

文章编号: 1001-3806(2010)04-0532-03

## 大气激光束漂移的实验研究

赵琦<sup>1</sup>, 钟鸣<sup>2</sup>, 吕百达<sup>1\*</sup>

(1. 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

**摘要:** 为了研究激光束在大气中的漂移情况, 对激光束在大气中的传输做了实验研究。采用电荷耦合器件 CCD 成像技术对光斑的漂移情况进行了测量。对光斑漂移在水平和垂直方向的变化进行了实验研究, 并分析了横向风对光束漂移的影响, 得到了在不同时刻以及不同传输距离情况下光束漂移情况的实验结果。结果表明, 光束随传输距离的增加, 垂直和水平方向的漂移量逐渐趋于一致。

**关键词:** 大气与海洋光学; 激光大气传输; 光束漂移; 大气湍流

**中图分类号:** TN012      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.027

### Experimental study about laser beam wander in atmosphere

ZHAO Qi<sup>1</sup>, ZHONG Min<sup>2</sup>, LÜ Bai-da<sup>1</sup>

(1. Institute of Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** For studying the wander of laser beam through atmosphere, the propagation of a laser beam through atmosphere was studied experimentally. The wander of light spots was measured by means of CCD imaging technique. The spot wander in horizontal and vertical direction was studied and the influence of crosswind on the spot wander was analyzed. The spot wander was obtained at different time and distance. The experimental result shows that the spot wander in both the directions can reach unanimity gradually with the increasing distances.

**Key words:** atmospheric and ocean optics; laser propagation through atmosphere; beam wander; atmosphere turbulence

### 引言

激光在大气传输中因为湍流作用会产生明显的光束漂移现象。这对于空间光通信、激光雷达以及精确制导系统都有影响<sup>[1-2]</sup>。对于光束漂移的理论研究和数值模拟已经有很多报道<sup>[3-4]</sup>。但是关于实验的研究还相对较少<sup>[5-6]</sup>。

作者用 CCD 成像技术对激光束漂移进行实验研究, 这种方法有很高的空间分辨率, 通过对 CCD 和成像系统的调节, 能够得到较大动态范围和较高的帧频。通过实验分析, 研究大气对光束在水平和垂直方向漂移的影响, 以及在不同传输距离和不同时刻下光束偏移均方差的变化。所得结果对实际应用具有参考意义。

### 1 实验

外场实验布局如图 1 所示。用全球定位系统 (global position system, GPS) 测量发射端与接收端的距离以及光学路径横向方向与正北方向的夹角  $\varphi$ 。用测风仪测量风速  $v$  以及风向与光学路径横向方向的夹角  $\theta$ 。测量时大气能见度在 3km 左右。

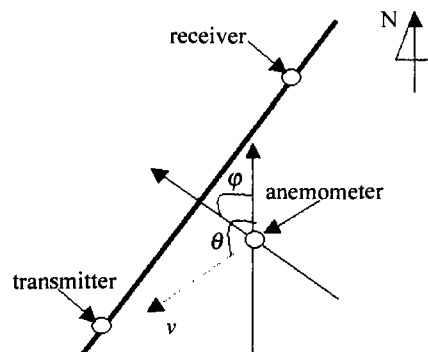


Fig. 1 Diagrammatic sketch of the experiment

实验中用波长为  $1.06\mu\text{m}$  的固体激光器, 发散角为  $0.5\text{mrad}$ , 功率为  $10\text{W}$ 。用大孔径可调焦光学系统对光束进行扩束、聚焦, 其出口孔径为  $150\text{mm}$ , 发射系统离地高度为  $1.6\text{m}$ 。实验示意图见图 2。

基金项目: 国防预研基金资助项目(404050502)

作者简介: 赵琦(1985-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光大气传输的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: baidalu@tom.com

收稿日期: 2009-06-11; 收到修改稿日期: 2009-07-21

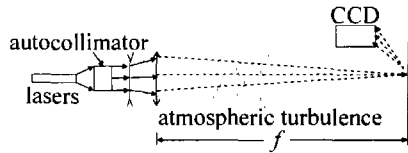


Fig. 2 Schematic illustration of the experimental set-up

在焦点处设置漫反射板,运用 864 像素 × 794 像素的 CCD(EP-7290euro)对光斑进行成像记录,设置其曝光时间为 40μs,以提高信噪比并能避免饱和。图片采集速度为 30 帧/s,每次连续采集 10s。

## 2 数据处理

通过采集背景光的信号,用 MATLAB 空间噪声滤波器<sup>[7]</sup>对信号进行还原,见图 3。

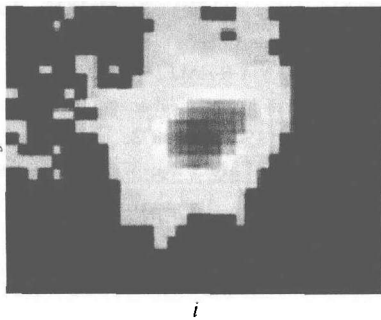


Fig. 3 Intensity distribution

采集的图像是聚焦在平面上离散时间序列的强度场的图像,在计算图像重心时,对应每个像素,坐标  $i$  和  $j$  可以表示为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} a_y \\ a_x \end{bmatrix} = \frac{1}{f} \begin{bmatrix} \Delta_y i \\ \Delta_x j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta a_y i \\ \Delta a_x j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $f$  为焦距,  $\Delta_y$  和  $\Delta_x$  是水平和垂直方向上的物理像素距离,  $\Delta a_y$  和  $\Delta a_x$  为 CCD 得到图像的水平和垂直方向上的物理像素距离。对应本实验的情况,  $\Delta_y = \Delta_x = 0.154\text{mm}$ 。

运用下式分别计算得到水平和垂直方向的重心位置  $x_i$  和  $y_i$ :

$$x_i = \frac{\sum_{n=1}^m y(n) \cdot n}{\sum_{n=1}^m y(n)}, y_i = \frac{\sum_{n=1}^m x(n) \cdot n}{\sum_{n=1}^m x(n)} \quad (2)$$

式中,  $y(n)$  和  $x(n)$  分别是图像上光强分布垂直和水平方向上每点的光强值。求得这两个方向的质心均方差  $\delta_x^2$  和  $\delta_y^2$ , 得到光斑质心漂移均方差为:

$$\delta^2 = \delta_x^2 + \delta_y^2 \quad (3)$$

## 3 实验结果的比较分析

漂移幅度用质心在水平和铅直方向的漂移的均方差来表示,分别为  $\delta_y^2$  和  $\delta_x^2$ , 图 4 为在 250m 处连续采集 99 组的漂移均方差数据。

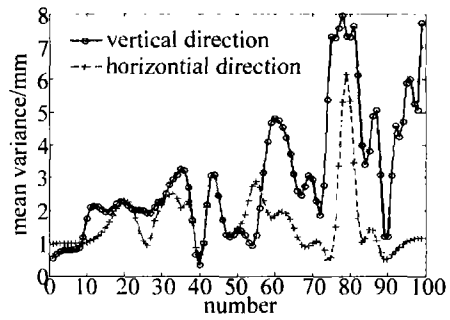


Fig. 4 Mean variances of the spot wander in the horizontal and vertical directions for 200 measurement times

由图 4 可见,在水平和垂直方向上漂移均方差都处于变化中,其中垂直方向上的漂移方差大于水平方向。这是因为在垂直方向上还存在着系统折射率梯度变化,导致光束在垂直方向上的漂移大于水平方向。随着传输距离加大,用垂直方向与水平方向的漂移均方量的比值公式来判断变化趋势:

$$R = \sqrt{\frac{\delta_y^2}{\delta_x^2}} \quad (4)$$

在不同距离测量光束垂直方向与水平方向的漂移均方差,利用(4)式求得其比值,见图 5。可见在近距离

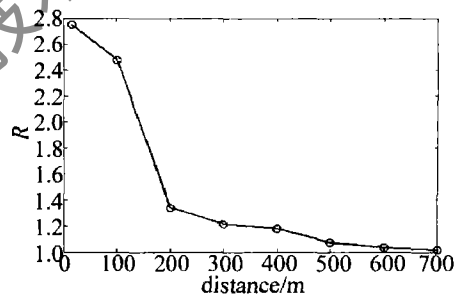


Fig. 5 Comparison of the horizontal and vertical mean variances of the spot wander versus the propagation distance

处,光束在垂直方向的漂移均方差值要远大于水平方向,但随着传输距离的增加,这两个方向上的漂移均方差值趋于一致,这是实验的新结果。这是因为在垂直方向上,系统折射率梯度对漂移产生的作用相对稳定。漂移效应对湍流大尺度敏感<sup>[8]</sup>,而正是平均风速决定了湍流的大尺度,而湍流的大尺度漩涡一般不是各向同性的,这时的横向风的瞬时变化会导致湍流的大尺度漩涡的变化,从而使光束的水平漂移均方差产生的变化。

图 6 中实验结果为距离为 300m 处采集每 300 幅图像计算一个漂移均方差的曲线,用(3)式得到光斑漂移量为  $\delta^2$ 。运用温度计测量每次测量均方差时的温度。观察图 6 可见,实验中得到的漂移量均方差随时间变化而变化,这与折射率结构常数昼夜变化有关<sup>[9]</sup>。从图中还可以发现,在中午温度较高时,光束漂移均方差变化较为明显,这说明当温度较高时候,大气折射率常数较大,且变化较为明显。当温度下降时

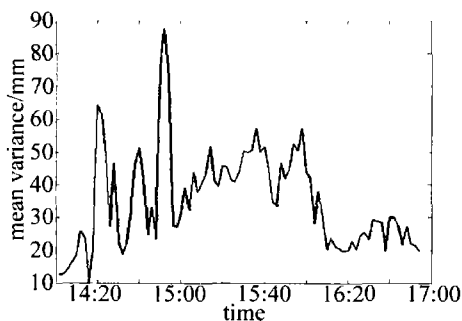


Fig. 6 Experimentally measured mean variances of the spot wander versus the time

候,光束漂移均方差随之减小,变化范围逐渐缩小。

由图7可知,光束的质心漂移均方差随着距离的

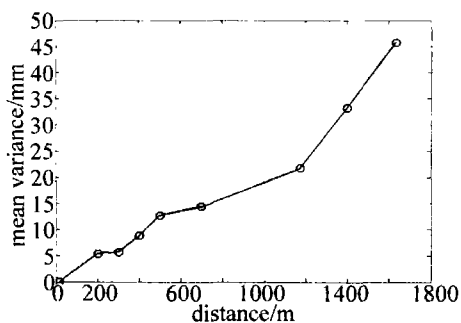


Fig. 7 Experimentally measured mean variances of the spot wander versus distance

增加而加大。这与理论研究的结论相同<sup>[9]</sup>。但是光束的重心漂移的均方差并不随着距离的增加而线性增加,这说明湍流强度的变化对光斑的漂移也有显著的影响。当光束传输距离增大时,可以发现光斑出现了明显的撕裂,导致光束漂移量明显加大。在实际测量中,当距离较大时,探测得到个信噪比较低,较高的背景噪声会导致计算过程中光束重心偏移量变小。

#### 4 结论

光束在大气中传输时,由于湍流等大气因素的影

响光斑重心会发生随机漂移。通过实验可以发现,在近距离处的光斑水平方向的漂移方差要小于垂直方向,这与参考文献[6]中的结论一致。本实验结果表明,随着距离增加,光束在水平铅直两个方向的漂移方差趋于一致。光束的漂移均方差会随昼夜时刻变化而变化,光束漂移量会随着光束传输距离增加而增加。本文中所得结果对光束漂移的研究和相关应用有实际意义。

#### 参考文献

- [1] CAO G H, XU H J, SU C Z. Effects of atmospheric turbulence on the laser alignment of a shaft[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(3): 327-329 (in Chinese).
- [2] LIU J F, YU S Y, HAN Q Q, *et al.* Wave structure function of light wave propagating in turbulent atmosphere [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 11-14 (in Chinese).
- [3] FEDERICO D, JUAN A B, ALEJANDRO R, *et al.* Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(19): 3866-3873.
- [4] CHURNSIDE J H, LATAITIS R J. Wander of an optical beam in the turbulent atmosphere[J]. *Appl Opt*, 1990, 29(7): 926-930.
- [5] CHEON Y H, HOHREITER V. Angle-of-arrival anemometry by means of a large-aperture Schmidt-Cassegrain telescope equipped with a CCD camera[J]. *J O S A*, 2007, A24(11): 3478-3492.
- [6] RAO R Z, WANG S P, LIU X C, *et al.* Experimental study of spot dancing of laser beam in turbulent atmosphere[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11): 1011-1015 (in Chinese).
- [7] GONZALES R C. *Digital image processing* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 78-89 (in Chinese).
- [8] MAO X S, ZHU W Y, RAO R Z. Comparison of refractive index structure constants of atmospheric turbulence deduced from scintillation and beam wander effects[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(4): 538-542 (in Chinese).
- [9] WU J, YANG C P, LIU J B. *Optics propagation in the atmosphere* [M]. Beijing: Beijing University of Posts & Telecommunications Press, 2005: 184-186 (in Chinese).