

对流湍流池湍流特性与真实大气对比实验研究

倪小龙¹ 宋卢军¹ 姜会林¹ 付强¹ 刘艺¹ 张肃¹ 刘智^{1,2*}

¹长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

²长春理工大学研究生院, 吉林 长春 130022

摘要 热风对流式大气湍流模拟装置作为一种主要的大气湍流模拟手段有着广泛的应用,其所模拟的大气湍流与真实大气湍流相比在频谱特性与概率密度特性上的一致性一直鲜有人研究。采用同样的发射与测试设备分别在1.6 km 真实大气链路和室内模拟装置内进行了长期的测量,并对其频谱特性和概率密度分布特性做了详细的分析。实验结果表明,对流式大气湍流模拟装置所模拟大气对于光强闪烁效应的模拟在频谱特性和概率密度分布特性上均与真实的大气相符。对于到达角起伏效应的模拟,在 y 轴方向上,频谱特性与概率密度特性均与真实大气相符;但在 x 轴方向上,由于模拟装置缺少横向侧风产生装置,频谱特性与概率密度特性均与真实大气有区别,概率密度分布无明显规律。

关键词 大气光学; 大气湍流模拟装置; 大气湍流; 频谱分析

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.090103

Contrast Experimental Research on Turbulence Characteristics Between a Simulate Turbulence and the Real Atmospheric Turbulence

Ni Xiaolong¹ Song Lujun¹ Jiang Huilin¹ Fu Qiang¹ Liu Yi¹ Zhang Su¹ Liu Zhi^{1,2}

¹Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²College of Graduate, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract As one of most important simulation methods, hot air convection atmospheric turbulence simulator has been widely used in many area. However, there is rarely study on the spectral characteristics and probability density characteristics of the simulated turbulence. A long-term measurement is made in a real link under 1 km and 6 km atmospheric environment, and a simulate link by using the same laser emission device and measuring device. The detailed analysis of the spectral characteristics and the probability density fluctuations characteristics of the simulator are done. The experimental results show that compared with the real atmosphere, the spectral characteristics and the probability density fluctuations characteristics of scintillation generated by the convection atmospheric turbulence simulator are well agreed to the real atmosphere. For angle-of-arrival, the spectral characteristics and the probability density fluctuations characteristics are well agreed to the real atmosphere on y axis. But on x axis, because of the lack of crosswind, the spectral characteristics is different from real atmosphere. For probability density fluctuations characteristics, there is no obvious pattern.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence simulator; atmospheric turbulence; spectrum analysis

OCIS codes 010.1330; 010.1290; 010.7060

1 引言

激光在大气中传播时,由于大气湍流的影响,传输光束波前会发生随机的起伏,引起光束漂移、光束扩

收稿日期: 2015-04-09; 收到修改稿日期: 2015-05-05; 网络出版日期: 2015-08-25

基金项目: 国防科工局基础科研基金(A362080230)

作者简介: 倪小龙(1988—),男,博士研究生,主要从事大气光学、液晶光调制方面的研究。

E-mail: nixiaolongg@gmail.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事光学系统设计、光电检测技术和激光通信技术等方面的研究。E-mail: HLJiang@cust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: liuzhiqi@126.com

展和强度起伏等现象,导致光束质量变坏。随着天文成像、激光通信、轨迹跟踪等高端技术的发展,这种影响引起人们越来越多的重视^[1-5]。若仅仅是采用野外测量、重复实验等手段,不仅需消耗大量的人力、物力和财力。且鉴于大气本身的不确定性,该方法很难完全准确地反映各种天气环境下的湍流变化。对于能够模拟大气湍流的模拟装置的需求愈加迫切。目前,模拟大气湍流的方法有多种,如基于液晶的大气湍流模拟器、热风对流式大气湍流模拟装置以及基于随机相位片的模拟方法等^[6-8]。

热风对流式大气湍流模拟装置,由于其模拟湍流的机理与真实大气相同而被广泛的使用。其所模拟的大气湍流与真实大气在大气相干长度 r_0 、大气折射率常数 C_n^2 、光强闪烁因子 S_i^2 、到达角(AOA)起伏方差以及光束漂移方差等参数上均相符^[9],但在频谱与概率密度这两个特性上与真实大气湍流的一致性一直鲜有人研究。本文在 1 km 和 6 km 的真实大气链路与室内模拟装置上采用相同的发射与测试设备进行了长期的测量,并对不同传输链路环境下的大气湍流频谱特性和概率密度特性进行了详细的对比分析。

2 对流式大气湍流模拟装置原理

大气湍流模拟装置基于流动的相似性理论基础,完成大气湍流的光学特性的模拟,即当流动具有相似的几何边界条件,且雷诺数相同,那么即使尺寸或者速度不同,甚至流体本身不同,它们也具有相似的动力。其基本结构如图 1 所示。

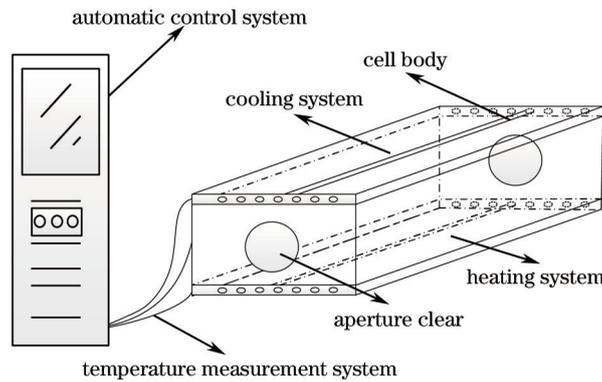


图 1 湍流模拟装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of turbulence simulator

池体由高温、耐热、绝热板组成,主要用于减少池体内部与外界的热交换;池体底部为加热面板,通电后均匀加热,并可达到足够高的温度,以产生不同强度的湍流;池体顶部为冷却面板,通过自来水(也可制冷,采用冷却水)的循环流动,保持冷却面板保持恒定的室温(或低温),以实现上下平行平板间的不同温差;测温系统由池体内部的温度探测器构成,可实时采集并记录装置各部分的温度信息;自动控制系统则根据用户预设信息与温度采集信息实时调整加热系统,以形成闭环控制过程。

湍流模拟池工作时,下面平板加热,上面平板制冷,两板之间就会产生对流,当温度超过某一值,即所谓的瑞丽数超过某一数值后,流动就会成为湍流。湍流池所模拟湍流的强度通常用大气相干长度 r_0 来度量,对于平面波

$$r_0 = 0.185\lambda^{1/2}(C_n^2 L)^{-3/5}, \quad (1)$$

式中 λ 为光波波长,取为 530 nm, C_n^2 为系统光路上的平均折射率结构常数。如果希望 r_0 为 5 mm。光路的长度 L 为 1.5 m,则所需平均折射率结构常数 C_n^2 为 7.7×10^{-11} 。折射率结构常数和温度结构常数 C_T^2 有如下关系:

$$C_n^2 = M^2 C_T^2, \quad M = dn/dt, \quad (2)$$

式中 n 为折射率, t 为温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$,对于空气

$$M \approx 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}. \quad (3)$$

因此,若需要 r_0 为 5 mm,由(1)式算出, $C_T^2 = 77^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-2/3}$,则湍流介质中温度起伏方差为

$$\sigma_T^2 = C_T^2 L_0^{2/3} / 2. \quad (4)$$

设湍流外尺度 L_0 为 10 cm,则可算出温度起伏的标准差 $\sigma_T = 2.8^{\circ}\text{C}$ ^[9]。

3 实验设置与基本原理

热风对流式湍流模拟装置所模拟湍流大气相干长度 r_0 、等效大气折射率常数 C_n^2 、光强闪烁因子、到达角起伏方差以及光束漂移方差等参数已经有了较为成熟的研究。本文主要针对湍流模拟装置所模拟湍流在频谱特性和概率密度分布特性方面与真实大气的对比进行分析研究。于2014年7月至2014年12月,在长春市市区进行了链路距离为1 km和6.2 km的激光大气传输实验。湍流模拟池长度为1.5 m,等效大气相干长度 r_0 模拟范围为1~40 cm,并对所得结果与湍流池所模拟湍流进行比对分析。实验链路和实验装置如图2所示。

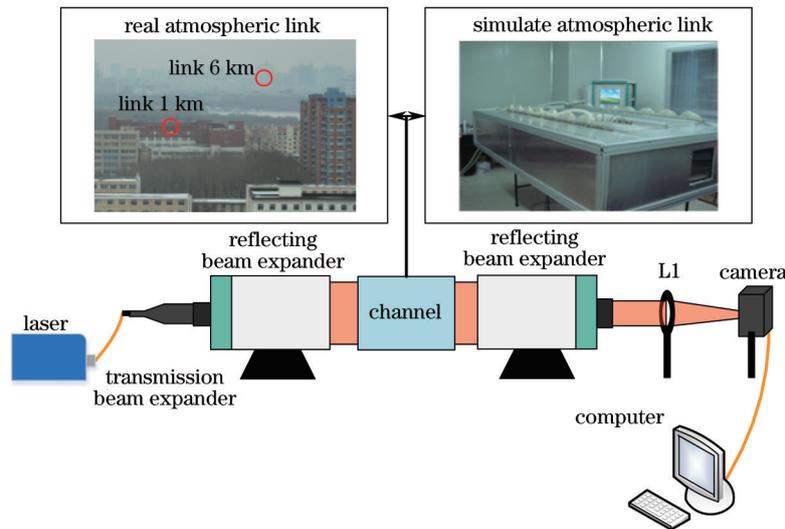


图2 实验示意图

Fig.2 Schematic diagram of experiment

实验装置主要由激光光源、二级准直扩束装置、缩束装置、透镜、测量相机及用于采集和处理数据的计算机组成。功率为50 mW的半导体激光器发射波长为808 nm的激光光束先通过准直装置准直,而后经由投射式初级扩束器(放大倍率为5倍、发射口径为30 mm)进行扩束,最后通过放大倍率为7倍的反射式扩束装置进行最后的扩束与准直,最终的束散角约为0.5 mrad,发射口径为210 mm。分别经由真实大气湍流链路和模拟大气湍流链路传输后到达接收端。接收端采用口径为210 mm的反射式缩束装置进行缩束后,经由透镜聚焦到测量相机光敏面上。计算机对采集的数据进行处理与分析得到所需的实验数据。相机的分辨率为1280 pixel × 1024 pixel,像素尺寸为14 μm,满分辨率采样频率为506 Hz。为了提高相机的采样频率,对相机进行了2 × 2的binning操作,实际实验采样频率为1736 Hz,等效像素尺寸为28 μm。

真实大气链路测量时,对大气链路进行24 h连续的测量,测量间隔为10 min;每次测量,测量相机采集15000幅灰度值图像。室内模拟信道测量时,由湍流池在大气相干长度1~20 cm范围内生成定量大气湍流,在1~5 cm范围内,每隔0.5 cm测量5次;在5~10 cm范围内每隔1 cm测量5次;在10~20 cm范围内每隔2 cm测量5次。测量的主要内容为大气湍流的光强闪烁和到达角起伏效应,测量相机一次同时完成这两个效应的测量。实验时,为了实现该操作,需调整透镜L1的位置,使汇聚的光斑存在一定程度的离焦。这样在测量光强闪烁时,系统不容易饱和,且提高了测量的精度;此外,由于光斑的变大,质心的测量精度同样有了提高。测量原理图如图3所示。

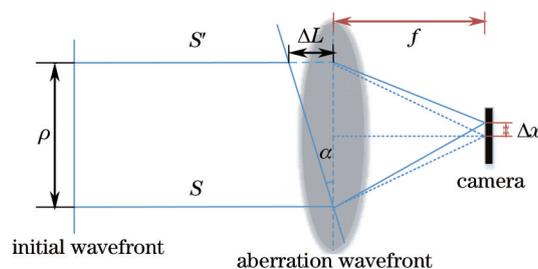


图3 测量原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of measurement

如图3所示,到达角 α 的定义如下:

$$\alpha = \Delta S/k\rho, \quad (5)$$

式中 ρ 为两点间的观测距离, ΔS 为相位差, $k = 2\pi/\lambda$ 。实验时利用相机测量到达角 α 的公式如下:

$$\alpha = (D_x \times p)/f, \quad (6)$$

式中 D_x 为光斑重心的位置变化量, p 为像素大小, f 为接收透镜至相机之间的距离,在本实验中为 80 mm。

光强闪烁的测量相对简单,只需将整个探测器面上的灰度值相加即可。但仍需注意光斑的亮度不能超过探测器所探测的阈值,否则会很大程度上影响测量精度。具体实验操作时,调整光斑最大亮度像素点的灰度值为 200~255 之间即可。

4 实验结果与分析

4.1 频谱分析

在 Kolmogorov 湍流情况下,平面波和球面波的对数振幅起伏和相位起伏的理论实践频谱最大的特征就是高频段频谱密度呈 $-8/3$ 幂率^[10]。真实大气链路的光强闪烁测量表明,大部分频谱的高频段都呈现幂率特征,但幂值围绕在 $-8/3 \sim -11/3$ 波动。这主要是由于实际大气链路中湍流均匀性的假设、风速均匀性的假设以及冻结湍流的假设总是不能很好的成立,故实际频谱与理论频谱相比更为复杂。图中功率密度采用均方根振幅(MSA)进行衡量。

图4(a)是 808 nm 激光在大气中传输 1 km 后的一例对数光强起伏频谱,图4(b)为同样波长激光光束采用同样测量手段在室内湍流模拟装置中传输后的一例对数光强起伏频谱。为了使对比更有效性,特选取闪烁因子相近的两例测量样本,分别为 0.045 和 0.041。

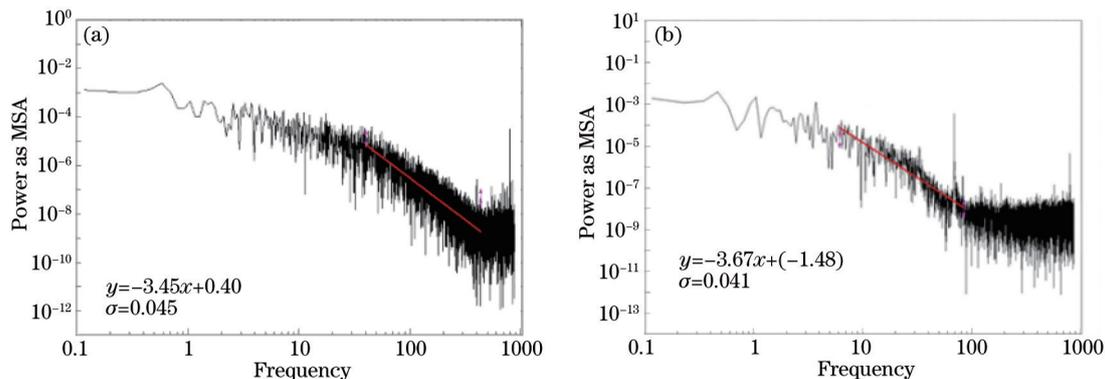


图4 光强闪烁功率谱对比。(a) 真实湍流; (b) 模拟湍流

Fig.4 Comparison of scintillation power spectrum. (a) Real atmospheric turbulence; (b) simulate atmospheric turbulence

通过图4可以看到,真实大气的对数光强起伏频谱,在 40~400 Hz 范围内,频谱呈现 $-8/3$ 幂率,当时间频率达到 400 Hz 后频谱迅速下降,更高频率出现的无规律起伏为噪声引起;而湍流模拟装置所模拟湍流的对数光强起伏,其高频段仍然呈现 $-8/3$ 幂率,但其特征频率区间为 10~100 Hz,较真实大气信道频率区间略低。实际上,大量的实验数据表明:由于模拟环境与野外环境相比,湍流模拟装置所模拟湍流相对的稳定,故所得频谱曲线要好于实际测量条件下所得。在湍流模拟装置的全部测量样本中,大多数的测量样本功率谱高频段幂率均服从 $-8/3$ 分布,仅有少部分幂率高于 $-8/3$ 。

同样的,与光强闪烁相同,到达角起伏的频谱特性也同样存在幂率特征。理论和实验研究结果表明,到达角起伏功率谱密度可以分为低频和高温两个部分,低频部分按 $-2/3$ 幂指数规律变化,高频部分按 $-11/3$ 幂指数规律变化^[11]。图5(a)和图6(a)分别为 808 nm 激光在 6 km 真实大气湍流中传输 6 km 后的 x 轴和 y 轴到达角起伏频谱,图5(b)和图6(b)则为同样波长激光光束采用同样测量手段在室内湍流模拟装置传输后的到达角起伏频谱。从图中可以看到真实大气的到达角起伏对数频谱无论在 x 轴和 y 轴上均能很好的满足低频部分按 $-2/3$ 幂指数规律变化高频部分按 $-11/3$ 幂指数规律变化的规律。并且,通过对大量真实大气测量数据的分析处理也表明,到达角起伏对数频谱无论在 x 轴和 y 轴均与理论相符。室内湍流模拟装置所模拟湍流角起伏功率谱在 y 轴上能很好的满足理论幂率,并且大量的测量结果呈现比较稳定的状态;而在 y 轴上幂

指数规律出现了较大的起伏,稳定性很低。这主要是由于本实验中所使用的湍流模拟装置为热风对流式湍流模拟装置,并没有加入横向的侧风,加入横向侧风的热风对流式湍流模拟装置所模拟湍流的 x 轴到达角起伏幂率规律能否复合真实大气环境下的幂率规律仍有待于进一步实验研究。与光强闪烁相同,湍流模拟装置所模拟湍流的到达角起伏频谱的高频段区间要低于真实大气为 10~100 Hz,略低于真实大气的 20~200 Hz 左右的高频特征区间。

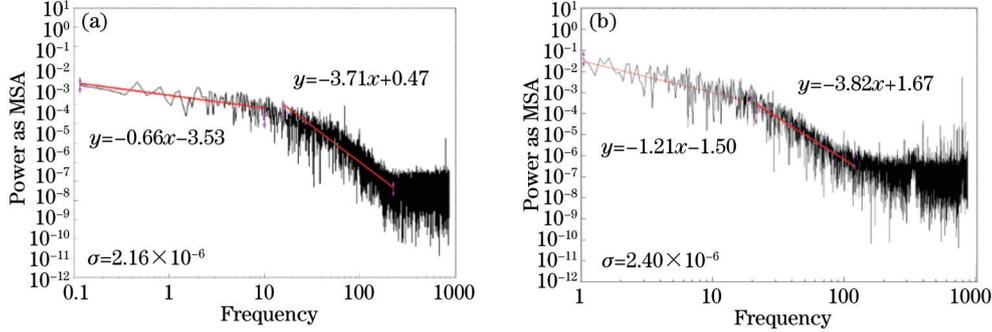


图5 x 轴到达角起伏功率谱对比。(a) 真实湍流;(b) 模拟湍流

Fig.5 Comparison of x axis angle-of-arrival power spectrum. (a) Real atmospheric turbulence; (b) simulate atmospheric turbulence

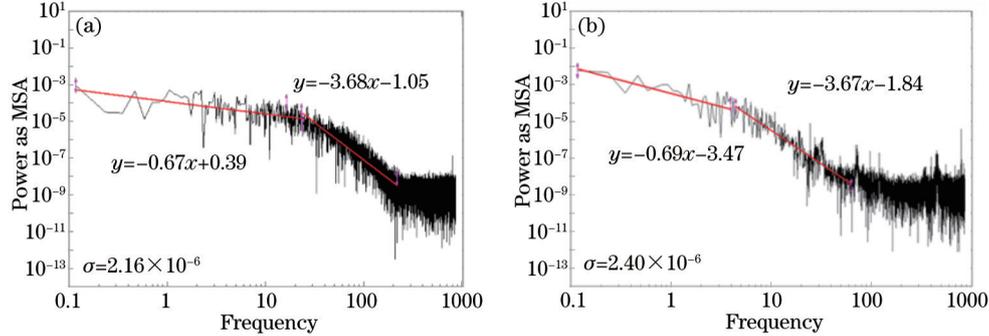


图6 y 轴到达角起伏功率谱对比。(a) 真实湍流;(b) 模拟湍流

Fig.6 Comparison of y axis angle-of-arrival power spectrum. (a) Real atmospheric turbulence; (b) simulate atmospheric turbulence

4.2 概率密度分析

大气湍流造成的光波起伏,概率密度是其统计规律最基本的描述方式。由于相位起伏是湍流介质折射率起伏的线性贡献造成的,当折射率起伏服从正态分布时,相位起伏也服从正态分布,其概率密度分布为

$$p(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (7)$$

式中 σ_s^2 为相位起伏方差, S 为相位量。由于两点间的相位符合正态分布,两点间的相位差也符合正态分布,其概率密度分布为

$$p(\Delta S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\Delta s}^2}} \exp\left(-\frac{\Delta S^2}{2\sigma_{\Delta s}^2}\right), \quad (8)$$

式中 ΔS 为两点相位差, $\sigma_{\Delta s}^2$ 为相位差起伏方差。两点间的到达角起伏定义如(6)式所示,根据相位起伏服从正态分布的结论,到达角起伏必然也服从正态分布。由(8)式,到达角的概率密度分布为

$$p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\alpha^2}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\alpha^2}\right), \quad (9)$$

式中 θ 为角起伏量, σ_α^2 为到达角起伏方差。用样本的平均值对样本中的角起伏量进行归一化处理得到相对角起伏,将相对角起伏的取值范围划分为一定数目的等分区间,计算落在每个区间的相对角起伏个数,所有区间的中心值组成一个序列 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 所有区间中相对角起伏的个数也组成一个序列

$Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$, 分别以 X 和 Y 作为横纵坐标即可得到该样本的归一化直方图。图 7、图 8 为归一化角起伏直方图, 图 9 为采用同样方法得到的归一化光强闪烁直方图。图中是直方图和拟合曲线的相关系数, 若用 $Z=(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ 表示拟合曲线上与 X 对应的纵坐标序列, 则 R 可以表示为

$$R = \frac{\langle Y \cdot Z \rangle - \langle Y \rangle \cdot \langle Z \rangle}{\sqrt{D_Y \cdot D_Z}}, \quad (10)$$

式中 D_Y 和 D_Z 分别是序列 Y 和 Z 的方差。

图 7(a)和图 8(a)为真实大气环境下大气湍流 x 轴和 y 轴到达角起伏概率密度直方图。从图中可以看出真实大气的到达角起伏概率密度直方图, 无论 x 轴和 y 轴均很好的服从正态分布, 相关因子 R^2 在 0.995 以上。

图 7(b)和图 8(b)分别为所选取的室内湍流模拟装置模拟大气湍流条件下所选取的到达角起伏方差与真实大气样本相近的样本所绘制的概率密度直方图。从图中可以看到在 y 轴上到达角起伏的概率分布很好的服从正态分布。但图 8(b)所示的 x 轴到达角起伏概率密度分布无明显的分布规律。事实上, 在大量的样本条件下, 室内模拟装置的 x 轴到达角起伏概率密度函数均无很好的概率密度分布规律。这主要是由于, 实验所采用的热风对流湍流模拟装置无横向侧风产生装置。

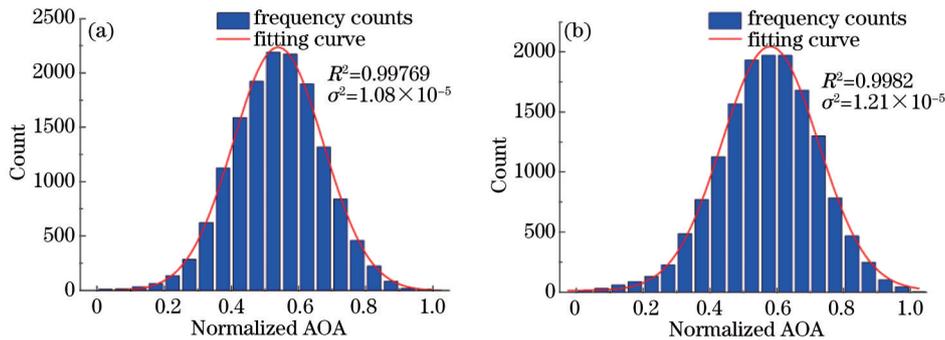


图 7 y 轴到达角起伏概率密度分布对比。(a) 真实湍流; (b) 模拟湍流

Fig.7 Comparison of y axis angle-of-arrival probability density distribution. (a) Real atmospheric turbulence; (b) simulated atmospheric turbulence

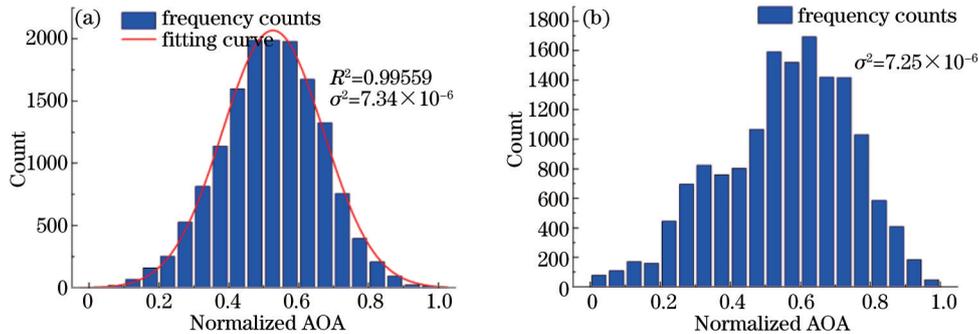


图 8 x 轴到达角起伏概率密度分布对比。(a) 真实湍流; (b) 模拟湍流

Fig.8 Comparison of x axis angle-of-arrival probability density distribution. (a) Real atmospheric turbulence; (b) simulated atmospheric turbulence

相对于相位起伏和到达角起伏, 光强起伏的概率密度分布问题要复杂得多。理论和研究表明有光波起伏造成的光强闪烁效应, 其统计规律在弱湍流时是服从正态分布的, 随着湍流的增强其服从对数正态分布; 在强起伏条件下, 光强闪烁服从指数分布。由于实验所用的热风对流式大气湍流模拟装置所模拟湍流的强度有限, 故其所模拟湍流基本上均为弱起伏。

图 9(a)为真实大气环境下测得光强闪烁概率密度直方图, 图 9(b)为选取闪烁因子与真实大气样本相近的湍流模拟装置样本所绘制的概率密度直方图。从图中可以看出无论是真实大气还是模拟大气其正态分布拟合的相关因子 R^2 均在 0.996 以上。这说明, 大气湍流模拟装置所模拟的大气湍流产生的光强闪烁效应在概率密度分布上与真实的大气是一致的。进一步的增加湍流池的长度可以得到更强的闪烁效应。由于湍流池所选取样本的闪烁因子略小于真实大气所选样本, 故湍流模拟装置样本光强闪烁概率密度直方图光

强分布的幅度略大于真实样本。

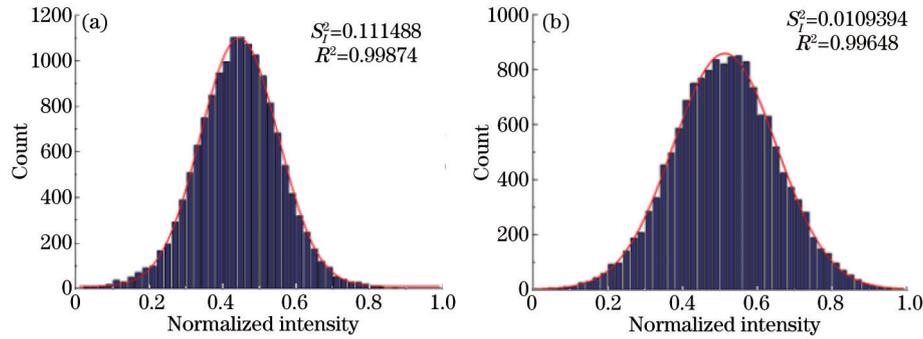


图9 光强闪烁概率密度分布对比。(a) 真实湍流; (b) 模拟湍流

Fig.9 Comparison of scintillation probability density distribution. (a) Real atmospheric turbulence; (b) simulated atmospheric turbulence

通过上面的实验结果可以看到,对流式大气湍流模拟装置由于其产生湍流的机理与真实大气相同,所模拟的大气湍流不仅在大气相干长度 r_0 、大气折射率常数 C_n^2 等参数上符合真实大气湍流的规律,在频谱特性和概率密度分布特性上也较接近于真实的大气,可以真实地模拟大气湍流。为对流式湍流模拟装置模拟湍流的真实性提供了可靠的依据。

5 结 论

为了对对流式大气湍流模拟装置所模拟湍流与真实大气湍流相比的一致性进行验证,采用相同的发射和测试装置分别对真实大气信道与模拟信道的湍流频谱特性和概率密度分布特性进行了测试,并进行了对比分析研究。结果表明,与真实大气湍流相比对流式湍流模拟装置所模拟湍流在频谱特性与概率密度特性上与真实大气较为接近,但由于缺少横向侧风,所模拟到达角起伏效应在 x 轴的频谱特性与概率密度特性与真实大气存在一定的差别。该工作为热风对流式湍流模拟装置所模拟大气湍流与真实大气湍流间的差异及其等效性提供了有效的依据。

参 考 文 献

- Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin, *et al.*. Performance analysis of large-aperture receiving and selection of aperture size in atmospheric optical communications[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2957-2961.
陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气光通信中大孔径接收性能分析与尺寸选择[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2957-2961.
- Liu Yangyang, Lü Qunbo, Zhang Wenxi. Simulation for space target interference imaging system distorted by atmospheric turbulence[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 124201.
刘扬扬, 吕群波, 张文喜. 大气湍流畸变对空间目标清晰干涉成像仿真研究[J]. 物理学报, 2012, 61(12): 124201.
- Liu Guangqian, Yang Lei, Deng Linhua, *et al.*. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of astronomical telescope auto-guiding system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0101002.
柳光乾, 杨磊, 邓林华, 等. 大气湍流对天文望远镜光电导行精度的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0101002.
- Han Liqiang, Wang Qi, Xintai Kegui. Outage probability of free space optical communication over atmospheric turbulence [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 660-663.
韩立强, 王 祁, 信太克归. 大气湍流下自由空间光通信中断概率分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 660-663.
- Luo Wen, Geng Chao, Li Xinyang. Simulation and experimental study of single-mode fiber coupling efficiency affected by atmospheric turbulence aberration[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0606001.
罗 文, 耿 超, 李新阳. 大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响分析及实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0606001.
- Liu Yongjun, Hu Lifa, Cao Zhaoliang, *et al.*. Liquid crystal atmosphere turbulence simulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(12): 1960-1963.
刘永军, 胡立发, 曹召良, 等. 液晶大气湍流模拟器[J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1960-1963.
- Jing Wenbo, Zhao Si, Fu Qiang, *et al.*. Turbulence characteristics optical test contrast[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(7): 805-811.

- 景文博, 赵 思, 付 强, 等. 湍流特征光学测试对比[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 805-811.
- 8 Zeng Zhihong, Luo Xiujuan, Wang Baofeng, *et al.*. Laboratory simulation of atmosphere turbulence for Fourier telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 0601002.
- 曾志红, 罗秀娟, 王保峰, 等. 傅里叶望远镜大气湍流模拟实验[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 0601002.
- 9 Shen Yong, Liu Jianguo, Zeng Zongyong, *et al.*. Performance testing of atmospheric turbulence simulator[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(3): 231-234.
- 申 永, 刘建国, 曾宗泳, 等. 大气湍流模拟装置性能测试[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(3): 231-234.
- 10 Yijun Jiang, Jing Ma, Liying Tan, *et al.*. Measurement of optical intensity fluctuation over an 11.8 km turbulent path[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 6963-6973.
- 11 Wenhe Du, Liying Tan, Jing Ma, *et al.*. Measurements of angle-of-arrival fluctuations over an 11.8 km urban path[J]. *Laser and Particle Beams*, 2010, 28(1): 91-99.

栏目编辑: 史 敏