

像差对聚焦高斯光束大气传输轴闪烁特性的影响

唐军成^{1,2}, 钱仙妹¹, 苗锡奎³, 陈勇³

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003

摘要 采用多层相位屏的数值模拟方法, 定量研究了儿种典型像差对聚焦高斯光束在湍流大气中传输的轴闪烁特性的影响。研究结果表明, 像散和慧差像差对远场光斑的轴闪烁分别具有较强的抑制和促进作用, 较强的慧差和像散能分别提前和延后光斑轴闪烁饱和的出现。湍流较弱时的聚焦高斯光束大气传输光强起伏概率严重, 湍流越强, 光强起伏概率越接近于对数正态分布, 且基本满足偏斜度为负, 陡峭度为正。弱、中等湍流强度下, 像差权重较大时, 光强起伏概率分布主要受像差影响; 像差权重系数较小时, 光强起伏概率分布主要受湍流效应的影响, 且各像差主要影响光强较弱区域的起伏分布情况。强湍流强度下, 湍流效应对光强起伏概率分布占主要作用, 趋近于对数正态分布。

关键词 大气光学; 激光传输; 轴闪烁; 数值模拟; 像差; 湍流大气

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1101001

Effects of Aberrations on On-Axis Scintillation Propagating Properties of Focus Gaussian Beams in Turbulent Atmosphere

Tang Juncheng^{1,2}, Qian Xianmei¹, Miao Xikui³, Chen Yong³

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Key Laboratory of Electro-Optical Counter Measures Test and Evaluation Technology, Luoyang, Henan 471003, China

Abstract Based multi-phase screen numerical simulation, the influences of on-axis scintillation of focus Gaussian beams propagating in the turbulent atmosphere on several typical aberrations are investigated quantitatively. It is found that astigmatism and coma aberrations can restrain and promote the axis-scintillation to some extent, respectively. Stronger coma and astigmatism aberrations can forward and delay the appearance of scintillation saturation, respectively. The distribution of intensity deviates from log-normal distribution when turbulence strength is weaker. It is close to log-normal distribution when the intensity of turbulence rises. The skewness of the intensity distribution is less than zero and its kurtosis is greater than zero basically. Under weak or moderate turbulence intensity, the distribution of intensity fluctuation is always determined by aberrations when the aberration is big enough, however, the effects of turbulence play the main role on the distribution of intensity fluctuation and the aberrations mainly affect the fluctuation distributions of weak intensity areas when the weight of aberration is

收稿日期: 2014-06-16; **收到修改稿日期:** 2017-07-07

基金项目: 光电对抗测试评估技术重点实验室开放课题(GKCP2016002)

作者简介: 唐军成(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事像差对激光大气传输影响方面的研究。

E-mail: tangjc@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 钱仙妹(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事光波大气传输特性方面的研究。

E-mail: qianxianmei@aiofm.ac.cn(通信联系人)

small. The strong turbulence influences the probability distribution of intensity fluctuation mostly, and the distribution fits to log-normal distribution approximately.

Key words atmospheric optics; laser propagation; on-axis scintillation; numerical simulation; aberration; turbulent atmosphere

OCIS codes 010.1300; 010.1290; 010.1330

1 引 言

在激光大气传输的光学工程应用中,光学系统等的静态像差使得激光传输到远场靶面的光束质量下降,直接影响并限制了激光传输性能和工程应用。光电对抗、自适应光学、自由大气光通信、激光雷达、激光能量输运以及星际大气探测等技术受远场光斑的闪烁特性影响非常大。而大气激光传输闪烁特性主要受大气湍流造成的动态像差和光学系统缺陷造成的静态像差的影响。

近年来,对理想激光束在湍流大气中的传输特性研究已相当成熟^[1-7],但为更切合光学工程的实际应用,学者们已开始关心引入系统像差后的非理想激光的大气传输特性。Roddier^[8]根据 Noll^[9]的 Zernike 像差分解法模拟大气湍流引起的动态波前误差,并适用于以低阶 Zernike 像差分布为主的自适应光学校正;鲜浩等^[10-11]将各像差独立对光束质量因子的影响系数以加权求和的形式模拟不同像差组合对光束质量因子的综合效应,并在实际应用中得到验证;对于实际的天文观测系统所采用的环形光瞳,Dai 等^[12]用环域内的 Zernike 多项式展开法模拟环形光瞳的波像差,得到在不同湍流统计模型下波前像差分解系数的统计分布;叶红卫等^[13]将实际波前像差等效为大气湍流引入的动态像差和系统引入的静态像差的综合,并得出 Zernike 球差对光束质量因子影响很大的结论;贺元兴等^[14]也进一步给出了有光阑截断时高斯光束质量因子与 Zernike 像差之间的拟合关系。

考虑到系统的激光大气传输瞬时效应,若仅用光束发散角或光束质量因子描述发射激光束的光束质量,对激光大气传输效果的论证和预测评估有很大的不确定性。鉴于此,本文采用多层相位屏的数值模拟方法,通过设定不同的激光传播环境,利用 Zernike 像差分解法,模拟了几种典型系统 Zernike 像差对聚焦高斯光束大气传输闪烁特性的影响。计算了靶面光斑轴闪烁指数和轴上光强起伏概率分布及其偏斜度、陡峭度,分析了大气折射率结构常数和各阶 Zernike 像差权重系数对非理想激光大气传输轴闪烁特性的影响规律。

2 数值模拟方法

2.1 激光传输方程求解

随机介质中光传输方程求解已非常成熟^[15-17]。以 Maxwell 传播方程式

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 n^2 \mathbf{E} + 2 \nabla (\mathbf{E} \cdot \nabla \ln n) = 0 \quad (1)$$

为基础,由于实际大气湍流内尺度远大于可见光波长,因此忽略偏振效应。(1)式中 \mathbf{E} 为光场, k 为光波波数, n 为折射率。考虑到前向小角散射近似和光沿 z 轴方向傍轴传播近似,光波在折射率 $n = 1 + n_1$ 的介质中的传播方程满足标准抛物型方程式

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} = \frac{i}{2k} \nabla_{\perp}^2 \mathbf{E} + i k n_1 \mathbf{E}, \quad (2)$$

式中 ∇ 为拉普拉斯算符, n_1 为折射率起伏小量。(2)式构成随机介质中光传播数值模拟和理论研究的基础,光在随机介质中传播的求解可等效于求解标准抛物线方程^[18]。

多层相位屏模型已非常成熟,在文献[18]中也有详尽描述,在此不做赘述。其基本思想是对一个复高斯随机数矩阵用大气湍流功率谱进行滤波,然后进行 Fourier 逆变换得到大气扰动相位 S 满足^[19]

$$S(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{S}(K_x, K_y) \exp(i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{K}, \quad (3)$$

式中 $|\mathbf{K}| = \sqrt{K_x^2 + K_y^2}$ 为空间波数, K_x 、 K_y 分别为 x 和 y 方向上的空间波数; $\tilde{S}(K_x, K_y)$ 为根据 Kolmogorov 湍流折射率空间谱滤波得到的相位复随机场; \mathbf{r} 为相屏上的位置矢量。

若相邻相屏间相位变化 ΔS 足够小,根据(2)式,利用 Fourier 步进求解法^[20-21]可得两相邻相位屏以及最

终接收屏上的光场分布,通常认为这种多层相位屏分析法等同于光传播路径积分的离散解。

经过扰动相位调制后的光场分布的 Fourier 逆变换形式为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, z_i) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \exp \left[-\frac{i\Delta z}{2k} (K_x^2 + K_y^2) \right] \mathcal{F} [\exp [iS(\mathbf{r}, z_i)] \mathbf{E}(\mathbf{r}, z_{i-1})] \right\}, \quad (4)$$

式中 \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别为 Fourier 正变换和逆变换; $\mathbf{E}(\mathbf{r}, z_i)$ 和 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, z_{i-1})$ 分别为光轴 z_i 和 z_{i-1} 上的第 i 和 $i-1$ 个相位屏上的光场; $S(\mathbf{r}, z_i)$ 为光波通过相屏 z_i 时引入的相位调制; Δz 为相邻相位屏间距,该间距随湍流强度增强而适当缩小,以满足 ΔS 足够小的约束条件。

2.2 系统像差构造

在数值模拟中,通常采用波前 Φ 描述像差。 Φ 以波长 λ 为单位,它与相位 S 满足

$$S = 2\pi\Phi/\lambda = k\Phi. \quad (5)$$

光波波前用 Zernike 多项式表示。以半径 ρ , 方位角 θ 所定义的第 j 阶 Zernike 项的极坐标表达式 Z_j 为^[9]

$$Z_j(\rho, \theta) = \begin{cases} \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \cos(m\theta); & \text{even } j, \quad m \neq 0 \\ \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \sin(m\theta); & \text{odd } j, \quad m \neq 0, \\ \sqrt{n+1} R_n^0(\rho); & m = 0 \end{cases} \quad (6)$$

该单阶次的 Zernike 多项式正交性质为

$$\int_0^{2\pi} \int_0^1 Z_j(\rho, \theta) Z_{j'}(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta = \pi \delta_{jj'}, \quad (7)$$

式中 $R_n^m(\rho)$ 为径向函数, $\delta_{jj'}$ 为狄拉克函数, 整数 m, n 满足: $n \geq m \geq 0$ 。

用单位圆域内正交 Zernike 多项式表示系统像差。在半径为 R 的出瞳内, 光波波前可表示为

$$\Phi(R\rho, \theta) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j Z_j(\rho, \theta), \quad (8)$$

式中 a_j 为 Zernike 多项式第 j 项权重系数, Z_j 为 Zernike 多项式第 j 项, ρ 为单位径向坐标。根据(8)式, 通过设定不同 a_j 值, 可得到不同的像差及像差组合情况。

本文主要研究系统单一像差对聚焦高斯激光的大气传输闪烁特性的影响规律。根据实际光学系统像差来源, 着重分析了 Z_3 (离焦)、 Z_4 (像散)、 Z_7 (慧差)、 Z_{11} (二级像散) 4 种典型像差对激光大气传输的轴闪烁及轴上光强起伏概率分布的影响规律。

2.3 轴闪烁指数计算

激光大气传输实验中, 通常以光斑归一化光强起伏方差 β_I^2 判断光强起伏强弱^[22-23], 计算公式为

$$\beta_I^2 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle / \langle I \rangle^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{i=m} (I_i^2) / \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{i=m} I_i \right]^2 - 1, \quad (9)$$

式中 $\langle * \rangle$ 为系综平均, ΔI 为光强起伏值, I_i 为 m 个样本中第 i 个样本光强值。

2.4 光强统计分布

已经证明, 在弱湍流起伏条件下, 激光大气传输靶面光斑对数光强起伏的概率分布基本满足正态分布^[18,24]。为了得到聚焦高斯光束大气传输的轴上光强起伏分布特征, 统计了光斑轴上的 8100 个光强样本, 并以偏斜度 γ_1 评价光强相对于均值的偏离特性, 以陡峭度 γ_2 评价光强相对于同方差正态分布的集散程度^[16,25]。对应的计算公式为

$$\gamma_1 = \mu_3 / \mu_2^{3/2}; \gamma_2 = \mu_4 / \mu_2^2 - 3, \quad (10)$$

式中 μ_2, μ_3, μ_4 分别为对数光强样本的二阶、三阶和四阶统计矩, 对样本的统计矩算法可参见文献[16]和[25]。

γ_1 和 γ_2 的评价特征为: 1) 如果概率分布关于均值是对称(如正态分布), 则 $\gamma_1 = 0$; 2) 如果 $\gamma_1 < 0$, 则低于均值的事件出现的概率小于高于均值的事件出现的概率, 但低于均值的事件的绝对偏离却要大于高于均值的事件的绝对偏离; 反之亦然; 3) 如果 $\gamma_2 > 0$, 则概率分布比同方差正态分布更为集中, 反之则比同方差正态分布发散。

3 数值模拟结果分析

3.1 计算参数设置

设置聚焦高斯激光大气传输条件如下:波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 初始光束口径为 100 mm , 发射口径为 200 mm , 光束曲率半径为 1000 m , 发射光功率为 1 W , 传输天顶角为 90° , 水平均匀路径传输距离为 1000 m , 相位屏网格数为 256×256 。

3.2 轴闪烁指数与像差权重系数和湍流强度的关系

图 1(a)~(d)分别对应 Z_3 、 Z_4 、 Z_7 和 Z_{11} 系统 Zernike 像差在不同湍流强度下, 对应 β_i^2 与 a_j 和大气折射结构常数 C_n^2 的关系。从等高线的趋势可得出以下结论。1) $a_j = 0$ 时, 表示无系统像差的激光传输结果, 可以看出在达到闪烁峰值后出现闪烁饱和现象, 并随着 C_n^2 的增大闪烁峰值有一定的下降趋势, 符合已有的实验结果。2) 横轴方向, 当 a_j 的值不同时, 相对于无像差状态, 随着 C_n^2 的增加, β_i^2 值达到饱和会提前或延后。如: Z_4 和 Z_7 像差在权重系数较大时, 闪烁饱和会相应地延后和提前。3) 纵轴方向, 当 C_n^2 的值不同时, 相对于无系统像差状态, 等高线曲率为正时, 像差对轴闪烁有抑制作用, 反之, 具有增强作用。斜率越大, 影响越明显。4) 通过比较图中 $\beta_i^2 \leq 0.67$ 所对应的较弱起伏强度区域的大小, 可知 Z_4 像差对轴闪烁的抑制作用总体来说最强。

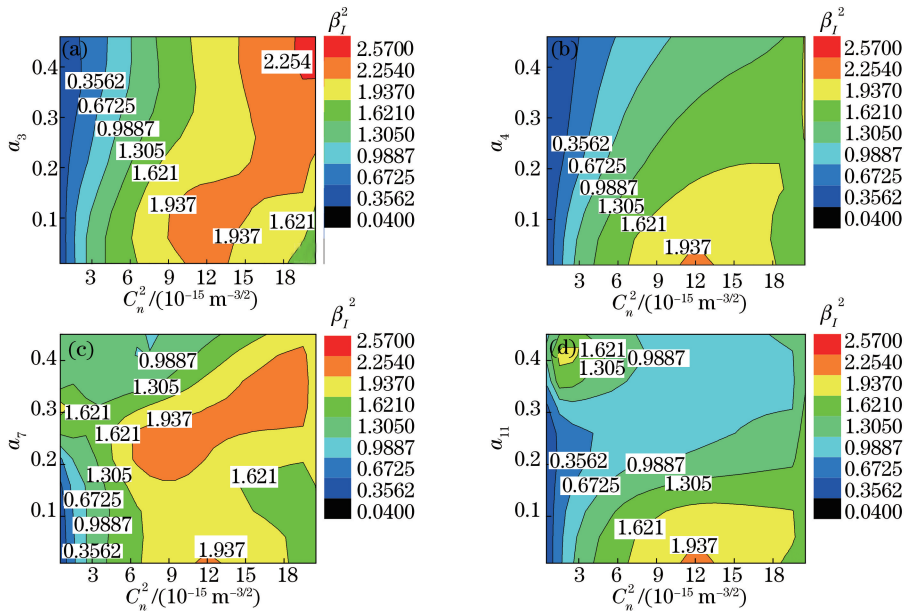


图 1 不同像差(Z_3 、 Z_4 、 Z_7 、 Z_{11})条件下对应 β_i^2 与 a_j 和 C_n^2 的变化关系。(a) Z_3 ; (b) Z_4 ; (c) Z_7 ; (d) Z_{11}

Fig. 1 Performance of β_i^2 versus a_j and C_n^2 with different aberrations. (a) Z_3 ; (b) Z_4 ; (c) Z_7 ; (d) Z_{11}

图 2 为 C_n^2 分别取 1.5×10^{-15} 、 2.5×10^{-15} 、 $8.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-3/2}$ 3 种典型值时, 不同像差对应 β_i^2 与 a_j 变化规律, 其中黑色方块线为无像差状态 ($a_j = 0$) 的参考线 (Refer line)。由图 2 可得: 不同湍流条件下, 各像差对 β_i^2 的影响变化规律不同。1) Z_3 像差在弱、中等强度时, 均对 β_i^2 有抑制作用, 但在强湍流强度时, 有一定抑制作用。2) Z_4 像差始终保持对 β_i^2 的抑制作用。3) Z_7 像差对 β_i^2 的影响随 C_n^2 和 a_j 变化明显。在 $a_7 < 0.3$ 区域, 均对 β_i^2 有增强作用。在 $C_n^2 = 1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-3/2}$, $a_7 = 0.3$ 时, β_i^2 达到峰值, 相比无系统像差状态, β_i^2 增长为原来的 1.4333 倍。4) Z_{11} 像差在弱、中等湍流条件下, 随着 a_j 的增加, 对 β_i^2 的作用表现由抑制转为增强, 强湍流条件下始终抑制 β_i^2 增长。同理, 可计算其余像差对 β_i^2 增减特性的影响程度。

图 3 为同种像差在分别取 $a_j = 0, 0.02, 0.2, 0.3$ 时, β_i^2 随 C_n^2 的变化规律。由图 3 可得: 1) Z_3 像差权重系数较大时, 轴闪烁达到饱和的速度延后, 且相比无系统像差状态, 轴闪烁值回落趋势缓慢; 2) Z_4 像差对 β_i^2 始终起到抑制作用, 且闪烁饱和峰值低于无系统像差时的闪烁峰值, 并随着 C_n^2 的增大, 轴闪烁值达到饱和后趋于平缓; 3) Z_7 像差对轴闪烁的增强作用明显, 相较无系统像差状态, 提前达到闪烁饱和; 4) 在 $a_{11} = 0.2$ 时, Z_{11} 像差对轴闪烁抑制作用明显, 达到闪烁饱和和速度缓慢。

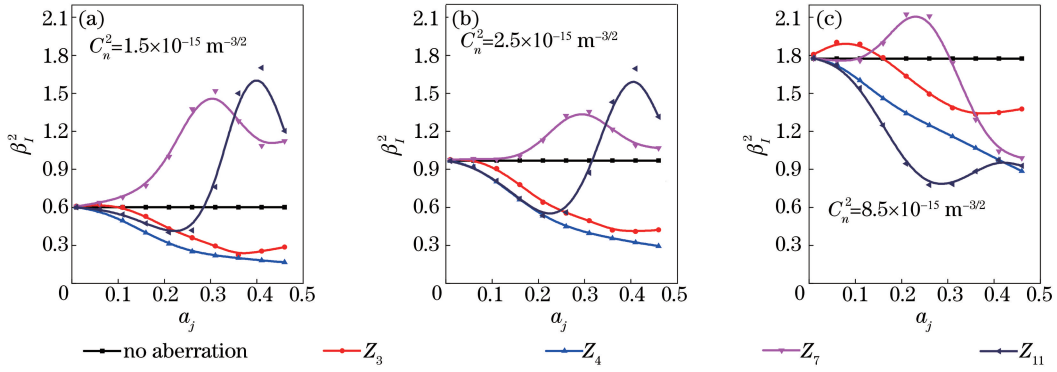


图 2 各像差在不同 C_n^2 时 β_1^2 随 a_j 变化规律

Fig. 2 Performance of β_1^2 versus a_j and Z_j in three different values of C_n^2

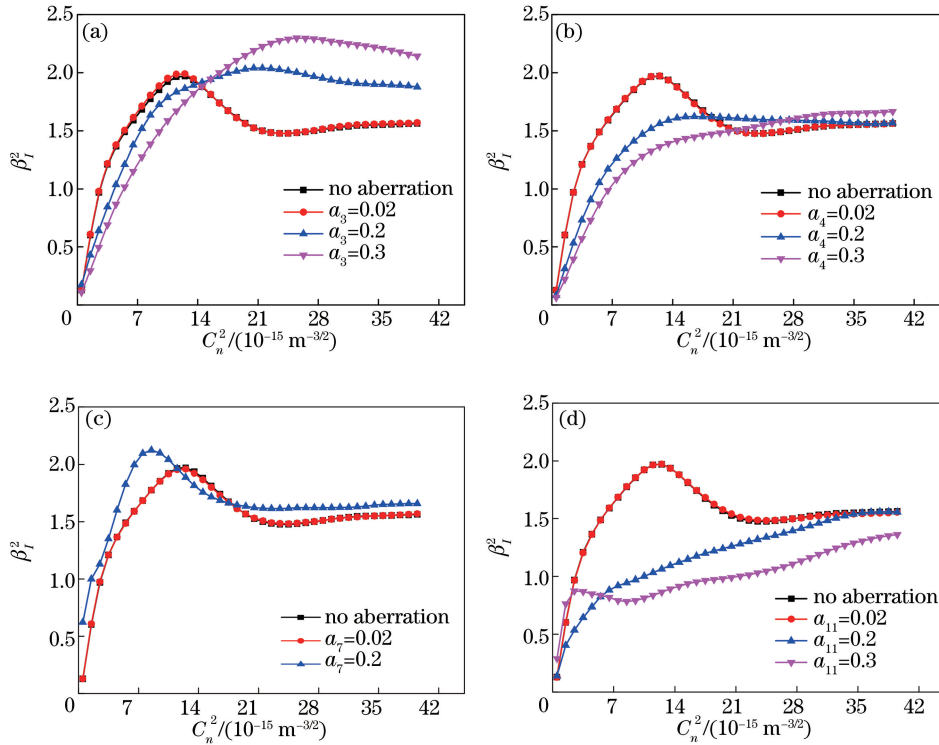


图 3 不同像差 (Z_3, Z_4, Z_7, Z_{11}) 条件时 β_1^2 随 C_n^2 的变化规律。(a) Z_3 ; (b) Z_4 ; (c) Z_7 ; (d) Z_{11}

Fig. 3 Performance of β_1^2 versus C_n^2 with four fixed values of a_j . (a) Z_3 ; (b) Z_4 ; (c) Z_7 ; (d) Z_{11}

3.3 轴上光强起伏概率统计分析

分别在弱、中、强起伏条件下,对远场光斑的轴上对数光强 $\ln I$ 及其相对平均光强起伏 $\ln(I/I_0)$ 的概率密度分布进行了比较。其中 I_0 为平均光强值,两者位置关系相当于沿着横轴作一个平移,其分布特征不变。并在图中给出 $\ln I$ 的积分概率图以及 $a_j = 0.2$ 时积分概率为 80% 所对应的 $\ln I$ 值。

图 4 为弱湍流条件下的轴上光强统计结果。其中图 4(a)、(c) 分别反映 $\ln(I/I_0)$ 和 $\ln I$ 的概率密度分布,图 4(b)、(d) 为 $\ln I$ 的积分概率图。由图 4 可得:1) $a_j = 0, C_n^2 = 1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-3/2}$ 时,聚焦高斯光束光强起伏严重偏离对数正态分布,其偏斜度 $\gamma_1 = -1.36$,陡峭度 $\gamma_2 = 2.11$,图 5 给出各像差在不同 a_j 和 C_n^2 时,对应的 $\ln I$ 概率密度分布的偏斜度和陡峭度;2) 当 $a_j = 0.02$ 时,湍流效应对光强分布占主要作用,且概率密度曲线左端出现高频抖动,因此各类型像差在权重系数较小时,对光强分布的影响主要集中在较弱光强的区域,但影响绝对值很小;3) 当 $a_j = 0.2$ 时,像差对光强分布占主要作用。光强概率密度峰值左移,偏移量 Δx_i 满足: $\Delta x_{11} > \Delta x_3 > \Delta x_7 > \Delta x_4$, 设无像差时 $\ln I$ 均值为 $(\ln I)_0$, 则各阶像差造成光斑 $\ln I$ 均值大小对应满足: $(\ln I)_0 > (\ln I)_4 > (\ln I)_3 > (\ln I)_{11} > (\ln I)_7$ 。

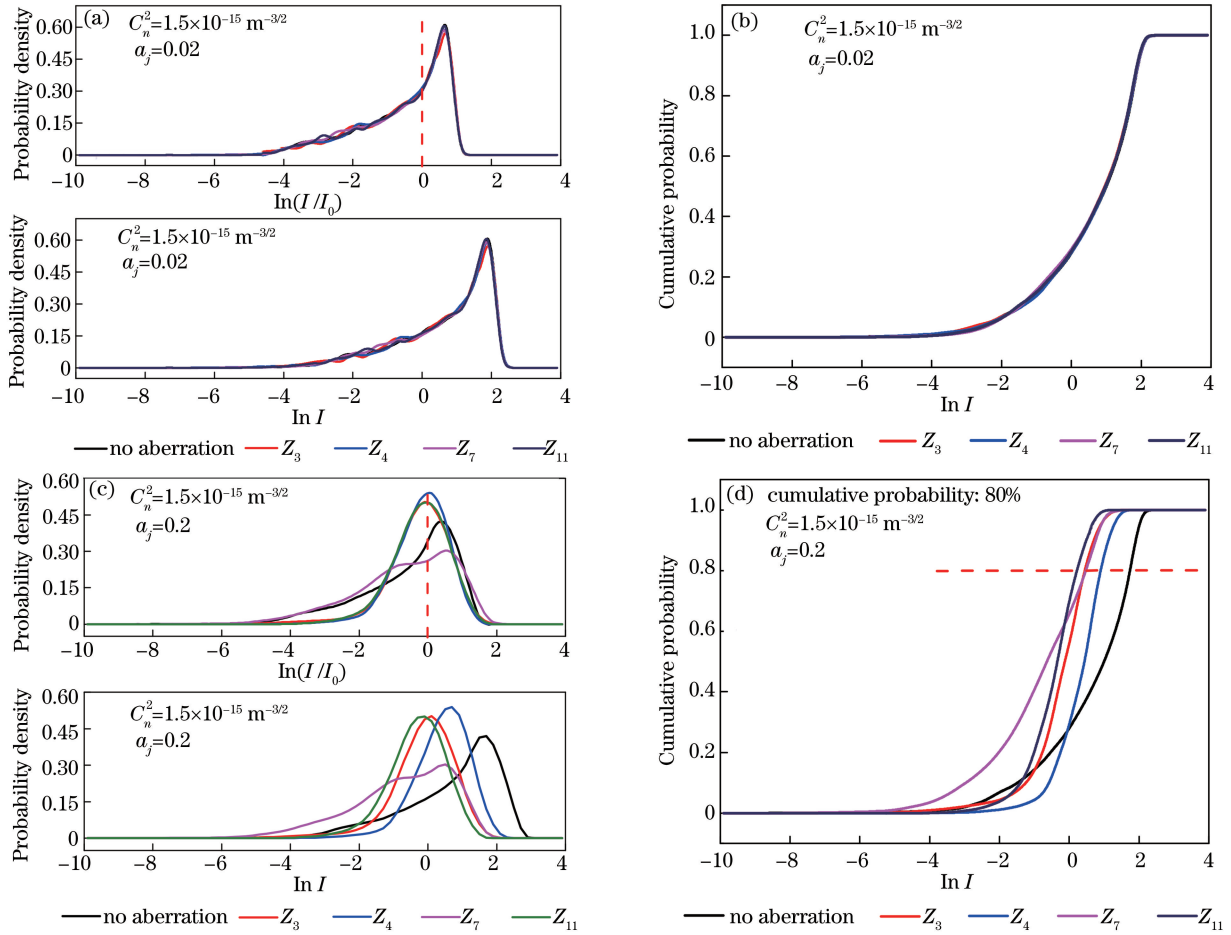


图 4 各像差在弱湍流强度条件下对应 $a_j = 0.02, 0.2$ 时的轴上对数光强分布特征

Fig. 4 Distribution of $\ln I$ with different aberrations in weak turbulence with $a_j = 0.02$ and 0.2

图 5 为各像差在不同 a_j 和 C_n^2 条件下, 对应 $\ln I$ 概率密度曲线的 γ_1 和 γ_2 值, 图中另外给出了 Z_8, Z_{13}, Z_{24} 的相关计算结果。由图 5 可得: 1) 总体来看, 各像差在不同条件下对应的光强概率分布基本满足 $\gamma_1 \leq 0, \gamma_2 \geq 0$, 与文献[18]中实测结果基本保持一致, 即低于均值的概率小于高于均值的概率, 实际分布比正态分布更向均值集中; 2) 与文献[18]不同在于, 聚焦高斯光束大气传输在湍流较弱时, 光强起伏偏离对数正态分布

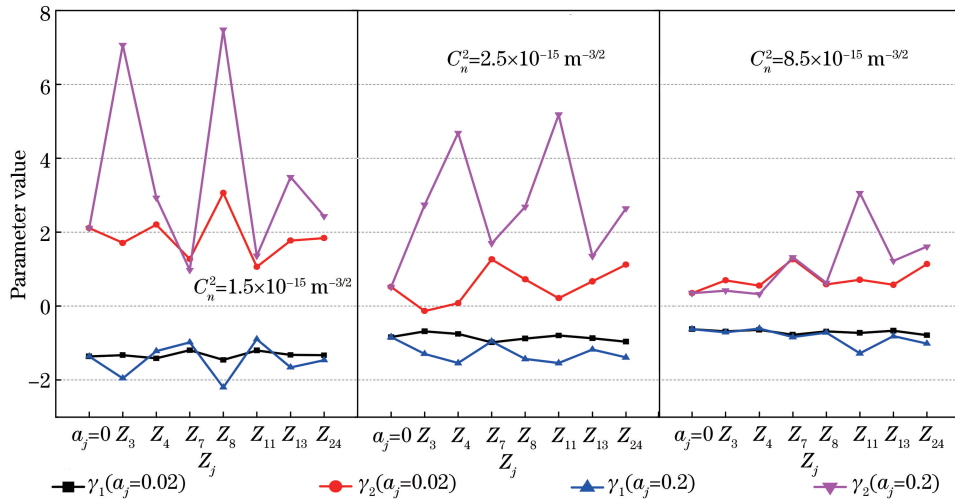


图 5 各像差在不同 a_j 和 C_n^2 条件下的光强概率密度曲线偏斜度和陡峭度分布

Fig. 5 Skewness and kurtosis of probability density distribution of $\ln I$ versus Z_j, a_j and C_n^2

大,湍流越强,光强起伏更加接近对数正态分布。不同权重系数大小的系统像差对光斑光强的分布差异如图 5 所示。

图 6 给出了各像差权重系数 $a_j=0.2$ 时,对应在不同湍流强度下的 $\ln I$ 均值及其标准差分布。图中另外给出了 Z_8 、 Z_{13} 、 Z_{24} 的相关结果。

图 7 为中等湍流强度下的轴上光强统计结果。在弱湍流情况下,像差权重系数较大时,像差对光强分布占主要作用,像差权重系数较小时,湍流效应对光强分布占主要作用。 $a_j=0.2$ 时,光强概率密度峰值均向

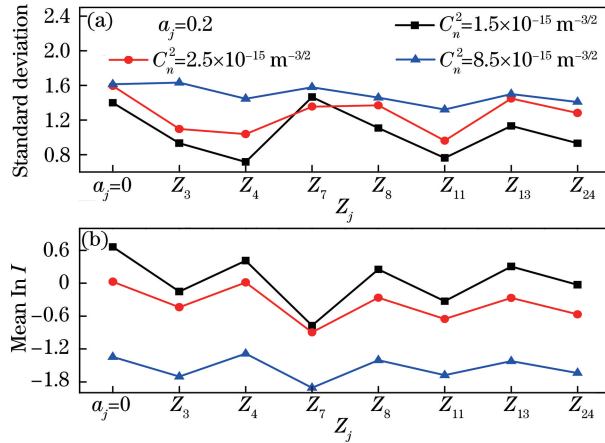


图 6 各像差在不同湍流强度下(a)轴上对数光强起伏标准差及(b)其均值

Fig. 6 (a) Standard deviation and (b) mean value of $\ln I$ with different aberrations and turbulence conditions

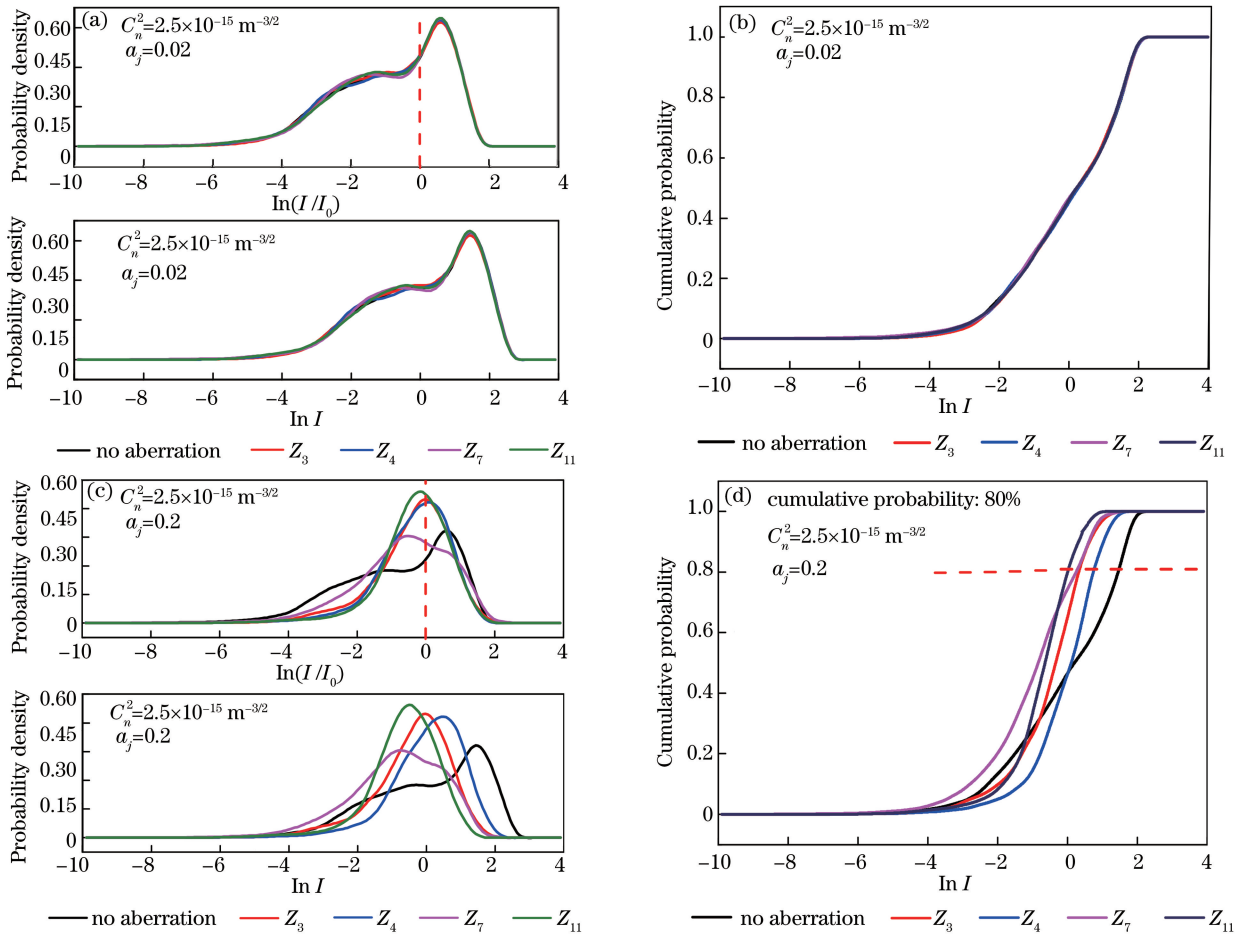


图 7 各像差在中等湍流强度条件下对应 $a_j=0.02, 0.2$ 时的轴上对数光强分布特征

Fig. 7 Distribution of $\ln I$ with different aberrations in moderate turbulence with $a_j = 0.02$ and 0.2

弱光强区域偏移, 偏移量 $\Delta x_7 > \Delta x_{11} > \Delta x_3 > \Delta x_4$, $\ln I$ 均值大小满足: $(\ln I)_0 > (\ln I)_4 > (\ln I)_3 > (\ln I)_{11} > (\ln I)_7$ 。

图 8 为强湍流下的轴上光强统计结果。在强湍流情况下, 湍流效应占主导地位, 系统像差对光强分布的影响减弱, 轴上光强更加接近于对数正态分布。值得一提的是, Z_{11} 像差在 $a_j = 0.2$ 较大值时, 相较于其余像差情况, 其光强分布最均匀, 且如图 2 和图 3(d) 所示, 闪烁值最小。

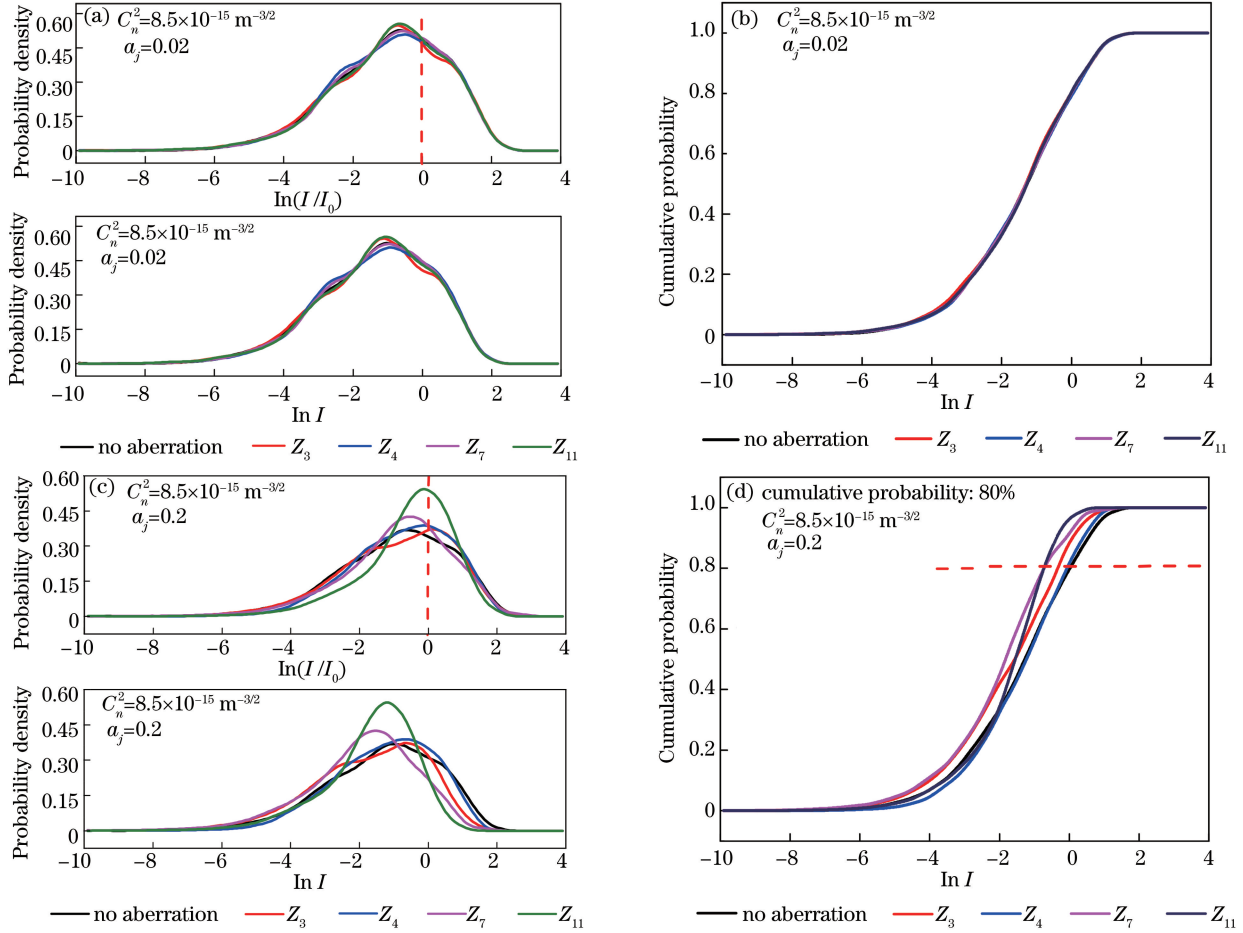


图 8 各像差在强湍流强度条件下对应 $a_j = 0.02, 0.2$ 时的轴上对数光强分布特征

Fig. 8 Distribution of $\ln I$ with different aberrations in strong turbulence with $a_j = 0.02$ and 0.2

结合图 4、图 7 和图 8 可以看出: 1) Z_7 像差对光斑的能量扩散作用最明显, 相反 Z_4 最弱, 在图 4、图 7 中也可以看出 Z_4 对应的光强概率密度相对于无像差状态, 其峰值向左的偏移量最小; 2) 根据图 6(a) 标准差变化图, 在弱湍流情况下, 由于 Z_7 像差对光强的分布调制作用明显, 光强起伏方差大, 因此在湍流增强时, 湍流效应会打破原来像差调制为主的光强分布, 使得轴闪烁值有所减弱, 标准差相对减小; 3) 较大权重系数的 Z_4 和 Z_{11} 像差在湍流强度改变时, 仍能保持相对其他条件下较小的光强起伏标准差值。

光电探测应用中, 接收信号功率低于探测阈值或高于损伤阈值时, 仪器均不能有效地工作。根据图 4(d)、图 7(d) 以及图 8(d) 中 80% 积分概率线所对应的 $\ln I$ 大小关系分别满足: $(\ln I)_0 > (\ln I)_4 > (\ln I)_7 \approx (\ln I)_3 > (\ln I)_{11}$, $(\ln I)_0 > (\ln I)_4 > (\ln I)_3 \approx (\ln I)_7 > (\ln I)_{11}$ 以及 $(\ln I)_0 > (\ln I)_4 > (\ln I)_3 > (\ln I)_7 \approx (\ln I)_{11}$ 。同理还可定量获得不同像差情况下, 不同积分概率所对应的 $\ln I$ 值。在实际光学工程应用中, 可根据该结果结合实际光电探测仪器阈值参数, 估算探测器对信号探测的有效性, 即低于探测阈值的信号无效; 也可估算固定功率激光器在光电对抗中对光电仪器破坏的有效性, 即高于损伤阈值的信号有效。

4 结 论

采用多层相位屏的数值模拟方法, 在符合 Kolmogorov 湍流谱分布的大气中, 重点分析了实际系统中典

型 Z_3 (离焦)、 Z_4 (像散)、 Z_7 (慧差)、 Z_{11} (二级像散) 4 种 Zernike 像差对聚焦高斯光束的大气传输轴闪烁特性的影响。

结果表明,不同像差在相同的权重系数下,对光斑轴闪烁的影响差异大。像散和慧差对远场光斑的轴闪烁分别具有较强的抑制和促进作用,较强的慧差和像散像差能使轴闪烁饱和的出现提前和延后。在湍流较弱时的聚焦高斯光束大气传输远场光斑光强起伏概率严重偏离对数正态分布,其偏斜度 $\gamma_1 = -1.36$, 陡峭度 $\gamma_2 = 2.11$ 。湍流强度越强,远场光斑光强起伏概率越接近于对数正态分布,但光强起伏概率密度分布基本满足偏斜度为负,陡峭度为正。弱、中等湍流强度下,像差权重系数较大时,像差对光强分布起主要作用;像差权重系数较小时,湍流效应对光强的分布起主要作用,且主要影响光斑较弱光强的分布情况,但波动幅度非常小。强湍流强度下,湍流对光斑光强的分布起主要作用,且光强起伏概率更趋近于对数正态分布。相较于其余像差, Z_{11} 像差在强湍流情况下对光束能量的平均作用最强,光斑强度分布更加集中和均匀。

该结论适用于单一像差对聚焦高斯激光大气传输轴闪烁的影响。由于实际系统像差组合复杂,通过初步了解各像差对激光大气传输的影响特性,参考并结合文献[10]和[11]的方法,将各像差对闪烁特性的影响以加权求和的形式分析具有复杂像差组合的实际系统对激光大气传输闪烁特性的影响,这对今后解决光学工程的实际应用问题具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Flatté S M, Martin J, Wang G Y. Irradiance variance of optical waves through atmospheric turbulence by numerical simulation and comparison with experiment[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10(11): 2363-2370.
- [2] Qian X, Zhu W, Rao R. Intensity distribution properties of Gaussian vortex beam propagation in atmospheric turbulence [J]. Chinese Physics B, 2015, 24(4): 202-206.
- [3] Martin J M, Flatté S M. Simulation of point-source scintillation through three-dimensional random media[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1990, 7(7): 838-847.
- [4] Coles W A, Filice J P, Frehlich R G, *et al.* Simulation of wave propagation in three-dimensional random media[J]. Applied Optics, 1995, 34(12): 2089-2101.
- [5] 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.
- [6] Yang Ting, Ji Xiaoling. Regions of spreading of laser beams propagating through non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501001.
杨婷, 季小玲. 激光通过非 Kolmogorov 大气湍流传输光束扩展区间的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501001.
- [7] Li Yan, Qi Jun, Chen Feinan. Propagation quality of laser diode beam in anisotropic non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0701003.
李燕, 戚俊, 陈斐楠. 激光二极管光束在各向异性非柯氏大气湍流中的传输质量[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0701003.
- [8] Roddier N A. Atmospheric wavefront simulation and Zernike polynomials[C]. SPIE, 1990, 1237: 668-679.
- [9] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 207-211.
- [10] Xian Hao, Jiang Wenhan. The relation between wave front aberration and the beam quality factor[J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(5): 415-419.
鲜浩, 姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系[J]. 中国激光, 1999, 26(5): 415-419.
- [11] Li Xinyang, Xian Hao, Wang Chunhong, *et al.* Relationship between beam quality factor β and wave front error[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 798-802.
李新阳, 鲜浩, 王春鸿, 等. 波像差与光束质量 β 因子的关系[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 798-802.
- [12] Dai G M, Mahajan V N. Zernike annular polynomials and atmospheric turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(1): 139-155.
- [13] Ye Hongwei, Li Xinyang, Xian Hao, *et al.* Relationship between Zernike wavefront errors and beam quality factor β for optics system[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1420-1427.
叶红卫, 李新阳, 鲜浩, 等. 光学系统的 Zernike 像差与光束质量 β 因子的关系[J]. 中国激光, 2009, 36(6):

1420-1427.

- [14] He Yuanxing, Mu Baili, Li Jian, *et al.* Relationship between Gaussian beam quality and wavefront aberration[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 747-752.
贺元兴, 穆佰利, 李建, 等. 高斯光束质量与波像差之间的关系[J]. *激光技术*, 2014, 38(6): 747-752.
- [15] Tatarski V I. Wave propagation in a turbulent medium[M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong, *et al.* Transl. Beijing: Science Press, 1978; 109-120.
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩, 宋正方, 曾宗泳, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1978; 109-120.
- [16] Goodman J W. Statistical optics [M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Zhan Dasan. Transl. Beijing: Science Press, 1992; 354-363.
古德曼. 统计光学[M]. 秦克诚, 刘培森, 詹达三, 译. 北京: 科学出版社, 1992; 354-363.
- [17] Martin J M, Flatté S M. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(11): 2111-2126.
- [18] Rao Ruizhong. Light propagation in the turbulent atmosphere[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005; 93-101.
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005: 93-101.
- [19] Zhang Jianzhu, Zhang Feizhou, Wu Yi. Methods for simulating turbulent phase screen[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2318-2324.
张建柱, 张飞舟, 吴毅. 大气湍流随机相屏模拟方法研究[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(10): 2318-2324.
- [20] Fleck J A, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1976, 10(2): 129-160.
- [21] Frehlich R. Simulation of laser propagation in a turbulent atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(3): 393-397.
- [22] Fante R L. Electromagnetic beam propagation in turbulent media[J]. *Proceedings of IEEE*, 1975, 63(12): 1669-1692.
- [23] Qian Xianmei, Rao Ruizhong. Spatial distribution of Gaussian-beam scintillation in atmosphere by numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3): 320-324.
钱仙妹, 饶瑞中. 高斯光束大气闪烁空间分布的数值模拟研究[J]. *量子电子学报*, 2006, 23(3): 320-324.
- [24] Flatté S M, Bracher C, Wang G Y. Probability-density functions of irradiance for waves in atmospheric turbulence by numerical simulation; Erratum[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 11(7): 2080-2092.
- [25] 王岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 10-14.