

# 热风对流式大气湍流模拟装置湍流模拟特性分析

倪小龙<sup>1</sup> 宋卢军<sup>1</sup> 付强<sup>1</sup> 刘艺<sup>1</sup> 李小伟<sup>1</sup> 姜会林<sup>1</sup> 刘智<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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作为一种主要的大气湍流模拟手段已被广泛的应用,能很好地模拟大气湍流对激光光束造成的光强闪烁、相位起伏、到达角起伏、光束扩展和光束漂移等影响。采用 532、808、1064、1550 nm 激光发射接收以及测量装置对热风对流式大气湍流模拟装置所模拟大气湍流的相干长度、等效大气折射率常数、光强闪烁等效距离以及光强闪烁与到达角起伏的频谱特性和概率密度分布特性进行了标定。实验结果表明:大气模拟装置所模拟大气湍流的相干长度范围为 5~20 cm,等效湍流链路长度为 1 km 时,大气湍流模拟装置所能模拟的  $C_n^2$  最大值为  $1.81 \times 10^{-16}$ ;模拟链路距离为 10 km 时,大气湍流模拟装置所能模拟最大  $C_n^2$  值为  $1.81 \times 10^{-15}$ ,光强闪烁等效距离为 661.2 m。所模拟大气湍流光强闪烁效应与到达角起伏效应的频谱特性与概率分布特性与实际大气湍流相近。综上所述,热风对流式大气湍流模拟装置所模拟大气湍流与真实大气环境比较接近。

**关键词** 大气光学;大气湍流;大气湍流模拟装置;频谱分析

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s101004

## Characteristic Analysis of Hot Air Convection Atmospheric Turbulence simulator

Ni Xiaolong<sup>1</sup> Song Lujun<sup>1</sup> Fu Qiang<sup>1</sup> Liu Yi<sup>1</sup> Li Xiaowei<sup>1</sup> Jiang Huilin<sup>1</sup> Liu Zhi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> *Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

<sup>2</sup> *College of Graduate, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** As one of most important atmospheric turbulence simulator, hot air convection atmospheric turbulence simulator has been widely used in many areas. It can simulate scintillation, phase fluctuations, angle-of-arrival, beam expander and beam wander caused by atmospheric turbulence. 532, 808, 1064, 1550 nm lasers transmitting, receiving and measuring device have been used to calibrate the coherence length, refractive index structure constant, equivalent scintillation index, and the spectral characteristics and probability density distribution characteristics of the scintillation and the angle-of-arrival. Experimental results show that the range of atmospheric turbulence coherence length obtained by atmospheric turbulence simulator is 5~20 cm. The maximum  $C_n^2$  simulated by this simulator is  $1.81 \times 10^{-16}$  when equivalent turbulence link length is 1 km. The maximum  $C_n^2$  is  $1.81 \times 10^{-15}$  when equivalent turbulence link length is 10 km, and the equivalent distance of scintillation index is 661.2 m. Besides, the spectral characteristics and probability density distribution characteristics of scintillation index and angle-of-arrival are similar to the real atmospheric turbulence. In summary, the atmospheric turbulence simulated by the hot air convection turbulence simulator is close to the real atmosphere.

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-03-04

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,主要从事大气光学与光场调制技术相关方面的研究。

E-mail: nixiaolong@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

**Key words** atmospheric optics; atmospheric turbulence; atmospheric turbulence simulator; 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,这些影响越来越引起人们的重视<sup>[1-5]</sup>。仅仅采用野外测量、重复实验等手段,会消耗大量的人力、物力、财力,同时,由于大气本身具有很高的不确定性,这些方法也很难完全准确地反映各种天气环境下的湍流变化。因此迫切需要能够模拟大气湍流的湍流模拟装置。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和基于随机相位片等<sup>[6-9]</sup>。

在这几种湍流模拟装置中,热风对流式大气模拟装置的使用最为广泛,与其他的湍流模拟装置相比,热风对流式大气湍流模拟装置的模拟方式更为接近真实的大气湍流,但对热风对流式大气湍流模拟装置模拟的大气湍流性能的评价都仅局限于大气相干长度、大气折射率结构常数、光强闪烁因子以及到达角起伏方差等统计量的测量上,对于该湍流模拟装置所模拟的湍流的概率密度特性、频谱特性以及不同波长下的表现情况一直处于研究空白。本文采用实验装置在对大气相干长度、大气折射率结构常数、光强闪烁因子以及到达角起伏方差等常见参数测量的基础上加入了各湍流效应的概率密度分析、频谱分析,并且对不同波长条件下所模拟的湍流的性能也进行了分析研究。

## 2 热风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,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。对大气湍流的光学特性进行模拟,其基本结构如图1所示。

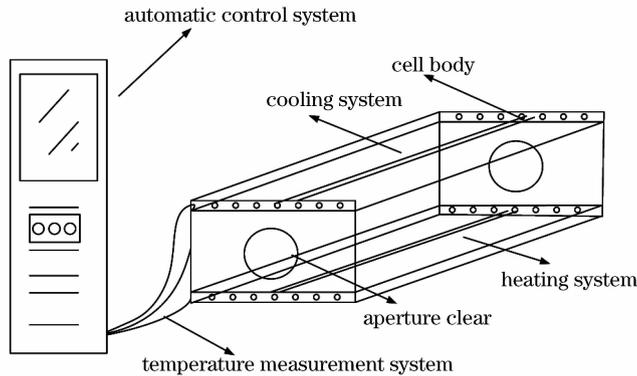


图1 湍流模拟装置原理图

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(也可采用冷却水制冷)的循环流动,使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系统构成,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,即所谓的瑞利数超过某一数值后,流动就会成为湍流。对于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,有

$$r_0 = 0.185\lambda^{1/2}(C_{n0}^2 L)^{-3/5}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为光波波长,取为 530 nm,  $C_{n0}^2$  为系统光路上的平均折射率结构常数,  $L$  为光路的长度。如果要  $r_0$  为

5 mm,  $L$  为 1.5 m, 则所需平均折射率结构常数  $C_n^2$  为  $7.7 \times 10^{-11}$ , 折射率结构常数和温度结构常数  $C_T^2$  的关系如下:

$$\begin{cases} C_n^2 = M^2 C_T^2 \\ M = dn/dt \end{cases}, \quad (2)$$

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

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

因此, 若需要  $r_0$  为 5 mm, 由(1)式算出,  $C_T^2 = 77 / ^{\circ}\text{C}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}$ , 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  $\sigma_T = 2.8 ^{\circ}\text{C}^{[10]}$ 。

### 3 湍流模拟特性测试与结果分析

为了对湍流模拟装置的性能和等效性进行分析, 采用 532、808、1064、1550 nm 激光进行了一系列的实验。激光发射和接收装置如图 2、图 3 所示。

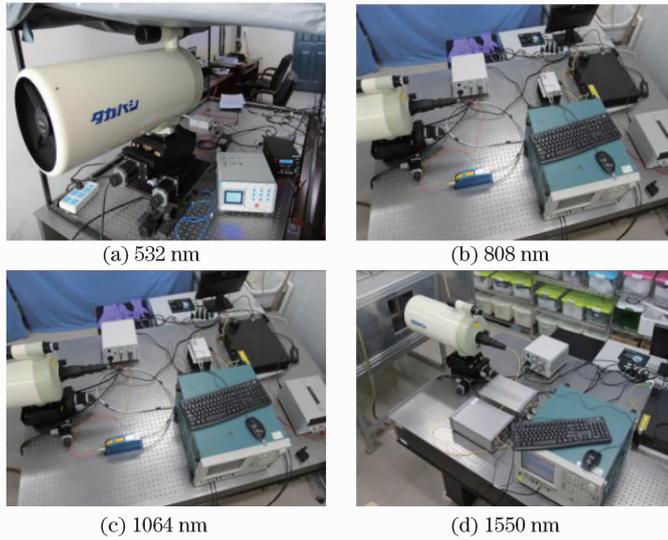


图 2 发射端实物图

Fig. 2 Diagram of the transmitter

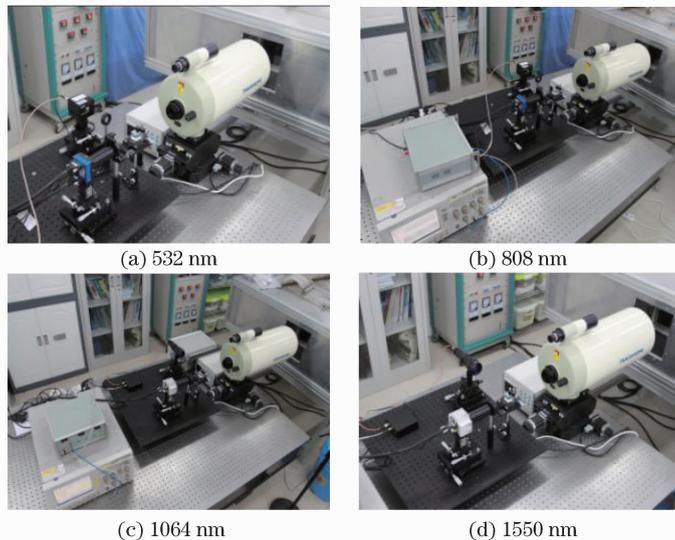


图 3 接收端实物图

Fig. 3 Diagram of the receiving end

采用不同波长激光器对湍流模拟装置的模拟范围进行标定。激光在大气中传播时,由于大气湍流效应,激光光束会出现随机漂移、扩展、畸变、闪烁等现象,破坏了激光的相干性。在激光大气传输和自适应光学相位校正技术中,描述湍流效应的影响,评价激光传输及其相位校正的效果时,就会用到弗里德常数,即大气相干长度。大气相干长度为评价大气湍流强弱的主要参数,故采用它对湍流模拟装置性能进行标定。

湍流介质中平面波的到达角起伏方差  $\delta_\alpha^2$  与  $C_n^2(h)$  之间的关系同  $r_0$  与  $C_n^2(h)$  之间的关系基本相同,为

$$\delta_\alpha^2 = 2.91D^{-\frac{1}{3}} \cos^{-1} \phi \int_{h_0}^{\infty} C_n^2(h) dh, \quad (5)$$

式中  $D$  为接收望远镜口径,  $\phi$  为天顶角,  $h_0$  为观察点的高度。因此在水平链路中,  $r_0$  与到达角起伏方差  $\delta_\alpha^2$  的关系为<sup>[11]</sup>

$$r_0 = 3.18k^{\frac{6}{5}} D^{-\frac{1}{5}} \delta_\alpha^{-\frac{6}{5}}, \quad (6)$$

式中  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为光束波长,所以可以通过测量到达角起伏方差推导大气相干长度  $r_0$ 。测量时,分别采用 532、808、1064、1550 nm 4 个波长激光对相干长度进行推导。测量过程中逐步提高湍流模拟装置的上下板温差,选取几个典型温差进行相干长度的测量,并记录此刻的温差。同样的温差下采用不同波长激光进行测量。每个波长每个温差条件下测量 10 次。测量中不可避免地会引入误差,故首先对实验测量结果进行误差剔除并求平均后再进行大气相干长度的反演。

图 4 为不同波长条件下的测量结果汇总图,可以看到,在同样的温差条件下,采用不同波长进行测量反演得到的大气相干长度基本一致。

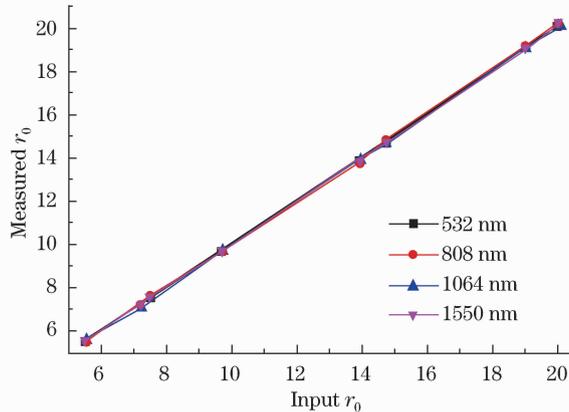


图 4 不同波长所测得大气相干长度

Fig. 4 Measured coherence length of different wavelengths

大气折射率结构常数同样也是研究光波在大气中传播的一个重要的物理量,也采用到达角起伏法对大气折射率结构常数进行测量。到达角起伏方差  $\sigma_\beta^2$  与大气折射率结构常数  $C_n^2$  之间的关系<sup>[11]</sup>为

$$C_n^2 = \frac{\sigma_\beta^2 D^{1/3}}{1.093L}. \quad (7)$$

可以看出大气折射率结构常数的大小与  $L$  有关系,同样的到达角起伏方差下,不同  $L$  下反演出的折射率结构常数是不同的。为了对大气湍流模拟装置的模拟性能进行标定,当发射端与接收端放置水平链路上时,用大气折射率结构常数  $C_n^2$  来计算大气相干长度  $r_0$ ,公式可表示为

$$r_0 = (0.423k^2 LC_n^2)^{-3/5}. \quad (8)$$

对不同  $L$  条件下所能模拟的最大折射率结构常数的值进行计算,利用计算结果绘制了图 5 所示的曲线。可以看到在  $L=1$  km 时,大气湍流模拟装置所能模拟的  $C_n^2$  最大值为  $1.81 \times 10^{-16}$ ;在  $L=10$  km 时,大气湍流模拟装置所能模拟最大  $C_n^2$  值为  $1.81 \times 10^{-15}$ 。

湍流大气中光的传播特性大致可以按相干性、相位特性、光强特性进行分析,其中光强起伏最为复杂。光强是一个可直接观测的物理量,实际应用中大量涉及的问题均为光强问题,因此首先对大气湍流模拟装置的光强特性进行等效分析。Rytov 为实际应用中用来估计光强闪烁的主要参数,在弱起伏条件下。Rytov 方差值与闪烁因子可以认为是近似的。如果用 Kolmogorov 幂率谱模型描述光湍流,对于平面波和球面波,

Rytov 方差  $\sigma_R^2$  为

$$\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L_{11/6}. \quad (9)$$

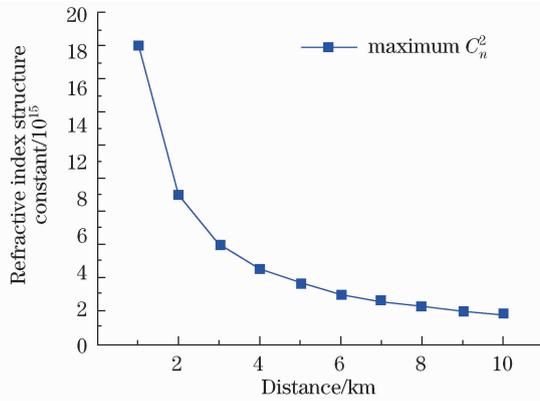


图 5 不同距离可模拟大气折射率结构常数

Fig. 5 Atmospheric structure constant of refractive index can be simulated in different distances

由于湍流模拟装置可输入的控制湍流强弱的参数为  $r_0$ ，所以采用  $r_0$  作为衡量湍流强弱的指标。在不同  $r_0$  条件下，采用 808 nm 波长光束对湍流模拟装置的闪烁特性进行测量，在每个  $r_0$  条件下进行 20 次光强闪烁测量，剔除误差后取平均值绘制闪烁因子随  $r_0$  变化曲线。根据(8)式可以用  $r_0$  来表示大气折射率结构常数，代入(9)式可得

$$\sigma_R^2 = 2.9r_0^{-5/3} k^{5/6} L_{5/6}. \quad (10)$$

采用  $L$  为拟合变量与湍流池模拟所得闪烁因子随相干长度  $r_0$  的变化曲线进行拟合。选取误差最小值条件下的  $L$  值，便为湍流模拟装置所模拟光强闪烁的等效距离，图 6 为拟合曲线。通过计算可知，湍流模拟装置所模拟闪烁强度的等效距离  $L=661.2$  m。

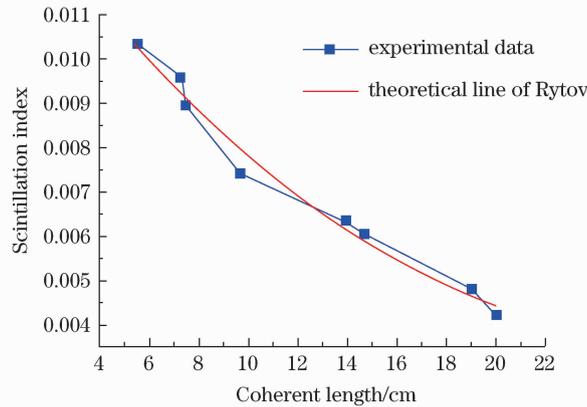


图 6 测量闪烁因子与 661.2 m 距离下 Rytov 方差对比图

Fig. 6 Contrast diagram of measured scintillation index and Rytov variance under 661.2 m distance

通常光强闪烁为一个随机过程，所以概率分布为其统计特征的最基本描述方法。在弱起伏条件下，理论研究与实验都证明，光强闪烁的概率密度函数服从正态分布。随着湍流的进一步增强，其概率密度函数服从对数正态分布(即对数强度服从正态分布)；而在强起伏条件下，特别是弱起伏条件、强起伏条件之间的中等起伏条件下，尚不能从光传输的物理过程中获得确定的分布形式。根据假设提出的多种分布模型一般都包含可调节的参量，它们必须通过分布函数的模型计算值与实验数据的比较才能确定。因为湍流模拟装置所模拟湍流均为弱湍流，所以光强起伏的概率密度函数为正态分布和对数正态分布。当闪烁因子值较小时，其概率密度函数为标准的正态分布如图 7 所示，图 7 中  $\sigma^2$  为闪烁因子， $R$  为概率密度函数拟合相关系数。拟合相关系数为 0.99648，这说明曲线的拟合度很高。

随着闪烁因子的增加光强起伏概率密度函数趋近于对数正态分布，如图 8 所示， $\sigma^2=0.29$ ，相关系数  $R=0.99148$ ，说明拟合度很高。

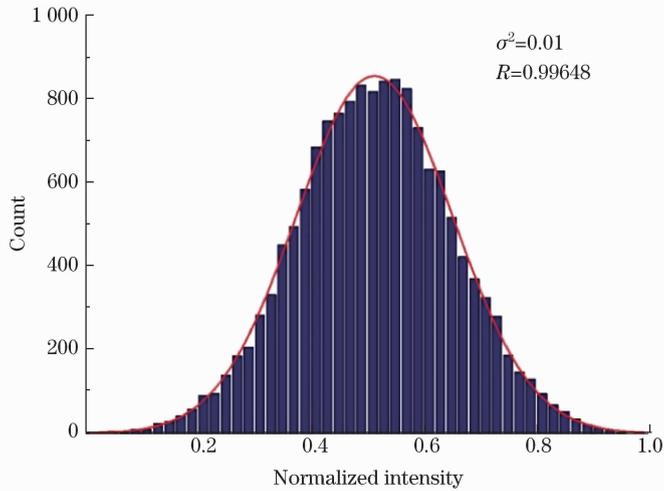


图 7 高斯分布光强闪烁直方图

Fig. 7 Histogram of Gauss distribution scintillation

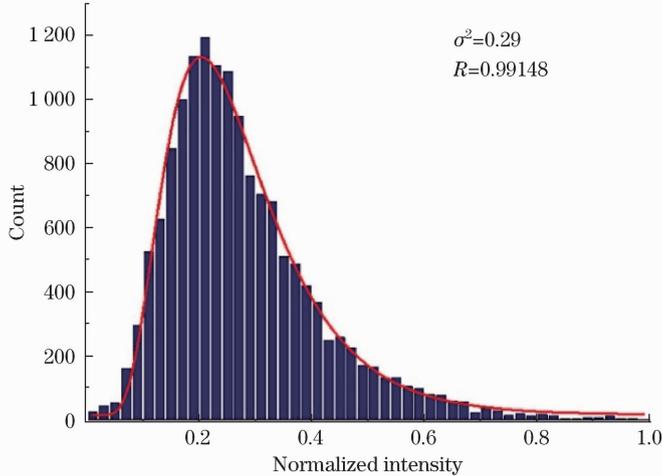


图 8 对数分布光强闪烁直方图

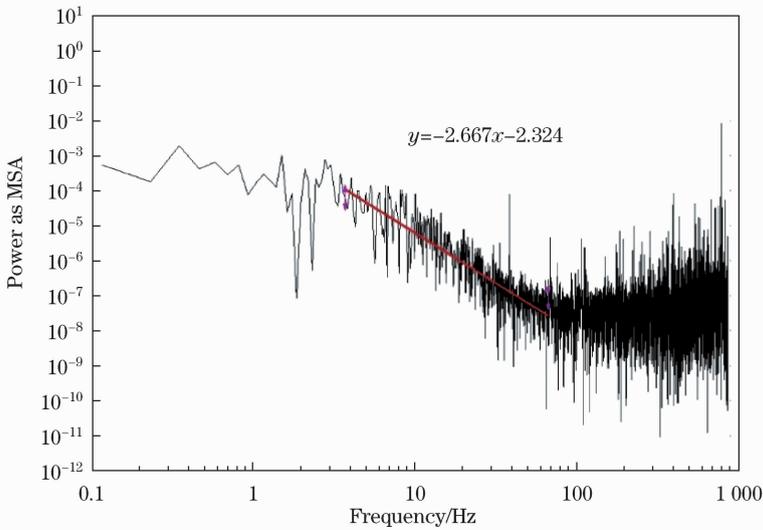
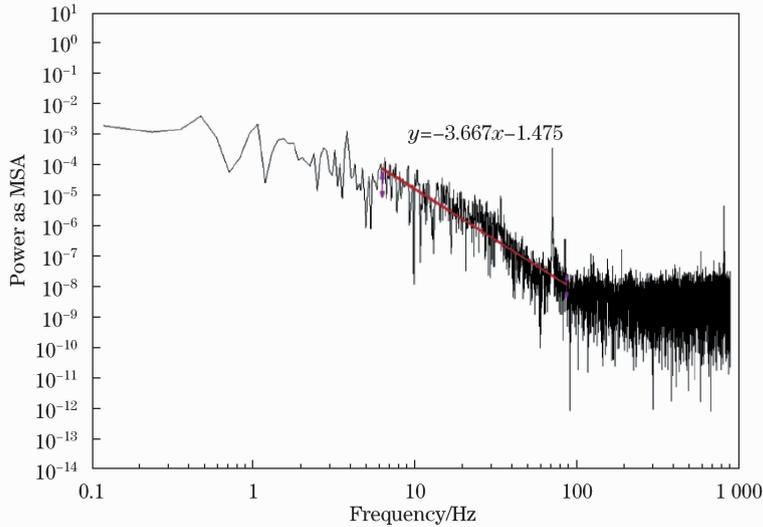
Fig. 8 Histogram of logarithmic distribution scintillation

由于湍流模拟装置长度有限,模拟的湍流强度有限,无法模拟强起伏情况,故在整个实验测量过程中未出现指数分布概率密度函数。

由于大气介质的流动,大气折射率也是时间随机函数,湍流大气中的光波起伏也具有时间特性,其相应的频谱特征是在大气中工作的光学系统(如光通信、自适应光学)的设计与性能评估的重要依据,也是进行确定湍流谱的依据之一。光波起伏频谱既与大气湍流谱特征、风速的不均匀等因素有关,也与光学系统有限的接收面积和光波波形等因素有关。光波起伏频谱为反映大气湍流变化规律的重要参数。

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频谱最大的特征就是高频段频谱密度呈 $-8/3$  幂率。大量的实验结果表明,大部分频谱的高频段呈现幂率特征,但幂值往往和 $-8/3$  不符。实际大气传播路径上湍流均匀性的假设、风速均匀性的假设、冻结湍流的假设总不能很好地成立,因此频谱的实际分布比理论预期更为复杂。采用湍流模拟装置对光强起伏的频谱特性分析,其环境与野外环境相比相对稳定,故所得频谱曲线要好于实际测量条件下所得到的。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,但然仍有一些幂率高于 $-8/3$ 。图 9 所示为典型的湍流模拟装置条件下功率谱密度函数,该样本中高频段幂率为 $-8/3$ ,但仍有部分测量样本服从 $-11/3$  幂率分布,如图 10 所示,MSA 为测量系统分析。

与外场实验数据相比,湍流模拟装置所得的功率谱密度函数曲线主要区别为特征频率提前,特征频率转折点均小于 10 Hz;高频段截至点也大幅度提前,均在 100 Hz 以下。

图 9  $-8/3$  幂指数光强闪烁功率谱密度图Fig. 9 Diagram of  $-8/3$  exponential intensity power spectrum density图 10  $-11/3$  幂指数光强闪烁功率谱密度图Fig. 10 Diagram of  $-11/3$  exponential intensity power spectrum density

理论上到达角起伏的概率密度函数无论  $x$  轴还是  $y$  轴均是服从正态分布的。为了验证这一理论,对湍流模拟装置所模拟湍流的到达角起伏概率密度函数分  $x$  轴和  $y$  轴进行了分析。

通过不同波长不同相干长度的多次测量,发现湍流模拟装置所模拟湍流的到达角起伏在  $y$  轴上是符合正态分布的,这与之前的理论相吻合。图 11 为典型的  $y$  轴到达角起伏概率密度函数,其拟合相关系数达到了 0.99648,这说明曲线拟合度非常的高。

但在  $x$  轴方向,到达角起伏概率密度函数并不能很好地服从正态分布,并且,其分布并无明显的规律。图 12 为一次测量中的到达角起伏概率密度直方图 AOA 为到达角度测距,可以看到曲线拟合的相关系数很小,只有 0.935,并且,直方图也非常不平滑。这主要是由于湍流模拟装置仅采用增加上下板温差的原理来产生湍流,导致其模拟的湍流纵向( $y$  轴)强度很强,并且符合实际湍流变化趋势,但  $x$  轴(水平方向)湍流较弱,与实际大气变化不是很吻合。

到达角起伏也是一个随机过程,因而必须用统计量来描述。功率谱密度是描述到达角起伏在频域内起伏特性的物理量。之前的理论和实验研究表明,到达角起伏功率谱密度可以分为低频和高频两个部分,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。

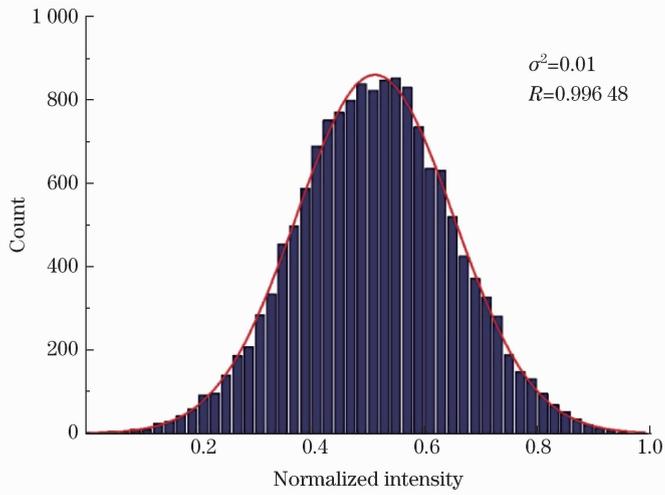


图 11  $y$  轴到达角起伏概率密度直方图  
Fig. 11 Histogram of  $y$  axis probability density

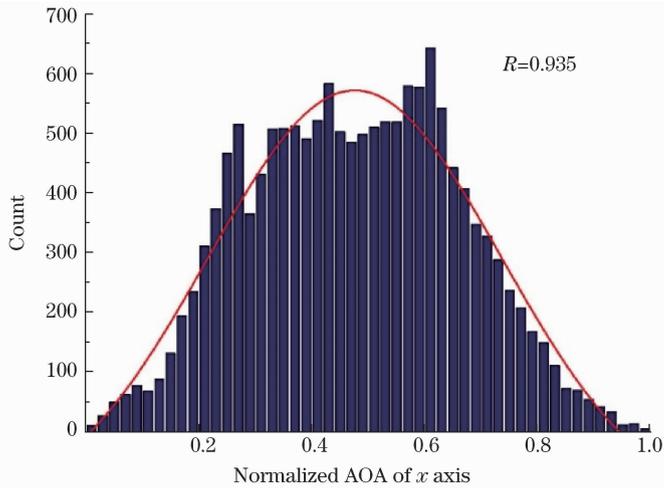


图 12  $x$  轴概率密度直方图  
Fig. 12 Histogram of  $x$  axis probability density

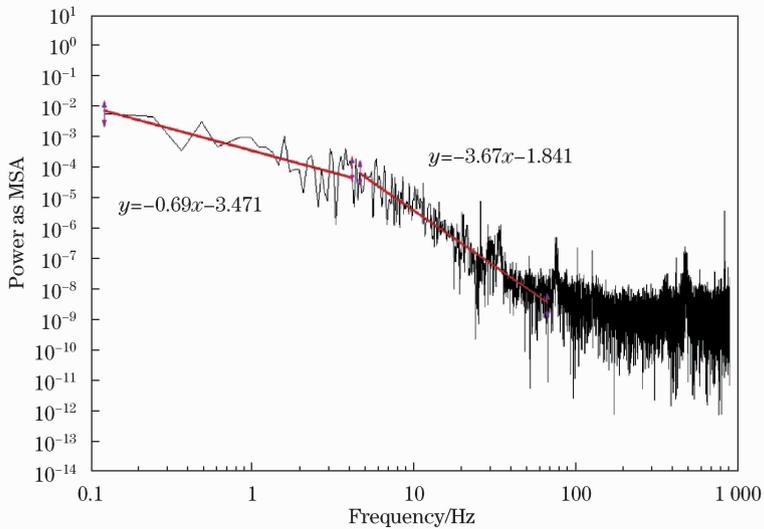


图 13  $y$  轴功率谱密度图  
Fig. 13 Diagram of  $y$  axis power spectrum density

为了对湍流模拟装置所模拟湍流的等效性进行验证,采用同样的手段对到达角起伏的功率谱密度函数进行分析。实验结果表明湍流模拟装置所产生湍流的到达角起伏功率谱密度在  $y$  轴有很好的二段线分布,并且幂指数也基本符合低频部分按  $-2/3$  幂指数规律变化高频部分按  $-11/3$  幂指数规律变化的现象。图 13 为典型功率谱密度函数。但  $x$  轴的到达角起伏功率谱密度却不符合这样的规律,这主要是因为湍流池基本原理为上下板间的温度差,并无横向风,水平方向的湍流抖动较弱。

综上所述,热风对流式大气湍流模拟装置由于其模拟湍流的原理与实际大气湍流比较接近,其所模拟大气湍流与真实大气湍流的相符度比较高,在相干长度、大气折射率结构常数、闪烁因子、到达角起伏方差等大气湍流参数上均能对中弱湍流进行很好的模拟,同时,在光强闪烁和到达角起伏的频谱特性和概率密度分布特性上也能很好地对大气湍流进行模拟。

## 4 结 论

为了对热风对流式大气湍流模拟装置所模拟大气湍流的等效性进行分析,设计了相关实验,采用 4 种不同的波长对大气热风对流式大气湍流模拟装置采用不同的手段进行了多次的测量。实验结果表明,热风对流式大气湍流模拟装置可以很好地对中弱湍流(相干长度为  $5\sim 20\text{cm}$ ,  $C_n^2$  在  $1.81\times 10^{-16}\sim 1.81\times 10^{-15}$  之间)进行模拟,光强闪烁等效距离为  $661.2\text{ m}$ 。其所模拟大气湍流光强闪烁效应、到达角起伏效应的频谱特性和概率分布特性与实际大气湍流相符,可以很好地实现对大气湍流的模拟。

## 参 考 文 献

- 1 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孔径尺寸选择[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2957-2961.
- 2 Liu Yangyang, Lv Qunbo, Zhang Wenxi, *et al.*. 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.
- 3 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. 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.
- 4 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,信台克归. 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.
- 5 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.
- 6 Gan Xinji, Guo Jin, Fu Youyu, *et al.*. Simulating turbulence method of the atmosphere scene simulator [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(6): 764-766.  
甘新基,郭劲,付有余,等. 大气场景模拟器中的湍流模拟方法[J]. 半导体光电, 2006, 27(6): 764-766.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Zeng Zhihong, Luo Xiujian, 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.
- 10 Zhang Huimin, Li Xinyang. Measurement of a hot-wind laboratory atmospheric turbulence generator with Hartman wave-front sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(12): 4-7.  
张慧敏,李新阳. 热风式大气湍流模拟装置的哈特曼测量[J]. 光电工程, 2004, 31(12): 4-7.
- 11 Chen Chunyi, Yang Huamin, Tong Shoufeng, *et al.*. Measurement experiment and analysis of laser atmospheric structure constant of refractive index [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(10): 422-426.  
陈纯毅,杨华民,佟首峰,等. 激光大气折射率结构常数测量实验与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(10): 422-426.

栏目编辑:史敏