

长光程大气湍流发生装置的设计与性能测试

吴应发 邱选兵 李传亮 李晋红 魏计林

太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024

摘要 温度场起伏导致空气折射率的起伏, 风速的变化影响湍流的动态特性, 从而形成光学湍流效应, 对大气激光传输产生影响。研制了一种用于研究激光大气传输效应的 Herriott 长光程大气湍流发生装置, 此装置能模拟出温度差范围为 10~200 °C, 风速范围为 0~5.8 m/s 以及光程为 1~100 m 的随机大气湍流。分析并测量了在不同温度、风速参数下该装置对激光传输的光束质量影响。实验结果表明, 该大气湍流发生装置的性能指标与实际大气湍流性能较为接近, 且具有温度范围宽、光程可调、重复性好、准确度高等优点, 能够满足大气传输湍流效应的实验要求。

关键词 大气光学; 大气湍流; 长光程; M^2 因子; 折射率结构常数

中图分类号 TN206; TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0413004

Design and Performance Testing of Long-Optical-Path Atmospheric Turbulence Simulator

Wu Yingfa Qiu Xuanbing Li Chuanliang Li Jinhong Wei Jilin

School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract Random variation in temperature field causes refractive index fluctuation in the atmosphere. Wind velocity affects atmosphere turbulence dynamic characteristic. Thus, it forms optical turbulence effects and influences atmospheric laser transmission. Based on this principle, a modified Herriott type of long-optical-path atmospheric turbulence simulator for studies of atmospheric propagation characteristics is proposed. It can simulate the temperature difference (ΔT) ranging with 10~200 °C, wind velocity with 0~5.8 m/s and optical path with 1~100 m for the random atmospheric turbulence. Measurement and analysis of the laser propagation beam quality influence at different ΔT and wind speeds are completed. Experimental results reveal that the performance of this simulator is almost identical with actual situation. It possesses wide ΔT , optional optical path, good repeatability, highly precise, etc. Therefore, it meets the needs of atmospheric turbulence effect experiment.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; long-optical-path; M^2 -factor; structure constant of refractive index

OCIS codes 010.1330; 010.3310; 080.4035

1 引言

激光大气传输对激光通信、光学雷达、卫星遥感、远距通信、激光武器等方面的应用有着重要影响, 所以激光大气传输效应成为了目前大气光学领域最为活跃的研究热点之一^[1-3]。激光本身具有带宽大、传输速率快、保密性好、抗干扰性强和成本低等优点^[4-5], 因此已成为了无线光通信中最理想的载体。激光在大气湍流中传输一定距离后, 大气湍流、气溶胶、雨雪天气等引起的相位起伏、到达角起伏、光强闪烁等光学效应严重制约了激光在通信、光学雷达、卫星遥感、远距测量、激光武器等方面的应用^[3-6]。如何准确地描述复杂湍流

收稿日期: 2014-11-28; 收到修改稿日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61178067, 61405136)、太原科技大学博士启动基金(20132011)、山西省青年科技研究基金(2012021016)

作者简介: 吴应发(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气激光通信方面的研究。E-mail: yingfa_wu@163.com

导师简介: 邱选兵(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光通信、光学测试与传感等方面的研究。

E-mail: qiuxuanbing@163.com(通信联系人)

模型和建立合适实验模型成为了激光在大气中传输的首要问题,再加上实际的大气环境是一个随机的、复杂的过程,各种实验不具备重复性和可操作性,很难找到一个普适性的研究结论^[7-9]。因此,本文研制了一种光程可调,风速、温度可控制的稳定性高、重复性好的大气湍流发生装置,为激光通过大气湍流效应的实验研究创造了有利条件。

目前国内外的湍流模拟装置^[10-12]基本都是单一环境参数控制型,而且都采用单次光程,传输距离一般在0.5~2 m。当光束在湍流发生装置中传输时,其光速质量如光斑大小、到达角起伏、光强闪烁等参数影响较小,不易测试。文献[10]设计的大气湍流模拟装置,采用空气为介质,通过装置的底部加热板和装置的顶部制冷版形成大气对流湍流的一种模拟装置;文献[11]介绍了一种对流湍流发生池,通过底部加热,顶部制冷的方式产生对流湍流,采用油为加热介质,并在加热后的油上放置平板,使得加热均匀。文献[12]提出了一种用于光传输实验研究的湍流箱,侧面的风扇使空气通过加热网格,进入湍流箱内部,再通过制冷网格流出湍流箱的另一个侧面,激光传输用的光学窗口在湍流箱的两个侧面,箱内的温度可控。以上设计装置几乎都是采用单一或是两个大气湍流参数的单光程的湍流发生装置,虽然在某些场合的实验已经足够,但是不具备一种普遍且适用的研究条件。

在激光的实际应用中对传输效率、光束稳定性以及输出功率等方面具有严格要求,而且光束质量已成为了一个重要的评价指标^[13],因此测量光束质量因子对激光的理论分析和实际应用具有重要意义。由于在大气中受到大气湍流的影响,激光光束质量因子随之产生变化即可以反映出大气湍流的特征^[14]。因此,本文采用德国 Cinogy 公司 CMOS-1201 型光束质量因子(M^2)测量系统,实测了激光束通过大气湍流发生装置后的光束质量 M^2 因子,通过计算得到相应的大气湍流折射率结构常数 C_n^2 ,并对湍流发生装置进行了特性分析。

2 长光程大气湍流发生装置

本长光程大气湍流发生装置主要由湍流发生池、光路部分和电路系统组成,如图1所示。湍流发生池主要包括密闭的装置主体、气压控制阀门、传输管道、接口法兰和石英玻璃。湍流池主体为长1 m、宽0.6 m、高0.4 m的长方体,池内两侧用隔板避免高温接触放置的电路板和传感器。湍流池两端各有一个直径为100 mm 通光管,耐高温石英玻璃安装在两侧的通光管上,并用高温硅胶密封。湍流池的两块侧板各有2个通风孔,安装控制阀并通过接口法兰和管道将加热系统和冷却系统连接起来。

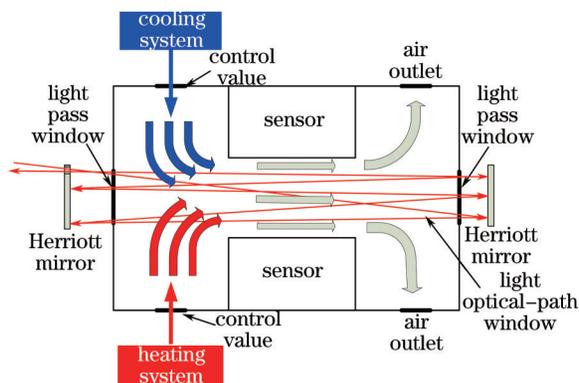


图1 湍流发生装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of atmospheric turbulence simulator

激光光路为改进型 Herriott 长光程系统^[15-16],与现有的单次光程湍流模拟装置(一般在0.5~2 m,传输距离有限)相比,本设计的光路不仅增大了有效光程,实现了在实验室里远距离光传输实验(传输距离1~100 m,且可调),而且具有安装简单、易控制、光路方便调节等优点。Herriott 反射镜的半径为3 cm,曲率半径为5 m,装置可通过调节反射镜的焦距、反射镜间距、移动镜片转角以及激光入射角增加反射光斑数目即增大反射次数,因此在有限的空间有效利用镜面的面积实现了不同距离光路,从而满足通过改变距离来测量大气湍流参数的实验要求。

电路系统主要包括各种传感器和控制系统。通过各种传感器实时监测温度、风速的测量值,并通过比例、积分、微分计算出控制量进行比例-积分-微分(PID)冷风和热风循环系统。温度传感器放在图1中湍流

装置传感器区隔板上,用于测量发生湍流后的温度,而风速仪用于测量出风口处的风速。PID控制系统如图2所示,STM32F103RBT6(MCU)作为控制器,MCU通过温度传感器和风速仪实时读取湍流池中温度和风速值,通过PID调节冷风和热风循环装置的阀门、半导体制冷器、加热丝、电风机转速,从而实现模拟大气环境的自适应调节,并且可以在液晶显示器(LCD)上显示湍流池内的信息。

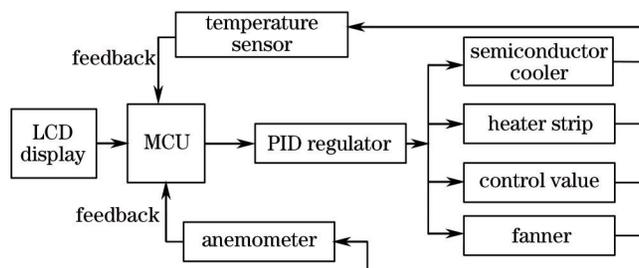


图2 PID控制系统

Fig.2 PID control system

3 大气湍流发生装置性能测试

3.1 方 法

Siegman^[17]用二阶矩表示的束宽积定义为光束质量因子 M^2 ,较为合理地描述了激光束的质量,已经成为衡量激光光束优劣的一项重要指标^[18]。本文根据广义惠更斯-菲涅耳原理,并利用维格纳分布函数(WDF)的二阶矩定义,推导了光束质量因子 M^2 和大气湍流折射率结构常数 C_n^2 的解析表达式,分析大气湍流对光束质量的影响,并通过实验的方法对湍流发生装置进行特性分析。

将惠更斯-菲涅耳原理的近轴形式与Tatarskii湍流谱模型相结合,计算得到部分相干光束的交叉谱密度函数表达式为^[17]

$$W(\rho_1, \rho_2, z) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right)^2 \iint W(s_1, s_2, z=0) \exp\left\{-\frac{ik}{2z}[(\rho_1 - s_1)^2 - (\rho_2 - s_2)^2] - H\right\} ds_1 ds_2, \quad (1)$$

$$\rho_0 = (0.545C_n^2 kz)^{-3/5}, \quad (2)$$

式中 ρ_1 和 ρ_2 为传输距离为 z 时的任意两点, ρ_0 为球面波传播通过湍流空间相干半径, C_n^2 为大气湍流广义结构常数, s_1, s_2 分别为 $z=0$ 时的二点坐标矢量, z 为传播距离, $k=2\pi/\lambda$ 是波数, λ 为波长, H 为大气湍流扰动引起的相位起伏,

$$H = 4\pi^2 k^2 z \int_0^\infty \left[1 - J_0 \kappa (1 - \xi)(\rho_2 - \rho_1) + \xi(s_2 - s_1)\right] \Phi_n(\kappa) \kappa d\kappa d\xi, \quad (3)$$

其中, J_0 是第一类零阶贝塞尔函数, $\Phi_n(\kappa)$ 是大气湍流折射率起伏函数的空间功率谱, κ 为大气湍流波数的大小, ξ 为大气湍流积分量。

部分相干高斯-谢尔模型(GSM)光束在入射面 $z=0$ 时的交叉谱密度函数为

$$W(s_1, s_2, z=0) = I_0 \exp\left[-\frac{s_1^2 + s_2^2}{w_0^2} - \frac{(s_1 - s_2)^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (4)$$

式中 I_0 为入射光束的光源光谱, w_0 为GSM光束的束腰宽度, σ_0 为光源的空间相干长度。

通过WDF二阶矩得到光束质量因子 M^2 的表达式为

$$M^2 = 2k \left(\langle \rho^2 \rangle \langle \theta^2 \rangle - \langle \rho\theta \rangle \right)^{1/2}, \quad (5)$$

将(2)式和(3)式代入(1)式中,并利用WDF二阶矩的定义以及狄拉克函数的性质可以推导出均方根束宽、均方根角度、交叉项,分别如下:

$$\langle \rho^2 \rangle = \frac{w_0^2}{4} + \frac{1}{k^2 w_0^2} M_0^4 + \frac{2}{3} \pi^2 z^3 u, \quad (6)$$

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{1}{k^2 w_0^2} M_0^4 z + 2\pi^2 zu, \quad (7)$$

$$\langle \rho \theta \rangle = \frac{1}{k^2 w_0^2} M_0^4 z + \pi^2 z u . \quad (8)$$

式中 M_0^2 为 $z=0$ 处光束质量因子, u 为大气湍流特征量。大气湍流解析表达式为^[19-20]

$$\frac{1}{\rho_0^2} = \frac{1}{3} k^2 \pi^2 z \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa) d\kappa . \quad (9)$$

将(2)式代入(9)式得

$$u = \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa) d\kappa = \frac{3(0.545 C_n^2 k z)^{6/5}}{k^2 \pi^2 z} . \quad (10)$$

将(6)~(8)式代入(5)式可以计算出光束传输因子 M^2 的解析表达式为

$$M^2 = \left(M_0^4 + 2\pi^2 k^2 w_0^2 z u + \frac{8\pi^2 z^3}{3w_0^2} M_0^4 u + \frac{4\pi^4 k^2 z^4}{3} u^2 \right)^{1/2} . \quad (11)$$

根据(10)式和(11)式可解出大气湍流折射率结构常数 C_n^2 为

$$C_n^2 = \frac{0.57795 \left[\left(k^2 w_0^2 + \frac{4z^2}{3w_0^2} M_0^4 \right)^2 - \frac{4k^2 z^2}{3} (M_0^4 - M^4) - k^2 w_0^2 - \frac{4z^2}{3w_0^2} M_0^4 \right]^{5/6}}{k^2 z^{8/3}} . \quad (12)$$

分析(12)式可知,只需要通过实验测量光束在初始位置的光束质量因子即 M_0^2 和传输距离 z 时的 M^2 值,代入(12)式可得结构常数 C_n^2 的值。

3.2 实验系统

实验测量系统如图3所示, GY-10C型 He-Ne 激光(输出波长 632.8 nm, 输出功率 5 mW, 光束直径 0.257 mm)穿过长光程镜1的孔并垂直入射通光窗, 进入湍流发生池(经过一次湍流发生池的传输距离 $z=1.0$ m), 经另一端通光窗后入射到长光程镜2上, 并在湍流发生池内多次反射。实验中, 通过改变反射次数来实现 1~100 m 的长光程测量, 最终当满足测量所需的光程后激光从长光程镜1孔出来, 接着通过反射镜、聚焦镜后入射到带有高精度的导轨上的 CMOS 图像传感器上。光束分析仪通过 USB 线将数据传到计算机上, 并由德国 Cinogy 公司自带软件 RayCi 实现 M^2 值、束腰大小、束腰位置、瑞利长度以及发散角等参数的测量。图3(a)为实验结构框图, (b)为实验平台照片。

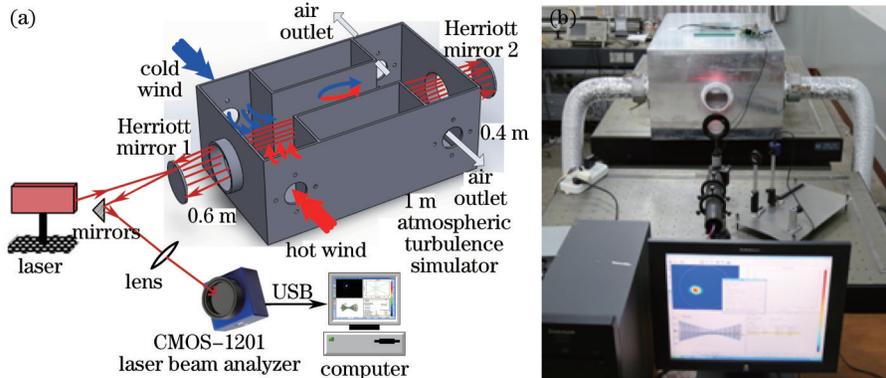


图3 测量系统图。(a) 示意图; (b) 实物图

Fig.3 Measurement system diagram. (a) Schematic diagram; (b) actual photo

通过调节 Herriott 反射镜的焦距、反射镜间距、移动镜片转角以及激光入射角可以增加反射光斑数目即增大反射次数。实验测量了传输距离 z 为 1、3、5、14、22、30、38 m 的湍流参数, 其中传输距离 z 为 14、22、30、38 m 时 Herriott 反射镜上的光斑分布图如图4所示。

光束分析仪具有形象化视图模式、精度和准确度高、分析功能完善、操作简单等优点, 采用 ISO11146 测量标准, 通过测量 10 个点以上并拟合出 M^2 值, 其中 5 个点必须在瑞利长度之内。束腰宽度 w 的双曲线拟合表达式为

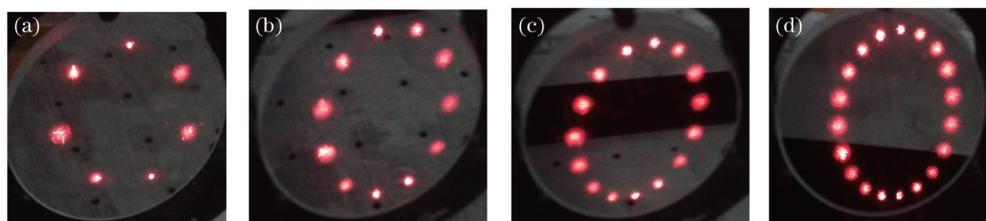


图4 Herriott反射镜上的光斑分布照片。(a) $z=14$ m; (b) $z=22$ m; (c) $z=30$ m; (d) $z=38$ m

Fig.4 Pictures of Herriott type mirror spot distribution. (a) $z=14$ m; (b) $z=22$ m; (c) $z=30$ m; (d) $z=38$ m

$$w^2 = Az^2 + Bz + C, \quad (13)$$

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{AC - \frac{B^2}{4}}, \quad (14)$$

式中 A 、 B 、 C 是拟合系数。通过 RayCi 测量软件可以计算得出拟合系数,代入(14)式即求得 M^2 值。实验中的 M^2 是通过三次测量的 M^2 求均值得到的。

4 实验结果与分析

图5是通过光束分析仪测得不同湍流环境下的二维光斑图。图(a)中 $z=0$, 室温 20°C , 风速为 0 ; 图(b)中 $z=5$ m, 温差为 36°C , 风速为 2.0 m/s; 图(c)中 $z=14$ m, 温差为 36°C , 风速为 2.0 m/s; 图(d)中 $z=38$ m, 温差为 36°C , 风速为 2.0 m/s; 图(e)中 $z=38$ m, 温差为 46°C , 风速为 2.0 m/s。从图5可以看出随 M^2 增大光斑质量越来越差,也反映了湍流强度的强弱;一开始得到的光斑图能量较集中,能量大致成一个圆环分布,后面几个光斑图案由于受到大气湍流的作用,导致波前像差的畸变、破碎和展宽等质量变坏,从而影响了光波的光学质量^[21-22]。

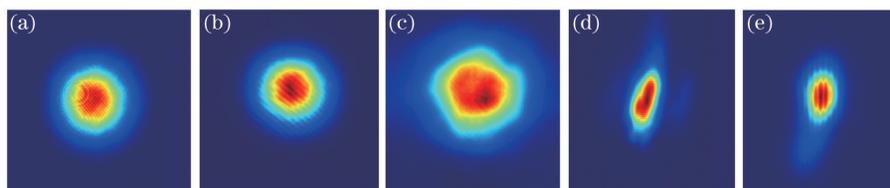


图5 CMOS 光束分析仪测得的光斑照片。(a) $M^2=1.139$; (b) $M^2=2.166$; (c) $M^2=4.308$; (d) $M^2=9.733$; (e) $M^2=13.247$

Fig.5 CMOS beam analyzer measured spot photos. (a) $M^2=1.139$; (b) $M^2=2.166$; (c) $M^2=4.308$; (d) $M^2=9.733$; (e) $M^2=13.247$

图6是在 $z=3$ m, 温差为 36°C 时,不同风速下测得的二维光斑图。图(a)为风速 1.0 m/s; 图(b)为风速 2.0 m/s; 图(c)为风速 3.0 m/s; 图(d)为风速 4.0 m/s; 图(e)为风速 5.0 m/s。从图6可以看出,不同风速下光束光斑的形状没有发生太大的变化。通过比较图5和图6,温差对光斑形状影响比较大,而风速对光斑形状影响比较小。大气湍流对激光传输最直观的影响是光强空间分布(光斑形状的变化),即光斑图像可以反映湍流对光束的影响。

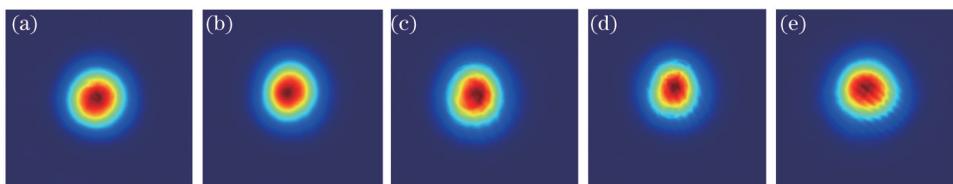


图6 不同风速时的光斑照片。(a) $M^2=1.710$; (b) $M^2=1.849$; (c) $M^2=1.921$; (d) $M^2=2.078$; (e) $M^2=2.101$

Fig.6 Spot photos of different wind speeds. (a) $M^2=1.710$; (b) $M^2=1.849$; (c) $M^2=1.921$; (d) $M^2=2.078$; (e) $M^2=2.101$

图7是在风速 $v=2.0$ m/s 下不同温差 ΔT 时传输距离 $z=14$ m 测量得到的 M^2 值曲线图,以及将由 M^2 计算得到的结构常数 C_n^2 值曲线图。根据(12)式,计算得到相对应的结构常数 C_n^2 值范围为 $2.30 \times 10^{-12} \sim 1.32 \times 10^{-11} \text{ m}^{-2/3}$ 。从图7可以看出, M^2 因子和结构常数 C_n^2 都随温差 ΔT 的增大而增大,光束受到大气湍流的影响就越大,光束质量就越差。图8是在温差 $\Delta T=36^\circ\text{C}$ 下不同温差 ΔT 时传输距离 $z=14$ m 时 M^2 值和结构常数 C_n^2 值曲线图,相应的结构常数 C_n^2 范围为 $5.57 \times 10^{-12} \sim 7.50 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 。通过对比图7和图8,可以得到虽然 M^2 因子和结构常数 C_n^2 都受风温度和风速的影响,然而温差的影响比风速的影响更为明显。一般对光学性质起影响的是由于大气密度起伏引起的折射率改变而引起的,大气密度起伏主要由温度起伏决定的,而风速影响湍流的动态特性^[23]。

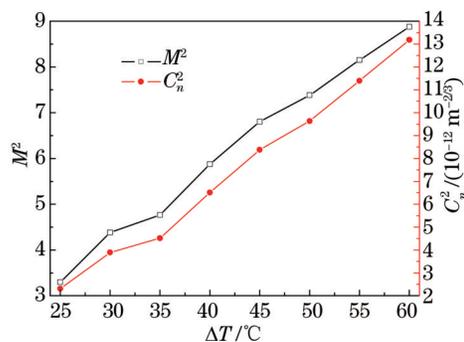


图7 不同温差 ΔT 下大气湍流参数

Fig.7 Atmospheric turbulence parameter versus ΔT

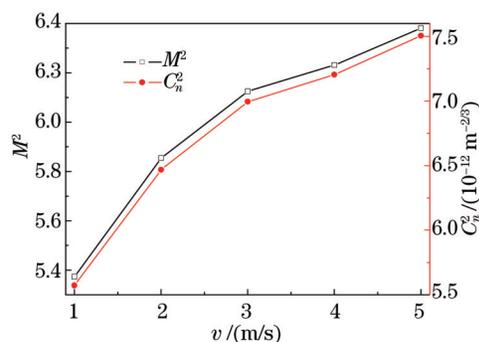


图8 不同风速 v 时大气湍流参数

Fig.8 Atmospheric turbulence parameter versus wind speed v

图9为 Herriott 反射镜反射4次即传输距离 $z=8$ m时,无湍流和有湍流的功率分布。无湍流功率分布为激光器预热2 h后测得的光强,功率值主要集中在3.6 mW左右。而有湍流的功率分布是在温差45 °C、风速为1.7 m/s时接收的光强分布,曲线分布分散、振荡和起伏。从图9的有、无湍流的功率分布可以看出湍流导致了光束的扩展、漂移、减弱等现象。

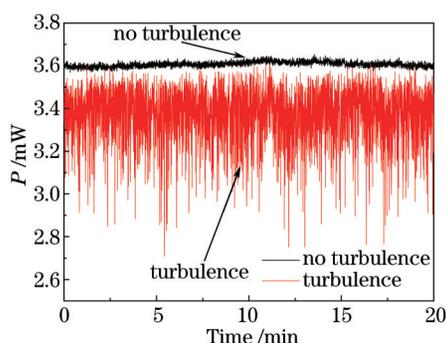


图9 有、无湍流情况光功率分布

Fig.9 Optical power distribution with and without turbulence

目前,有关激光大气湍流效应理论研究以及模型一般都是建立在大气湍流满足局地均匀各向同性的基础上,再加上湍流特性的复杂性,所以大多程度上的湍流理论模型是否准确不易得到验证。本湍流装置通过控制温度和风速可以很好的模拟随机、复杂大气湍流的空气运动状况,为下一步分析激光大气传输效应提供了有力的实验验证和数据来源。

5 结 论

研制了一种应用于实验室传输的距离可调,风速、温度可控制的能产生复杂、随机湍流的发生装置,从而为激光大气湍流效应的基本物理机制提供了有利条件。实验结果表明,所设计的大气湍流发生装置所测的性能指标与实际大气湍流性能较为接近,而且具有较好的可控性、准确性和稳定性,能够满足大气传输湍流效应的实验要求。下一阶段通过定量测量湍流强度、内外尺度、功率谱等基本参数以便对模拟的湍流特性进行较全面的描述和评估。

参 考 文 献

- 1 Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.*. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.
赵 馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- 2 Xie Mengqi, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the signal-to-noise ratio of free space optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 110102.
解孟其, 柯熙政. 大气湍流对无线光通信系统信噪比的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 110102.
- 3 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.
- 4 Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- 5 Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1020-1024.
- 马东堂, 魏急波, 庄钊文. 大气激光通信中多光束传输性能分析和信道建模[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1020-1024.
- 6 Lü Baida, Ji Xiaoling, Luo Shirong, *et al.*. Parametric characterization of laser beams and beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 14-17.
- 吕百达, 季小玲, 罗时荣, 等. 激光的参数描述和光束质量[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 14-17.
- 7 Xiao Liming, Ma Chengsheng, Weng Ningquan, *et al.*. The design and properties of convective turbulence cell[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1999, 16(1): 86-89.
- 肖黎明, 马成胜, 翁宁泉, 等. 对流湍流发生池的设计与性能[J]. 量子电子学报, 1999, 16(1): 86-89.
- 8 Duan Mengyun, Shan Xin, Ai Yong. Research and progress of laser atmospheric turbulence simulator[J]. Optical Communication Technology, 2014, (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): 49-52.
- 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 Lu Yihuai, Shen Yong, Ceng Zongyong, *et al.*. Device Simulation of Atmospheric Turbulence: China, CN201020699835.8[P]. 2011-11-30[2014-11-28]. http://d.wanfangdata.com.cn/Patent_CN201020699835.8.aspx.
- 陆亦怀, 申永, 曾宗泳, 等. 大气湍流模拟装置: 中国, CN201020699835.8[P]. 2011-11-30[2014-11-28]. http://d.wanfangdata.com.cn/Patent_CN201020699835.8.aspx.
- 11 Zeng Zongyong, Xiao Liming, Weng Ningquan, *et al.*. Convective Turbulence Cell: China, CN00221591.8[P]. 2001-09-26[2014-11-28]. http://d.wanfangdata.com.cn/Patent_CN00221591.8.aspx.
- 曾宗泳, 肖黎明, 翁宁泉, 等. 对流湍流发生池: 中国, CN00221591.8[P]. 2001-09-26 [2014-11-28]. http://d.wanfangdata.com.cn/Patent_CN00221591.8.aspx.
- 12 Li Yan, Zong Fei, Qiang Xiwen, *et al.*. Design and characterization analysis of turbulence chamber for optical propagation experiments[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 920-923.
- 李岩, 宗飞, 强希文, 等. 用于光传输实验研究的湍流箱的设计和特性分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 920-923.
- 13 Deng D. Generalized M^2 -factor of hollow Gaussian beams through a hard-edge circular aperture[J]. Physics Letters A, 2005, 341(1): 352-356.
- 14 Pan Pingping, Zhang Bin. Method for determining the characteristic parameters of the turbulence based on the measurement of M^2 -factor[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 014215.
- 潘平平, 张彬. 基于 M^2 因子测量的大气湍流参数的确定方法[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 014215.
- 15 Wei Jilin, Li Chuanliang, Qiu Xuanbing, *et al.*. An Automatic Tunable Multi Optical Path System :China, CN201210371938.5[P]. 2013-01-16[2014-11-28]. http://d.wanfangdata.com.cn/Patent_CN201210371938.5.aspx.
- 魏计林, 李传亮, 邱选兵, 等. 一种自动可调谐多光程系统: 中国, CN201210371938.5[P]. 2013-01-16[2014-11-28]. http://d.wanfangdata.com.cn/Patent_CN201210371938.5.aspx.
- 16 Yang Mu, Li Chuanliang, Wei Jilin. A novel design of mutipass Herriott type cell[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2013, 19(2): 189-194.
- 杨牧, 李传亮, 魏计林. 基于 Herriott 型长程池的光学设计的研究[J]. 量子光学学报, 2013, 19(2): 189-194.
- 17 Siegman A E. New developments in laser resonators[C]. SPIE, 1990, 1224: 2-14.
- 18 Ai Yangli, Dan Youquan, Ming Delie. M^2 factor of partially coherent cosh-Gaussian beams in turbulent atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2849-2854.
- 艾扬利, 但有全, 明德烈. 湍流大气中部分相干双曲余弦高斯光束的 M^2 因子[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2849-2854.
- 19 Li J, Yang A, Lü B. Comparative study of the beam-width spreading of partially coherent Hermite-sinh-Gaussian beams in atmospheric turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science and Vision, 2008, 25(11): 2670-2679.

- 20 Li J, Yang A, Lü B. The angular spread and directionality of general partially coherent beams in atmospheric turbulence[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008, 10(9): 095003.
- 21 Zhao Tao, Zhang Zhengyu, Wang Shuiliang, *et al.*. Measurement and reconstruction for large aero-optics wavefront distortion field[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1012003.
赵 涛, 张征宇, 王水亮, 等. 大幅面气动光学波前畸变场测量与重构[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1012003.
- 22 Wu Huiyun, Chen Jinbao, Sun Zhenhai. Analysis of beam propagation through a relay mirror system in turbulent atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0213001.
吴慧云, 陈金宝, 孙振海. 激光湍流大气中继传输性能分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0213001.
- 23 Feizulin Z I, Kravtsov Y A. Broadening of a laser beam in a turbulent medium[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 1967, 10(1): 33-35.

栏目编辑: 史 敏