

对流式湍流模拟装置湍流模拟稳定性研究

倪小龙^{1,2} 宋卢军^{1,3} 姜会林¹ 付强¹ 刘艺^{1,3} 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长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

³长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为评价对流式湍流模拟装置的性能,验证所模拟湍流的稳定性,提高湍流模拟器装置的可信度,从区域稳定性、频谱稳定性以及不同波长条件下大气相干长度的变化情况3个方面进行了详细的检测与分析。在不同位置选取21个点进行独立测量,对模拟装置的光强闪烁与角起伏区域稳定性进行了检测与评价。采用532、808、1064、1550 nm 4种波长激光器与检测装置,以大气相干长度作为检测指标对模拟装置所模拟湍流的大气相干长度随波长的变化情况进行了检测。最后,对测量数据的强度起伏与角起伏进行了频谱分析以评价模拟装置的频谱稳定性。实验结果表明:对流式湍流模拟装置在16 cm×16 cm区域内的波动量小于15%,不同波长条件下相干长度满足Kolmogrov理论,频谱波动量小于20%,对大气湍流进行了高精度、高可靠性、高稳定性的模拟。该研究内容为对流式湍流模拟装置的使用提供了有效的依据。

关键词 大气光学; 湍流模拟; 稳定性; 对流式湍流模拟装置

中图分类号 TP394.1; TH691.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.100102

Research on Turbulence Stability Characteristic of Convection Turbulence Simulator

Ni Xiaolong^{1,2} Song Lujun^{1,3} Jiang Huilin¹ Fu Qiang¹ Liu Yi^{1,3} Zhang Su¹ Liu Zhi^{1,2}

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

²School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

³College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to evaluate the performance of the convection turbulence simulator, the stability of the simulate turbulence is tested and the credibility of the turbulence simulator is improved. The measurement and analysis are done from three aspects of regional stability, wavelength stability and frequency stability by using specific instrument. 21 points in specific locations are chosen for testing the regional stability of scintillation and angle-of-arrival. By using the coherence length as the indicator, 532 nm, 808 nm, 1064 nm and 1550 nm lasers are used to test the wavelength stability of the convection turbulence simulator. Finally, the spectra of scintillation and angle-of-arrival are analyzed to test the spectral stability of turbulence simulator. The experimental results show that, the performance fluctuation of the convection turbulence simulator in a 16 cm×16 cm area is less than 15%, the coherence length fluctuation under four wavelengths meets Kolmogrov theory and the spectrum fluctuation is less than 20%. The turbulence simulator can simulate the atmospheric turbulence with high precision, high reliability and high stability.

收稿日期: 2015-05-15; 收到修改稿日期: 2015-05-22; 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

The research provides a strong support for the applications of the convection turbulence simulator.

Key words atmospheric optics; turbulence simulate; stability; convection turbulence simulator

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。并且,随着天文成像激光通信、轨迹跟踪等高端技术的发展,这种影响越来越引起人们的重视^[1-8]。若仅仅是采用野外测量、重复实验等手段,不仅消耗了大量的人力、物力、财力,并且,由于大气本身具有很高的不确定性,重复性较弱,所以这种方法也很难完全准确地反映各种天气环境下的湍流变化。故人们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、基于随机相位片等^[9-12]。

在这几种湍流模拟装置中,热风对流式大气模拟装置具有惯性区宽、均匀区大、易于操控的优点,使用最为广泛^[13]。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所模拟的方式更能接近真实的大气湍流。物理量弗里德(Fried)常数,又名大气相干长度,其所模拟湍流的Fried长度、折射率结构常数、内尺度、外尺度、闪烁因子以及到达角起伏方差等参数已经得到实验验证^[14-15]。并且,近些年来,随着研究的深入,对热风对流式大气湍流模拟装置所模拟湍流参数的稳定性提出了要求。为了对对流式湍流模拟装置的湍流模拟性能进行进一步的验证,本文采用多种设备从区域稳定性、不同波长条件下相干长度的变化情况以及频谱稳定性3方面进行了实验研究。实验结果表明,对流式湍流模拟装置所模拟的湍流,在区域稳定性以及频谱稳定性上均有很好的表现。并且,不同波长条件下所模拟的湍流大气相干长度满足Kolmogrov理论,具有准确性高、稳定性强以及可重复性好的优点,可以很好地对大气湍流进行模拟。

2 对流式湍流模拟装置工作原理

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。

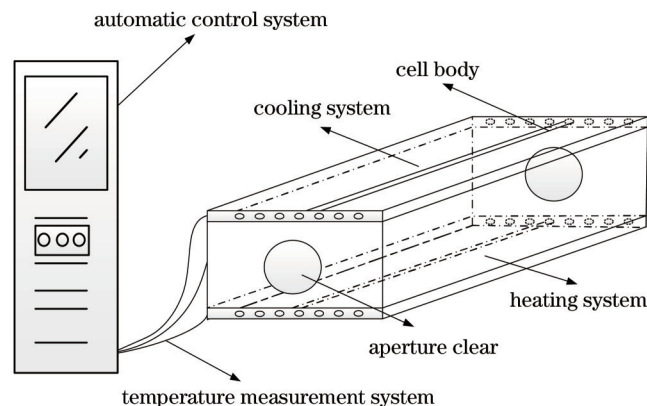


图1 湍流模拟装置原理图

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(自来水也可制冷,或采用冷却水)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。湍流池所模拟湍流的强度通常用大气折射率结构常数 C_n^2 来度量,湍流强度用温度结构常数来表示,其定义为

$$C_i^2 = D(d)/d, \quad (1)$$

$$D(d) = \left\langle [t(r+d) - t(r)]^2 \right\rangle, \quad (2)$$

式中 $t(r)$ 表示空间点 r 处的温度, r 为空间坐标, d 为两测点距离。则折射率结构常数 C_n^2 和温度结构常数 C_t^2 有如下关系:

$$C_n^2 = KC_t^2. \quad (3)$$

常数 K 由下述方法求出。介质的折射率 n 和密度 ρ 以及温度 t 有如下近似关系:

$$n(t_1) = \frac{\rho(t_1)}{\rho(t_2)} [n(t_2) - 1] + 1. \quad (4)$$

写成微分形式为

$$\frac{dn}{dt} - \frac{(n-1)}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{(n-1)}{\rho} T, \quad (5)$$

式中 T 为介质的膨胀系数, 因此

$$C_n^2 = \left[\frac{(n-1)T}{\rho} \right]^2 C_t^2. \quad (6)$$

查出不同温度下的 T 值和标准温度下的介质折射率 n , 利用(1)、(2)、(4)、(6)式即可得出所模拟的折射率结构常数 C_n^2 。

3 实验设置及结果分析

3.1 区域稳定性

对于对流式湍流模拟装置, 其所模拟湍流的均匀性为评价其性能的重要指标。均匀性即区域稳定性, 是指在湍流池中心区域表征湍流特征参数的变化程度。选取大气湍流效应中比较典型的光强闪烁与到达角起伏效应对区域稳定性进行评价。实验装置主要由激光光源、透射式扩束装置、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, 而后经由放大倍率为 5 倍、发射口径为 20 mm 的透射式扩束器进行扩束, 束散角约为 0.5 mrad, 经模拟大气湍流链路传输后到达接收端。

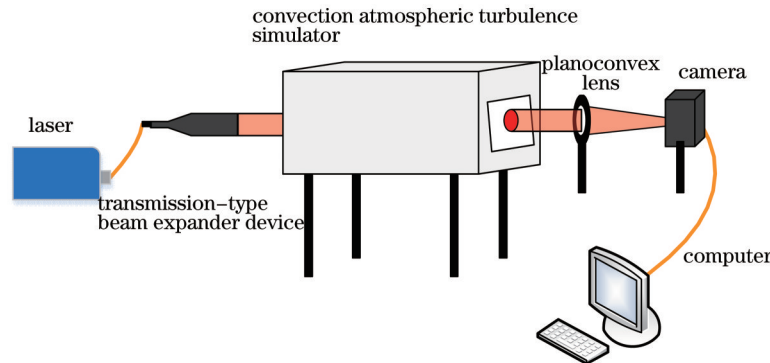


图2 区域稳定性测量装置

Fig.2 Diagram of regional stability measurement

在湍流模拟装置的窗口上, 按图3所设定位置选取 21 个点进行测量。接收端采用直径为 25 mm 的平凸透镜聚焦到测量相机光敏面上; 计算机通过采集的数据进行处理与分析得到所需实验数据。相机的分辨率为 1280×1024 , 像素尺寸为 $14 \mu\text{m}$, 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 $28 \mu\text{m}$ 。为了使测量的结果更具可比性, 实验时调整平凸透镜的位置, 使会聚的光斑存在一定程度的离焦, 实现光强闪烁与角起伏的同时测量。这样在测量光强闪烁时, 系统不易饱和并提高了测量的精度; 且由于光斑变大, 质心的测量精度同样有了提高。测量原理图如图4所示, 到达角 α 的定义如下:

$$\alpha = \Delta L/kd, \quad (7)$$

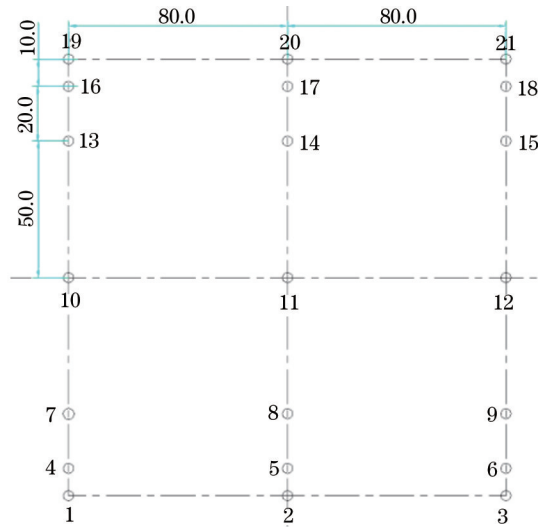


图3 测量点选取示意图

Fig.3 Schematic diagram of measurement point

式中 d 为两点间观测距离, ΔL 为相位差。实验时利用相机测量到达角 α 的公式如下:

$$\alpha = (\Delta x \times p) / f, \tag{8}$$

式中 Δx 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。测量原理如图 4 所示。

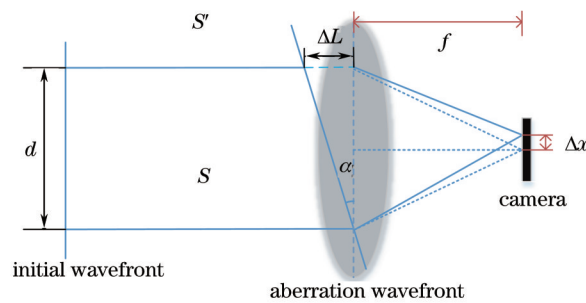


图4 测量原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of measurement

闪烁因子 β 定义为

$$\beta = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \tag{9}$$

式中 $\langle \rangle$ 表示统计平均, I 表示相机所拍摄图像的灰度值总和。

测量时, 首先设定湍流模拟装置大气相干长度为 5 cm, 启动系统进行加热, 直到模拟装置稳定时开始测量。每个测量点测量 10 次, 每次测量以 1736 Hz 的采样频率采集 15000 幅灰度图进行计算。所得闪烁因子与到达角起伏方差剔除粗大误差后取平均值记录保存。所得闪烁因子与到达角起伏方差分别如表 1、表 2 所示。

表 1 闪烁因子结果

Table 1 Results of scintillation index

Sequence number	Measurement data	Sequence number	Measurement data	Sequence number	Measurement data
1	0.04675	8	0.0472	15	0.04227
2	0.04833	9	0.04394	16	0.04437
3	0.0471	10	0.04525	17	0.04524
4	0.04601	11	0.04414	18	0.04396
5	0.04685	12	0.04587	19	0.04167
6	0.04546	13	0.04494	20	0.04303
7	0.04372	14	0.04689	21	0.04201

表2 到达角起伏结果
Table 2 Results of angle-of-arrival

Sequence number	Measurement data /10 ⁻⁶	Sequence number	Measurement data /10 ⁻⁶	Sequence number	Measurement data /10 ⁻⁶
1	2.79	8	2.75	15	2.57
2	2.82	9	2.59	16	2.67
3	2.70	10	2.58	17	2.62
4	2.76	11	2.67	18	2.48
5	2.86	12	2.74	19	2.69
6	2.65	13	2.58	20	2.69
7	2.68	14	2.66	21	2.52

通过对表中数据分析,光强闪烁因子的波动为14.8%,到达角起伏的波动为14.5%。2个参数的波动量均小于15%。

3.2 不同波长情况下大气相干长度变化

根据Kolmogorov湍流理论,湍流介质中平面波的到达角起伏方差 σ_α^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,即

$$\sigma_\alpha^2 = 2.91D^{-1/3} \arccos \theta \int_{r_0}^{\infty} C_n^2(h) dh, \quad (10)$$

式中 D 为接收望远镜孔径, θ 为天顶角, h 为观察点的高度。因此在水平链路中, r_0 有与到达角起伏方差 σ_α^2 的关系为

$$r_0 = 3.18k^{-6/5} D^{-1/5} \sigma_\alpha^{-6/5}. \quad (11)$$

通过(11)式可以看到,平面波相干长度与波长的6/5次方成正比。为了对这一理论进行验证,采用532、808、1064、1550 nm激光进行了一系列的实验。测量装置的发射端与接收端分别如图5、图6所示。

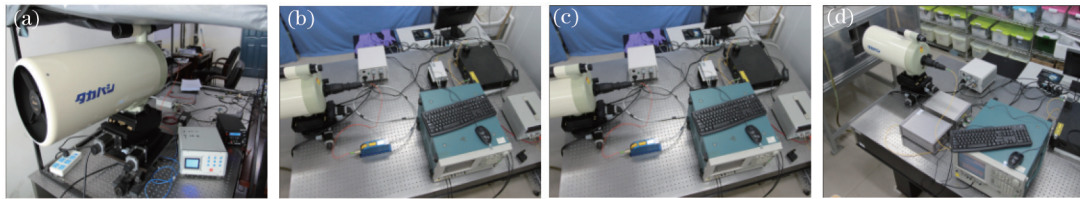


图5 发射端实物图。(a) 532 nm; (b) 808 nm; (c) 1064 nm; (d) 1550 nm

Fig.5 Diagrams of the transmitter. (a) 532 nm; (b) 808 nm; (c) 1064 nm; (d) 1550 nm

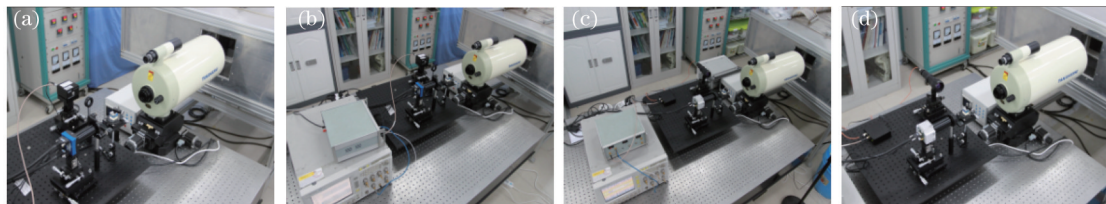


图6 接收端实物图。(a) 532 nm; (b) 808 nm; (c) 1064 nm; (d) 1550 nm

Fig.6 Diagrams of the receiving end. (a) 532 nm; (b) 808 nm; (c) 1064 nm; (d) 1550 nm

实验装置主要由4种波长激光光源、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,而后经由放大倍率为5倍、发射口径为30 mm的透射式初级扩束器进行扩束,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,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;计算机通过采集的数据进行处理与分析得到所需实验数据。

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次取平均值。结

果如图7所示。

由图7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随着波长的增长而增长。并且,不同波长条件下的大气相干长度与波长的6/5次方成正比。表3为具体实验数据。

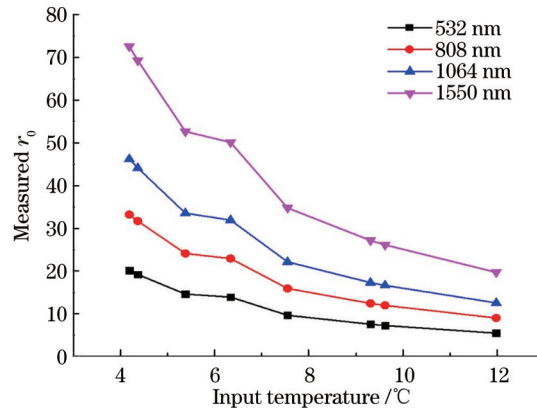


图7 不同波长所测得大气相干长度

Fig.7 Measured coherence lengths of different wavelengths

表3 大气相干长度测量数据表(单位为厘米)

Table 3 Measurement data of measured coherence length (unit is cm)

Input temperature / °C	Wavelength / nm			
	532	808	1064	1550
11.98	5.46	9.02	12.55	19.70
9.62	7.24	11.95	16.63	26.12
9.31	7.53	12.43	17.30	27.17
7.55	9.64	15.92	22.15	34.78
6.34	13.89	22.94	31.91	50.12
5.38	14.60	24.11	33.54	52.68
4.37	19.20	31.70	44.11	69.28
4.19	20.11	33.21	46.20	72.56

3.3 频谱特性稳定性

Kolmogrov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^[16]。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。理论研究表明,到达角起伏功率谱密度可以分为低频和高频2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^[17],进而用对流式湍流模拟装置对模拟湍流在频谱特性上的稳定性进行测量,对波长稳定性实验中的实验数据进行了频谱分析。图8、图9分别为选取的典型样本通过离散的傅里叶变换并采用对数-对数坐标绘制的光强闪烁和角起伏功率谱密度图,图中MSA为均方差振幅。

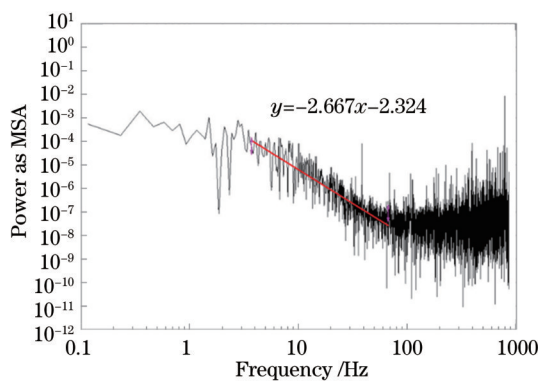


图8 典型光强闪烁功率谱密度

Fig.8 Diagram of typical scintillation power spectrum density

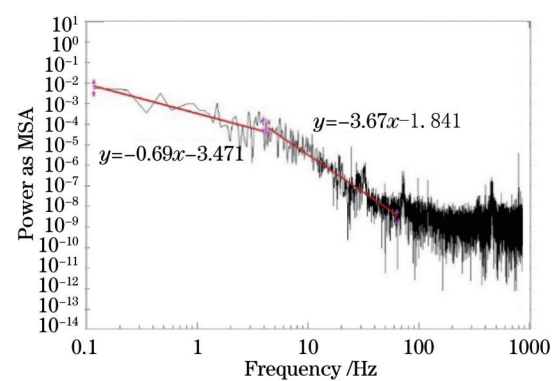


图9 y轴角起伏功率谱密度图

Fig.9 Diagram of y axis power spectrum density

由图8、9可以看出湍流模拟装置所模拟湍流在光强闪烁与到达角起伏的频谱特性与理论相符。在此没有列出 x 轴功率谱密度图是由于本实验采用热风对流式湍流模拟装置缺少横向侧风,故 x 轴无明显的幂率规律。由于实验样本比较多,未一一列举。通过对样本的统计,光强闪烁频谱高频幂指数的波动量为19.8%,到达角起伏频谱的高频幂指数波动量为17.9%。

4 结 论

为了提高对流式湍流模拟装置模拟湍流的可信度,介绍了对流式湍流模拟装置的系统结构和工作原理。采用相应的实验设备对湍流模拟装置的区域稳定性进行了评价。采用4种波长激光器对模拟装置所模拟湍流的大气相干长度随波长的变化情况进行了测定。最后,对测量数据进行了频谱分析,对模拟装置的频谱稳定性进行了评价。实验结果证明:对流式湍流模拟装置在16 cm×16 cm区域内的波动量小于15%,不同波长条件下相干长度的变化满足Kolmogrov理论,频谱波动量小于20%。满足高精度、高可靠性、高稳定性的模拟要求。

参 考 文 献

- 1 Liu Yangyang, Lü Qunbo, Zhang Wenxi, et al.. Simulation for space target interference imaging system distorted by atmospheric turbulence[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 124201.
刘扬阳, 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.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Luo Wen, Geng Chao, Li Xinyang, et al.. 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, 等. 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.
- 5 Han Liqiang, Wang Qi, Xinke Taigui, et al.. 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, 等. 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.
- 6 Wang Junbo, Sheng Ming, Xie Xiuxiu, et al.. Outage analysis for parallel relay free-space optical communication in strong turbulence[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 745-751.
王俊波, 盛明, 谢秀秀, 等. 强湍流下并行中继自由空间光通信的中断分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 745-751.
- 7 Song Hongfei, Che Ying, Zhao Xin, et al.. Improvement of fiber coupling efficiency in atmospheric turbulence[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3205-3211.
宋鸿飞, 车英, 赵馨, 等. 湍流环境中光纤耦合效率的提高[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3205-3211.
- 8 Zhang Shijie, Li Junshan, Yang Yawei, et al.. Blur identification of turbulence-degraded IR images[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 514-521.
张士杰, 李俊山, 杨亚威, 等. 湍流退化红外图像降晰函数辨识[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 514-521.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Duan Mengyun, Shan Xin, Ai Yong. Research and progress of laser atmospheric turbulence simulator[J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 1(1): 49-52.
段梦云, 单欣, 艾勇. 激光大气湍流模拟装置的研究与进展[J]. *光通信技术*, 2014, 1(1): 49-52.
- 14 Shen Yong, Liu Jianguo, Zeng Zongyong, *et al.*. Performance testing of atmospheric turbulence simulator[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(2): 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(2): 231-234.
- 15 Zhenzhong Wei, Guangjun zhang, Xin Li. The application of machine vision in inspecting position-control accuracy of motor control systems[C]. *Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2001, 2: 787-790.
- 16 Yijun Jiang, Jing Ma, Liying Tan, *et al.*. Measurement of optical intensity fluctuation over an 11.8 km turbulent path[J]. *Opt Express*, 2008, 16(10): 6963-6973.
- 17 Wenhe Du, Liying Tan, Jing Ma, *et al.*. Measurements of angle-of-arrival fluctuations over an 11.8 km urban path[J]. *Laser and Partical Beam*, 2010, 28(1): 91-99.

栏目编辑: 王晓球