式求导可得

$$\left(\frac{d}{f}\right)^2 = \frac{d}{f^2} \quad (7)$$

由此可得在不同会聚位置处焦点移动量与两透镜间距变化量关系如图2所示。该图所示系统焦距范围从200 m到1000 m可变, 间距变化量从1 m到10 m, 得到此时系统焦点位置的变化关系。由图2可知, 焦距越远, 两透镜间距变化对组合系统焦距变化影响越明显, 即是说, 对于长距离聚焦而言, 对两透镜间距调整精度要求较高。假设在450 m聚焦, 由此可得透镜间距变化和系统焦距变化关系如表2所示。

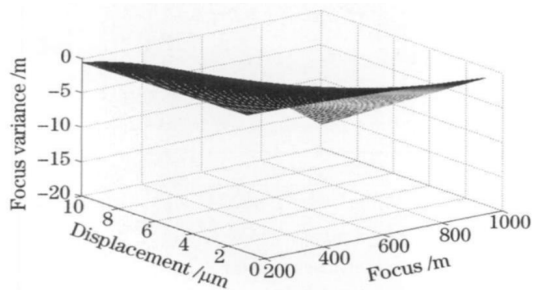


图2 焦点变化与透镜间距的关系

Fig. 2 Relationship between focus variance and displacement of the two lens

由此可见, 对于该距离处的激光聚焦而言, 采用精密位移平台移动, 每步进一步, 对应的距离是2 m, 与之对应的光斑焦点大致移动0.7 m(实际是0.6750 m)左右, 如此精度可以控制聚焦光斑的微小移动, 通过微调此距离, 找到450 m位置处光斑最小的调整点。此时, 可用激光功率计或光束质量

分析仪对聚焦后的光斑分布特性进行测量。实验中选取450 m和300 m距离处进行光束聚焦, 主要考虑当时的实地情况, 这两个位置较为开阔, 容易实现光束传输。

表2 焦距为450 m的透镜间距与焦移关系

Table 2 Focus variance versus focus displacement at the focal length of 450 m

Displacement / m	Focus variance / m
1	-0.3375
2	-0.6750
4	-1.3500
6	-2.0250
8	-2.7000
10	-3.3750

3 实验测量

实验中聚焦450 m前后光束如图3所示。



图3 聚焦前后光束

Fig. 3 Laser beams before and after focusing

聚焦前光斑直径为1.2 m, 聚焦后的光斑为11 mm左右, 通过功率计测量该光斑内的功率, 将功率计更换为光束质量分析仪可测光斑的能量分布。经长时间观测, 可得聚焦光斑位置处的功率分布如图4所示。

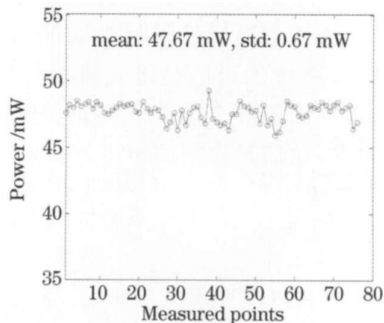


图4 聚焦光斑的功率抖动

Fig. 4 Power drift of the focusing laser spot

由图4可知, 聚焦光斑位置处的功率波动不大, 功率平均值47.67 mW, 功率波动标准偏差0.67 mW,

其中引起波动的主要因素有: 激光器本身的功率波动、接收系统平台振动、激光大气传输中的湍流引起光斑位置和功率抖动。

除了聚焦光斑功率波动外, 本身的功率值也较小, 而且光斑只会聚到 10 mm 左右, 如此看来, 制约整个系统会聚光斑大小和功率的因素有必要进行深入研究。

3.1 衍射效应

在使用的系统中, 激光器出口光斑约 2 mm, 经一级扩束后出光口径 $a = 30$ mm, 而扩束镜后端的凹透镜和凸透镜口径均大于入射在其表面的光束口径, 因此造成的衍射现象不明显, 由此看来, 整个系统的入射衍射光斑大小受限于扩束镜的出光口, 由衍射理论可知, 圆孔衍射第一暗环直径 d_1 为

$$d_1 = \frac{2.44}{a}, \quad (8)$$

此时焦距为 300 m。由此可得, 艾里斑直径为 13 mm, 在该亮环内占据总能量的 83.78%, 其余能量分别耗散在立体角较大的空间中, 无法接收, 此时受限光束衍射如图 5 所示。

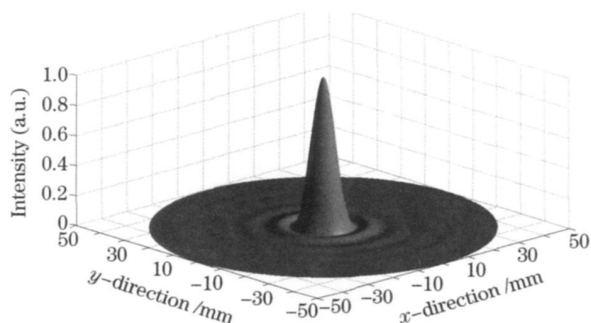


图 5 扩束镜决定的衍射光斑分布

Fig. 5 Spot distribution due to the diameter of beam expander

由图 5 可知, 理想情况 300 m 处, 中心能量相对集中, 由于整个系统激光器功率为 250 mW, 经扩束和发射系统后的激光功率为 230 mW, 因此在此基础上按照理论计算在艾里斑内包括功率为 192 mW 左右, 实际上在本次实验中采用接收面积为 20 mm 的功率计, 只获得了均值 106 mW 的接收功率。

3.2 大气传输衰减

由于激光在近地面大气中传输, 空气中的气溶胶以及大气分子的吸收和散射造成的衰减可以大致通过 MODTRAN 进行计算, 选取参数模型为中纬度夏季, 市区能见度 5 km, 观察者高度 10 m, 观察距离 300 m, 光谱波段 0.4~0.7 μm。由此计算得到大气透射率如图 6 所示。

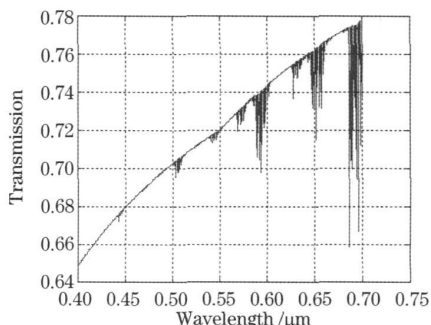


图 6 大气透射率

Fig. 6 Atmospheric transmission

由图 6 可知, 波长 532 nm 对应的透射率为 0.715, 以此看来在考虑衍射之后所剩余的功率 192 mW 当中, 考虑大气衰减后, 应该为 137 mW, 而实际测量到的功率值与之相差较大, 说明引起功率下降还有其他更重要的因素。

3.3 透镜像差

由于聚焦系统凹透镜和凸透镜之间无像差校正, 导致光斑焦点弥散。而多种像差综合作用相当复杂, 对系统光路调整带来极大困难, 如果系统入射光线调整正好位于主轴上, 此时球差占主要因素, 如果偏离主轴, 则各种轴外像差综合作用。图 7 为 300 m 处聚焦光斑在聚焦前后的光斑分布。

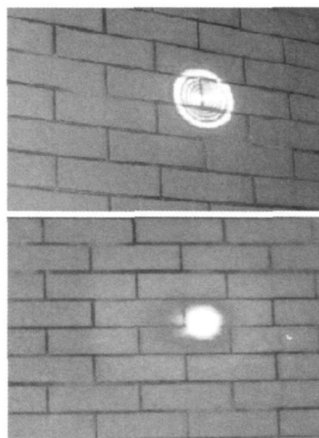


图 7 300 m 聚焦前后光斑图样

Fig. 7 Spot before and after focusing at the distance of 300 m

由图 7 可知, 光斑呈现同心圆环结构, 而且由中心向边缘过渡, 圆环厚度加大, 这是典型轴上球差表现形式。而由分析可知, 衍射效应造成的圆环中心为能量集中的亮环, 由此肯定图 7 中所出现的圆环是由系统轴上球差引起的。随着系统焦距调整, 墙上光斑环状结构变得密集, 人眼或者相机已经无法将其区分开, 继续调整系统中凹透镜和凸透镜间距,

将使光斑会聚得更小,但由于像差的影响,最终会聚的中心光斑直径在 16 mm 左右,当利用口径为 20 mm 功率计探测时,所能接收到的功率只占据整个功率大部分。在 300 m 聚焦位置测量得到的光斑功率为 106 mW 左右,如图 8 所示。

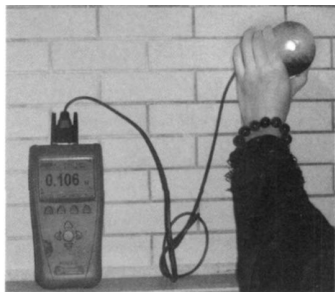


图 8 300 m 聚焦光斑功率

Fig. 8 Power of the focusing spot at the distance of 300 m

根据分析 300 m 处聚焦的衍射和大气衰减造成损失后可接收功率大概为 137 mW,而在 300 m 处实际测量功率只有 106 mW(如图 8 探测器表头读数所示),可以认为这损失的 31 mW 能量由像差造成。

总之,对于远场聚焦而言,影响激光能量耗散的 3 个主要因素中,大气衰减无法克服,另外两个因素可以通过人为进行改善。在系统设计中保留各光学元件口径余量,让系统受限衍射孔尽量大;另一方面,发射系统像差校正尤为重要,需要对变焦距系统进行像差校正。

4 图像处理分析光斑

具体实验位置在本所研发大厦 440 房间和研究室部 B 座 609 室之间,二者间距为 450 m;实验时间为 2010 年 5 月 16 日晚上 19 点到 23 点。采用 OPHIR 公司光束质量分析仪 USB SP620U 测量的一次原始光斑分布如图 9 所示。

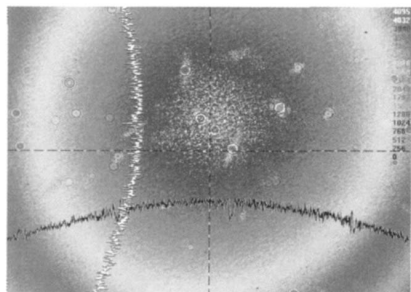


图 9 450 m 聚焦光斑图样

Fig. 9 Pattern of focusing spot at the distance of 450 m

该设备输出的光斑分布中,包含两条中心线、过中心线的光斑能量分布曲线以及伪彩色表示的光强分布,其中过中心线的光斑能量分布曲线是行和列的区分。图 9 虽然能够直观反映光斑的空间分布,由于该输出结果是经过转化之后的 BMP 格式图像,像素为 736 pixel × 538 pixel,而该设备所保存的数据文件原始像素为 1600 pixel × 1200 pixel,转化为图像格式后,像素降低了一半多,图中的小圆斑是由于光束质量分析仪前端衰减片表面的尘埃颗粒衍射造成的,这是由于外场实验条件所限,难以保证接收系统表面清洁。以下所有分析均是基于导出数据。将数据灰度显示如图 10 所示。

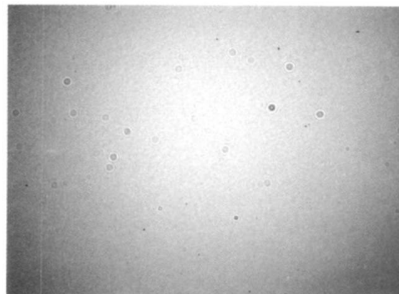


图 10 光斑图样灰度图

Fig. 10 Gray scale image of the spot pattern

为了对该灰度图进行光波中心定位和光斑半径提取,需要对该图进行二值化和边界提取。首先将整个图像的灰度值平均值作为二值化阈值,然后采用 Matlab 中内置函数 EDGE 和 Sobel 算子对二值图像进行边界提取,并对提取边界的二值图进行中值滤波处理,最终结果如图 11 所示。

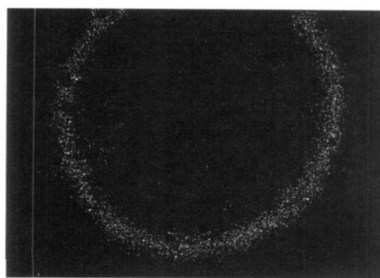


图 11 边界提取和中值滤波后的图像

Fig. 11 Image after edge finding and median filtering

通过提取边界后的二值图,可以确定光斑中心和在该阈值下的光斑直径。具体做法:按照列扫描方式对图像从左和从右两个方向扫描。可以得到每一行像素所对应的圆内弦长,根据弦长随着行元素的变化关系可以得到圆的直径,直径的中心即为圆心所在。由于整幅图像含有噪声影响,扫描得到的弦长变化并不十分光滑,所以需要扫描出的原始

数据进行 53H 滤波。

53H 法是 Turkey 提出的,其基本思想是产生一个曲线的平滑估计,然后把它从数据中减掉,这样就会很容易地识别出异点。该方法利用中位数是均值的稳健估计这个事实。由于传统 53H 法对序列的 $x(i)$ 的前 4 个和后 4 个点得不到有效平滑,需要将算法做如下改进。改进的 53H 法对序列的前后 8 个点也进行了正反两次平滑,因此该算法可使序列中的所有点都得到有效平滑。

该滤波算法对于变化陡峭的信号具有很好的平滑效果,为了得到弦长的变化趋势,又对滤波后的信号进行 4 阶多项式拟合。最终得到行扫描数据 53H 滤波信号以及多项式拟合信号如图 12 所示,同理可得沿着列扫描方向的光斑弦长分布如图 13 所示。

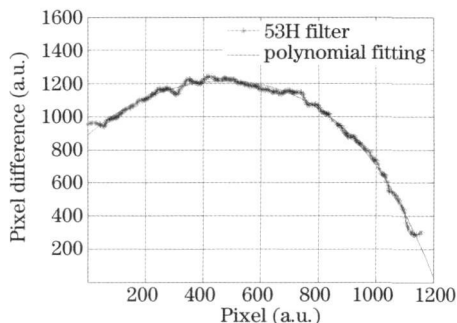


图 12 行扫描数据 53H 滤波和多项式拟合

Fig. 12 53H filtering and polynomial fitting of the row data

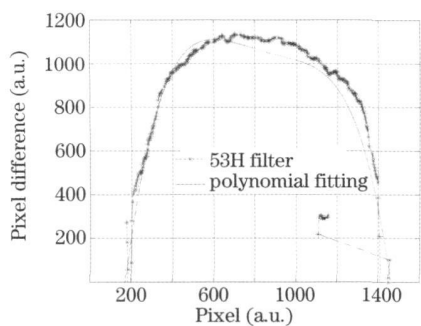


图 13 列扫描数据 53H 滤波和多项式拟合

Fig. 13 53H filtering and polynomial fitting of the column data

由图 12, 13 可知,经 53H 滤波后的数据仍然出现局部剧烈振荡,这是由于图像上尘埃杂质影响,造成图像阈值分割不准确,但是不影响整个整体趋势。由图 12 可知,多项式拟合曲线的最高点即为 1216,而该器件 CCD 像元尺寸为 $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$,由此可得在该阈值条件下的光斑直径为 $1216 \times 4.4 \times 10^{-3} = 5.35 \text{ mm}$,根据行扫描数据可得光斑中心纵

坐标为 505,根据列扫描数据可得光斑中心横坐标为 720,即光斑中心坐标为 (720, 505)。

同理可得实验中所采集的其他组数据经处理后得到的光斑直径,圆心坐标如表 3 所示。

表 3 图像处理后的光斑中心和直径

Table 3 Center and diameter of the spot after image processing

No.	Diameter / mm	x-axis	y-axis	Centre
1	5.10	761	493	(761, 493)
2	5.35	722	509	(722, 509)
3	5.81	838	395	(838, 395)
4	5.41	602	551	(602, 551)
5	5.72	792	383	(792, 383)
6	5.63	766	372	(766, 372)
7	5.70	815	518	(815, 518)
8	5.57	592	294	(592, 294)
9	5.46	780	407	(780, 407)
10	5.76	814	412	(814, 412)
11	5.69	807	425	(807, 425)
12	5.79	1012	352	(1012, 352)
13	5.49	712	396	(712, 396)
14	6.09	824	356	(824, 356)
15	5.39	786	414	(786, 414)
16	5.34	954	445	(954, 445)
17	5.52	912	524	(912, 524)
18	5.25	954	503	(954, 503)
Average	5.56	802	431	(802, 431)
Deviation	0.24	110	71	131

由于圆心变化是随机的,因此横坐标和纵坐标之间变化是相互独立的,故而根据误差合成规律可以得到圆心标准差。设横坐标为 x , 纵坐标为 y , 由贝塞尔公式可得 x, y 标准偏差为

$$x = \sqrt{\frac{(x_i - x)^2}{n - 1}}, \quad (9)$$

$$y = \sqrt{\frac{(y_i - y)^2}{n - 1}}, \quad (10)$$

则圆心标准偏差可表示为

$$= \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{n}}, \quad (11)$$

同理可以计算得到圆环直径的标准偏差

$$D = \sqrt{\frac{(D_i - D)^2}{n - 1}}. \quad (12)$$

式中 D_i 为第 i 次测量的圆环直径, D 为所有次测量的平均圆环直径。根据以上分析可得所选取阈值下,光斑直径标准偏差 0.24 mm, 圆心横坐标偏差 110 个像元, 纵坐标偏差 71 个像元, 圆心偏差 131 个像元, 根据每个像元尺寸 $4.4 \mu\text{m}$ 可得光斑圆心

标准偏差0.58 mm,与直径均值之比为10.43%,该偏差表示光斑中心抖动大小,主要由发射平台抖动、大气湍流抖动、接收平台抖动引起。可见,在该实验条件下,由于系统缺少防振平台,造成光斑抖动较大。

5 结 论

搭建了激光远场聚焦实验系统,分别在距离为450 m和300 m处实现聚焦,在450 m焦点处的功率均值为47.67 mW,标准偏差0.67 mW。通过光束质量分析仪测量聚焦光斑的分布,采集并保存光斑图像,利用图像处理技术中的边界提取以及中值滤波和53H滤波方法,对图像进行信息处理,最后得到在给定边界提取阈值下的光斑直径为5.56 mm,标准偏差为0.24 mm;光斑中心漂移0.56 mm,占光斑直径10.43%。分析了实验中功率损失的主要因素,为后期进行系统设计提供数据参考。

参 考 文 献

- 1 Li Xianqin, Cheng Zhaogu, Jiang Jinbo *et al.*. Focus characteristics of laser beam for long distance propagation in atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 324~ 329
李现勤,程兆谷,蒋金波等. 激光束在大气中远距离传输聚焦特性的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 324~ 329
- 2 He Yi, Wu Jian. Optical system of a coherent CO₂ laser radar for edge tracking[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(7): 667~ 671
何毅,吴健. 相干式CO₂激光边缘跟踪雷达光学系统[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(7): 667~ 671
- 3 Victor A. Banakh, Igor N. Smalikhov. Turbulence influence on focused laser beam propagation in the stratosphere[C]. *SPIE*, 1994, **2222**: 511~ 521
- 4 J. C. Ricklin, W. B. Miller. Optical turbulence effects on focused laser beams: new results [C]. *SPIE*, 1994, **2312**: 145~ 154
- 5 Baida Lu, Bin Zhang. Propagation and focusing properties of high-power laser beams[C]. *SPIE*, 1996, **2870**: 195~ 204
- 6 Kremena S. Petrova. Focusing of a laser beam in turbid media [C]. *SPIE*, 2005, **5830**: 429~ 433
- 7 Fedor V. Shugaev, Evgeni N. Terentiev, Ludmila S. Shtemenko *et al.*. The effect of the strong turbulence regime on the laser beam propagation and focusing[C]. *SPIE*, 2008, **7108**: 71080A
- 8 V. M. Sazanovich, R. Sh. Tsvyk. Influence of turbulence on formation of the focused laser beam image at reflection from a mirror[C]. *SPIE*, 1999, **3938**: 221~ 228
- 9 T. Stewart McKechnie. Focusing infrared laser beams on targets in space without using adaptive optics [C]. *SPIE*, 1991, **1408**: 119~ 135
- 10 Yajun Li, Joseph Katz. Optimum focusing of Gaussian laser beams: beam waist shift in spot size minimization [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(4): 1152~ 1155
- 11 Li Xiaofeng, Xu Jun, Zhang Shengxiu *et al.*. Edge detection algorithm of laser active imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1599~ 1601
李晓峰,徐军,张胜修等. 激光主动成像图像边缘检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1599~ 1601
- 12 Yuan Weiqi, Bai Xiaoguang. A new iris edge extraction method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2158~ 2163
苑玮琦,白晓光. 一种新颖的虹膜轮廓提取方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2158~ 2163