

## 激光大气传输相位屏的时间相关性测量

丛明慧<sup>1</sup>,倪小龙<sup>2,3</sup>,刘智<sup>1,2\*</sup>,张小琪<sup>1</sup>,姚海峰<sup>2</sup>

(1.长春理工大学 电子与信息工程学院,长春 130000;

2.长春理工大学 空间光电技术研究所,长春 130000;3.长春光客科技有限公司,长春 130000)

**摘要:**为了提高动态大气湍流模拟相位屏时间上的模拟精度,提出了利用时间协方差测量时间相关性的方法,在基于液晶空间光调制器(LC-SLM)的大气湍流相位屏模拟方法、时间特性等方面开展了研究。采用功率谱反演法生成湍流模拟相位屏,给出了时间变量及时间功率谱的计算方法,搭建了基于 LC-SLM 的大气湍流相位屏模拟实验系统,并对上述方法进行了实验验证。实验结果表明:激光畸变损失情况下,时间协方差的计算误差可控制在 8.0% 左右,且该模拟方法下相位屏的时间模拟精度较好。

**关键词:**大气湍流;时间相关性;时间协方差;功率谱反演法;相位屏

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)10-0028-05

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.028

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Time correlation measurement of laser atmospheric transmission phase screen

CONG Minghui<sup>1</sup>, NI Xiaolong<sup>2,3</sup>, LIU Zhi<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Xiaoqi<sup>1</sup>, YAO Haifeng<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130000, China;

2. Institute of Space Optics and Electronics, Changchun University of Technology, Changchun 130000, China;

3. Changchun Guangke Technology Co. Ltd., Changchun 130000, China)

**Abstract:** In order to improve the simulation accuracy on the phase screen of dynamic atmospheric turbulence simulation, a method for measuring time correlation using time covariance is proposed. Research has been carried out on atmospheric turbulence phase screen simulation methods based on liquid crystal spatial light modulators(LC-SLM), time characteristics, etc. The power spectrum inversion method is used to generate a turbulence simulation phase screen, and then the calculation method of the time variable and time power spectrum is given. Finally, an atmospheric turbulence phase screen simulation experiment system based on LC-SLM is established, and the above method is verified experimentally. The experimental results show that in the case of laser distortion loss, the calculation error of the time covariance can be controlled to about 8.0%, and the time simulation accuracy of the phase screen is better under this simulation method.

**Key words:** atmospheric turbulence; time correlation; time covariance; power spectrum inversion method; phase screen

## 0 引言

激光具有强度、单色性和相干性高的性质,其在大气传输过程中会受湍流效应影响<sup>[1-2]</sup>,导致大气激光

通信等应用系统的性能受到严重影响。迄今为止,大部分的理论研究均是从空间统计的角度对大气湍流效应进行描述,很少从时间相关性的角度对大气湍流效应及其对空间激光通信系统的影响进行分析。在大气湍流环境激光通信链路特性的仿真分析与实验验证中,缺乏时间相关性信息会导致仿真过程的不完整和测试结果的偏差。因此,湍流模拟的时间相关性分析具有重要意义。

在湍流模拟的时间相关性分析方面,国内外研究人员做了很多工作。Glindemann A 等人<sup>[3]</sup>考虑大气湍流的时间相关性,调整了子相位屏的空间间隔,并预测新

**收稿日期:** 2020-01-11。

**基金项目:** 国家自然科学基金(批准号:61775022)资助。

**作者简介:** 丛明慧(1995—),女,吉林靖宇人,硕士生,现就读于长春理工大学电子信息工程学院信息与通信工程专业,主要从事空间光通信系统理论与技术方面的研究工作,并对激光大气传输相位屏进行优化及实验验证。

\* 通信作者:刘智(E-mail: liuzhi@cust.edu.cn)。



的子屏,使子屏的重复性有所降低,但其对时间相关性的分析过程较为复杂;Dainty C<sup>[4]</sup>将相位波前展开成一系列傅里叶变换的叠加,但在实验中无法实现时变仿真;卫沛锋等人<sup>[5]</sup>给出了时域上湍流相位屏的刷新频率、平滑帧数与风速的关系,而对于已有相位屏具有一定的随机性,所以得到的相位屏整体的动态特性仍需评估;李盾等人<sup>[6]</sup>研究了相位屏旋转的长时间特性,其可模拟动态大气湍流,但需要深度研究模拟精度和时间特性。谭涛等人<sup>[7]</sup>测量了旋转相位屏模拟的大气湍流的时间和空间特性,但只对泽尼克(Zernike)法生成的相位屏进行了实验,并没有分析功率谱反演法。目前,很多研究人员已经将数值模拟技术应用到湍流模拟的时间相关性分析中<sup>[8]</sup>,但高斯光束在大气湍流中传播的时间特性分析较少。

本文采用功率谱反演法模拟大气湍流,将数值模拟技术的适用性扩展到近似高斯光束在大气中传播的时间分析,并研究从空间到时间的转换关系和时间功率谱的计算方法。

## 1 相位屏的生成及时间相关性原理

### 1.1 功率谱反演法基本原理

功率谱反演法是常用的相位屏生成方法,其基本思想是对一个复高斯随机数矩阵用大气湍流的功率谱进行滤波,再通过逆傅里叶变换得到大气扰动相位<sup>[9]</sup>。

$$\varphi(x, y) = A \sum_k \sum_{k_y} R(k_x, k_y) \sqrt{F_\varphi(k_x, k_y)} e^{i(k_x x + k_y y)} \quad (1)$$

其中,  $A$  为控制相位屏的常数;  $x = p\Delta x, y = q\Delta y, \Delta x, \Delta y$  为空域内的取样间隔,  $p, q$  为整数;  $k_x = p'\Delta k_x, k_y = q'\Delta k_y, \Delta k_x, \Delta k_y$  为波数域内的取样间隔,  $p', q'$  为整数;  $R(k_x, k_y)$  是随机数(均值为零,方差为高斯形式);  $F_\varphi(k_x, k_y)$  为近似功率谱密度,表示大气湍流引起的相位畸变部分。

因为缺少低频部分,本文通过叠加低次谐波进行补偿,即对傅里叶低次谐波重采样,再进行插值合并<sup>[9]</sup>。

### 1.2 相位结构函数

相位结构函数是从空间的角度上来衡量相位屏与理论的吻合度,其基本原理公式参见文献[10]。

由于不同的湍流模型有不同的相位结构函数形式,而且在本文中是 Kolmogorov 湍流模型,所以该模式下相位结构函数的形式如式(2)所示。

$$D_\varphi(r) = 5.88(r/r_0)^{5/3} \quad (2)$$

其中,  $r_0$  为大气相干长度,  $r = |r_1 - r_2|$ ,  $r_1$  和  $r_2$  为相位屏上的任意两点,  $r$  即为这两点间的距离。

### 1.3 时间变量

大气光学传播中的分析方法通常应用湍流冻结或泰勒假设<sup>[11]</sup>,以将波的空间统计特性扩展到时间统计特性。空间坐标  $\vec{\rho}$  表示垂直于波传播方向的平面中的位置,时间变量  $\tau$  实际上是通过将  $\vec{\rho}$  表示为风速  $\vec{V}_\perp$  的横向分量的函数进行转换而得到的。波的类型不同,相应的转换公式也不同。在 Phillips 和 Andrews<sup>[12]</sup>的研究之后,对于近似高斯光束的情况,其转换公式为:

$$\tau = \frac{\gamma \vec{\rho}}{\vec{V}_\perp} \quad (3)$$

其中,  $\gamma = (1 + j\alpha_0 z) / (1 + j\alpha_0 L)$ ,  $\alpha_0 = 2 / (k W_0^2) + j R_0^{-1}$ ,  $L$  为传输距离,  $\gamma$  和  $\alpha_0$  是高斯光束的复数参数,  $k$  是自由空间中的波数,  $W_0$  和  $R_0$  分别是  $z=0$  时的光束宽度和曲率半径。

### 1.4 时间功率谱

湍流相位屏的时间相关性可由波束轴上辐照度的时间功率谱进行评估。时间功率谱  $S_I$  可以通过时间协方差法来计算,即利用傅里叶变换直接从时间协方差  $B_I$  导出,如式(4)所示。

$$S_I(\omega) = 2 \int_0^\infty B_I(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau = 4 \int_0^\infty B_I(\tau, L) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (4)$$

其中,  $B_I(\tau, L)$  是时间协方差函数,  $\omega, \tau$  分别是傅里叶变换公式中的圆频率和时间变量。式(4)的逆变换为:

$$B_I(\tau, L) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S_I(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \quad (5)$$

文献[12]中给出了近似高斯光束的空间协方差函数,将转换式(3)代入空间协方差函数近似式中可获得简化的时间协方差函数为:

$$B_I(\tau) = 2.172 \sigma_R^2 \operatorname{Re} \left\{ (2j + \Lambda)^{5/6} {}_1F_1 \left( -\frac{5}{6}; 1; \frac{-\omega_1^2 \tau^2}{2j + \Lambda} \right) - \Lambda^{5/6} {}_1F_1 \left( -\frac{5}{6}; 1; \frac{-\omega_1^2 \tau^2}{\Lambda} \right) \right\} \quad (6)$$

其中,  ${}_1F_1 \left( -\frac{5}{6}; 1; \frac{-\omega_1^2 \tau^2}{2j + \Lambda} \right)$  为超几何函数,  $\Lambda = \frac{2L}{k_0 \omega^2(L)}$ ,

$\omega_1 = \vec{V}_\perp / \sqrt{L/k}$ 。特征频率  $\omega_1$  (又称菲涅耳频率)由菲涅耳尺度和平均风速唯一定义。

## 2 激光大气传输模拟实验

### 2.1 实验装置与参数

本文采用液晶空间光调制器(LC-SLM)进行实验,

丛明慧,倪小龙,刘智,等:激光大气传输相位屏的时间相关性测量

在 LC-SLM 上动态连续地加载由母屏截取的子相位屏,并用夏克-哈特曼波前传感器进行相关测量,激光大气传输实验装置如图 1 所示。激光器发射出激光光束,经光束准直器得到准直光束,再经偏振片得到线偏振光,分光棱镜 1 将该线偏振光入射到 LC-SLM 上进行相位调制,再反射到分光棱镜 1 中,光束的方向发生偏转,入射到分光棱镜 2 中,又通过分光棱镜 2 分束,其中一束光束入射到波前传感器上,测量光束经调制后波前的变化;另一束光束入射到透镜中使光束汇聚在一起。汇聚后的光束入射到相机的光敏面上,通过相机采集相关信息。实验装置参数如表 1 所示。

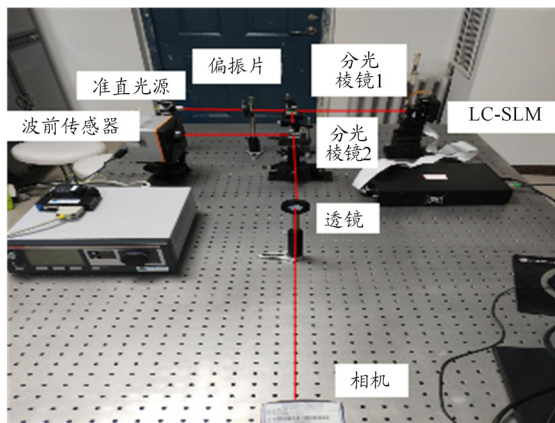
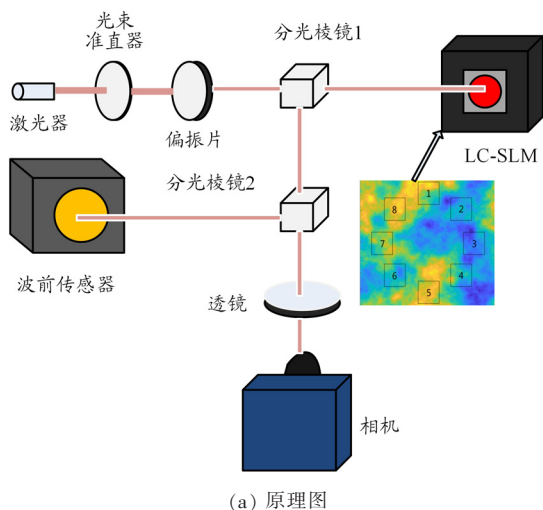


图 1 激光大气传输实验装置图

实验中液晶的刷新频率最大为 500 Hz(即显示一帧需要 2 ms),因此本文设定相位屏的切换频率为 200 Hz。夏克-哈特曼波前传感器的速率其实是波前复原的速率,虽然其波前复原计算量很大,需要很多的时间,但实际采样频率为 2000 Hz,采样频率很高。

## 2.2 相位屏模拟

本文所需网格点数为  $4096 \times 4096$ ,相位屏的单元

表 1 实验装置参数

| 器件名称                       | 参数                                                   |
|----------------------------|------------------------------------------------------|
| 激光器                        | 波长:785 nm<br>最大输出功率:400 mW                           |
| 光束准直器                      | 半径范围:3.2~4.0 mm                                      |
| 分光棱镜                       | 能量利用率:25%<br>零级衍射效率: $\geq 90\%$                     |
| 透镜                         | 半径:12.5 mm<br>焦距:500 mm                              |
| 偏振片                        | 消光比: $>1000:1$                                       |
| LC-SLM                     | 工作波长:785 nm<br>分辨率:512×512<br>速率:500 Hz              |
| 波前传感器<br>(夏克-哈特曼<br>波前传感器) | 分辨率:500×500<br>有效孔径:30 mm<br>帧率:60~100 f/s           |
| 相机                         | 像元尺寸:14 $\mu\text{m}$<br>分辨率:320×320<br>采样频率:1000 Hz |
| 计算机                        | CPU:4.00 GHz<br>操作系统:Win7 64 位                       |

长度为  $D=6.144 \times 10^{-2}$  m,湍流外尺度为  $L_0=10$  m,湍流内尺度为  $l_0=0$  m。选取弱湍流条件下大气相干长度  $r_0=0.1$  m。生成的相位屏及相位结构函数对比图如图 2 所示,从图 2(b)可以看出模拟结果和理论结果比较接近。

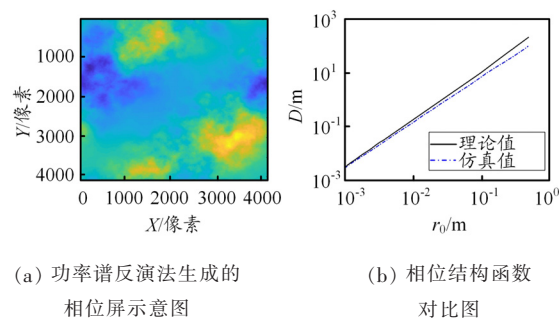


图 2 相位屏示意图及相位结构函数对比图

## 2.3 基于 LC-SLM 的相位屏加载方式

由于本文所用的 LC-SLM 的分辨率为  $512 \times 512$ ,所以旋转截取的子相位屏大小为  $512 \times 512$ ,即子相位屏的采样点数为 512。本文将旋转半径设为 1024 个像素点,相位屏沿着光束传播的方向进行旋转截取,并且对于每一张母相位屏进行旋转截取时,可得到 1000 张子相位屏进行实验。实验中先将起始子相位屏加载至 LC-SLM 中,利用 LC-SLM 的计算机加载软件(即



PCle-Blink 软件)将下一张子相位屏接续加载进来,从而很好地引入风速,最后形成动态的湍流相位屏。

### 3 实验结果分析

激光受大气湍流的影响发生畸变,从而产生一些湍流效应如光束漂移、光束扩展等<sup>[13]</sup>。当湍流尺度大于光束直径时会发生折射现象,大量的折射使得光束在接收端发生了明显的随机偏移,这就是光束漂移效应<sup>[14]</sup>。因此,本文从光束漂移的角度分析大气湍流相位屏模拟的时间特性。

#### 3.1 时间相关性测量结果

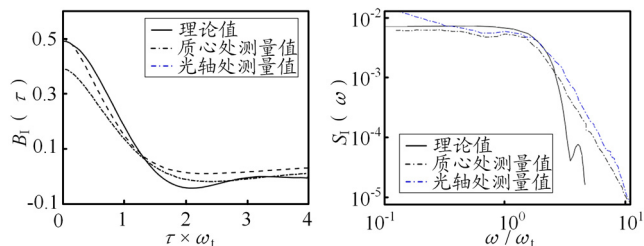
为了验证湍流模拟过程中的时间相关性参数,本文利用上述时间协方差分析方法,分别选择了2种不同强度的湍流(即弱和中等湍流)对时间相关性进行实验验证。取光束束宽  $W_0=1.0$  cm,横向风速  $\vec{V}_\perp=5$  m/s,长期光束半径  $W_{\text{lt}}=R_{86}$ (即光束半径包含总功率的86%),结构参数  $C_n^2=10^{-13}$  m<sup>-23</sup>,并设置不同的传输路径长度来模拟不同强度的湍流。

第一个参考点选择在光轴(即未受干扰的光束中心处)与距离光轴的距离等于长期光束宽度的一半(即  $r=W_{\text{lt}}/2$ )处,第二个参考点为质心。这2个参考点在长期光束(长时间观测光束即长曝光光斑)中最终现象是相同的,但由于漂移效应,它们在短期光束(瞬时观测光束即短曝光光斑)中可能不同。所以,本文研究这2个参考点的时间演变。

##### 3.1.1 弱湍流

本文选择传输路径距离  $L=0.5$  km, Rytov 方差  $\sigma_R^2=0.859$ (本文采用通用标准  $\sigma_R^2=1$  作为弱和中等湍流之间的极限)。整个实验过程在相同条件下重复做10次。弱湍流下光轴和质心处的时间协方差和时间功率谱如图3所示。

在图3中,时间变量  $\tau$  乘以特征频率  $\omega_t=\vec{V}_\perp/\sqrt{L/k}$  进行归一化,归一化频率  $f=\omega_t/2\pi=17.27$  Hz。图3(a)



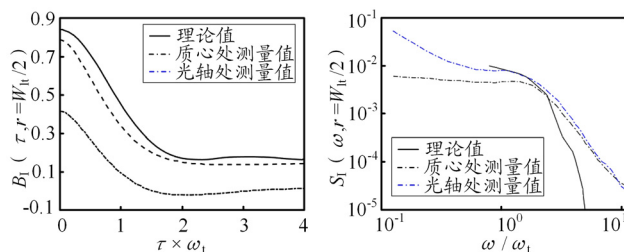
(a) 时间协方差

(b) 时间功率谱

图3 弱湍流下光轴和质心处的时间协方差和时间功率谱

中,弱湍流情况下,因为漂移效应的影响,在质心和光轴处测量的时间协方差结果有些偏差。这与式(6)的理论模型相比大致相符。图3(b)为弱湍流下的时间功率谱。可以看出,在弱湍流环境下,理论模型与低频模拟结果大致相同,而因为光束在Kolmogorov谱下的协方差函数是近似值,所以理论时间功率谱中较高频率处的功率谱衰减比实验结果中功率谱衰减得更快。但时间功率谱的截止频率和理论模型相同,该频率在0.163~0.217 krad变化。

弱湍流下质心和距离光轴的距离  $r=W_{\text{lt}}/2$  处的时间协方差和时间功率谱如图4所示。可以看出,光束漂移的影响比图3的更明显。但在光轴上测量的时间协方差值仍然与理论模型一致。



(a) 时间协方差

(b) 时间功率谱

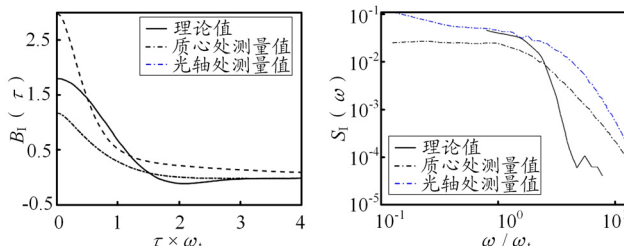
图4 弱湍流下质心和距离光轴的距离  $r=W_{\text{lt}}/2$  处的时间协方差和时间功率谱

因为式(6)中的超几何函数对较大的参数值难以评估,所以很难得到  $\tau\omega_t > 4$  ( $\tau\omega_t$  为归一化函数,其对应于受湍流影响的波束带宽)的理论值。因此理论时间功率谱只针对  $\omega > \omega_t$  的条件,相应的时间功率谱如图4(b)所示。

##### 3.1.2 中强湍流

本文选择传输路径距离  $L=1.5$  km, Rytov 方差  $\sigma_R^2=2.481$ ,中强湍流下光轴和质心处的时间协方差和时间功率谱分别如图5、图6所示。

此时归一化频率  $f=9.94$  Hz。从图5(a)可知,在光轴处光束漂移效应对时间协方差的影响远大于图3(a)



(a) 时间协方差

(b) 时间功率谱

图5 中强湍流下光轴和质心处的时间协方差和时间功率谱

丛明慧,倪小龙,刘智,等:激光大气传输相位屏的时间相关性测量

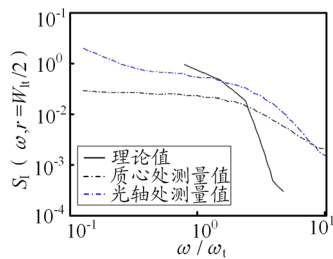


图6 中强湍流下质心和距离光轴的距离  $r=W_0/2$  处的时间功率谱

中弱湍流的情况。

从图 5(b)和图 6 可以看出,由于光束漂移的影响,理论和实验结果的区别比弱湍流情况的更明显,但实验曲线整体趋势和理论曲线大致相符。

#### 4 结束语

本文采用功率谱反演法生成相位母屏,并模拟了激光在弱和中强 2 种强度湍流下的传输过程,测试、分析并验证了基于 LC-SLM 的大气湍流模拟过程中时间相关性参数的变化规律。结果表明:其相位屏的时间模拟精度较好,且在激光畸变损失的情况下,时间协方差的计算误差可以控制在 8.0%左右;弱湍流情况下,实验结果和理论值大致相符,光束漂移的影响较小;中强湍流情况下,光束漂移的影响最大,但实验曲线整体趋势符合真实大气湍流情况。因此,本文所用旋转截取相位屏的方法在时间特性方面符合 Kolmogorov 湍流统计理论,并且采用时间协方差法能够很好地对时间相关性进行分析,为分析湍流相位屏模拟精度提供了新思路。

#### 参考文献:

[1] 张启东. FSO 系统中激光在雾霾环境下的大气透过率研究[D]. 西安:

西安理工大学,2019.

[2] 徐瑞超,高明. 大气湍流等效相位屏的仿真研究[J]. 西安工业大学学报,2018,38(2):108-113.

[3] GLINDEMANN A, LANE R G, DAINITY J C. Simulation of time-evolving speckle patterns using Kolmogorov statistics [J]. Journal of modern optics, 1993, 40(12): 2381-2388.

[4] DAINITY C. Fourier-series-based atmospheric phase screen generator for simulating anisoplanatic geometries and temporal evolution[C]//Optical Science, Engineering and Instrumentation, July 27, 1997, San Diego, USA. Dayton: International Society for Optics and Photonics, 1998: 327-338.

[5] 卫沛锋,刘欣悦,林旭东,等. 自适应光学系统测试中大气湍流的时间域模拟[J]. 中国光学,2013,6(3):371-377.

[6] 李盾,宁禹,吴武明,等. 旋转相位屏的动态大气湍流数值模拟和验证方法[J]. 红外与激光工程,2017,46(12):124-130.

[7] 谭涛,罗奇,谭毅,等. 旋转相位屏模拟大气湍流时空特性的测量[J]. 激光与光电子学进展,2015,52(8):61-68.

[8] ASSÉ MAT F, WILSON R W, GENDRON E. Method for simulating infinitely long and non stationary phase screens with optimized memory storage[J]. Opt. Express, 2006, 14(3): 988-999.

[9] 刘涛,朱聪,孙春阳,等. 一种改进的次谐波大气湍流相位屏模拟方法[J]. 光子学报,2019,48(2):15-20.

[10] 杨海波,许宏. 基于功率谱反演法的大气湍流相位屏数值模拟[J]. 光电技术应用,2019,34(4):73-76.

[11] 韩国文. 泰勒冻结假设在近中性大气表面层的适用性研究 [D]. 兰州:兰州大学,2018.

[12] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser Beam Propagation through Random Media[M]. 2nd Edition. Washington: SPIE Press, 2005.

[13] 陈纯毅,杨华民,任斌,等. 激光大气湍流传输数值实验建模与计算机模拟[J]. 系统仿真学报,2018,30(6):2133-2143.

[14] 陈盼盼,屈军,周正仙,等. 阵列光束在各向异性湍流大气传输时的光束漂移[J]. 量子电子学报,2019,36(3):270-277.