

文章编号:1001-5078(2024)06-0878-07

· 激光应用技术 ·

## 激光传输大气湍流效应复域仿真模拟方法研究

赵建彤<sup>1</sup>, 刘智<sup>2</sup>, 姚海峰<sup>3</sup>, 蒋青芳<sup>1</sup>, 杨亚欣<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022; 3. 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要:**针对光场所受到的湍流畸变影响,提出了一种模拟激光传输大气湍流效应的新方法,利用大气湍流效应的统计学特性,实现了激光传输大气湍流效应在幅度域和相位域两个维度的联合模拟,且该方法适用于弱、中、强三种湍流情况。基于可描述不同湍流强度下光场幅度畸变的两种统计模型,采用随机微分方法得到光波幅度变化序列,光波幅度变化序列模拟结果与理论计算结果在不同湍流强度下均较好地吻合,拟合系数均大于0.9767;基于低频次谐波补偿的功率谱反演方法,采用三阶贝塞尔函数随机曲线设计生成时变相位屏对大气湍流效应中的相位畸变进行模拟。在不同湍流强度下,采用高斯光束作为光源,通过对时变相位屏移动过程中接收光斑强度进行归一化统计,模拟结果表明,所构建的大气湍流效应复域仿真模型模拟的效果与实际大气湍流畸变过程吻合。

**关键词:**激光传输;大气湍流;复域仿真;幅度畸变;相位畸变

**中图分类号:**TN929.12;O436 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.006

## Complex-domain simulation and modeling method for atmospheric turbulence effect of laser transmission

ZHAO Jian-tong<sup>1</sup>, LIU Zhi<sup>2</sup>, YAO Hai-feng<sup>3</sup>, JIANG Qing-fang<sup>1</sup>, YANG Ya-xin<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aiming at the effect of turbulent distortion on the optical field, a new method to simulate the atmospheric turbulence effect of laser transmission is proposed, which realizes the joint simulation of the atmospheric turbulence effect of laser transmission in two dimensions, the amplitude domain and the phase domain, by using the statistical properties of the atmospheric turbulence effect, and the method is applicable to weak, moderate and strong turbulence cases. Based on the two statistical models that can describe the optical field amplitude aberration under different turbulence intensities, the stochastic differentiation method is used to obtain the optical wave amplitude change sequence, and the simulation results of the optical wave amplitude change sequence match well with the theoretical calculations under different turbulence intensities, and the fitting coefficients are all greater than 0.9767. A power spectrum inversion method based on low-frequency harmonic compensation is utilized to generate a time-varying phase screen using a third-order Bessel function stochastic curve design to simulate phase aberrations in atmospheric turbu-

**基金项目:**国家自然科学基金叶企孙科学基金项目(No. U2141231);国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 62105029);中国博士后科学基金项目(No. 2021TQ0035; No. 2021M700415);应用光学国家重点实验室基金项目(No. SKLA02022001A11)资助。

**作者简介:**赵建彤(1998-),女,硕士研究生,主要从事空间光通信关键技术方面的研究。E-mail:18943395971@163.com

**通讯作者:**刘智(1971-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事空间激光通信关键技术和光电动态性能测试方面的研究。E-mail:liuzhi@cust.edu.cn

**收稿日期:**2023-09-13; **修订日期:**2023-10-31

lence effects. Under different turbulence intensities, a Gaussian beam is used as the light source, and the simulation results show that the simulated effects of the constructed complex-domain simulation model of atmospheric turbulence effects coincide with the actual atmospheric turbulence aberration process through the normalized statistics of the intensity of the received spot during the moving process of the time-varying phase screen.

**Keywords:** laser transmission; atmospheric turbulence; complex domain simulation; amplitude distortion; phase distortion

## 1 引言

受雨、雪、雾等天气现象尤其是大气湍流的影响,激光在大气信道中传输过程中会产生严重的畸变。这种畸变破坏了光波的相干性,也影响了光波的振幅,进而导致光束漂移、光强闪烁、相位扰动、到达角起伏等多种湍流效应,造成激光特性参数在传输过程中的变化,严重影响了激光高速率信息传输能力,是影响实际激光传输性能的重要因素之一。

研究激光传输大气湍流效应问题的方法包括理论分析、实验测量和数值模拟等。理论分析大多采用近似的方法,试图从大气湍流的物理属性入手,理论上得出光场的统计特性解析表达式,但由于大气湍流的迅变特性而存在很大困境。实验测量方法受时间、地点等因素制约,灵活性不高,很难获得全面的测量结果。数值模拟具备参量可选择、各种统计系综平均可实现等优势,可以为实际激光传输工程系统的设计提供一定的数据支持。

目前,建立大气湍流数值模拟模型时主要考虑湍流引起的幅度畸变和相位畸变,针对相位畸变的模拟,国内外已提出了多种随机相位屏的数值模拟方法,如基于快速傅里叶变换(FFT)的功率谱反演法<sup>[1]</sup>、稀疏谱模拟方法<sup>[2]</sup>、离散傅里叶变换法<sup>[3]</sup>、基于协方差函数法<sup>[4]</sup>、Zernike 多项式法<sup>[5]</sup>、混合法<sup>[6-7]</sup>、分形插值法<sup>[8]</sup>等,以上这些模拟方法都仅考虑了湍流引起的相位畸变,而忽略了幅度畸变,导致仿真结果不够精确,无法精准全面的为各种激光传输工程系统的设计提供数据支持。

国内外提出了多种综合考虑幅度域畸变和相位域畸变的模拟方法。1983年,Knepp等<sup>[9]</sup>采用多相位屏的模拟方法在大气激光传输链路过程中布置数十个相位屏,光束通过多个有序相位屏,经过最后一个相位屏后的光束即为模拟受到大气湍流幅度域畸变和相位域畸变影响的光束,此方法由于相位屏数目过多,导致光束传输时间很长,且对计算机存储容量的需求也较大。1997年,Kouznetsov等<sup>[10]</sup>提出在接收端采用功率谱反演法生成一个随机幅度屏和一个随机相位屏,该方法利用对数振幅自相关积分函数、相位自相关积分函数、对数振幅与相位的互相关积分函数求出两个自相关功率谱和一个互相关功率

谱,再基于FFT进行功率谱反演法模拟。该方法考虑了幅度畸变与相位畸变之间的相关性,但其选用的Kolmogorov功率谱模型未体现大气湍流内、外尺度的影响,且该方法仅适用于弱湍流情况。2015年,向劲松等<sup>[11]</sup>在文献[10]的基础上,针对星地间的激光通信提出了类似于协方差随机相位屏模拟的方法。该方法既考虑幅度畸变与相位畸变的相关性,又体现了大气湍流内、外尺度的影响,但该方法也仅适用于弱湍流情况,不适用于中强湍流情况,存在很大局限性。

本文基于大气湍流引起的光强闪烁统计模型和相位起伏统计学特性,提出了一种激光传输大气湍流效应复域仿真模拟方法。该方法既考虑幅度畸变和相位畸变时变性,且适用于弱、中、强三种湍流情况,考虑影响因素更充分,提升了模拟精度,适用性更强。

## 2 大气湍流效应的数值仿真原理

如上所述,大气湍流效应一般可从幅度畸变和相位畸变两个方面进行数值仿真模拟,下面分别说明。

### 2.1 大气湍流中激光传输幅度畸变模拟研究

在Rytov近似法中,光场可以写为:

$$\begin{aligned} U(\vec{r}) &= U_0(\vec{r}) \exp[\psi(\vec{r})] \\ &= U_0(\vec{r}) \exp[\chi(\vec{r}) + i\zeta(\vec{r})] \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $U_0(\vec{r})$ 为真空条件下的光场; $\vec{r}$ 表示接收光场的任意一点; $\psi(\vec{r})$ 为复相位畸变,包含对数振幅畸变 $\chi(\vec{r})$ 和相位畸变 $\zeta(\vec{r})$ 。

根据式(1),光强 $I$ 可以写为:

$$\begin{aligned} I &= |U_0|^2 \exp(\psi + \psi^*) \\ &= |U_0|^2 \exp(2\chi) \end{aligned} \quad (2)$$

在弱、中湍流环境下,激光传输受湍流影响的幅度变化服从对数正态概率密度函数(Lognormal PDF)分布,在强湍流环境下,激光传输受湍流影响的幅度变化服从Gamma-Gamma概率密度函数(Gamma-Gamma PDF)分布<sup>[12]</sup>。因此,采用Lognormal PDF和Gamma-Gamma PDF生成时域相关波形模拟光束大气传输系统的信号幅度畸变,当大气特征参数大气结构常数 $C_n^2$ 小于等于 $1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 采用Lognormal PDF,其拟合如公式:

$$P(I) = \frac{1}{I\sigma_I(\bar{r}, L)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\ln(I/\langle I \rangle) + \frac{1}{2}\sigma_I^2(\bar{r}, L)}{2\sigma_I^2(\bar{r}, L)}\right\}, I > 0 \quad (3)$$

式中,  $I$  表示光强;  $\sigma_I(\bar{r}, L)$  表示闪烁因子;  $\langle I \rangle$  表示点接收的平均光强;  $I/\langle I \rangle$  表示归一化光强, 当大气特征参数大气结构常数  $C_n^2$  大于  $1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  采用 Gamma-Gamma PDF, 其拟合如公式:

$$\begin{aligned} p(I) &= \int_0^\infty p_y(I|x)p_x(x) dx \\ &= \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I), \\ &I > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\Gamma(\cdot)$  是伽马函数,  $K_\nu(\cdot)$  表示  $\nu$  阶的第二类修正贝塞尔函数。其中  $\alpha$  和  $\beta$  是关于 Rytov 方差  $\sigma_{\text{Rytov}}^2$  的函数, 表示为:

$$\alpha = \left[ \exp\left(\frac{0.49\sigma_{\text{Rytov}}^2}{(1+1.11\sigma_{\text{Rytov}}^{12/5})^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\beta = \left[ \exp\left(\frac{0.51\sigma_{\text{Rytov}}^2}{(1+0.69\sigma_{\text{Rytov}}^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (6)$$

Rytov 方差  $\sigma_{\text{Rytov}}^2$  可由大气特征参数大气结构常数  $C_n^2$ 、激光传输的链路距离  $L$  和光波数  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  是光波波长) 确定<sup>[13]</sup>:

$$\sigma_{\text{Rytov}}^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (7)$$

针对航空平台激光传输受到大气湍流的影响时, 采用 Hufnagel Valley (H-V) 模型计算大气折射率结构常数  $C_n^2$ , 其表征大气湍流强弱, 是海拔高度  $h$  的函数:

$$\begin{aligned} C_n^2(h) &= 0.00594 \left(\frac{v}{27}\right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times \\ &10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \times \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $v$  表示以 m/s 为单位的随机风速;  $h$  表示光束传输终端高度, 单位为 m;  $A$  表示以  $\text{m}^{-2/3}$  为单位的地球表面大气折射率结构常数, 即  $A = C_n^2(0)$ , 在数值计算中, 常用的是  $v = 21 \text{ m/s}$ 、 $A = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。

结合式 (3) 及式 (4), 利用随机微分方法 (SDEs) 基于光波时域波形进一步生成模型, 随机微分方法如下<sup>[14]</sup>:

$$\frac{d\rho}{dt} = Q_1(\rho) + \sqrt{Q_2(\rho)} Q_3(t) \quad (9)$$

$$Q_2(\rho) = -\frac{2f_c}{p(\rho)} \int_0^\rho (x - \langle \rho' \rangle) p(x) dx \quad (10)$$

$$Q_1(\rho) = -\frac{Q_2(\rho)}{2} \frac{d}{dx} \ln[Q_2(\rho)p(\rho)] \quad (11)$$

式中,  $\rho = I/\max(I)$ ,  $\max(\cdot)$  表示最大值;  $Q_3(t)$  表示高斯白噪声。(10) 式中,  $f_c$  表示光束传输信道的 Greenwood 频率。

由于公式 (9) 为时变函数, 将其变形为公式:

$$d\rho = Q_1(\rho)\Delta t + \sqrt{Q_2(\rho)} Q_3(t)\Delta t \quad (12)$$

公式 (12) 是用数值方程难以表示的解析式, 故采用 Implicit Milstein 原理近似获得公式 (13), 再化简得公式 (14):

$$\begin{aligned} \rho_{k+1} &= \rho_k + Q_1(\rho_{k+1})\Delta t + \sqrt{Q_2(\rho)}\Delta t Q_{3k} + \frac{1}{4}Q_2'(\rho_k) \cdot \\ &(Q_{3k}^2 - 1)\Delta t \end{aligned} \quad (13)$$

$$\rho_{k+1} = \frac{4\sqrt{Q_2(\rho_k f_c)}\Delta t Q_{3k} + [Q_2'(\rho_k f_c)(Q_{3k}^2 - 1) + 4\langle \rho' \rangle]\Delta t}{4(1+f_c)} \quad (14)$$

针对公式 (14) 采用服从高斯白噪声分布的随机数表征扰动, 进而模拟大气湍流造成的随机噪声影响。首先任意给定一个初值  $\rho_0$ , 然后进行迭代, 计算出  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k, \rho_{k+1}, \dots$ , 记为序列  $\rho\{r_0, f_c, t\}$ 。其中, 生成的  $\rho\{r_0, f_c, t\}$  是与大气特征频率 Greenwood 频率  $f_c$  相关的。

## 2.2 大气湍流中激光传输时变相位畸变模拟研究

考虑了大气湍流不同的内部尺度和外部尺度因子的改进的冯·卡曼功率谱模型表示为<sup>[15]</sup>:

$$\Phi_n(f) = \frac{0.023 \times r_0^{-5/3} \times \exp\left(-\frac{f^2}{f_m^2}\right)}{(f^2 + f_0^2)^{11/6}} \quad (15)$$

式中,  $f$  表示空间频率;  $f_m = 5.92/(2\pi l_0)$  与大气湍流内尺度  $l_0$  相关,  $f_0 = 1/L_0$  与大气湍流外尺度  $L_0$  相关。 $r_0$  为大气相干长度, 其与大气折射率结构常数的关系为:

$$r_0 = (0.423Lk^2 * C_n^2)^{-3/5} \quad (16)$$

用复高斯矩阵乘功率谱函数的平方根进行滤波, 构造出一个二维复随机场, 将二维复随机场进行逆傅里叶变换方法可以得到一个二维随机相位场, 即二维平面上的相位屏:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= c \sum_{j_x} \sum_{j_y} [R_a(f_x, f_y) + iR_b(f_x, f_y)] \times \\ &\sqrt{\Phi_n(f_x, f_y)} \exp[i \times (f_x x + f_y y)] \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $c$  为用来调控相位屏的方差的常数;  $R_a$  和  $R_b$  为两个零均值和单位方差的独立高斯随机数;  $i = \sqrt{-1}$  表示虚部单位;  $\sqrt{\Phi_n(f_x, f_y)}$  为相位的二维频谱和大气湍流折射率空间谱密度关系函数。 $x = m\Delta x, y = n\Delta y, \Delta x$  和  $\Delta y$  分别为空间域内  $x, y$  方向上的采样间隔, 这里的  $m$  和  $n$  均为整数;  $f_x = m'\Delta f_x, f_y$

$= n' \Delta f_y, \Delta f_x$  和  $\Delta f_y$  分别为频域内  $x, y$  方向上的采样间隔, 这里的  $m'$  和  $n'$  均为整数。

基于功率谱反演法的时变相位屏模拟思路如图 1 所示, 首先采用上述功率谱反演法, 且重采样傅里叶低频次谐波, 经插值拟合方法叠加四级次谐波生成具有  $\text{Big}N \times \text{Big}N$  个采样点的相位屏<sup>[16]</sup>。然后为了得到  $n$  个连续的动态时变相位屏 ( $N \times N$ ), 采用三阶贝塞尔函数随机曲线  $y_{\text{move}}(x) = A \times x^3 + B \times 3x^2(1-x) + C \times 3x(1-x)^2 + D \times (1-x)^3, x = 0 \cdots 1$ , 令屏质心沿曲线连续运动, 其中  $A, B, C, D$  为随机产生的四个自然数, 屏质心移动速度 (Movespeed) 与大气环境中风速的关系如下<sup>[17]</sup>:

$$\vec{v}_{\text{move}} = \vec{v} \times \frac{N}{\text{Big}N} \quad (18)$$

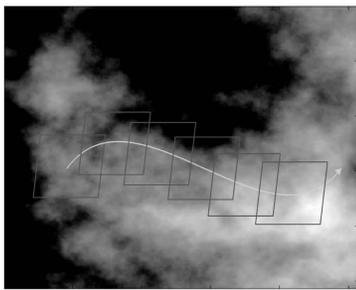


图 1 时变相位屏生成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of time-varying phase screen generation

所取的第一个时变相位屏和最后一个时变相位屏的相关性约束为  $1/e$ , 相邻时变相位屏相关性约束为小于  $1/e$ 。连续随机曲线的走向定为时变相位屏取的先后顺序, 实现动态湍流。

计算相位屏的实际结构函数, 先对相位屏两坐标点的相位进行卷积计算, 得到其自相关函数  $B_\phi$ , 再计算原点处的自相关函数减去距离为  $r$  处的自相关函数的差值, 该差值的二倍即为实际自相关函数  $D_\phi$ , 定义为:

$$D_\phi(r) = 2[B_\phi(0) - B_\phi(r)] \quad (19)$$

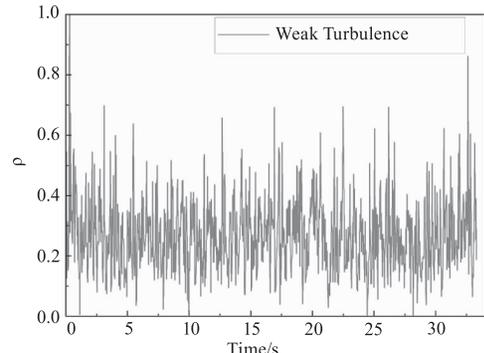
通常相位的功率谱函数和相关函数用于模拟屏的生成, 大气湍流产生的随机场空间统计特性一般用结构函数表示, 结构函数因其没有零点问题而常用来检验仿真模拟模型的准确性。改进的冯·卡曼湍流功率谱模型对应的理论结构函数为:

$$D_\phi^{\text{theory}} = 3.08r_0^{-5/3} \times \left\{ \Gamma\left(-\frac{5}{6}\right)k_m^{-5/3} [1 - {}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -\frac{k_m^2 r^2}{4}\right)] - \frac{9}{5}k_0^{1/3} r^2 \right\} \quad (20)$$

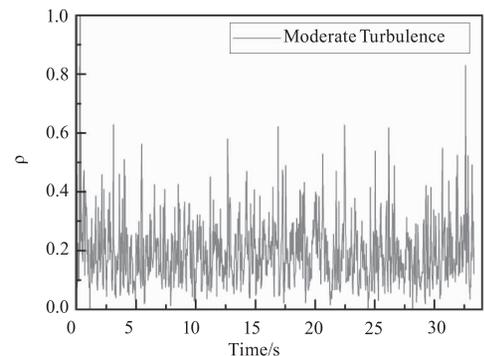
式中,  $r_0$  为大气相干长度;  ${}_1F_1(a; c; z)$  为第一类汇合超几何函数,  $k_m = 5.92/l_0, k_0 = 2\pi/L_0$ 。

### 3 模拟与讨论

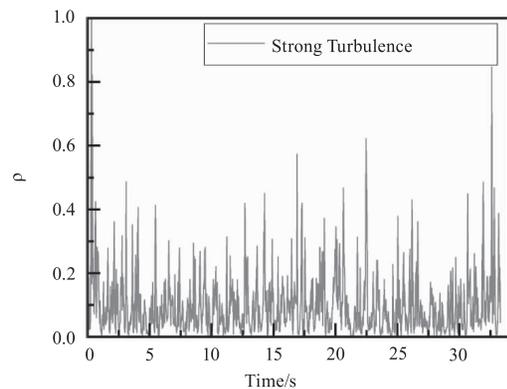
本文模拟了传输距离  $D_z$  为 8 km、传输信号波长  $\lambda$  为 1550 nm 的弱、中、强三种湍流强度下的归一化幅度变化序列, 如图 2 所示。其中 (a)  $r_0 = 0.4203$  m, (b)  $r_0 = 0.1648$  m, (c)  $r_0 = 0.0747$  m。从图 2 中可以看出, 弱湍流情况幅度大部分小于 0.4, 中湍流情况幅度大部分小于 0.3, 强湍流情况幅度大部分小于 0.2, 是由于湍流强度增强, 幅度起伏剧烈, 故归一化后湍流引起的幅度衰落情况严重。



(a)  $r_0 = 0.4203$  m



(b)  $r_0 = 0.1648$  m



(c)  $r_0 = 0.0747$  m

图 2 激光传输大气湍流归一化幅度变化序列

Fig. 2 Sequence of normalized amplitude variations of laser-transmitted atmospheric turbulence

图 3 是统计不同湍流强度下幅度变化序列的概率密度函数并和理论计算结果进行比较, 从图中可以看到不同湍流强度情况下, 幅度变化序列

模拟统计分布结果与理论概率密度函数分布结果曲线都基本吻合,经数据分析,拟合系数分别为弱湍流 0.97675、中湍流 0.98074、强湍流 0.99365,模拟结果的特征均符合光束在大气传输过程中的特征。

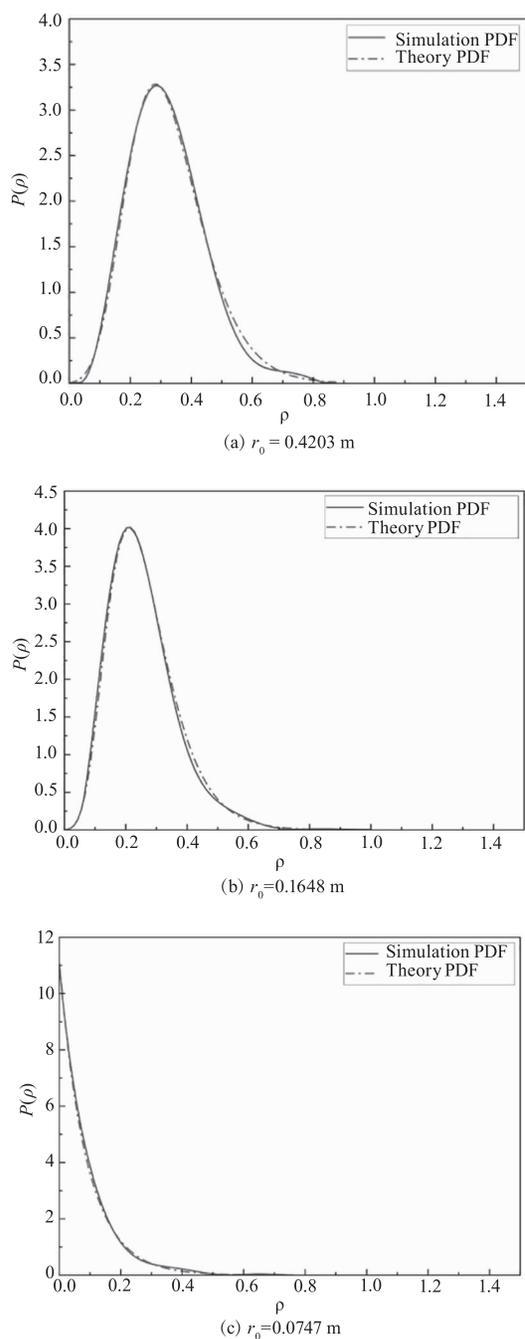


图 3 大气光传输幅度变化序列概率密度函数图

Fig. 3 Sequential probability density function plot of atmospheric optical transmission amplitude variation

基于改进的冯·卡曼功率谱模型采用功率谱反演法设计了一个大气湍流相位模拟屏,网格数为  $2400 \times 2400$ ,时变相位屏网格数为  $400 \times 400$ ,物理尺寸为 2 m。将大气相干长度设置为 0.1648,针对

时变相位屏的模拟结果,进行模拟相位结构函数均值与理论相位结构函数对比分析,曲线对比如图 4 所示。可以看出,在  $r \in [0, 0.07]$  和  $r \in [0.133, 0.2]$  部分模拟值普遍比理论值大,在  $r \in [0.071, 0.132]$  部分模拟相位结构函数普遍比理论相位结构函数小。整体来看,模拟相位结构函数均值与理论相位结构函数相近,模拟精度较高,误差主要由功率谱反演法低频部分模拟不足造成。

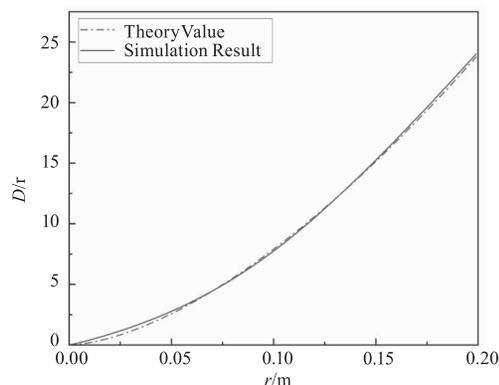
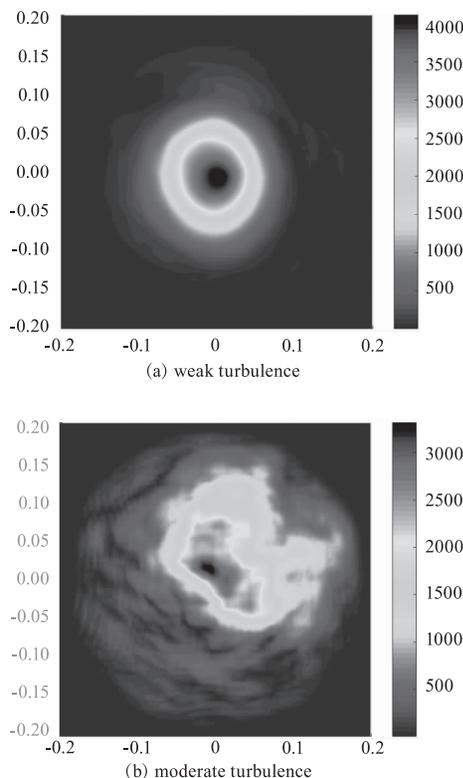


图 4 大气湍流相位屏结构函数理论曲线与模拟曲线对比

Fig. 4 Comparison between theoretical and simulated curves of atmospheric turbulence phase screen structure function

高斯光束作为光源,通过分布光束传播法模拟弱( $r_0 = 0.4203$  m)、中( $r_0 = 0.1648$  m)、强( $r_0 = 0.0747$  m)三种湍流情况下移动路程终点的接收光斑,如图 5 所示。从图中可以看到接收光斑随着湍流强度增强呈现畸变和分裂加剧的现象。



(b) moderate turbulence

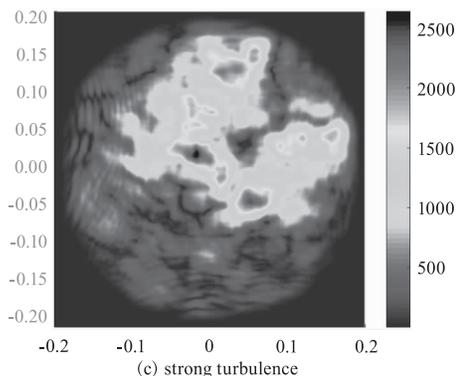


图5 三种湍流条件下接收光斑显示图

Fig. 5 Received spot display for three turbulent conditions

弱( $r_0 = 0.4203 \text{ m}$ )、中( $r_0 = 0.1648 \text{ m}$ )、强( $r_0 = 0.0747 \text{ m}$ )三种湍流情况下,对时变相位屏移动路程起点至中点位置的接收光斑归一化强度进行统计,如图6所示,采用此模拟方法通过幅度变化序列和时变相位屏移动过程实现了大气湍流激光传输复域仿真。弱湍流条件下接收光斑归一化强度主要集中在1上下,波动范围为 $[0.9039, 1.0592]$ ,中湍流条件下接收光斑归一化强度波动最大值为3.8203,强湍流条件下接收光斑归一化强度波动最大值为8.3281。由于湍流强度的增强,接收光斑的畸变越大,导致归一化强度波动更剧烈。

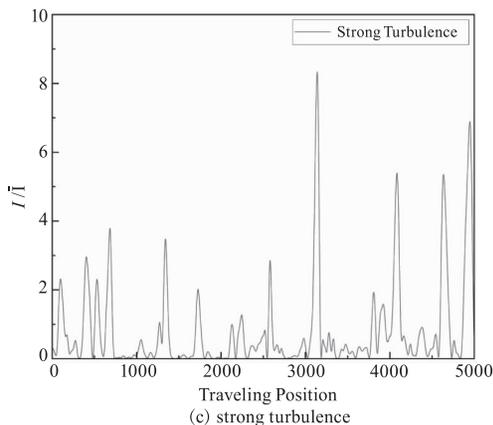
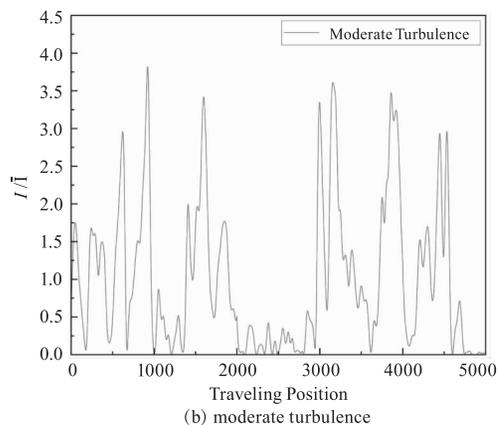
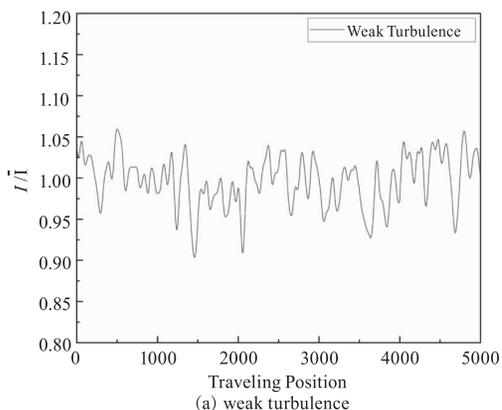


图6 三种湍流强度的接收光斑归一化强度对比图

Fig. 6 Comparison of normalized intensity of received spot for three turbulence intensities

#### 4 结论

本文从大气湍流效应中光强闪烁和相位扰动两个特性入手,提出了一种新的激光传输大气湍流效应数值模拟方法,并分析了该方法在多种湍流强度下的准确性。从模拟结果可以看出,在不同湍流强度下,采用SDEs方法处理幅度畸变模型,其产生的序列满足激光经过大气光信道后的PDF特征,与理论计算PDF高度吻合,相对误差在2.33%左右,该序列为激光大气传输室内实验中电光调制器等衍射光学元件实现幅度调制功能提供了新思路;采用三阶贝塞尔函数生成时变相位屏,其结构函数与改进的冯·卡曼功率谱模型的理论结构函数吻合得较好,可为搭建激光大气传输室内实验提供精确的数据支撑。对于整体大气湍流效应数值仿真模型,在不同湍流强度下,以高斯光束作为光源模拟大气湍流激光传输,通过统计时变相位屏移动过程中接收光斑强度变化,并进行归一化处理分析,体现了该复域仿真模拟方法的时变特性、优越性、简便性,对实际激光传输工程系统的设计和实现具有重要的参考价值。

#### 参考文献:

[1] Xiang Jinsong. Fast and accurate simulation of the turbulent phase screen using fast Fourier transform[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 016110. (in Chinese)  
向劲松. 利用快速傅立叶变换快速准确模拟湍流相屏[J]. 光学工程, 2014, 53(1): 016110.

[2] Zhang Xiaoqi. Research on the simulation technique of atmospheric turbulence phase screen based on sparse spectrum[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)  
张小琪. 基于稀疏谱的大气湍流相位屏模拟技术研究

- [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [3] Yang Haibo, Xu Hong. Numerical simulation of atmospheric turbulence phase screen based on power spectrum inversion method [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2019, 34(4): 73–76. (in Chinese)  
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.
- [4] Assémat F, Wilson R W, Gendron E. Method for simulating infinitely long and non stationary phase screens with optimized memory storage [J]. *Optics Express*, 2006, 14(3): 988–999.
- [5] Wang Qitao, Tong Shoufeng, Xu Youhui. Simulation and validation of atmospheric turbulence phase screen using Zernike polynomial [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1907–1911. (in Chinese)  
王奇涛, 佟首峰, 徐友会. 采用 Zernike 多项式对大气湍流相位屏的仿真和验证 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1907–1911.
- [6] Ren Bin, Chen Chunyi, Yang Huamin. A review of research on numerical simulation techniques for atmospheric turbulence lightwave transmission [J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(8): 1631. (in Chinese)  
任斌, 陈纯毅, 杨华民. 大气湍流光波传输数值仿真技术研究综述 [J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(8): 1631.
- [7] Xu Ruichao, Gao Ming. Simulation study of equivalent phase screen for atmospheric turbulence [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2018, 38(2): 108–113. (in Chinese)  
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.
- [8] Xiang Jinsong, Li Xiaoshuang, Chen Shaojuan, et al. Simulation of time-domain characteristics of star-ground laser atmospheric turbulence transmission [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 487–490. (in Chinese)  
向劲松, 李晓双, 陈绍娟, 等. 星-地激光大气湍流传输的时域特性模拟 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(5): 487–490.
- [9] Knepp D L. Multiple phase-screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(6): 722–737.
- [10] Kouznetsov D, Voitsekhovich V V, Ortega-Martinez R. Simulations of turbulence-induced phase and log-amplitude distortions [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(2): 464–469.
- [11] Xiang Jinsong, Li Xiaoshuang, Chen Shaojuan, et al. Simulation of time-domain characteristics of star-ground laser atmospheric turbulence transmission [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 487–490. (in Chinese)  
向劲松, 张明杰. 一种空间激光通信中模拟湍流效应的新方法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2721–2725.
- [12] Andrews L C, Phillips R L. *Laser beam propagation through random media*, second edition [M]. SPIE Press, 2005.
- [13] Yu Jiping, Qi Wenzong, Guo Chunfeng, et al. Numerical simulation of laser atmospheric transmission characteristics [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(6): 523–527. (in Chinese)  
于继平, 齐文宗, 郭春风, 等. 激光大气传输特性的数值模拟 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(6): 523–527.
- [14] Yao H, Chen C, Ni X, et al. Analysis and evaluation of the performance between reciprocity and time delay in the atmospheric turbulence channel [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25000–25011.
- [15] Schmidt J D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB [J]. (No Title), 2010.
- [16] Ai Yong, Duan Mengyun, Xu Jiejie, et al. Turbulence simulation of LC-SLM laser atmospheric transmission and communication experiment analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3103–3109. (in Chinese)  
艾勇, 段梦云, 徐洁洁, 等. LC-SLM 激光大气传输湍流模拟及通信实验分析 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 3103–3109.
- [17] Yao H, Zhang P, Liu Z, et al. Simulation of atmospheric turbulence phase screen based on wind speed [C]//Asia Communications and Photonics Conference. Optica Publishing Group, 2019.