

文章编号: 1004-4213(2011)s1-0073-4

# 60 微弧度激光发射天线模拟设计及测试

王希军

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130031)

**摘要:** 为了实现远距离激光能量传输, 根据光学相差理论和优化的组合透镜设计, 着重研究了影响激光发射天线发射的激光光束随望远光学系统离焦量的变化规律和初步的实验测试. 实验中利用三级像差理论消除激光天线系统像差对离焦量控制精度的影响, 在不同的距离, 实现了远场激光光斑的测量. 采用高斯曲线拟合法, 消除 CCD 探测器的饱和影响, 提高了远场激光束腰的测量精度. 在小口径和低倍率光学扩束系统约束条件下, 实现了 60 微弧度激光发射天线的设计和测量. 实验初步说明组合透镜消除了像差对离焦量的影响, 进而提高了光斑测量精度. 同时理论和实验两方面初步说明存在激光光束最小值偏离零离焦量现象, 而且偏离的方向均是离焦量负向.

**关键词:** 激光发射天线; 激光扩束; 离焦量实验; 激光雷达

中图分类号: TN27; TN911.73 文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb201140s1.0073

## 0 引言

激光以其亮度高、方向性好及能量高等优点, 已被广泛应用于很多领域<sup>[1-4]</sup>. 可是激光器输出的光束, 具有一定的发散角, 当激光应用到激光测距、激光雷达和激光通信等领域的时候, 因激光光束发散角大, 很难被直接使用, 通常使用激光发射天线技术来解决这些问题<sup>[5-6]</sup>.

在这些要求激光传输的距离较远的应用中, 利用望远光学系统进行扩束, 从而减小激光束的发散角, 达到远距离传输激光能量的目的. 通常把使用望远光学系统对激光器输出的激光束发散角进行压缩的方法, 归于激光发射天线技术.

激光束扩束一般采用倒置的望远镜系统, 还可以达到, 根据不同系统需求, 通过改变扩束比可以改变光束尺寸, 满足不同的设计要求.

实验中采用半导体激光器, 即激光二极管. 由于激光二极管直接发出的光束为椭圆光斑, 具有的较大的发散角, 需要在扩束之前对光束进行预压缩发散角和准直等工作. 可以采用棱镜对扩束、柱透镜和平凸透镜可以对光束进行发散角的预压缩和准直<sup>[7-8]</sup>, 这样一般可以得到毫弧度量级圆形光斑的激光光束. 由于单个透镜很难消除球像差在对焦系统的影响, 也就是离焦量的影响<sup>[9-10]</sup>, 因此本文采用了组合透镜, 利用三级像差理论进行优化设计, 精密控制实验系统的离焦量, 实验测量激光束的发散角为 0.06 毫弧度.

## 1 理论分析离焦量对扩束的影响

激光扩束器的设计中常用倒置的望远镜系统, 如图 1 所示, 为一离焦望远镜系统.  $l_1$  为入射光束腰  $\omega_{01}$  到目镜的距离,  $l_2$  为出射光束腰  $\omega_{02}$  到物镜的距离,  $f_2$ 、 $f_1$  分别为目镜和物镜的焦距,  $l$  为两镜之间的距离, 并设  $M_T = -f_2/f_1$  为调焦望远镜系统的放大率.

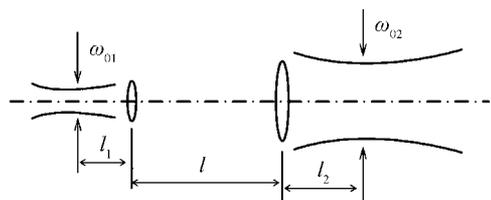


图 1 光束通过望远镜扩束

Fig. 1 Schematic beam expander of laser beam waist

定义  $\Delta = f_1 + f_2 - l$  为望远光学系统的离焦量. 则高斯光束通过该系统的变换矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_T + \frac{\Delta}{f_1} & l \\ \frac{\Delta}{M_T f_1^2} & \frac{1}{M_T} - \frac{\Delta}{M_T f_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

根据高斯光束的 ABCD 传输规律及式(1)可以得到<sup>[11-12]</sup>

$$M = M_T f_1^2 / \sqrt{[f_1^2 + (l_1 - f_1)\Delta]^2 + (\Delta\pi\omega_{01}^2/\lambda)^2} \quad (2)$$

可见, 对给定的高斯及透镜组成的扩束望远镜系统, 给定入射高斯光束后, 其出射光束的尺寸与系统的离焦量  $\Delta$  和光腰到目镜的距离  $l_1$  有关, 而当

第一作者: 王希军(1963-), 男, 博导, 博士后, 主要研究方向为有机光电功能材料及固体激光技术. Email: xjwang@ciomp.ac.cn  
收稿日期: 2011-11-15; 修回日期: 2011-11-24

$\Delta=0$  时,系统的放大率为  $\omega_{02} = \omega_{01} M_T = -\omega_{01} \frac{f_2}{f_1}$ .

为了直观地看出出射光束束腰半径与离焦量和入射光束束腰半径位置的关系,以入射光斑半径为 1.2 mm、 $f_1=15$  mm、 $f_2=120$  mm 为例,数值模拟出射光束束腰半径与离焦量及入射光束束腰位置的关系曲线,如图 2. 由图可见,离焦量对出射光束的束腰影响是比较明显的,当离焦量达到 0.5 mm 时,出射光束的束腰已经变得很小,这时的出射光束的发散角已经很大了.

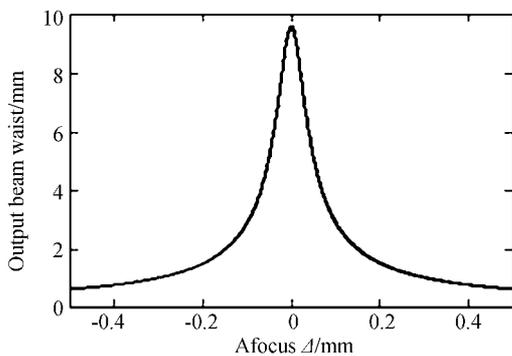


图 2 望远系统光束束腰随离焦量的变化

Fig. 2 Variation of the beam waist as the afocus of the telescope optical system

考虑实验中直接测量的物理量是光斑半径,同时可以直观的观察离焦量对远场发散角的影响,也模拟了 1 km 外光斑半径随离焦量的变化曲线如图 3 所示.

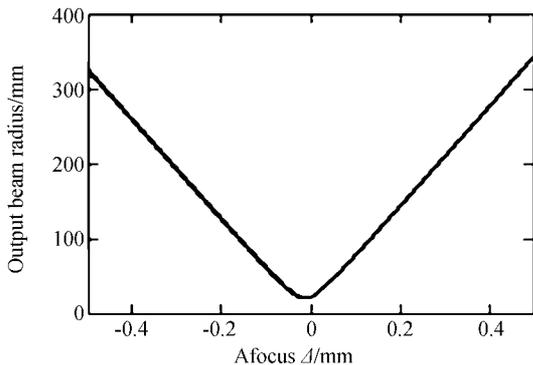


图 3 理论计算 1 km 处光斑随离焦量的变化

Fig. 3 Calculation of the beam waist variation as afocus

模拟设计对实验设计提出两个有力指导. 首先,激光光束半径最小值对应的离焦量不为零,而是偏向负离焦量,数值不是很大. 其次,远距离测量光斑半径,由于光强下降,变得十分困难,换句话讲,离焦量  $\Delta > 0.2$  或  $\Delta < -0.2$ , 激光光束半径大于 100 mm,因此,在远距离测量的实验设计时,考虑到实验效率,忽略了更大离焦量带来的激光光束测量困难.

## 2 测量实验

为了验证离焦量对扩束系统放大率的影响,对该系统进行了地基的实验测量,并且分别在 100 m, 500 m 和 1000 m 位置处观察扩束光斑随离焦量的变化.

为了研究离焦量对扩束光束的影响,把扩束望远镜与螺旋测微器结合起来,这样每次调节离焦量时,就可以通过螺旋测微读出调节量.

通过 CCD 直接测量激光束光斑的大小,同时也对光束光斑进行拍摄,然后对拍摄的光斑图进行数字图像处理,即可获得光斑半径. 离焦量很大的位置,不能拍摄到光斑,只能用相机找到光斑的边缘和几个特征点的数值,然后采用高斯拟合计算.

在离焦量提取拍摄图像像素的灰度值,然后做出过图像中心某条直线上 ( $x$  方向) 的灰度曲线,由于出现饱和现象,  $1/e^2$  的位置很难从图中确定,因此本文对灰度曲线进行了高斯函数拟合.

图 4 是对 100 mm 处拍摄光斑的处理,曲线拟合时,应除去图像处饱和像素的数据,以其避免对高斯拟合结果的影响. 按照相同的方法我们实验测量了出射光束在 100 m、500 m 和 1000 m 处随离焦量变化的光斑半径,数据如表 1.

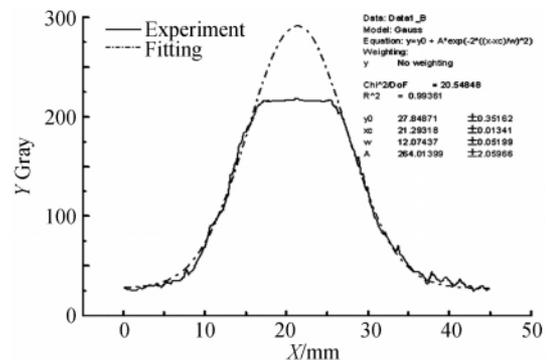


图 4 远场测量高斯光束的拟合曲线

Fig. 4 Fitting of Gauss beam in the far field

表 1 出射光束随离焦量的变化

Table 1 Variation of the beam waist as the afocus of the telescope

$\Delta/\text{mm}$	-0.30	-0.20	-0.10	0	0.10	0.20	0.30
Spot radius (100 m)/mm	10.1	5.2	4.6	12.1	17.5	25.6	32.5
Spot radius (500 m)/mm	96.2	61.9	26.5	20.6	46.4	80.3	118.1
Spot radius (1 000 m)/mm	—	119	58	30	75	138	—

在远场光斑实验中,当改变筒长时,无论在 100 m、500 m 还是 1 000 m 处都可以观察到明显的

光斑变化,且 500 m 和 1000 m 处可以观察到光斑随离焦量的变化关于零点对称,100 m 处时,光斑的变化在  $-0.1$  mm 时光斑达到最小。

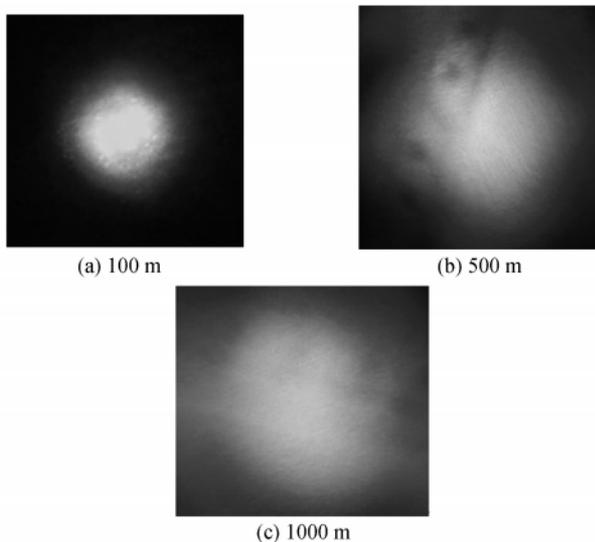


图 5 当离焦量  $\Delta=0$ ,不同距离的光斑图

Fig. 5 Afocus  $\Delta=0$ , the laser spot in a series of distance

### 3 结论

对自行设计的激光扩束望远镜系统进行了离焦量变化的实验,实验表明,在对扩束望远镜进行装调时,一个很失调也可能引起系统较大的误差,特别是高精度应用中,微小的失调量也将会引起远距离光斑较大的变化,甚至可以引起出射光束无限的发散,使系统无法工作。

通过三级像差理论设计望远光学系统,初步优化了系统像差,着重控制激光望远光学系统的离焦量,设计出发散角较小的望远系统,实际测量值达到  $0.06$  毫弧度,基本和理论计算值相符。

实验中采用的测量距离相对于空间距离,还是比较近的,需要采取航空或航天技术手段实现远场实验,进一步检验设计和制造能力。

#### 参考文献

[1] WANG Heng-kun, WANG Bing, ZHUANG Xin-yu, *et al.* Multi-band expand system for high-power lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(7): 1785-1788.  
王恒坤,王兵,庄昕宇,等.多波段高功率激光扩束系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(7): 1785-1788.

[2] GUO Rui, YANG Hua-jun, HU Yu, *et al.* Far-field focus facula measurement method concerning small-angle of laser divergence in optical communication [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2006, **35**(4): 437-439.  
郭瑞,杨华军,胡渝,等.光通信中激光发散小角度远场焦斑测量法[J]. *电子科技大学学报*, 2006, **35**(4): 437-439.

[3] HAO Pei-ming, KONG Xiang-lei. Research of beam expander with a two-mirror system[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(2): 179-183.  
郝沛明,孔祥蕾.两镜系统扩束器的研究[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(2): 179-183.

[4] KONG Xiang-lei, HAO Pei-ming. Optical design of varifocal beam expander[J]. *Chinese Applied Optics*, 2001, **22**(5): 7-11.  
孔祥蕾,郝沛明.变焦扩束系统的光学设计[J]. *应用光学*, 2001, **22**(5): 7-11.

[5] GE Lin, QIU Kun. Study of optical antenna for laser space communication[J]. *Journal of UEST of China*, 1998, **27**(4): 367-370.  
葛林,邱昆.激光空间通信中的天线研究[J]. *电子科技大学学报*, 1998, **27**(4): 367-370.

[6] YANG Chun-ping, WU Jian, HE Yi. Application of Laser radar in space rendezvous and docking[J]. *Journal of UEST of China*, 1999, **28**(4): 447-451.  
杨春平,吴健,何毅.激光雷达在空间交会对接中的应用[J]. *电子科技大学学报*, 1999, **28**(4): 447-451.

[7] HE Xiu-jun, TU Xiao-qiang, JIANG Meng-heng, *et al.* Collimating the semi-conductor laser beam with the elliptic section cylinder lenses[J]. *Optical Instruments of China*, 2005, **27**(4): 65-68.  
何修军,涂小强,蒋孟衡,等.半导体激光器光束的准直设计[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(4): 65-68.

[8] DERRICK P, JEFF G. New approach improves far-field measurements[J]. *Laser Focus World*, 2001, **7**: 149-152.

[9] HAO Pei-ming, YUAN Li-yin, LI Ke-xin, *et al.*  $\Phi 300$  Hartmann field flattening laser beam expander[C]. *SPIE*, 2007, **6722**: 672206.

[10] HAO Pei-ming, LI Wei-wei, LI Hong-guang, *et al.* Design and manufacture of Hartmann beam expander with wide aperture[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(6): 788-793.  
郝沛明,李玮玮,李红光,等.大口径哈特曼扩束系统的设计和研制[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(6): 788-793.

[11] 林殿阳. *光电子技术分册*[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业出版社, 2003.

[12] CHENG Jie, SUN Nian-hun, WANG Zhen-xing, *et al.* Maladjustment and Beam Expanded Ratio of Laser Beam Expanding Telescope[J]. *Laser Technology of China*, 1995, **19**(1): 57-60.  
程洁,孙年春,王正兴.激光扩束望远镜的失调与扩束比[J]. *激光技术*, 1995, **19**(1): 57-60.

## Measurement and Design of the Beam Expander as 60 Micro-Radian Laser Radiation Antenna

WANG Xi-jun

*(National Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics & Fine  
Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

**Abstract:** Aiming at realizing the laser energy transaction in a long distance, the optical design optimizations were analyzed and the experiment was set up to study the changes of the afocus influencing of the telescope system on the laser spot emitted from the laser antenna. In the experiment, utilizing the third-order aberration theory of optics, the effect on the manipulating accuracy of afocus of the telescope optical system was decreased because of the aberration of the laser radiation antenna, and the measurement of far field laser spot in a series of ranges was set up. By the Gauss curve fitting annihilating the laser irradiation saturation of the CCD device, the experimental precision was obtained to measure the laser beam waist in far field. In the condition of the constraint of the smaller diameters of the object lens and the lower multiply of the telescope expander, the 60 micro-Radian divergence design and measurement of the laser radiation antenna were attained. Both theoretical and experimental results expressed there is a phenomenon of the laser spot minimum deviated of the afocus zero position, and the deviation in the same negative direction of the afocus.

**Key words:** Laser radiation antenna; Laser beam expander; Afocus control experiment; LADAR