

近海面大气湍流中准直高斯光束光斑扩展实验

王红星^{1,2} 宋 博^{1,2} 吴晓军^{1,2} 陈典将³

¹海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001

²山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001

³91395 部队, 北京 102443

摘要 光斑扩展是光束在大气湍流中传输时的一个重要效应。利用光束动态变化测试系统在烟台地区近海面进行了准直高斯光束传输实验,在测量光斑扩展、温度、相对湿度和大气折射率结构常数等数据的基础上,分析了近海面准直高斯光束光斑扩展的变化特征。分别选择不同距离的链路和不同时间段进行实验,分析光斑扩展的变化情况。研究表明:近海面大气湍流中的光斑扩展半径与大气折射率结构常数相关性在晴朗时比风浪较大时要好。在风浪较大时,光斑扩展半径与大气折射率结构常数相关性较差,但在一定时刻与温度和相对湿度相关性较好;在链路距离相同的条件下,夜间光斑扩展半径明显小于昼间,且夜间光斑起伏幅度也小于昼间。

关键词 大气光学;光通信;近海面;大气湍流;准直高斯光束;光斑扩展

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0305004

Experiment of Beam Spreading of Collimated Gaussian Beam in Atmospheric Turbulence Under Sea Surface Environment

Wang Hongxing^{1,2} Song Bo^{1,2} Wu Xiaojun^{1,2} Chen Dianjiang³

¹Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute,

Yantai, Shandong 264001, China

²Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai, Shandong 264001, China

³91395 Army, Beijing 102443, China

Abstract Beam spreading is an important effect when a beam propagates in atmospheric turbulence. The collimated Gaussian beam spreading experiments are carried out with beam dynamic change test system under the sea surface environment in Yantai region, and the beam spreading characteristics are analyzed based on data including beam spreading, temperature, relative humidity and atmospheric refractive index structure parameter in different distances and different time periods experiments. Results show that the correlation between beam spreading and refractive index structure parameter is better in sunny weather than in stormy waves weather. But in stormy waves weather the correlation between beam spreading and temperature and relative humidity is good at certain time. In the condition of the same link distance, the beam spreading is obviously smaller at night than in day, and the amplitude fluctuation of beam spreading has the same results.

Key words atmospheric optics; optical communications; sea surface environment; atmospheric turbulence; collimated Gaussian beam; beam spreading

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 010.3310

1 引 言

光束在大气湍流中传输时,由于小尺度湍流影响,在远场接收平面上,会出现光斑扩展现象^[1-3]。光斑扩

收稿日期: 2015-09-11; 收到修改稿日期: 2015-10-15

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2013FQ010)、山东省“泰山学者”建设工程专项经费(ts20081330)

作者简介: 王红星(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信技术、现代通信新技术等方面的研究。

E-mail: buaawhx@163.cn

展会使接收端光束质量变差、接收光功率降低、接收端机跟踪不精确,严重时会导致传输的中断,进而对激光雷达、无线激光通信设备和光学跟踪系统等性能造成严重影响^[4-6]。因此,进行光束在大气中的传输实验,测量不同环境下的光斑扩展数据并分析其特征,对激光应用于实际工程中具有重要的意义。

关于光斑扩展效应,迄今为止已有不少的理论工作,主要包括水平和斜程链路条件下的基模(TEM₀₀)准直、聚焦高斯光束以及其他多模光斑扩展的相关研究^[7-10],但是这些工作大多建立在大气湍流局地均匀和各向同性假设的基础上,而实际的大气湍流并非各向同性、均匀,因此非常有必要从实验角度去研究光斑扩展问题^[11]。实际测量光斑扩展的报道有:2005年12月14日至16日,美国佛罗里达州立大学 Andrews 和 Philips 等^[12]在肯尼迪航天中心的航天飞机着陆场进行了光束漂移与光斑半径扩展的实验测量,传输下垫面环境为混凝土,其发射端使用了2个1060 nm的激光器(TEM₀₀激光器和TEM₁₁多模激光器),接收端采用CCD相机进行图像采集,光束分别在1、2、5 km的水平路径上传输。实验分析了1 km和2 km时光斑扩展半径与大气折射率结构常数的分布情况;虽然文中记录了大气折射率结构常数与温度的变化,但并未对光斑扩展半径与温度间的变化关系进行分析。在国内,2011年3月娄岩等^[13]在长春理工大学进行光强起伏和光斑面积的实验分析,传输下垫面环境为城市建筑群,发射端为波长为808 nm、功率为20 W的大功率半导体激光器,接收端采用:1) CCD相机,其分辨率为640 pixel×480 pixel,每个像素大小为7.6 μm×7.6 μm,帧频为50 Hz;2) 焦距为2500 mm的卡塞格林望远系统(口径有200 mm和50 mm)。该文献中分别使用200 mm和55 mm接收孔径测量了光斑面积的变化和统计特性,实验结果表明使用200 mm接收孔径可以有效抑制光斑面积随时间的起伏效应,但并未对光斑面积的变化及统计特性进行分析。2007年,张文涛等^[14]对光束经大气湍流传输后的光斑扩展效应进行了仿真模拟和实验测试研究,仿真模拟设置发射波长为830 nm,传输距离为1.6 km,得到的光斑扩展半径为10 cm;实验测量距离为1.6 km,给出了模拟光斑与实验光斑的图像对比,但并未具体介绍测量光斑扩展的其他实验条件与相关结论。

通过以上的分析可以看出,测量光斑扩展的实验多数是在机场和城市等陆地环境下进行的,暂没有近海面上光斑扩展的实验数据。随着激光工程应用领域与范围的不断扩展,为了准确设定应用于近海环境下激光设备的发射功率和接收孔径等参数,并为分析现有设备在近海环境下的链路余量、误码率和可用度等性能提供有力的数据支撑,有必要针对近海环境下的光斑扩展特征进行实验研究。

本文对近海环境下准直高斯光束的光斑扩展变化进行了实验测量。从大气折射率结构常数、温度、相对湿度等方面对光斑扩展变化进行了分析;在不同距离和昼夜时间段进行实验,分析了光斑扩展的变化特征。

2 实验设备与实验过程

测试场地位于烟台地区近海面,如图1所示,选择3条链路进行测试,距离分别为2.12、1.21、1.02 km。发射端和接收端都在滨海公路旁,海拔为3.5 m,测试链路下垫面为近海面。



图1 测试链路实际场景图(数据来源于Baidu.com)

Fig.1 Aerial photo of laser propagation path (data from Baidu.com)

实验设备主要使用光束动态测试仪。发射端设备主要有导向光与信号光的激光发射器,导向光是可见光,波长为532 nm,信号光为准直TEM₀₀高斯光束,波长为830 nm,光束发散角为0.1 mrad。接收端设备主要有:1) 红外CCD摄像机,像素数量为659 pixel×494 pixel,每个像素大小为5.6 μm×5.6 μm,帧频为1~119 Hz;

2) 1 m×1 m 的漫反射屏幕;3) 改造后的全顺汽车作为拍摄暗箱。其他辅助实验仪器有 BLS450 闪烁仪、六要素气象站等。

实验过程如图 2 所示,发射端发射导向光,在接收端找到导向光后将其引导至屏幕中心,关闭导向光开启信号光,使用红外 CCD 摄像机对光束动态变化进行记录,测试不同天气、不同时刻的光束漂移方差和光斑扩展半径等参数。为了减小背景光的影响,每次测试数据之前会采集此时刻的背景光数据,同时在距离光斑设备 3 m 之内的地方架设闪烁仪和气象站,分别测量大气折射率结构常数和温度、相对湿度的变化。

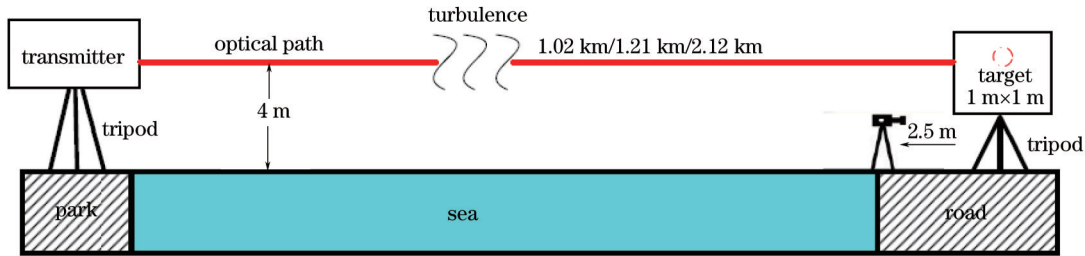


图 2 测试链路示意图

Fig.2 Schematic of experimental optical path

为了准确把握近海面大气湍流中准直高斯光斑扩展的统计特征,分别在 2014 年至 2015 年期间不同月份进行了 6 次测试。图 3(a)(b)分别给出了于 2014 年 12 月 14 日和 2015 年 2 月 5 日在近海面 1.2 km 链路上进行测试时的测试环境照片。测试帧频为 100 Hz,持续时间为 10 s,2 次实验分别采集了 200 组和 130 组数据。2014 年 12 月 14 日温度变化范围为 3~7 °C,相对湿度为 25%~45%,风速为 0.4~3 m/s,风向为 260°~280°,大气折射率结构常数为 $1.4 \times 10^{-16} \sim 2.6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$;2015 年 2 月 5 日温度变化范围为 0.1~1 °C,相对湿度为 55%~70%,风速为 4~8 m/s,风向为 300°~320°,大气折射率结构常数为 $5.3 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。由图中可以看出 2 天均为晴天,但 2 月 5 日风速较大,导致海面上有比较大的海浪,空气中相对湿度较高,同时会有较大颗粒的水滴漂浮在测试链路上。



图 3 测试环境照片。(a) 2014 年 12 月 14 日;(b) 2015 年 2 月 5 日

Fig.3 Photos of test environment. (a) December 14, 2014; (b) February 5, 2015

3 实验数据处理与光斑扩展测量方法

由于太阳光的影响,实验时 CCD 摄像机采集的、未经处理的光斑动态变化视频中会存在可以看作作为噪声的背景光,对每帧图像进行背景光处理是十分必要的,同时云层遮住太阳等偶然因素也会导致背景光变化,在进行每组光斑动态变化测试前需要先采集背景光。背景光具体处理步骤有:1) 在采集光斑动态变化之前,关闭发射端,采集漫反射板上的背景光作为参考,处理光斑动态变化时将背景光光强数据去除;2) 处理背景光之后,将视频每帧边缘背景异常的部分裁剪掉;3) 对每帧图像进行滤波处理,将光斑范围之外的视频剪除后对光斑变化进行分析。

目前有关光斑扩展的测量方法有很多,主要有:二阶矩法、刀口法、套桶法及 $1/e$ 和 $1/e^2$ 等,这些方法都可以准确地测量光斑扩展。本文主要采用二阶矩方法,设在广州方向某一位置 z 处,测量得到的光束截面功率密度分布为 $I(x,y,z)$,则其光束分布的质心坐标 \bar{x} 和 \bar{y} 的计算公式可以表示为

$$\bar{x} = \frac{\iint xI(x,y)dx dy}{\iint I(x,y)dx dy}, \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint yI(x,y)dxdy}{\iint I(x,y)dxdy} \quad (2)$$

x 和 y 方向的光斑扩展半径 $W_{LT,x}$ 和 $W_{LT,y}$ 由功率密度分布 $I(x,y,z)$ 的二阶矩给出,其计算公式表示为

$$W_{LT,x} = \sqrt{\frac{4 \iint (x - \bar{x})^2 I_{mn}(x,y)dxdy}{\iint I_{mn}(x,y)dxdy}} \quad (3)$$

$$W_{LT,y} = \sqrt{\frac{4 \iint (y - \bar{y})^2 I_{mn}(x,y)dxdy}{\iint I_{mn}(x,y)dxdy}} \quad (4)$$

4 测试结果及分析

为了能够较好地反映近海面光斑扩展的变化特征,本节从3个方面分析光斑扩展的变化情况。1) 选取2天天气条件差别较大的实验数据,分析相同链路距离和时间段条件下光斑扩展半径与大气折射率结构常数、温度和相对湿度等参数的变化关系;2) 选取较为平稳的天气,改变测试链路距离,分析不同距离光斑扩展的变化情况;3) 选取同一天的光斑实验数据,分析昼间与夜间光斑扩展的变化情况。

4.1 不同天气条件光斑扩展分析

为了研究光斑扩展半径与大气折射率结构常数 C_n^2 、温度和相对湿度的关系,在2014年12月14日和2015年2月5日进行了光斑扩展实验,实验结果分别如图5~7所示。图5为光斑扩展半径与大气折射率结构常数的变化曲线,由图可以看出2014年12月14日天气较好时,12:55~15:33期间光斑扩展半径与大气折射率结构常数变化趋势大体一致。2015年2月5日风浪较大时,光斑扩展半径变化与大气折射率结构常数变化无明显的相关性。上述现象可能与实际测试中光学测试系统自身的抖动及温度、相对湿度局部变化导致的大气折射率结构常数的变化有关,本节继续对温度和相对湿度与光斑扩展半径的变化关系做进一步分析。

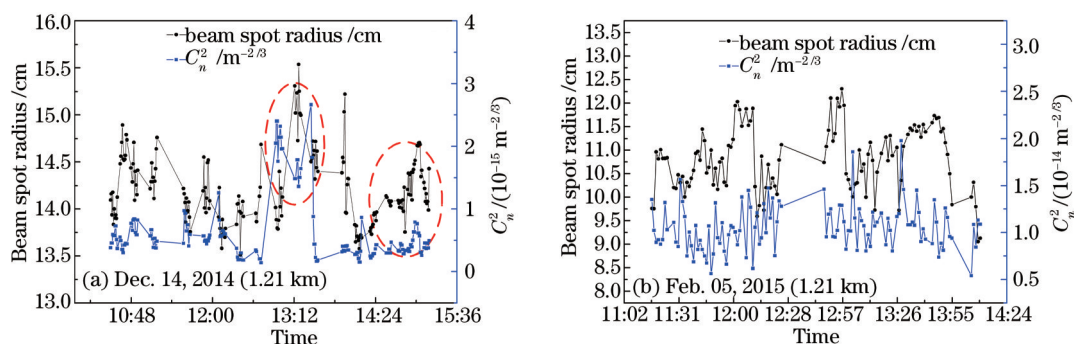


图5 光斑扩展半径与大气折射率结构常数变化曲线

Fig.5 Changing curves of beam spreading radius and refractive index structure parameter

由图5~7中的实验结果可以看出,在整个测试时间段内光斑扩展半径与温度、相对湿度和大气折射率结构常数的变化趋势都不一致,但是在不同时段分别与温度、相对湿度和大气折射率结构常数的变化局部一致,2014年12月14日11:34~13:17期间光斑扩展半径与温度变化趋势大体一致,14:36~15:00期间光斑扩展半径与相对湿度变化趋势大体一致;2015年2月5日在11:16~12:22期间光斑扩展半径与温度变化趋势较为一致。可以看出在近海环境下,光斑扩展半径被温度、相对湿度和大气折射率结构常数等参数共同影响,并不随一种大气参数的变化而变化,但在一定时刻会与其中一种参数的变化趋势一致。另外,横向风速也是影响光束在大气中传播的一个重要因素,由于实验条件限制这里不做讨论。

图7对比了光斑扩展半径与相对湿度的变化,可以看出近海面的光斑扩展半径在某些时刻与相对湿度的变化一致,这是由于风浪、太阳辐射等影响因素导致近海面上相对湿度的变化特征较内陆等其他环境有较大的差别,空气中的水分子以及水滴颗粒会影响光束在大气中的传播,最终影响接收端的光斑扩展,从实验结果中可以看出,相对湿度会对近海面的光斑扩展造成一定影响。

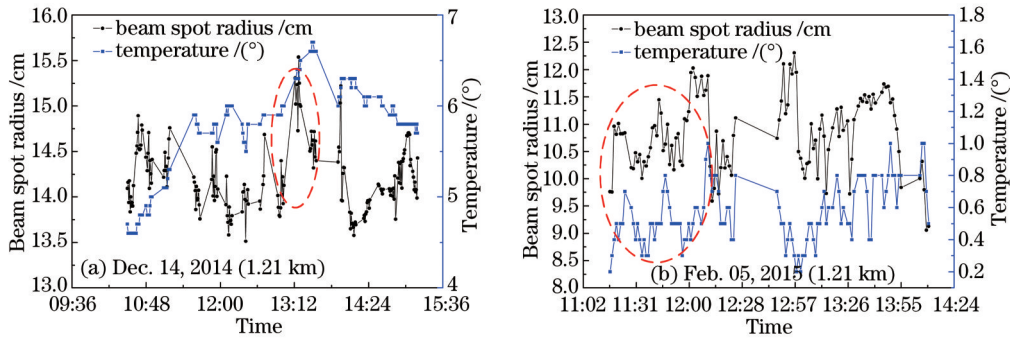


图6 光斑扩展半径与温度变化曲线

Fig.6 Changing curves of beam spreading radius and temperature

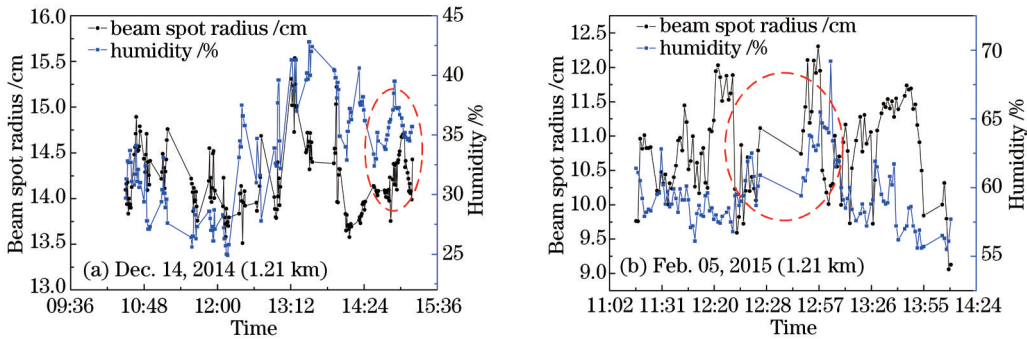


图7 光斑扩展半径与相对湿度变化曲线

Fig.7 Changing curves of beam spreading radius and relative humidity

4.2 不同距离光斑扩展分析

为了研究不同链路距离下光斑扩展的变化情况,在2015年3月21日下午14:00-16:00和21:00-22:30进行了光斑扩展实验,实验结果如图8所示,为方便比较,将每个光斑扩展的实验数据除以该组数据的均值,进行归一化处理。图8(a)为夜间21:00-22:30分别在1.21 km和2.12 km链路上得到的光斑扩展变化情况,其中1.21 km时光斑扩展半径的均值 $\bar{W}_{L,T}$ 为16.05 cm,变化范围为15.87~16.23 cm,2.12 km时光斑扩展半径的均值为22.01 km,变化范围为21.6~22.4 cm。图8(b)为昼间14:00-16:30分别在1.21 km和1.02 km链路上得到的光斑扩展变化情况,其中1.21 km时光斑扩展半径的均值为17.69 cm,变化范围为17.3~18.21 cm,1.02 km时光斑扩展半径的均值为16.89 km,变化范围为16.77~17.21 cm。从上述实验结果可以看出,当链路距离 L 从1.21 km增加至2.12 km时,光斑扩展的起伏幅度有明显的增加,当链路距离从1.02 km增加至1.21 km时,光斑扩展的整体起伏幅度变化不大,但在个别时刻起伏较大。

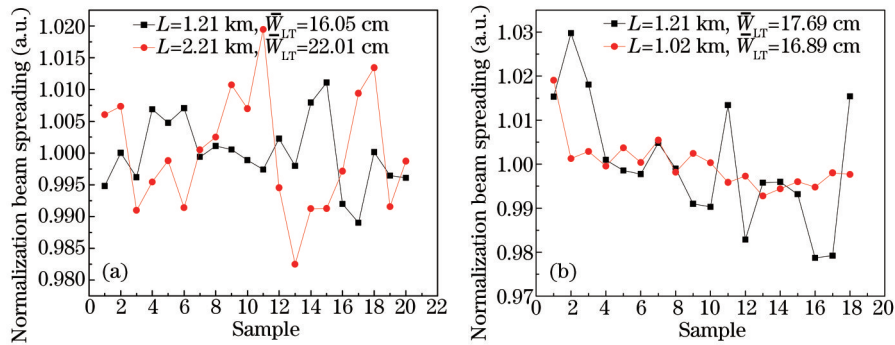


图8 不同距离归一化光斑扩展变化曲线。(a) 21:00-22:30; (b) 14:00-16:30

Fig.8 Changing curves of normalization beam spreading at different distances. (a) 21:00-22:30; (b) 14:00-16:30

4.3 昼间与夜间光斑扩展的对比分析

根据文献[15]报道,不同时间段的大气湍流强度变化特征存在差异,导致光斑扩展的变化。2015年3月

21日进行了光斑扩展实验,实验结果如图9所示,其中图9(a)为方便比较,将每个光斑扩展的实验数据除以该组数据的均值,进行归一化处理。图9分别给出了不同时间段光斑扩展半径和相对应的大气折射率结构常数的变化情况,图9(a)为链路距离为1.21 km时14:00-14:30与21:00-21:30时间段的光斑扩展变化情况,昼间光斑扩展半径的均值为17.69 cm,变化范围为17.3~18.21 cm,夜间时光斑扩展半径的均值为16.05 cm,变化范围为15.87~16.23 cm。图9(b)中昼间的大气折射率结构常数为 $1.19 \times 10^{-14} \sim 2.57 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,夜间大气折射率结构常数为 $1.25 \times 10^{-14} \sim 2.27 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。从上述实验结果可以看出,昼间大气折射率结构常数略大于夜间,光斑扩展半径与大气折射率结构常数的变化没有明显的线性关系;夜间光斑扩展小于昼间的光斑扩展,且夜间光斑扩展的起伏幅度也明显小于昼间。

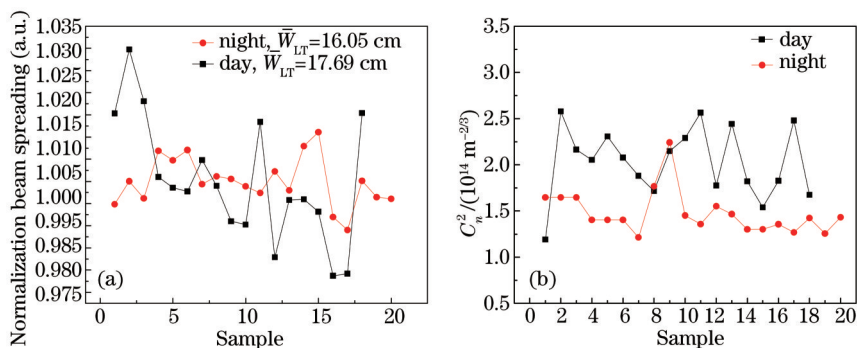


图9 不同时间段(a)光斑扩展半径与(b)大气折射率结构常数变化曲线

Fig.9 Changing curves of (a) beam spreading and (b) index structure parameter at different periods

5 结 论

对烟台地区近海环境下准直高斯光束经大气传输后的光斑扩展变化进行了实验测量,对测量的大气折射率结构常数、温度、相对湿度与光斑扩展半径间的变化关系进行了分析;对比分析了光斑扩展理论计算值与实测值的差异;选择不同距离的实验链路,分析了链路距离对光斑扩展变化的影响。由此得到以下结论:从光斑扩展实测数据与气象参数变化曲线可以看出,近海面的光斑扩展半径并不随温度、相对湿度和大气折射率结构常数中一种参数的变化而变化,但在一定时刻会与其中一种参数的变化趋势一致,说明近海光斑扩展的变化受到温度、相对湿度和大气折射率结构常数等参数的共同影响,可以看出相对湿度是影响近海环境下光斑扩展效应的一个重要部分。

参 考 文 献

- 1 L C Andrews, R L Phillips. Laser Beam Propagation Through Random Media[M]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005.
- 2 H G Sandalidis. Performance of a laser Earth-to-satellite link over turbulence and beam wander using the modulated Gamma-Gamma irradiance distribution[J]. Applied Optics, 2011, 50(6): 952-961.
- 3 I Toselli, B Agrawal, S Restaino. Gaussian beam propagation in maritime atmospheric turbulence: Long term beam spread and beam wander analysis[C]. SPIE, 2010, 7814: 78140R.
- 4 F Dios, J A Rubio, A Rodríguez, et al.. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink[J]. Applied Optics, 2004, 43(19): 3866-3873.
- 5 J Ma, Y Jiang, L Tan, et al.. Influence of beam wander on bit-error rate in a ground-to-satellite laser uplink communication system[J]. Optics Letters, 2008, 33(22): 2611-2613.
- 6 Guo Jing, Zhang He, Wang Xiaofeng. Beam spread characteristics of laser fuze in the rain[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0113001. 郭 婧, 张 合, 王晓锋. 激光引信在降雨中的光束扩展特性[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0113001.
- 7 J Reclons, L C Andrews, R L Phillips. Analysis of beam wander effects for a horizontal-path propagating gaussian-beam wave: Focused beam case[J]. Optical Engineering, 2007, 46(8): 086002.
- 8 J H Churnside, R J Lataitis. Wander of an optical beam in the turbulent atmosphere[J]. Applied Optics, 1990, 29(7): 926-930.
- 9 S Yu, Z Chen, T Wang, et al.. Beam wander of electromagnetic Gaussian-Schell model beams propagating in atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7581-7585.

- 10 Zhang Shaodi, Sun Honghai. High precision method of long-ranged laser spot position measurement[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0708003.
张少迪, 孙宏海. 远距离激光光斑位置高精度测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0708003.
- 11 D T Wayne, R L Phillips, L C Andrews, *et al.*. Beam wander of a collimated beam: Comparing theory and experiment[C]. SPIE, 2008, 7091: 709100.
- 12 R L Phillips, L C Andrews, J Stryjewski, *et al.*. Beam wander experiments: Terrestrial path[C]. SPIE, 2006, 6303: 630306.
- 13 Lou Yan, Jiang Huilin, Chen Chunyi, *et al.*. Analysis of experimental data of the scintillation fluctuation and spot area in atmosphere laser communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 515-519.
娄岩, 姜会林, 陈纯毅, 等. 激光大气湍流传输光强起伏及光斑面积实验分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 515-519.
- 14 Zhang Wentao, Zhu Baohua. Reseach on the laser beam through turbulence atmosphere channel[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(4): 784-787.
张文涛, 朱保华. 大气湍流对激光信号传输影响的研究[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(4): 784-787.
- 15 Wu Xiaojun, Wang Hongxing, Li Bifeng, *et al.*. Statistical analysis of atmospheric refractive index structure parameter under the sea surface environment[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0401002.
吴晓军, 王红星, 李笔锋, 等. 近海面大气折射率结构常数统计特性分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0401002.

栏目编辑: 史 敏