

# 近海面大气湍流中准直光束漂移特征的实验研究

王红星<sup>1,2</sup> 吴晓军<sup>1,2</sup> 宋 博<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001

<sup>2</sup>山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001

**摘要** 光斑漂移是光束在湍流大气中传输时的一个重要效应。利用 CCD 成像技术在烟台地区近海面进行了准直高斯光束传输实验,并在实测数据的基础上,分析得到了近海面准直高斯光束的漂移特性。研究结果表明:水平漂移幅度大于垂直漂移幅度,对于 1.21 km 近海面路径而言,前者介于 5.25~10.69 mm 之间,后者介于 4.45~8.59 mm 之间,两者之比平均数为 1.33,小于其他环境下聚焦光束的比值,随着传输距离的增加,它们之间的差异逐渐缩小,夜间时段的比值大于白天时段的比值,并且近海面不同时段的光束漂移幅度差别较小。此外,还对测试期间的大气折射率结构常数进行了简要分析。

**关键词** 大气光学; 激光传输; 大气湍流; 海面环境; 准直光束漂移; 大气折射率结构常数

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1101005

## Experimental Study on Beam Wander of Collimated Beam in Atmospheric Turbulence Under Sea Surface Environment

Wang Hongxing<sup>1,2</sup> Wu Xiaojun<sup>1,2</sup> Song Bo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University,  
Yantai, Shandong 264001, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing,  
Yantai, Shandong 264001, China

**Abstract** Beam wander is an important effect when a beam propagates in atmospheric turbulence. A set of measurements of beam wander of collimated beam using CCD techniques are conducted under the sea surface environment in Yantai region, and the characteristics are analyzed based on the measured data. Results show that the beam wander is larger in the horizontal direction than in the vertical direction, and the amplitude in horizontal direction is between 5.25 mm and 10.69 mm, and in vertical varies from 4.45 mm to 8.59 mm for a 1.21 km optical path. The mean ratio between the standard deviation in two directions is 1.33, and is lower than the value in other environments. The difference between the beam wander in two directions reduces with the increasing propagation distance, and the ratio is larger in nighttime than in daytime. The beam wander keeps stable at different times. In addition, atmospheric refractive index structure parameter is also analyzed during the test period.

**Key words** atmospheric optics; light propagation; atmospheric turbulence; sea surface environment; collimated beam wander; refractive index structure parameter

**OCIS codes** 010.1300; 010.1330; 010.3310

## 1 引 言

当激光束在大气中传输时,大尺度湍流涡旋的影响使其偏离原本的方向,在远处接收平面上,将会出现

收稿日期: 2015-05-21; 收到修改稿日期: 2015-07-03

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

作者简介: 吴晓军(1984—),男,博士研究生,助理工程师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: 195358836@qq.com

导师简介: 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.com

光斑随机抖动,此现象称之为光束漂移<sup>[1-3]</sup>。它极大地增加了实时捕捉激光信号的难度,严重时将会导致传输中断,进而对激光测距、光学跟踪以及激光通信等性能产生严重影响<sup>[4-6]</sup>。因此,通过开展野外激光传输实验,实际测量不同环境下的光束漂移数据,并分析得到特定类型光束的漂移特征,对于激光应用工程具有重要意义。

关于光束漂移效应,迄今为止已有不少的理论工作<sup>[7-10]</sup>,主要包括水平和斜程链路条件下的基模(TEM<sub>00</sub>)准直、聚焦高斯光束以及其他多模光束漂移的相关研究<sup>[11-13]</sup>,但是这些工作大多是建立在大气湍流局地均匀和各向同性的假设基础之上,而实际的大气湍流并非各向同性、均匀,因此从实验角度去研究光束漂移问题就显得非常有必要<sup>[14-15]</sup>。结合激光应用工程的实际需求,目前在国内外已经开展了一些有关光束漂移的实际测量工作,主要侧重于不同类型光束在不同传输环境下的光束漂移变化特性研究。在国外,美国佛罗里达州立大学的 Philips 等<sup>[6]</sup>在肯尼迪航天中心的航天飞机着陆场进行了光束漂移的实验测量,传输下垫面环境为混凝土,其发射端使用了两个 1060 nm 的激光器(单模激光器和多模激光器),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。实验结果显示:在发射孔径尺寸相同时,多模和单模激光器发射的激光束质心漂移的均方差基本相同;同样是该大学的 Wayne 等<sup>[14]</sup>继续在肯尼迪航天中心进行了传输路径为 1 km 的水平光束漂移测试,其传输下垫面为草地,采用 532 nm 固体激光器发射基模准直高斯光束,接收端采用 CMOS 高速相机进行拍摄,采集不同发射孔径尺寸下的光束漂移数据,并实测数据与理论模型计算值进行对比,目的在于验证其在该环境下的适用性。在国内,中国科学院安徽光学精密机械研究所是进行光束漂移野外实际测试的典型科研单位,饶瑞中等<sup>[17]</sup>利用波长为 632.8 nm 的基模聚焦激光束及阵列探测器对陆地环境的漂移特性进行测试,得出了水平漂移幅度小于垂直漂移幅度的特征,并对不同频率范围内漂移频谱的幂指数进行了拟合;马晓珊等<sup>[18-19]</sup>在合肥实验场对 473 nm 基模聚焦高斯光束的漂移特性进行了测量,并采用同样的实验装置,在沿海某地对近海面环境下的光束漂移数据进行了采集,通过对比不同环境下的光束漂移变化特征,得出了近海面条件下聚焦光束水平漂移幅度与垂直漂移幅度的比值为 1.83,大于陆地实验场的比值 1.46,同时也对近海面条件下不同采样频率范围内频谱密度的各向异性进行了研究;此外,中国人民解放军总参谋部第六十一研究所、中国电子科技集团公司第三十四研究所以及成都电子科技大学分别对城市环境、热带环境和高原环境下准直高斯光束的漂移幅度进行了测量,其目的都是在于分析内陆环境下光束漂移特征,进而为设计合理的无线光通信系统提供信道数据支撑。

目前,光束漂移测试主要集中在内陆环境下进行,只有极少数单位对近海面环境下聚焦光束的漂移特征进行了分析。而随着海洋经济的快速发展,无线光通信在海上场景的应用迎来了新的机遇和挑战,包括港口环境、舰船之间以及岛屿之间等,因此,有必要进一步地对海上环境大气中光束漂移展开实际测试,进而从多个角度准确把握光束动态变化特征,这对于无线光通信链路损耗估算和天线系统合理设计具有重要的应用价值。

依托烟台地区海边环境的地理优势,本文利用 CCD 成像探测技术对近海面环境下准直高斯光束的漂移特征进行了实际测量,从不同角度对漂移实测数据进行了分析,包括光束漂移统计特征、不同距离条件下光束漂移特征以及典型时段光束漂移特征,并将结果与其他地理环境下、聚焦光束的漂移特征进行对比,目的在于得出近海面环境下准直高斯光束漂移的变化特点。此外,为了反映大气湍流效应对光束漂移的影响,同时也对测试过程中大气折射率结构常数  $C_n^2$  进行了分析。

## 2 链路设置与实验仪器

### 2.1 链路设置

光束漂移测试场地位于烟台地区第一海水浴场附近海域,根据数据分析的实际需求,共选择 3 条不同距离的近海面测试路径。在测试过程中,仪器的接收端统一放置于滨海国际酒店东侧堤坝边,通过将发射端的安放在海边不同的位置,以此来调整测试链路的距离,其具体情况如下:1) 号链路的发射端放置于濒临第一海水浴场的滨海北路海边人行道附近,链路长度约为 1.02 km;2) 号链路的发射端放置于虹口路、滨海北路以及滨海广场交叉点处,链路长度为 1.21 km;3) 号链路的发射端放置于海岸路与东太平街交界靠海边堤坝

处,此条链路距离最长,达到 2.12 km。以上 3 条路径离海平面高度大约为 3.5 m,并且均可以近似看作水平路径。3 条测试链路的实际场景如图 1 所示。



图 1 近海面准直光束漂移测试链路实际场景图(数据来源于 Sogou.com)

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

### 2.2 实验仪器

测试设备采用近红外激光大气传输光束变化动态测试仪,其发射端通过准直系统出射平行基模高斯光束,包括导向光(532 nm 可见光)与信号光(830 nm 近红外光),首先利用精密旋转调节系统,将导向光引导至漫反射屏的中心处,实现发射端与接收端之间的快速对准,然后关闭导向光,开启信号光,做好采集数据准备;为了减弱背景光对测试结果的影响,在测试之前,把全顺车改装成移动暗箱,非常便于随时在不同场景下进行外场机动测试。将分辨率为 656 pixel×494 pixel 的高速 CCD 相机和 1 m×1 m 漫反射屏同时放置于移动暗箱内部,二者之间保持固定的距离,开始对光束的动态变化图像进行采集,实时记录光斑质心在水平方向和垂直方向的坐标,用于后续计算光束的漂移幅度。

此外,为了便于分析测试过程中大气湍流对光束漂移的影响,在同样的传输距离和传输高度上,同时还架设了德国进口的 BLS450 大口径闪烁仪(接收端置于移动暗箱外),进行大气折射率结构常数  $C_n^2$  的测量,用于大气湍流条件的监测。测试链路示意图如图 2 所示。

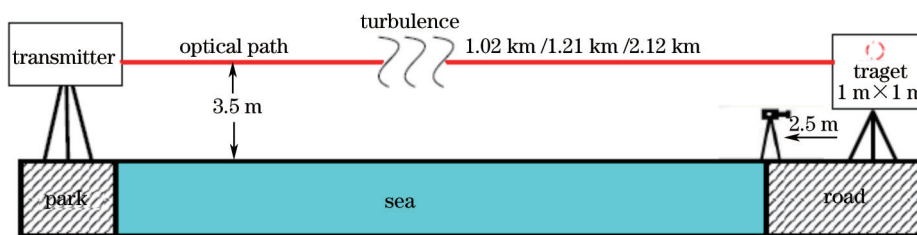


图 2 近海面准直光束漂移测试链路示意图

Fig.2 Schematic of the experimental optical path for collimated beam wander measurement under sea surface environment

### 3 测试结果及分析

光束漂移通常采用光斑质心的位置变化来描述,即用每一帧图像的光强的加权值除以总的光强,则每一帧图像光斑在水平方向和垂直方向上的质心坐标为

$$x_0 = \frac{\iint xI(x,y)dxdy}{\iint I(x,y)dxdy}, \tag{1}$$

$$y_0 = \frac{\iint yI(x,y)dxdy}{\iint I(x,y)dxdy}, \tag{2}$$

式中  $I$  代表单个像素点的光强值。图 3 为某一次测试得到的光斑质心位置分布图,其中图 3(a)为 5 s 采集时间内质心的变化,图 3(b)标出了质心初始的动态位置变化,从中可以形象地观察出光斑质心的随机漂移特征。一般情况下,用光斑质心漂移的均方差  $\sigma_c$  来衡量光束漂移的幅度,用  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别表示光束在水平方

向和垂直方向上的漂移幅度,以两者的比值  $R = \sigma_x / \sigma_y$  来衡量光束在水平和垂直方向上漂移的各向异性。下面将以实测数据为基础,分别对近海面大气湍流中准直高斯光束漂移的统计特征、不同距离条件下的变化特征以及不同时间段下的变化特征进行研究。

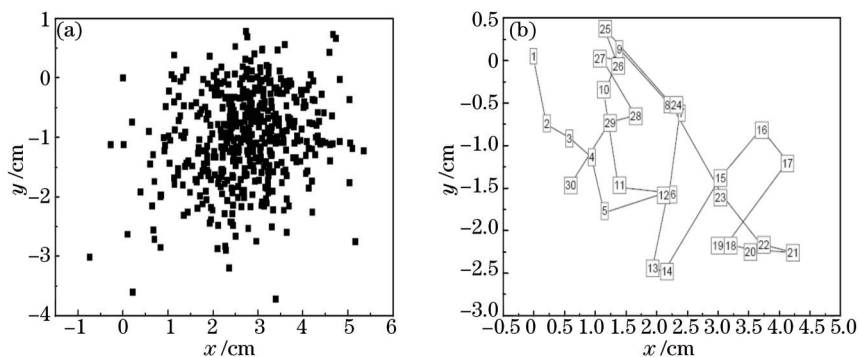


图3 准直高斯光束的光斑质心位置随时间的变化

Fig.3 Temporal variation of the centroid for the collimated beam

### 3.1 光束漂移的统计特性

为了对近海面大气湍流中准直高斯光束漂移的统计特征进行准确把握,分别在2014~2015年期间不同月份进行了6次测试,图4(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1.21 km链路上进行测试时,得到的准直高斯光束在水平和垂直方向上漂移分量的实测结果,每次测试采集图像的帧频为100 frame/s,持续时间为10 s,两次测试分别采集了200组和130组光束漂移数据。

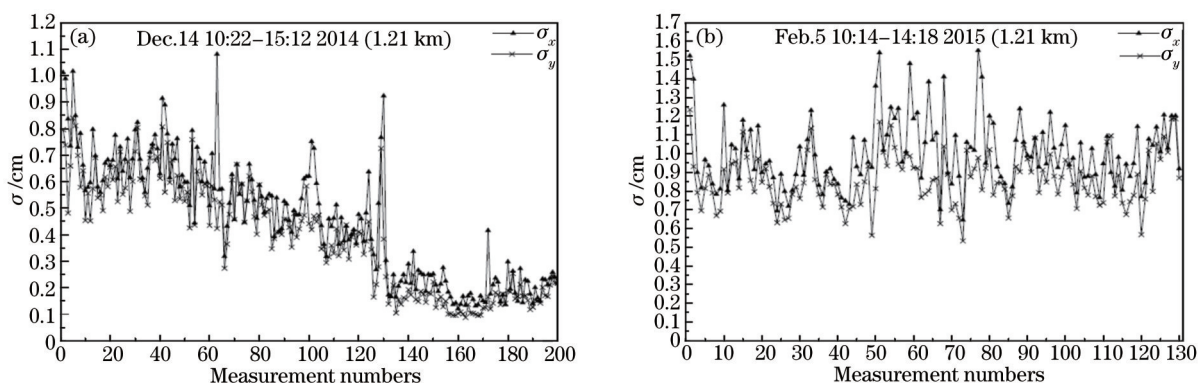


图4 水平和垂直方向光束漂移均方差变化趋势图

Fig.4 Variation of the standard deviation of beam wander in the horizontal and vertical direction

从图4可以看出,受到近海面大气湍流的影响,水平和垂直方向上的漂移分量都处于变化之中,从整体上看,水平方向上漂移幅度大于垂直方向上的漂移幅度,而根据文献[13]和文献[17]所报道的内陆环境下所得到的光束漂移实验结果可知,垂直方向上的漂移幅度大于水平方向上的漂移幅度。虽然在文献[18]所报道的近海面聚焦高斯光束的漂移测试中,也得到了与本文类似的结果,但是通过对比发现,本文所进行的准直高斯光束在水平方向上的漂移分量和垂直方向上的漂移分量之间的差异小于聚焦高斯光束条件下二者之间的差异,对两次测试的比值  $R$  求平均,其数值分别为1.18和1.17,明显小于文献[18]中所报道的  $R$  平均值1.83。此外,Okoulov等<sup>[20]</sup>利用四象限探测器在内陆环境测试得到的准直光束条件下的  $R$  值为1.6,也大于本文测试所得到的  $R$  值。由此可以看出,不同类型高斯光束在特定环境湍流大气中漂移各向异性的程度存在一定的差别。

大气湍流是影响激光束发生漂移的直接因素,而大气折射率结构常数  $C_n^2$  是衡量大气湍流强度重要参数之一,因此分析光束漂移与  $C_n^2$  之间的相互关系具有重要意义。图5中分别给出了2014年12月14日和2015年2月5日两次测试光束漂移总的均方差与大气折射率结构常数的变化趋势图,其中二者之间在时间点上互相对应的,即保证1 min采集一次数据。

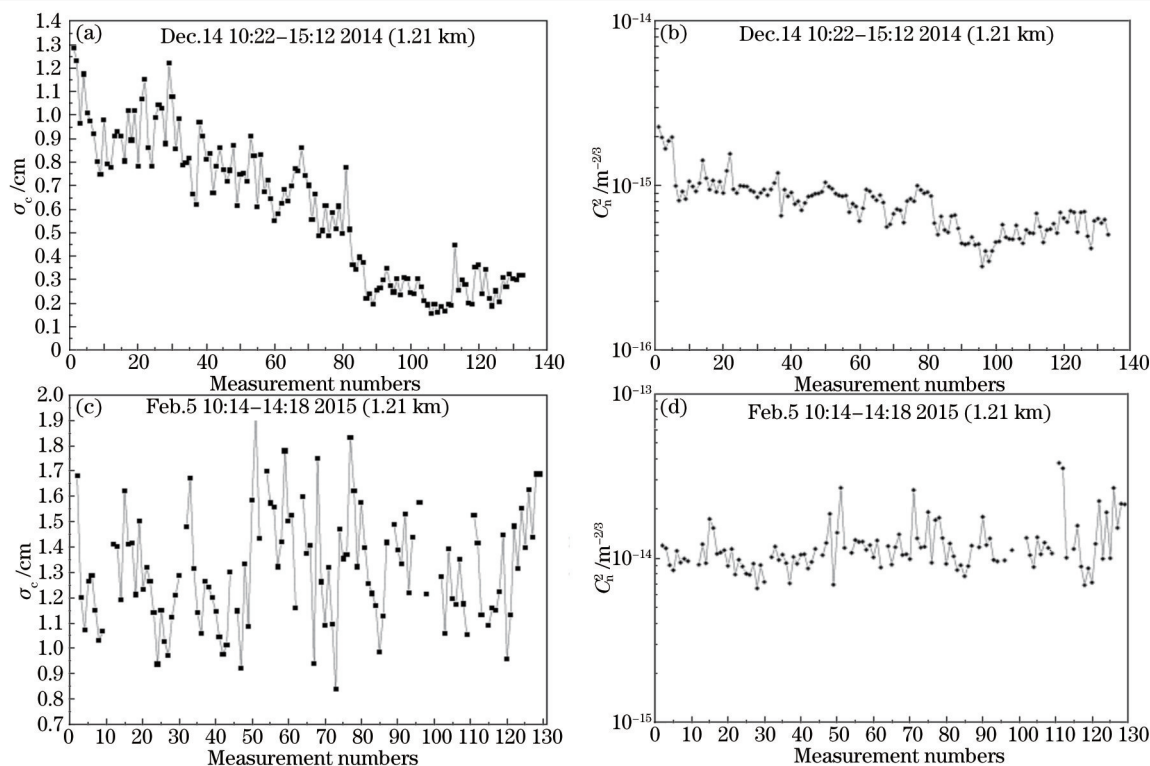


图 5 光束总漂移均方差与大气折射率结构常数变化趋势图

Fig.5 Variation of beam wander and refractive index structure parameter

从图 5 可以看出,在绝大部分时间内,近海面环境下总的光束漂移均方差的变化趋势与大气折射率结构常数  $C_n^2$  变化趋势相当一致,但是 12 月 14 日的光束漂移幅度明显低于 2 月 5 日的光束漂移幅度,其中前者的  $\sigma_c$  值分布于 0.16~1.32 cm 之间,平均值  $\overline{\sigma_c}$  为 0.69 cm,而后者的  $\sigma_c$  值则集中分布在 0.84~1.93 cm 之间,平均值  $\overline{\sigma_c}$  为 1.31 cm。对比两次测试的大气折射率结构常数变化趋势发现,前者的  $C_n^2$  数值整体偏低,主要集中在  $3.23 \times 10^{-16} \sim 2.28 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  之间,平均值  $\overline{C_n^2}$  为  $7.95 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ ,而后者的  $C_n^2$  数值分布于  $3.78 \times 10^{-14} \sim 6.55 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  之间,平均值  $\overline{C_n^2}$  为  $1.21 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,即 12 月 14 日测试期间的湍流强度弱于 2 月 5 日测试期间的湍流强度。

表 1 中列出了于 2014 年至 2015 年期间不同月份在近海面环境下进行的准直高斯光束漂移的统计结果,其测试路径统一为图 1 中的 1.21 km 链路。 $\overline{\sigma_x}$  和  $\overline{\sigma_y}$  分别表示在测试时间段内水平和垂直方向上光束漂移均方差的统计平均值, $\overline{\sigma_c}$  表示该时间段内总的光束漂移均方差的统计平均值, $\overline{R} = \overline{\sigma_x} / \overline{\sigma_y}$  表示水平与垂直方向漂移分量比值的统计平均值。

表 1 近海面准直高斯光束漂移幅度的统计特征

Table 1 Statistical characteristics of collimated beam wander under the sea surface environment

Date	Time	Number	$\overline{C_n^2} / \text{m}^{-2/3}$	$\overline{\sigma_x} / \text{mm}$	$\overline{\sigma_y} / \text{mm}$	$\overline{\sigma_c} / \text{mm}$	$\overline{R}$
2014.03.18	09:00~14:30	100	$3.01 \times 10^{-15}$	6.63	5.12	8.38	1.29
2014.06.17	09:34~14:44	120	$6.38 \times 10^{-15}$	7.63	5.43	9.36	1.41
2014.11.01	09:21~17:56	100	$2.95 \times 10^{-15}$	6.94	4.46	8.35	1.55
2014.12.14	10:22~15:12	130	$7.95 \times 10^{-16}$	5.25	4.45	6.88	1.18
2015.02.05	10:14~14:18	200	$1.21 \times 10^{-14}$	10.02	8.59	13.12	1.17
2015.03.21	10:40~14:00	50	$1.43 \times 10^{-14}$	9.56	7.19	11.45	1.33
	22:00~23:00	20	$1.53 \times 10^{-14}$	10.69	6.75	12.65	1.58
2015.05.09	10:00~14:00	140	$5.06 \times 10^{-15}$	7.22	5.76	9.24	1.25
2015.05.30	12:00~16:30	90	$2.54 \times 10^{-15}$	6.46	4.79	8.04	1.35

表 1 中的统计结果显示:对于 1.21 km 的近海面传输路径,准直高斯光束水平方向漂移幅度大于 5 mm,介

于 5.25~10.69 mm 之间,而垂直方向漂移幅度都低于 10 mm,分布在 4.45~8.59 mm 范围内。其总的光束漂移均方差 不超过 15 mm,低于文献[18]中所报道的 1 km 近海面传输路径条件下聚焦光束的漂移均方差为 20 mm。并且水平方向上的漂移幅度始终大于垂直方向上的漂移幅度,其比值介于 1.17~1.58 之间,平均值为 1.35,而文献[19]报道的内陆合肥实验场聚焦光束水平与垂直方向的比值  $R$  为 1.46,文献[18]报道的东部沿海聚焦光束的两个方向比值  $R$  的平均值达到了 1.83。

### 3.2 不同距离光束漂移对比分析

为了研究近海面环境不同链路长度条件下准直高斯光束的漂移特性,于 2015 年 3 月 21 日在烟台实验场的 3 条链路(如图 1 所示)分两个时段进行了光束漂移测试,图 6 给出了光束漂移实测数据的变化趋势,具体实验情况如下:图 6(a)为白天 10:40~16:00 时段进行测试得到的光束漂移数据,其中在 10:40~14:00 期间进行的是 1.21 km 链路测试,而在 14:30~16:00 期间进行的是 1.02 km 链路测试,每条链路采集 50 组数据;图 6(b)为夜间 20:30~23:00 时段进行测试得到的光束漂移数据,其中 20:30~21:30 进行的是 2.12 km 链路测试,而在 22:00~23:00 期间进行的是 1.21 km 链路测试,每条链路采集 20 组数据。

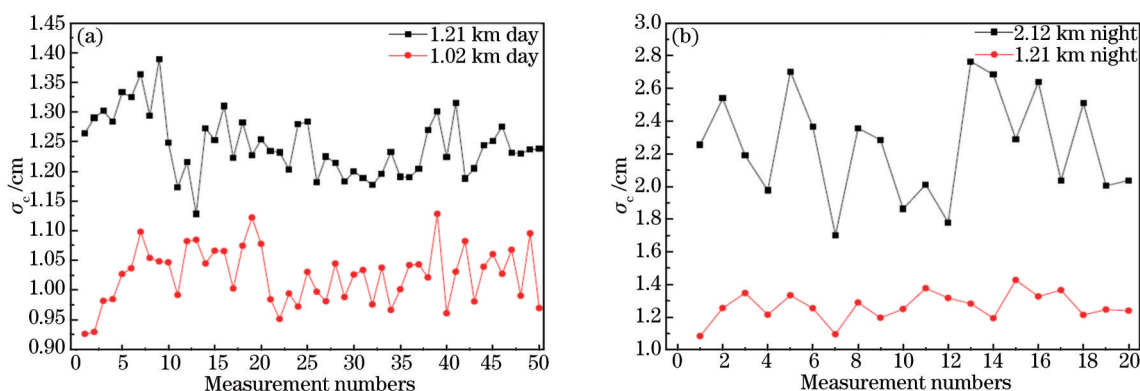


图 6 不同距离下光束漂移均方差变化趋势图

Fig.6 Variation of beam wander mean squared error over different distances

从图 6 中可以看出,对于白天光束漂移测试而言,1.21 km 链路的光束漂移幅度略大于 1.02 km 链路光束漂移幅度,统计结果显示为:1.21 km 链路光斑质心漂移的均方差  $\sigma_c$  分布于 1.13~1.39 cm 之间,平均值  $\bar{\sigma}_c$  为 1.25 cm,该时间段的  $C_n^2$  数值为  $1.43 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ ;对于 1.02 km 链路,  $\sigma_c$  介于 0.93~1.13 cm 之间,平均值  $\bar{\sigma}_c$  为 1.03 cm,其  $C_n^2$  大小为  $1.35 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 。对于夜间光束漂移测试而言,2.12 km 链路的光束漂移幅度明显大于 1.21 km 链路的光束漂移幅度,具体数据情况为:2.12 km 链路光斑质心漂移的均方差  $\sigma_c$  分布在 1.70~2.77 cm 范围内,平均值  $\bar{\sigma}_c$  为 2.25 cm,该时段的  $C_n^2$  值为  $1.44 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ ;而对于 1.21 km 链路,  $\sigma_c$  介于 1.08~1.43 cm 之间,平均  $\bar{\sigma}_c$  为 1.27 cm,  $C_n^2$  值与之前比较接近,为  $1.53 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 。

在 3.1 节主要是分析了同一条链路(1.21 km)的光束漂移各向异性的特征,在本节将以 3 月 21 日的实测数据为基础,继续分析不同链路距离条件下的光束漂移各向异性特征。图 7 中分别给出了白天测试时段和夜

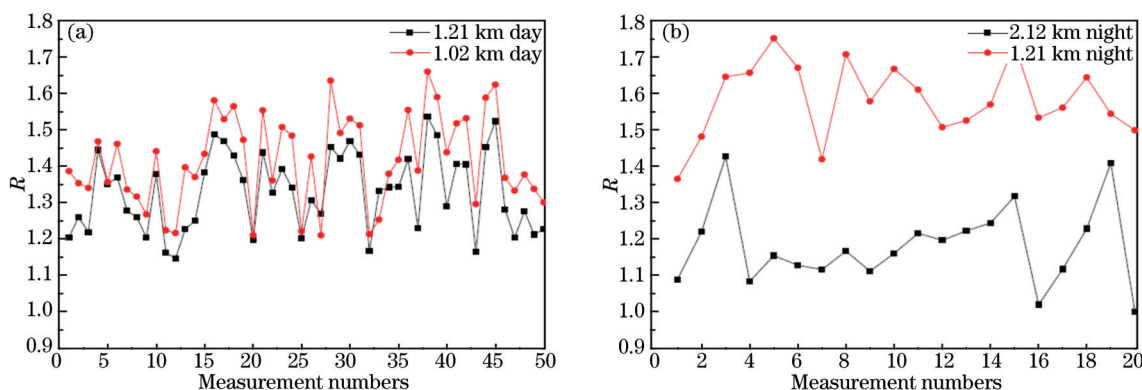


图 7 不同距离条件下水平漂移与垂直漂移比值变化趋势

Fig.7 Variation of the ratio between the horizontal direction and the vertical direction over different distances

间测试时段水平漂移分量与垂直漂移分量比值  $R$  的变化情况,其中图 7(a)为 1.21 km 与 1.02 km 链路  $R$  值的变化趋势,图 7(b)为 2.12 km 与 1.21 km 链路  $R$  值的变化趋势。

从图 7 中可以看出,不同链路距离条件下的  $R$  值大小存在差异,其具体情况为:白天测试 1.21 km 链路的  $R$  分布于 1.15~1.54 之间,平均值  $\bar{R}$  为 1.33,而 1.02 km 链路的  $R$  值介于 1.21~1.66 之间,平均值  $\bar{R}$  为 1.41,前者较长链路的  $R$  值略大于后者较短链路的  $R$  值;对于夜间时段的光束漂移测试而言,两条链路之间  $R$  值的差异较为显著,2.12 km 链路的  $R$  分布于 1.00~1.43 范围内,平均值  $\bar{R}$  为仅为 1.18,但是 1.21 km 链路的  $R$  值介于 1.37~1.75 之间,平均值达到 1.58。同时,对于 1.21 km 链路而言,夜间时段的  $R$  值大于白天时段的  $R$  值。从以上的分析可知,短距离链路的  $R$  值大于长距离链路的  $R$  值,即随着测试链路距离的增加,光束在水平方向和垂直方向漂移幅度的差异逐渐减小。此外,在 5 月 31 日夜间的 19:00~20:40 和 6 月 15 日夜间的 20:00~21:40 时段,分别对图 1 中的 1.02 km 和 2.12 km 链路进行了测试,通过计算得知,前者的  $R$  值分布在 1.33~1.72 范围内,后者的  $R$  值介于 1.10~1.41 之间,平均  $\bar{R}$  值分别为 1.48 和 1.22,由此同样得出短距离条件下不同方向漂移分量之间的差异明显长距离条件下的差异显著。同时,从图中还可以看出,对于同一条链路而言,晚上时段二者之间的差异大于白天它们之间的差异。此外,从本文计算得到的  $R$  来看,其整体数值大小低于文献[18]中所报道的  $R$  数值大小,也就是说准直高斯光束水平方向和垂直方向漂移幅度的差异低于聚焦光束两者之间的差异。

### 3.3 不同时段光束漂移对比分析

根据已有文献报道,在不同的下垫面条件下,不同时段的大气湍流强度变化特征存在差异<sup>[21]</sup>,由此将直接影响光束的传播特性。已有文献关于其他环境下的大气湍流测试认为,夜间和中午的大气湍流差别最大,因此对比分析这两个时段的光束漂移特性最具代表性<sup>[22]</sup>。本节将结合 3 月 21 日在近海面 1.21 km 链路进行的光束漂移测试,以中午 11:00~12:00 和夜间 22:00~23:00 两个典型时段的实测数据为基础,分析不同时段的光束漂移变化特征。图 8(a)表示两个时段光束漂移幅度的变化趋势,图 8(b)为对应的大气折射率结构常数变化趋势。

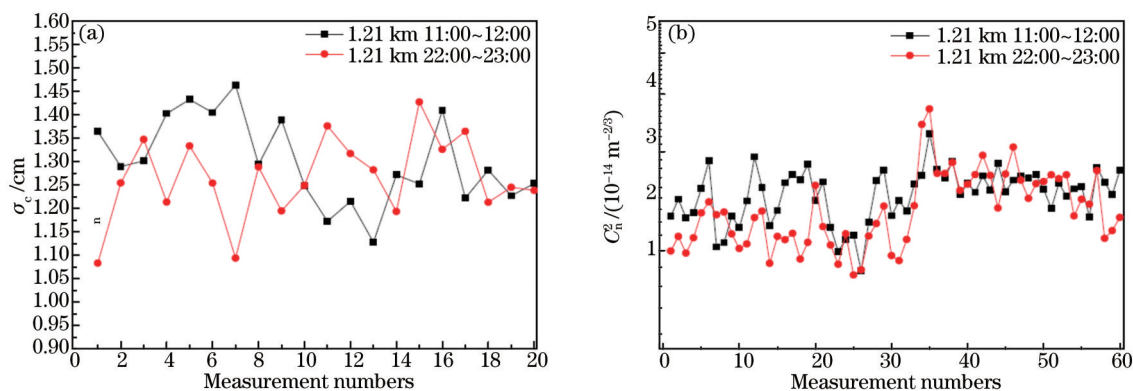


图 8 中午时段与夜间时段光束漂移对比

Fig.8 Comparison of beam wander between daytime and nighttime

从图 8 中可以看出,两个时段的光束漂移幅度没有出现较为显著的差异,统计结果显示:中午 11:00~12:00 时段的平均质心漂移均方差  $\overline{\sigma_c}$  为 1.30 cm,对应的平均大气折射率结构常数  $\overline{C_n^2}$  为  $1.36 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,夜间 22:00~23:00 时段的  $\overline{\sigma_c}$  为 1.26 cm,对应的  $\overline{C_n^2}$  为  $1.50 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,两个时段的数值大小比较接近,这与其他环境下的光束漂移特征存在明显差别,根据文献[17]报道的光束漂移测试结果显示,由于受到不同时段大气湍流强度变化的影响,光束漂移幅度出现较大差异,即中午时段的光斑质心漂移均方差明显高于夜间时段的均方差。

## 4 结 论

对烟台地区近海环境下准直高斯光束漂移效应进行了实际测量,首先对多次测量的实测数据进行统计分析,然后对不同距离下光束漂移特征和不同时段下光束漂移特征进行研究,分别得出以下结论:

- 1) 从多次光束漂移实测数据的统计特性中可以看出,准直高斯光束的水平漂移分量大于垂直漂移分

量,对于近海面 1.21 km 传输路径而言,前者介于 5.25~10.69 mm 之间,后者分布在 4.45~8.59 mm 范围内,并且它们之间的比值平均数为 1.35,低于其他环境下聚焦光束的比值;

2) 从不同距离条件下光束漂移实测数据的对比分析中可以看出,在大气湍流强度近似相同的情况下,长距离的光束漂移幅度明显大于短距离的光束漂移幅度,同时,随着传输路径距离的增加,水平漂移分量与垂直漂移分量的比值随之减小,对于同一条测试链路而言,夜间时段两者之间的比值大于白天时段的比值;

3) 从典型时段的光束漂移实测数据对比分析中可以看出,由于在近海面环境下,白天时段与夜间时段的大气湍流强度没有明显的差异,因此受其影响的光束漂移幅度也没有出现其他内陆环境下表现出的不同时段差异显著的变化特征。

近海面环境下准直高斯光束漂移所表现出的特征说明不同地理环境下、不同类型光束动态变化的复杂性。目前,所开展的光束漂移问题的外场实验研究主要是在近海面环境晴好天气条件下进行的,实验测量涉及的数据类型有限,下一步将陆续针对烟台海岸地区其他下垫面环境(包括沙滩、港口以及山地等)更为复杂气象条件下的光束漂移特性进行实际测试,进而为无线光通信链路的合理设计提供更为丰富的实验数据基础。

### 参 考 文 献

- 1 Andrews L C, Phillips R L. Laser Beam Propagation through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005: 201-205.
- 2 Yi Xiang. Research on Irradiance Scintillation and Mitigation Technology in Atmospheric Laser Communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.  
易 湘. 大气激光通信中光强闪烁及其抑制技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- 3 Sandalidis H G. Performance of a laser earth-to-satellite link over turbulence and beam wander using the modulated Gamma-Gamma irradiance distribution[J]. Appl Opt, 2011, 50(6): 956-961.
- 4 Dios F, Rubio J A, Rodríguez A, *et al.*. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink[J]. Appl Opt, 2004, 43(19): 3866-3873.
- 5 Ma J, Jiang Y, Tan L, *et al.*. Influence of beam wander on bit-error rate in a ground-to-satellite laser uplink communication system[J]. Opt Lett, 2008, 33(22): 2611-2613.
- 6 Han Liqiang, You Yahui. Performance of free space optical communication with combined effects from atmospheric turbulence and point errors[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106005.  
韩立强, 游雅晖. 大气湍流及瞄准误差联合效应下自由空间光通信的性能[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106005.
- 7 Guo Chaoxiu, Ling Chen, Du Xiangli. Theoretical study on propagation properties of semi-Gaussian laser beam[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 121405.  
郭超修, 凌 晨, 杜向丽. 半高斯激光束在自由空间的传输特性理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121405.
- 8 Ke Xizheng, Han Meimiao, Wang Mingjun. Spreading and wander of partially coherent beam propagating along a horizontal-path in the atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106003.  
柯熙政, 韩美苗, 王明军. 部分相干光在大气湍流中水平传输路径上的展宽与漂移[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106003.
- 9 Zhai Chao, Wu Feng, Yang Qingbo, *et al.*. Simulation research of laser beam atmospheric propagation in free-space optical communication [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0505004.  
翟 超, 武 凤, 杨清波, 等. 自由空间光通信中大气光束传输数值模拟研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0505004.
- 10 Huang Yongping, Duan Zhichun, He Yehuan, *et al.*. Change of turbulence distance for partially coherent flat-topped beams propagating through non-Kolmogorov turbulence[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0913002.  
黄永平, 段志春, 贺也洹, 等. 部分相干平顶光束在非 Kolmogorov 大气湍流中湍流距离的变化[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0913002.
- 11 Reclons J, Andrews L C, Phillips R L. Analysis of beam wander effects for a horizontal-path propagation Gaussian-beam wave: Focused beam case[J]. Opt Eng, 2007, 46(8): 086002.
- 12 Churnside J H, Lataitis R J. Wander of an optical beam in the turbulent atmosphere[J]. Appl Opt, 1990, 29(7): 926-930.
- 13 Yu Song, Chen Zhixiao, Wang Tianyi. Beam wander of electromagnetic Gaussian-Schell model beams propagating in atmospheric turbulence[J]. Appl Opt, 2012, 51(31): 7581-7585.
- 14 Wayne D T, Phillips R L, Andrews L C. Beam wander of a collimated beam: Comparing theory and experiment[C]. SPIE, 2008, 7091: 709100.



- 15 Zhou Jian, Sun Jianfeng, Lu wei, *et al.*. Real-time measurement of atmospheric coherence length based on lateral shearing interferometry [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208006.  
周 健, 孙建锋, 鲁 伟, 等. 基于剪切干涉法的大气相干长度直接实时测量[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208006.
- 16 Phillips R L, Andrews L C, Stryjewski J. Beam wander experiments: Terrestrial path[C]. SPIE, 2006, 6303: 630306.
- 17 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun. Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(11): 1011-1015.  
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春. 湍流大气中激光束漂移的实验研究[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 1011-1015.
- 18 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Anisotropy of beam wander of focused beam in atmospheric boundary layer above sea level [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(6): 922-926.  
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 海面大气边界层中聚焦光束漂移各向异性的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 922-926.
- 19 Zhu Wenyue. Applied Analysis and Statistics of Light Propagation in Atmospheric Turbulence Under The Coastal Environment[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, 2006.  
朱文越. 沿海地区激光大气传输湍流效应统计特征及其应用分析[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2006.
- 20 Okoulov V L, Snezhkov G Y. Probability distribution of laser beam wandering on near-land atmosphere range[C]. SPIE, 1998, 3219: 116-122.
- 21 Wu Xiaojun, Wang Hongxing, Li Bifeng. 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. 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.
- 22 Arnold Tunick. Statistical analysis of measured free-space laser signal intensity over a 2.33 km optical path[J]. Opt Express, 2007, 15(21): 14115-14122.

栏目编辑: 史 敏