

# 西安地区大气相干长度的实验测量及分析

吴鹏飞, 贾璐瑶\*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 大气相干长度是评价激光传输系统自适应相位校正效果的重要参数, 因此对大气相干长度进行测量分析具有实际应用价值。设计并搭建了一种基于差分像运动法测量大气相干长度的光学系统, 并进行了外场实验, 分析了西安地区全天范围内大气相干长度的变化趋势。结果表明, 虽然在不同方向上测量的大气相干长度值有所不同, 但总体变化趋势一致, 且夜晚变化较白天更为稳定。本文结果为研究城市无线光通信系统提供了一定的参考。

**关键词** 大气光学; 大气相干长度; 差分像运动法; 大气湍流; 相位屏

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.090101

## Experimental Measurement and Analysis of Atmospheric Coherence Length in Xi'an Area

Wu Pengfei, Jia Luyao\*

College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Shaanxi, Xi'an 710048, China

**Abstract** Atmospheric coherence length is an important parameter for evaluating the effect of adaptive phase correction in a laser transmission system, so there is a high research value to measure and analyze the atmospheric coherence length. In this paper, a system for measuring atmospheric coherence length by differential image motion method is designed and built to carry out field experiments in Xi'an area, and the variation trend of atmospheric coherence length within the whole day in Xi'an area is analyzed. Results show that although the values of atmospheric coherence length measured in different directions are different, the overall variation trend is the same, and the variation is more stable at night than at day. These results have a reference value for the construction of urban wireless optical transmission systems.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric coherent length; differential image motion method; atmospheric turbulence; phase screen

**OCIS codes** 010.1330; 060.4510

## 1 引言

激光通信具有低成本、高速率、部署灵活和强抗干扰能力等优势, 因此备受关注。激光在传输过程中受到大气湍流的影响, 导致激光波阵面发生畸变<sup>[1]</sup>、光束漂移、扩展、闪烁<sup>[2]</sup>等现象, 从而影响通信质量, 因此需要准确分析激光传输过程中大气湍流对通信系统的影响。一般采用大气相干长度  $r_0$  对大气湍流介质进行定量描述, 由于大气湍流效应受

温度、风速等因素的影响, 其值会不断发生变化, 故快速测量大气相干长度对大气激光通信具有重要意义<sup>[3]</sup>。测量大气相干长度  $r_0$  的方法包括光闪烁、激光雷达等, 与这些方法相比, 差分像运动法 (DIMM) 因成本低、操作简便得到了广泛应用。

O'Donovan 等<sup>[4-5]</sup>设计研发了一种基于卡塞格林望远镜的 DIMM 测量仪, 该仪器便携性较好, 通过与风廓线雷达法测量结果进行对比, 验证了该仪器稳定性较好。Okita 等<sup>[6]</sup>使用 DIMM 测量仪, 测

收稿日期: 2019-08-16; 修回日期: 2019-08-25; 录用日期: 2019-09-10

基金项目: 陕西省重点产业创新链计划(2017ZDCXLGGYG01)、西安市碑林区科技计划(GX1816)、陕西省重点研发计划(2019GY-033)

\* E-mail: 763404240@qq.com

量了南极科考站上方的大气湍流强度,同时在白天进行了观星实验。2012年,于龙昆等<sup>[7]</sup>利用 DIMM 测量仪得到了海边整层大气湍流参数的全天变化数据。数据分析表明,海边整层大气相干长度日变化明显,夜晚起伏无规则,且日变化没有陆地上的剧烈。2017年,董振龙等<sup>[8]</sup>分别在北京和成都两个城市地区搭建了光波传输特性测试链路,分析了不同地理区域内大气相干长度值的变化趋势及误差来源。2018年,王钰茹等<sup>[9]</sup>设计了折反路径上的激光探测成像系统,通过拟合的方法推算出湍流折射率结构常数与大气相干长度的值。

$r_0$  可表示为光波传输路径上的总湍流积分,因此可通过测量  $r_0$  提高通信系统中的目标识别跟踪效率。本文在现有理论上,通过数值仿真模拟了不同大气相干长度下的湍流情况,定量分析了大气湍流强度对通信系统产生的影响,为实际中进行激光通信提供了理论支撑。最后搭建了光传输系统实验平台,对西安地区大气相干长度进行测量,分析了大气湍流在白天和夜间、晴天和多云条件下的变化趋势。

## 2 差分像运动法原理分析

反演法测量大气相干长度的方法,主要通过测量大气折射率结构常数进行反演,两者的关系可表示为<sup>[10]</sup>

$$r_0 = \left[ 0.432k^2 \int_0^\infty C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

式中: $k$  为波数; $C_n^2(z)$  为大气折射率结构常数; $z$  为传输距离。

因反演法得到的大气相干长度值并不准确,所以本实验使用差分成像运动法测量  $r_0$ , 主要通过测量光波在大气中传输时引起的到达角起伏,即两个光斑相对位置的随机抖动计算大气相干长度。图 1 所示为光斑质心位置与到达角的关系,表现为光斑质心  $(x_c, y_c)$  偏离了理想质心  $(x_0, y_0)$ , 由于大气相干长度具有各向异性,可通过测量不同方向上的  $r_0$  值,再通过统计求平均来减小误差。

结合 CCD 单像素的尺寸,可知到达角与光斑实际质心的位置关系为

$$x_c = \alpha f, \quad (2)$$

式中: $\alpha$  为到达角; $f$  为光学系统等效焦距。

差分像运动法是通过计算图像上两个光斑质心位置的相对运动求  $r_0$ <sup>[11]</sup>, 可表示为

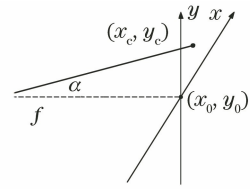


图 1 光斑质心位置与到达角关系

Fig. 1 Relationship between center of mass and angle of arrival

$$r_0 = \left[ \frac{2\lambda^2 f^2 (0.358D^{-1/3} - 0.242d^{-1/3})}{\rho_i^2 + \rho_i^2} \right]^{3/5}, \quad (3)$$

式中: $\lambda$  为光波波长; $D$  为子瞳口径; $d$  为子瞳中心间距,要求  $d \geq 2D$ ;  $\rho_i^2$  为水平连线方向上光斑质心的漂移均方差; $\rho_i^2$  为垂直连线方向上光斑质心的漂移均方差。

## 3 不同湍流条件下远场光斑仿真分析

### 3.1 湍流相位屏模拟

使用功率谱反演法仿真湍流相位屏的原理为:首先生成一个频域内零均值、单位方差的 Hermitian 复高斯随机数矩阵,然后用湍流相位谱的功率谱密度函数  $\Phi(k_x, k_y, k_z)$  对其进行滤波处理,最后进行傅里叶逆变换得到大气湍流随机相位屏<sup>[12]</sup>。

假定大气湍流是各向同性且局地均匀的,则 Kolmogorov 谱的功率谱密度函数可表示为

$$\Phi(k, z) = 0.033C_n^2(z)k^{-11/3}. \quad (4)$$

与  $z$  轴方向垂直,通过任意相位板调制后的大气湍流相位功率谱可表示为

$$F_\Phi(k_r) = 2\pi k^2 0.033k_r^{-11/3} \int_z^{z+\Delta z} C_n^2(z) dz, \quad (5)$$

式中: $\Delta z$  为湍流板的切面厚度; $k_r = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2}$ 。

引入大气湍流的相干长度  $r_0$ , 可将(5)式简化为

$$F_\Phi(k_r) = 0.49r_0^{-5/3}k_r^{-11/3}. \quad (6)$$

利用大气湍流相位谱与  $r_0$  的对应关系,使用均匀大气条件下的功率谱结构模型,对不同湍流强度的湍流相位屏进行仿真,结果如图 2~4 所示,主要参数为:光束波长  $\lambda = 632.8$  nm,光束传播距离  $h = 2000$  m,相位屏宽度为 0.4 m,网格数目为  $256 \times 256$ ,  $r_0$  分别取 0.01 m(强湍流),0.1 m(中湍流),0.2 m(弱湍流)。

对比图 2~4 可以明显发现:采用功率谱方法进行数值仿真生成的相位屏倾斜度较低,导致在大尺

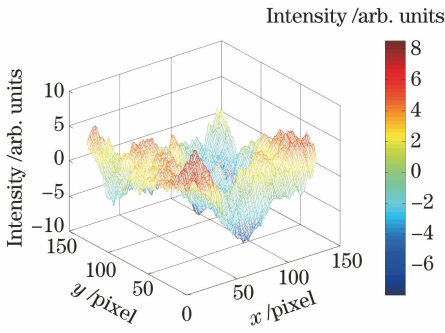


图 2  $r_0=0.01$  m 时模拟湍流相位屏的三维空间分布  
Fig. 2 Three-dimensional space distribution of simulated turbulent phase screen with  $r_0=0.01$  m

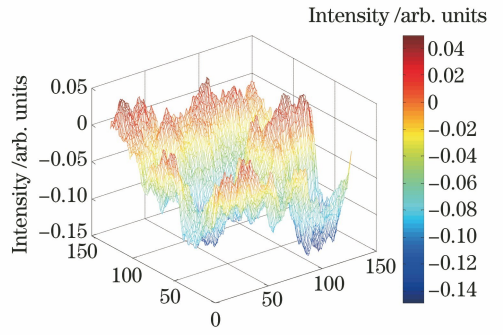


图 4  $r_0=0.2$  m 时模拟湍流相位屏的三维空间分布  
Fig. 4 Three-dimensional space distribution of simulated turbulent phase screen with  $r_0=0.2$  m

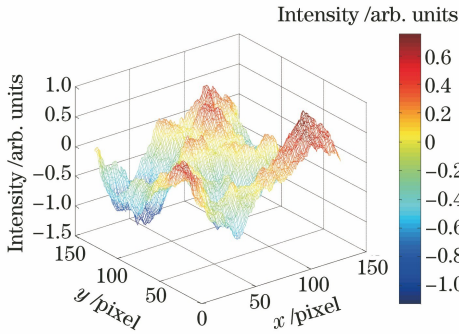


图 3  $r_0=0.1$  m 时模拟湍流相位屏的三维空间分布  
Fig. 3 Three-dimensional space distribution of simulated turbulent phase screen with  $r_0=0.1$  m

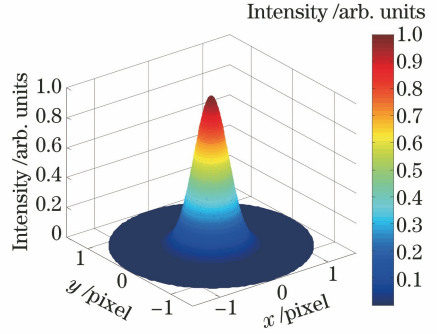


图 5 真空中传输时的远场光斑三维分布图  
Fig. 5 Three-dimensional map of far-field light spot during vacuum transmission

度的相位起伏上出现的误差较大,当  $r_0=0.01$  m 时,相位起伏变化范围在  $-10\sim 10$  rad 之间;当  $r_0=0.1$  m 时,相位起伏变化范围在  $-1.5\sim 1$  rad 之间;当  $r_0=0.2$  m 时,相位起伏变化范围在  $-0.15\sim 0.05$  rad 之间,这证明了大气湍流中的随机相位起伏随湍流强度的增强,变化幅度也越来越大。

### 3.2 不同湍流强度下的激光传输仿真

#### 1) 真空条件下的数值仿真

图5所示为高斯光束在真空中传输一段距离后

远场光斑的三维光强,可以看出此时光强呈理想高斯型分布。仿真参数为:光束束腰半径为 0.02 m,波长为 632.8 nm,传输距离为 3500 m,接收相位屏的尺寸为 0.6 m $\times$ 0.6 m,相位屏间距为 1 km,网格数设置为 256 $\times$ 256。

#### 2) 不同强度湍流下的数值仿真

图 6~8 所示为高斯光束分别经 3.1 节生成的随机相位屏传输一段距离后的远场光斑在三维空间和二维平面下的光强分布图。

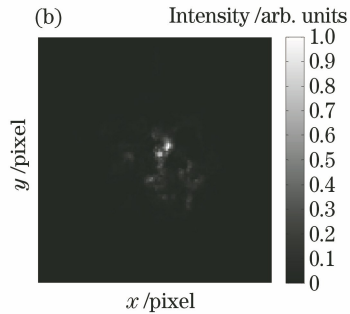
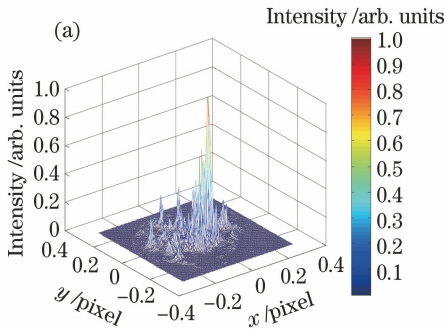


图 6  $r_0=0.01$  m 的光强分布。(a)三维分布图;(b)二维分布图

Fig. 6 Light intensity distributions with  $r_0=0.01$  m. (a) Three-dimensional distribution; (b) two-dimensional distribution

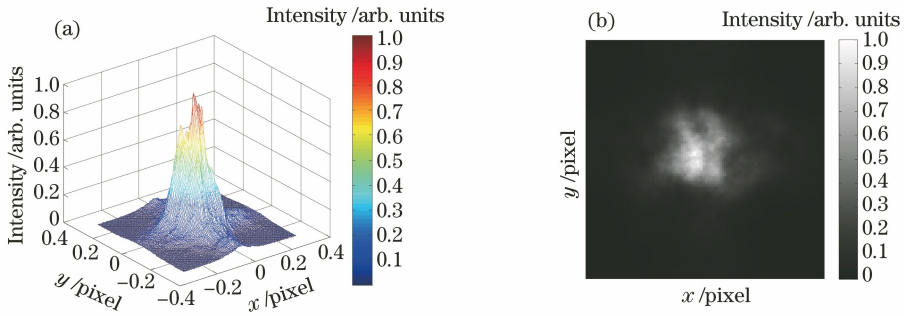


图 7  $r_0=0.1$  m 的光强分布。(a) 三维分布图；(b) 二维分布图

Fig. 7 Light intensity distributions with  $r_0=0.1$  m. (a) Three-dimensional distribution; (b) two-dimensional distribution

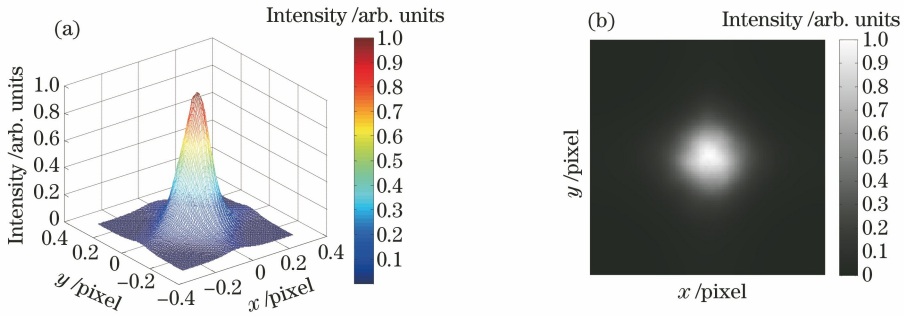


图 8  $r_0=0.2$  m 的光强分布。(a) 三维分布图；(b) 二维分布图

Fig. 8 Light intensity distributions with  $r_0=0.2$  m. (a) Three-dimensional distribution; (b) two-dimensional distribution

对比真空中传输后的光斑分布可以发现,经不同强度大气湍流传输后,接收像面上的光斑发生了明显的畸变,随着湍流强度的增加,受到湍流影响也越严重,特别是图 6 中光经大气强湍流传输后,光斑已经出现了破碎现象。

## 4 实验组成

### 4.1 实验系统搭建

采用差分像运动法对西安地区大气相干长度进行测量,采集全天接收到的信号光。选定发射地点与接收地点,在接收端设置一块白色幕布可明显观察光斑的实时位置。用 CCD 相机实时拍摄光斑图像,利用计算机软件对每一帧图像进行预处理,提取出光斑的质心位置进行分析。图 9 为实验使用的基于四孔差分像运动法的测量系统,主要包括激光器、发射端望远镜、接收端望远镜、CCD 相机及计算机处理终端。

### 4.2 测量地点选取

图 10 所示为实验中的激光通信链路的直线距离,总长为 2400 m,其中发射端设置在西安市东二环韩森路新东尚小区某楼层,接收端设置在西安理工大学学科 2 号楼 8 楼最东侧房间内,两地之间无房屋建筑的遮挡,传输路径近似水平。

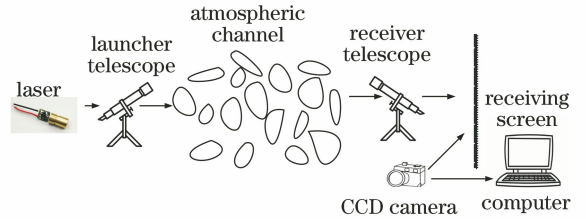


图 9 采集系统组成

Fig. 9 Composition of collection system



图 10 通信链路直线距离示意图

Fig. 10 Linear distance diagram of communication link

### 4.3 激光发射系统

图 11 为 DIMM 系统发射端实物图,激光器产生的信号通过光学望远镜形成聚焦光束发向接收端,激光器是激光通信系统中的关键器件之一,会影响系统整体性能。实验中使用波长为 650 nm 的半导体激光器(西安华科光电有限公司生产的 DH650-100-5 型激光器),输出功率为 100 mW。为

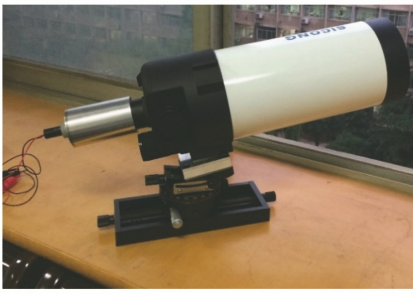


图 11 DIMM 系统发射端实物图

Fig. 11 Physical map of DIMM system transmitter

减小激光通信引起的能量衰减、光束扩散及波前畸变等效应,需要通过光学发射天线对激光束进行聚焦、准直、扩束,使光束到达接收端时能量相对集中,从而提高接收端系统的信噪比。因折反式系统具有体积小、扩束比大的优点<sup>[13]</sup>,所以实验使用折反式望远镜(西安北方光电股份有限公司生产的西光 SICONG 牌 3309-02 型马卡天文望远镜)进行激光的发射和接收。

#### 4.4 接收系统

接收端望远镜镜筒前有一块 4 个直径为 2 cm 小孔的圆形挡板,用一块白色幕布作为接收屏与激光传输方向垂直放置,CCD 相机拍摄尽量正对接收屏上的光斑,且在固定位置采集差分运动图像。图 12 为接收端挡板的 4 孔配置图。通过 CCD 相机(陕西维视生产的 MV-E 系列千兆网工业相机)拍摄,可得到同一目标的 4 个像点,同时测量 6 组不同的基线、4 个方位上的大气相干长度值。

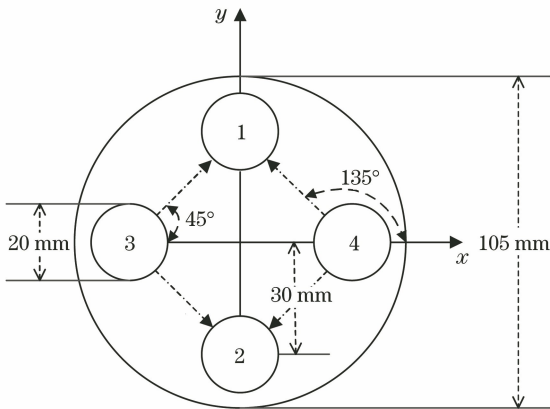


图 12 4 孔配置图

Fig. 12 Configuration of four aperture module

图 13 为测量系统中 CCD 相机实物外形图。该系列相机像素在 800 万以上,采用千兆以太网络进行传输时,具有功耗低,散热良好,图像质量清晰、稳定等特点,同时支持第三方图像处理软件直接调用。表 1 为 CCD 相机对应的指标参数,图 14 为实验中



图 13 工业 CCD 相机外形图

Fig. 13 Profile of industrial CCD camera

获得的差分运动图像,图 15 为对应的光强三维分布图。

表 1 CCD 相机性能指标

Table 1 Performance indexes of CCD camera

Parameter	Value
Maximum resolution / (pixel × pixel)	1600 × 1200
Pixel size / (μm × μm)	4.4 × 4.4
Optical size	1/1.8"
Time of exposure / μs	16—5 × 10 <sup>6</sup>
Effective photosensitive area / mm	7 × 5.3
Maximum frame rate / (frame · s <sup>-1</sup> )	20

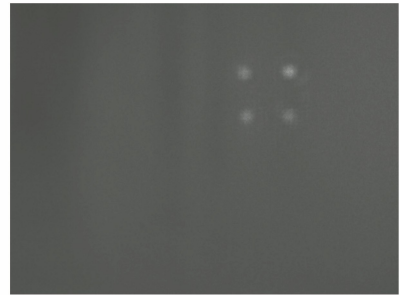


图 14 DIMM 系统成像效果图

Fig. 14 DIMM system imaging effect

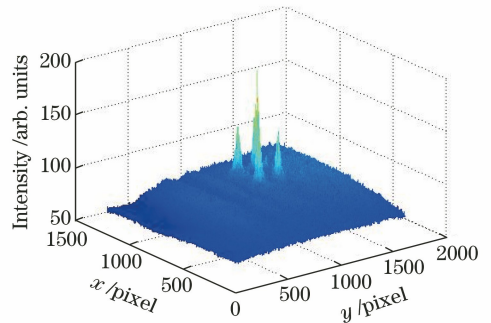


图 15 光斑能量三维分布

Fig. 15 Three-dimensional distribution of spot energy

## 5 实验结果分析

由于西安冬季雾霾比较严重,因此选择在 2018 年 8 月(夏季)晴朗无云的天气进行测试,对采集到

的光斑,使用文献[14]中的算法进行处理。

1) 测量时间:2018-08-17T19:00,晴天。使用 DIMM 测量仪进行实验观测,采样频率为20 Hz,采

样数目为 55 个,对采集得到的连续多帧差分图像进行处理和计算,以图 14 为例,得到 6 组基线 4 个方向上的大气相干长度值如图 16 所示。

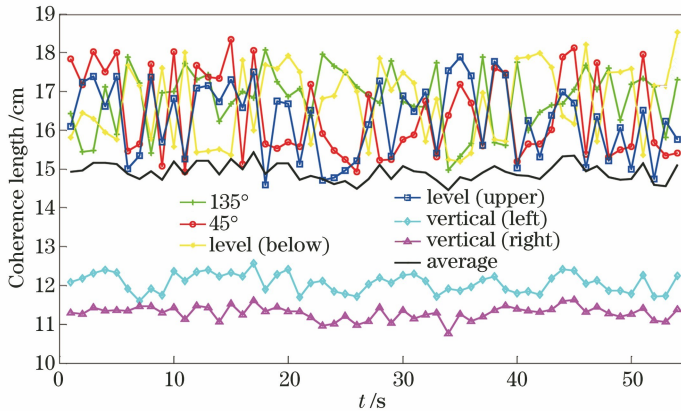


图 16 连续多帧图像大气相干长度值

Fig. 16 Atmospheric coherence length of continuous multi-frame images

从图 16 中可以发现,由于此时太阳刚刚下山,光斑抖动方差较小,总体来说大气相干长度的值在 10~19 cm 范围内波动。与其他三个方向对比发现,两个水平方向上出现最大值的频率最高,其次为 45°方向和 135°方向,铅直方向上并没有出现最大值,这符合大气湍流的各向异性。对该时刻所有方向上的测量值进行统计平均,发现该时刻内大气相干长度测量值的变化是平稳的,在 14.5~15.5 cm 范围内出现波动。

2) 测量时间:2018-08-15T08:00—23:30。使用 DIMM 测量仪平均每 15 min 测量一次,采样方法与上述相同,得到该时刻各个方向上  $r_0$  的统计平均值如图 17 所示。

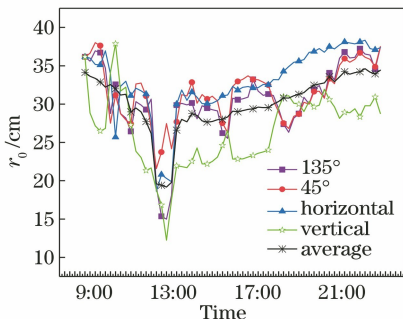


图 17 全天内 4 个方向大气相干长度测量值

Fig. 17 Measured atmospheric coherence length in four directions in a whole day

从图 17 中可以看出各个方向上的大气相干长度值在 11:00—14:00 波动范围较大,12:00 左右大气相干长度最小,湍流强度达到极大值。21:00 左右大气相干长度稍有下降,这种现象可能是由于夜

间突然起风造成的,23:30 观测结束。

3) 测量时间:2018-08-15T08:00—23:30、2018-08-16T08:00—23:30。使用 DIMM 测量仪平均每 15 min 测量一次,采样方法与上述相同,得到该时刻内所有方向上  $r_0$  的平均值,该时段内大气相干长度变化趋势如图 18 所示。

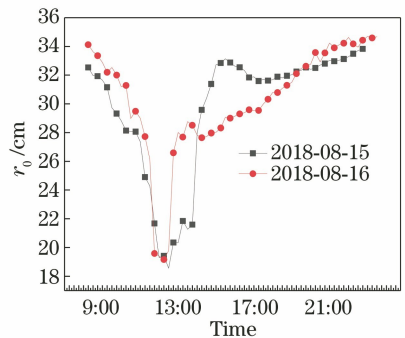


图 18 白天大气相干长度测量数值对比

Fig. 18 Numerical comparison of measured atmospheric coherence lengths at daytime

从图 18 中可以发现湍流在全天范围内的变化情况:每日中午前后(11:00—14:00)湍流较强,其他时间湍流较弱,大气相干长度也有同样的变化规律。图 18 中 2018-08-16 的曲线在 13:00 之后急剧上升,这是该时段内太阳被云层遮挡,从晴天变为阴天,湍流变弱造成的结果。

4) 测量时间:2018-08-16T00:00—08:00。使用 DIMM 测量仪平均每 15 min 测量一次,采样方法与上述相同,得到该时段内所有方向上  $r_0$  的平均值,该时段内大气相干长度变化趋势如图 19 所示。

对比图 18、图 19 可以明显发现白天的大气相

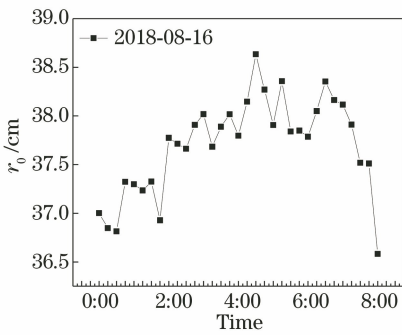


图 19 夜间大气相干长度测量数值

Fig. 19 Measured nocturnal atmospheric coherence lengths  
干长度均小于晚上,且白天大气相干长度变化范围较大,在 18.0~35.0 cm 之间,夜间大气相干长度变化比较平稳,在 36.5~38.8 cm 之间。

通过长时间的观测,得出光斑在晴天不同时段内的变化情况为:9:00 前,光斑抖动范围较小,此时大气相干长度值总体变化范围也较小,且变化较为平稳;11:00 左右,太阳逐渐升高,湍流开始变强,接收面上的光斑有小部分出现破碎现象;12:00—14:00 左右,光斑抖动范围较大,光斑分布为很多破碎的小块,闪烁比较严重,12:30 左右湍流强度达到极大值,此时大气相干长度最小,分别为 18.5 cm 和 19.0 cm;15:00 以后光斑闪烁逐渐减小,光斑抖动情况开始变弱,大气相干长度值逐渐增大,变化比较稳定,变化范围在 30.0~38.0 cm。

## 6 结 论

因为大气湍流是随机运动的,现如今并没有一个衡量大气相干长度测量结果是否准确的标准,常用的判断方式有两种:一种是通过与已经开发并投入使用的设备进行对比,观察两种设备测量结果的一致性程度;另一种是分析测量结果与理论研究的湍流强度变化趋势是否一致。由于没有同类型的测量仪器进行对比,因此通过在不同时间段进行测量实验,证实了该系统测量得到的西安地区大气相干长度变化趋势基本与近地面层的湍流强度随时间变化的趋势相吻合,稳定性较好,与已有的大气相干长度测量系统相比较,该设备可进行不间断测量,在外场具有便于操作等优势,采取的多光斑检测算法可快速准确地提取所需数据,因而在实际工程中应用是可行的。

## 参 考 文 献

[1] Guo Z H, Xu D S, Wang S P, et al. Effect of

atmospheric turbulence on laser beam propagation [J]. Laser Technology, 1992, 16(2): 65-72.

郭振华, 许德胜, 王世鹏, 等. 大气湍流对激光传输的影响[J]. 激光技术, 1992, 16(2): 65-72.

[2] Yao H F, Ni X L, Chen C Y, et al. Channel compensation based on pulse laser propagating in atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0101003.

姚海峰, 倪小龙, 陈纯毅, 等. 基于脉冲激光在大气中传输的信道补偿[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0101003.

[3] Song L J, Liu Z, Ni X L, et al. Measurement experiment and analysis of atmospheric coherence length [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 38(2): 125-127, 132.

宋卢军, 刘智, 倪小龙, 等. 大气相干长度测量实验与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 125-127, 132.

[4] O'Donovan B, Seneta E B, John S, et al. DIMMWIT measurements of the spatial and temporal scale of atmospheric turbulence at COAST and MROI[C] // SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Proc SPIE 5491, New Frontiers in Stellar Interferometry, Glasgow, United Kingdom, 2004: 1310-1319.

[5] O'Donovan B. Differential image motion monitor, which is transportable[D]. Cambridge, 2006: 20-35.

[6] Okita H, Ichikawa T, Ashley M C B, et al. Excellent daytime seeing at Dome Fuji on the Antarctic plateau [J]. Astronomy & Astrophysics, 2013, 554: L5.

[7] Yu L K, Wu Y, Hou Z H, et al. Measurement and analysis of whole layer atmospheric coherence length at seaside of South China Sea [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3046-3049.

于龙昆, 吴毅, 侯再红, 等. 南海海边整层大气相干长度的测量与分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3046-3049.

[8] Dong Z L, Gao C, Li L, et al. Test and analysis of atmospheric coherence length in optical wireless communication channel for urban area [J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(5): 52-54.

董振龙, 高超, 李黎, 等. 城市信道中大气相干长度测试与分析[J]. 光通信技术, 2017, 41(5): 52-54.

[9] Wang Y R, Mei H P, Kang L, et al. Experimental investigation on retro-reflective laser imaging in turbulent atmosphere [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 17-21.

- 2018, 45(4): 0401008.
- 王钰茹, 梅海平, 康丽, 等. 湍流大气中折反路径激光成像探测实验 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401008.
- [10] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(10): 1372-1379.
- [11] Ao J, Liu J Q, Ma C B. A new measurement of atmospheric coherent length using differential image motion[C] // 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), October 18-21, 2016. Guilin, China. IEEE, 2016: 264-267.
- [12] Han D, Liu Y Q, Zhao X, et al. Effect of beam radius on heterodyne efficiency for space coherent optical communication [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2016, 39(3): 36-40.
- 韩冬, 刘云清, 赵馨, 等. 光束腰半径对空间相干光通信外差效率的影响 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(3): 36-40.
- [13] Hu M Y, Feng Z W, Fan E R, et al. Design of high power laser focus system over variable long distance [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 062204.
- 胡明勇, 封志伟, 范二荣, 等. 一种可变远距离大功率激光聚焦系统的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 062204.
- [14] Wu P F, Jia L Y. A fast adaptive detection algorithm for multi-objective spot [J]. Laser Journal, 2019(6): 27-31.
- 吴鹏飞, 贾璐瑶. 一种多目标光斑自适应快速检测算法 [J]. 激光杂志, 2019(6): 27-31.