

# 湍流大气中激光束漂移的实验研究

饶瑞中 王世鹏 刘晓春 龚知本

(中国科学院安徽光机所国家 863 计划大气光学重点实验室 合肥 230031)

**提要** 利用阵列探测系统进行了聚焦激光束光斑漂移的实验研究。与图像法相比,在动态范围和采样率两方面得到了改善。近地面传播路径的实验结果表明:铅直方向的漂移量略大于水平方向的漂移量;在晴朗天气以及较大的湍流强度下,测量结果与理论结果定量吻合,其变化趋势与闪烁大致相同;而在其他条件下,二者变化特征可能明显不同;漂移谱密度在三个典型的频率范围内呈幂函数变化关系,幂指数分别约为-1.2, -2.4 和-4.8。

**关键词** 光传播,大气湍流,光斑漂移

## 1 引 言

光斑漂移是汇聚激光束在大气中传播的一个重要效应<sup>[1,2]</sup>,它对激光大气传播的工程应用,如光学跟踪系统,具有重要的影响<sup>[3]</sup>。迄今已有不少的理论工作<sup>[2,4-6]</sup>,而实验研究相对较少<sup>[7]</sup>。不同的理论分析对准直光束取得了一致结果;而对于聚焦光束,则存在着差异。这表明尚需进行必要的实验研究。实验上通常利用成像技术研究光斑漂移问题,它有两个主要限制:帧频较低,难以反映高频变化趋势;动态范围较小,图像易于饱和。为克服这些缺点,使用具有大动态范围的光电倍增管和高速 A/D 转换器组成的阵列探测系统。这种系统的主要缺陷在于空间分辨率较低,不能和图像相比。但与一般跟踪系统四像限探测器件相比<sup>[8]</sup>,我们的系统具有更高一些的空间分辨能力,因而所得结果具有明显的意义。

## 2 测量系统

探测器单元为光电倍增管,其光敏面略小于截面(直径约为 20 mm),由七个单元相切构成的探测器阵列的截面示意图如图 1 所示。波长为 0.6328  $\mu\text{m}$  的基模 He-Ne 激光由发射口径 200 mm 的望远镜将激光聚焦于 1000 m 处的探测系统上,设单元圆心坐标为  $(x_0^i, y_0^i)$  ( $i = 1, 7$ ),假定照射在每个单元上的光强  $I_i$  (作用区域在图中用阴影表示)作用在其圆心处,则光斑的重心坐标为  $x_c = \frac{\sum_{i=1}^7 I_i x_0^i}{\sum_{i=1}^7 I_i}$ ,  $y_c = \frac{\sum_{i=1}^7 I_i y_0^i}{\sum_{i=1}^7 I_i}$ 。信号采集采用 16 位 A/D,采样率(每个单元)为 2000 Hz,每次采样时间约为 10 s,每次采样数(每个单元)为 20480。

为了将实验结果与理论进行对比分析,我们同时进行发散光束的光强起伏(闪烁)的测量。两系统使用相同波长的激光,实验在同样的传播距离和传播高度上进行。两光源的横向距离约

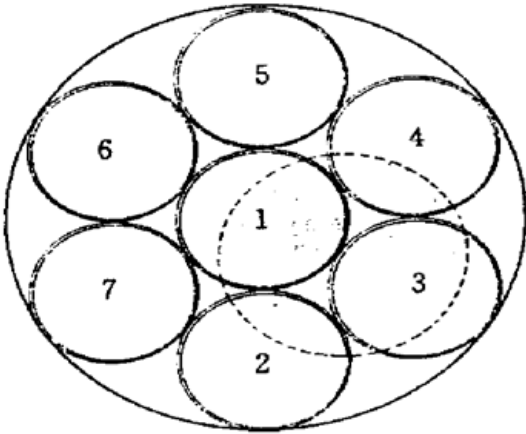


图1 阵列探测系统的截面示意图

1~7为探测器单元,虚线圈内为光斑

Fig.1 Schematic of the detector array

1~7 represent detectors, and the gray area indicates the light spot

为 550 mm。光强起伏的强度用闪烁指数  $\beta^2$  (即光强的归一化方差  $\langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1$ ) 表示,它既能与漂移结果作直接的对比,也能根据闪烁理论公式反演大气湍流强度(用折射率结构常数  $C_n^2$  表示),作为大气湍流条件的监测。

### 3 漂移幅度

光斑漂移的幅度一般用光斑重心漂移的均方差来表示。如果重心在水平和铅直方向的漂移均方差分别为  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ ,则在水平和铅直方向的漂移运动统计独立的假设下,光斑重心总的漂移方差为:  $\sigma_p^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ 。

图2是在1999年4月14日11:11~12:05连续进行的200次测量的水平和铅直方向的漂移均方差。在约2000 s的时间范围内,水平和铅直方向的漂移均方差都处于变化之中,但变化范围不大,水平漂移幅度系统小于铅直漂移幅度。这种差别可以归结于近地面大气湍流在水平方向与铅直方向上的差别。光斑漂移源于折射率梯度的变化,在水平方向,只存在随机变化,而在铅直方向,除随机变化外,还存在系统的梯度变化(由空气密度的高度分布造成的)。

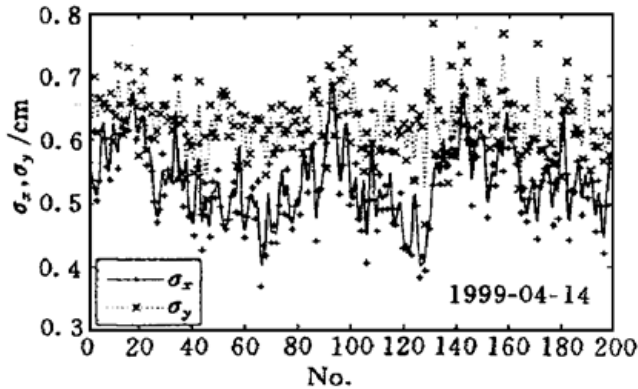


图2 200次测量的水平和铅直方向的光斑漂移均方差

Fig.2 Standard deviations of light spot dancing in both horizontal and vertical directions for 200 measurement events

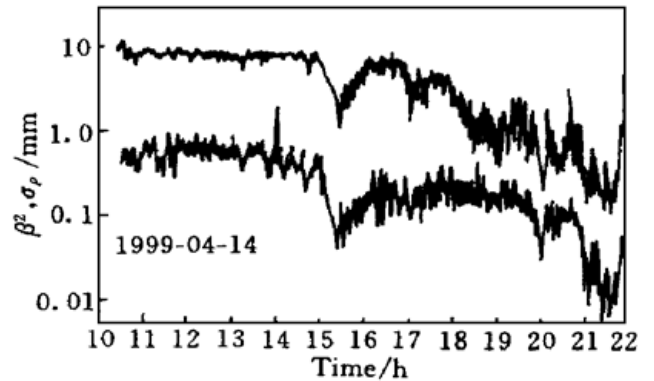


图3 光斑总漂移方差和闪烁指数的时间变化趋势

Fig.3 The time variation of the standard deviation of light spot dancing, the behavior of the scintillation index is plotted for comparison

1999年4月14日10:30~22:00(其中15:00~15:20系统因故中断)总漂移均方差的时间变化趋势如图3所示,图中同时绘出了闪烁指数的变化趋势。在绝大部分时间内,漂移变化趋势与闪烁变化趋势相当一致,只有在18时至19时的一段时间内,闪烁相对稳定,而漂移却有明显的下降趋势。

实验结果与理论结果的比较可通过漂移与  $C_n^2$  的关系以及闪烁与  $C_n^2$  的关系来实现。在弱起伏条件下,球面波闪烁指数与  $C_n^2$  的关系为  $\beta^2 = 0.496C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$  [1], 式中  $k$  为光波数,  $L$  为传

播距离。对于发射口径为  $D$  的聚焦光束, 光斑重心漂移方差的理论公式为  $\sigma_p^2 = 6.08L^2D^{-1/3} \int_0^L C_n^2(z)(1 - z/L)^{11/3} dz^{[2]}$ , 若  $C_n^2$  沿传播路径均匀分布, 则  $\sigma_p^2 = 1.303L^3D^{-1/3}C_n^2$ 。

对于 4 月 14 日的测量, 由闪烁和漂移求得的  $C_n^2$  的估计值绘于图 4。在 10:30 至 18 时的很长一段时间内, 二者无论是在数值上还是在变化趋势上都相当一致, 说明在当时的晴朗天气条件下实验结果与理论结果相吻合。然而, 从 18:00 前后起, 由光斑漂移反演的  $C_n^2$  值大大低于由闪烁反演的  $C_n^2$  值。这可分为两种情况。

第一种发生在 18 时至 21 时。虽然漂移迅速减小, 但闪烁强度相对稳定, 说明湍流强度并未降低。我们注意到,  $\beta^2$  在日落前并未出现正常情况下的极小值, 因而大气湍流可能处于非正常状态, 难以进行可靠定量的分析。漂移和闪烁的这种不同变化特征, 我们还在其他非晴朗天气情况下多次观察到, 既有漂移相对小于闪烁的情况, 也有漂移相对大于闪烁的情况。

第二种情况出现在 21 时至 22 时, 此时由闪烁反演的  $C_n^2$  值也非常小, 而由光斑漂移反演的  $C_n^2$  值明显超出了可能的范围。显然是由测量系统造成的。此时湍流很弱, 聚焦光斑是完整的, 其尺度接近于或小于探测单元的光敏面。若光斑完全落在一个探测单元的光敏面内, 则其漂移不能被测量出来; 若光斑落在相邻的探测单元上, 则分别集中在一定的区域内, 无法正确计算漂移量。

### 4 漂移频谱

在使用图像方法进行漂移测量的频谱分析中, 由于图像帧频的限制, 一般只能观察到几十赫兹的频谱<sup>[7]</sup>。在我们的测量系统中, 可将频率范围延伸至上千赫兹。大量测量结果的频谱分析表明: 漂移频谱在 1000 Hz 的范围内都有非常明显的变化。水平方向上与铅直方向上漂移方差的谱形式很相似。图 5 是一组水平方向上漂移方差的谱密度。

Chiba 观察到<sup>[7]</sup>: 漂移频谱密度在几赫兹(最大达 20 Hz)的范围内与频率成反比。我们的分析结果也证实了类似的特征: 在较低的频率上, 谱密度与频率近似有反比关系, 幂指数在 -1 附近摆动, 如图 6 中最上方的一条曲线所示。在更大的频率范围内, 谱密度随频率增加以更快的速度下降。如图 5 所示, 谱密度曲线可以由三条直线段描述, 第一条直线段位于约 50 Hz 以下, 谱密度的幂指数约为 -1.15。第二条直线段位于 50~200 Hz, 谱密度的幂指数约为 -2.53。第三条直线段位于 200 Hz 以上, 谱密度的幂指数约为 -4.50。

上述三个频率范围内谱密度的幂指数的变化特征如图 6 所示, 该图是根据 200 组水平方向上漂移方差的谱密度拟合的结果。三个区域内谱密度幂指数的均值与均方差分别为 (-1.21, 0.33), (-2.44, 0.60) 和 (-4.77, 0.56)。以三个直线段描述漂移谱密度, 虽然直观, 但只

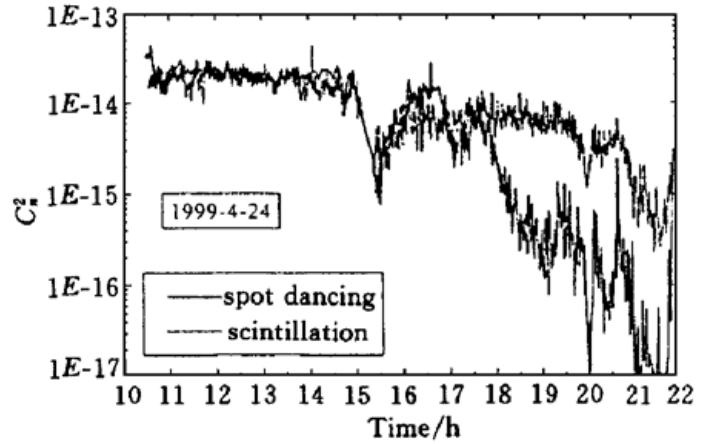


图 4 由光斑漂移以及闪烁反演的  $C_n^2$  的时间变化趋势

Fig. 4 Time variation of  $C_n^2$  derived from both the light spot dancing and the scintillation

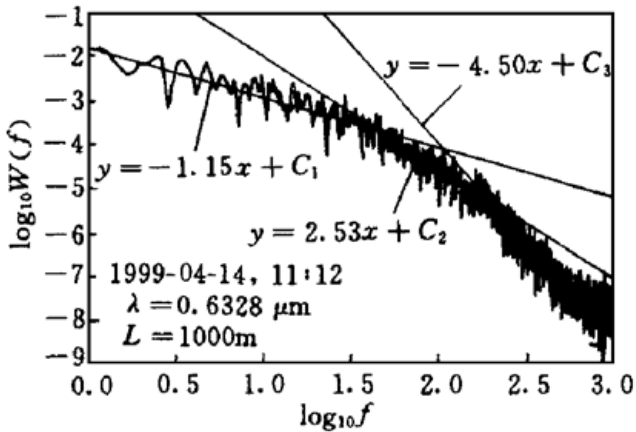


图5 水平方向上漂移方差的谱密度, 在三个频率范围内可分别拟合成直线段

Fig. 5 Power spectrum of the standard deviation of the light spot dancing in horizontal direction. It can be fitted by three straight segments with different slopes

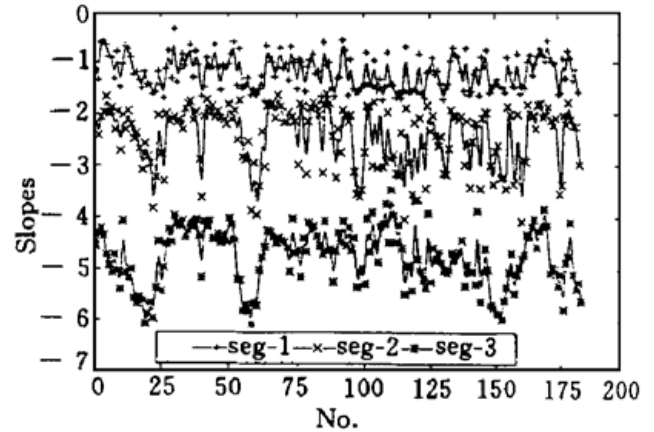


图6 200组水平方向上漂移方差的谱密度拟合的幂指数: 从上至下, 分别对应于第一至第三个频率范围

Fig. 6 Scaling exponents of the power spectra of the standard deviation of light spot dancing for 200 measurement events. The three curves from top to bottom correspond to the exponents in three ranges from low to high frequency

是一种人为的作法, 并非意味着谱密度确实存在三个截然不同的区域。由湍流谱密度的形式, 可以推测漂移方差的谱密度在高频部分可能具有某种指数下降趋势。

## 5 结 论

利用阵列探测系统进行了聚焦激光束的光斑漂移的实验研究。与图像法相比, 在动态范围和采样率两方面得到了改善。近地面传播路径的测量结果表明: 铅直方向的漂移量略大于水平方向的漂移量; 在晴朗天气以及较大的湍流强度下, 光斑漂移的变化趋势与闪烁变化趋势大致相同, 并且和理论分析结果吻合; 而在其他条件下, 二者的变化特征可能明显不同; 漂移谱密度在三个典型的频率范围内呈幂函数变化关系, 幂指数分别约为 $-1.2$ ,  $-2.4$ 和 $-4.8$ 。

由于本测量系统的探测器单元的光敏面比较大, 探测单元较少, 因而空间分辨率不高; 以及探测单元的截面是圆形的, 相邻三个单元间存在空隙, 对于湍流强度非常小、光斑尺度小于探测单元光敏面的情况, 虽然测量结果能在一定程度上反映其变化趋势, 但在定量方面不可靠, 尚需改进。此外, 当湍流强度非常大时, 光斑漂移幅度很大并伴随着光斑的破碎, 致使部分光逸出探测截面, 也影响漂移量的精确计算。这些问题的解决可通过增加探测单元数目来实现, 因而也需要使用更多通道的 A/D 转换器, 同时需要在探测系统前加扩束系统以调节光斑接收面积。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. Strohbehn ed. . Laser Beam Propagation in the Atmosphere. Springer-Verlag, Berlin, 1978. 154 ~ 155
- 2 R. R. Beland. Propagation through atmospheric spatial turbulence. in *Atmospheric Propagation of Radiation*, F. G. Smith ed. , IRIA and SPIE, 1993, 195~ 201
- 3 C. Fan, Z. F. Song. Effect of atmospheric turbulence on precision of laser tracking system. *High Power*

*Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1995, 7(4): 543~ 548 (in Chinese)

- 4 R. J. Cook. Beam wander in a turbulent medium: An application of Ehrenfest's theorem. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, 65(8): 942~ 948
- 5 V. L. Mironov, V. V. Nosov. On the theory of spatially limited light beam displacements in a randomly inhomogeneous medium. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, 67(8): 1073~ 1080
- 6 J. H. Churnside, R. J. Lataitis. Wander of an optical beam in the turbulent atmosphere. *Appl. Opt.*, 1990, 29(7): 926~ 930
- 7 T. Chiba. Spot dancing of the laser beam propagated through the turbulent atmosphere. *Appl. Opt.*, 1971, 10(11): 2456~ 2461
- 8 J. Ma, H. Sun, S. Wang *et al.*. Effects of atmospheric turbulence on photodetector arrays. *Appl. Opt.*, 1989, 28(11): 2123~ 2126

## Experimental Study of Spot Dancing of Laser Beam in a Turbulent Atmosphere

Rao Ruizhong   Wang Shipeng   Liu Xiaochun   Gong Zhiben

(Key Laboratory for Atmospheric Optics of National High Technology Research and Development Plan,  
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract** The spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere was studied experimentally with a detector array system. The system has advantages over the imaging system, i. e., wide dynamic range and high sampling rate. The results of ground-based transmission experiments show that the spot dancing is a little larger in the vertical direction than in the horizontal direction. Under strong turbulence condition in clear weather the spot dancing coincides quantitatively with theoretical prediction, and its time variation is similar to that of the light scintillation, but they can be much different from each other under other conditions. Up to one thousand hertz the power spectrum of the spot dancing can be well fitted by power laws in three frequency ranges, and the exponents are about  $-1.2$ ,  $-2.4$ , and  $-4.8$  respectively.

**Key words** light propagation, turbulence, spot dancing