

相位屏法研究湍流大气对干涉图样的影响

单聪淼,孙华燕,赵延仲,李 帅
(装备学院,北京 101416)

摘 要:基于马赫-泽德光路发射的相干光为模型,利用功率谱反演法生成随机相位屏的方法模拟湍流大气,分析了相干高斯光在湍流大气中的传输过程并建立了传输模型,推导得到了接收屏上的干涉光强。数值仿真分析了湍流大气对干涉图样分布以及条纹间距和对比度等特征参数的影响。结果表明,随着湍流强度增大,干涉图样变得模糊甚至破碎,条纹间距增大,对比度下降。此研究结果对于激光主动干涉探测技术的应用具有一定参考意义。

关键词:随机相位屏;马赫-泽德干涉原理;干涉图样;条纹间距;对比度

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.09.004

Influence of atmosphere turbulence on interference pattern by phase screen method

SHAN Cong-miao, SUN Hua-yan, ZHAO Yan-zhong, LI Shuai
(Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: Taking the coherent laser based on Mach-Zehnder light path as the model, random phase screen is generated by the power spectrum method of inversion to simulate the atmospheric turbulence. The transmission of coherent Gauss beams in atmosphere turbulent was analyzed, and the transmission model was established, and the interference light intensity on the receiving screen is derived. The influences of atmosphere turbulence on the distribution of interference pattern and the characteristic parameters such as fringe spacing and contrast are analyzed by numerical simulation. The results show that with the increase of turbulence intensity, the interference pattern becomes blurred or even broken, the fringe spacing increases and the contrast ratio decreases. The results of this study have a certain reference value for the application of laser active interference detection technology.

Key words: random phase screen; Mach-Zehnder interferometer principle; interference pattern; fringe spacing; contrast ratio

1 引 言

激光主动干涉探测技术具有抗背景光干扰性强、回波信息丰富的特点,是激光主动探测技术在未来的一个重要发展方向。因此,课题组提出了一种利用相干合成线阵高斯光束扫描识别漫反射背景中的光学目标的新方法,利用光学目标和漫反射目标

对组合光束反射特性的差异,能够从复杂漫反射背景中快速识别出光学目标^[1]。然而,湍流大气是影响激光主动干涉探测作用距离的最主要因素,湍流大气对在传输激光的闪烁、漂移、展宽等效应都会影响激光传输相干性,进而影响目标处的干涉场分布,因此如何消除湍流大气对激光主动干涉探测

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61302183)资助。

作者简介:单聪淼(1988-),女,博士,主要从事激光主动探测,光学信息获取与处理的研究。E-mail: dandanscmiao@163.com

收稿日期:2017-01-19; **修订日期:**2017-02-19

的不利影响,可以获得更多的目标特征信息,是值得研究的课题。

光波在湍流介质中传播的研究方法可以概括为两类:理论研究的解析方法^[2-5]和数值模拟研究方法^[6-9]。解析方法在弱起伏和强起伏时可以通过引入某种微扰近似获得较好的结果,但对于中等强度起伏的情况,至今依然没有很好的解析处理方法。因此,文中采用数值仿真的方法模拟湍流介质中的相干高斯光束的传输过程,以基于马赫-泽德光路发射的相干光为模型,利用功率谱反演法生成随机相位屏的方法模拟湍流大气,分析了相干高斯光在湍流大气中的传输过程并建立了传输模型,推导得到了接收屏上的干涉光强。数值仿真分析了湍流大气对干涉图样分布以及条纹间距和对比度等特征参数的影响。此研究结果对于激光主动干涉探测技术的应用具有一定参考意义。

2 功率谱反演法生成随机相位屏

利用数值仿真的方法模拟相干高斯光束在湍流大气中的传输过程,其主要思想是利用数值方法生成随机相位屏模拟湍流大气,目的是生成对相干光场分布产生影响的随机相位起伏。现在广泛使用的功率谱反演法是一种频域间接模拟,这种方法根据大气湍流的功率谱密度函数得到相位空间随机场,然后进行傅里叶变换得到二维随机相位的空间分布,通常也称为快速傅里叶变换(FFT)法^[10-11]。如图1所示,假设激光器发出的光束经过 N 个相位屏到达距离为 L 的接收屏上,则屏间距离 $\Delta z = L/N$ 。

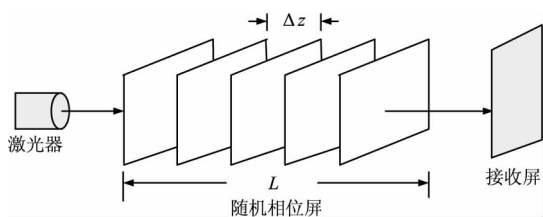


图1 光波经过相位屏的传输过程

Fig. 1 The transmission of light wave through phase screen

在湍流谱密度函数的选择上,文中采用同时考虑了湍流内尺度和外尺度、更符合大气折射率起伏特性的 Von Karmon 谱模型。具体过程为:在频率域生成一均值为0、方差为1的复数高斯随机矩阵,用符合 Von Karmon 大气相位扰动的功率谱 $\Phi_n(\kappa)$ 对其进行滤波,再进行逆傅里叶变换得到湍流大气的扰动相位 $\phi(x_i, y_i)$:

$$\phi(x_i, y_i) = \sum_{\kappa_x} \sum_{\kappa_y} h(\kappa_x, \kappa_y) \cdot \sqrt{\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y)} \exp[i(\kappa_x x_i + \kappa_y y_i)] \quad (1)$$

式中, $h(\kappa_x, \kappa_y)$ 为均值为0,方差为1的 Hermitian 复高斯随机矩阵; $\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y)$ 为符合 Von Karmon 谱的功率谱函数; κ_x, κ_y 分别为 x 方向和 y 方向的波矢分量。其中:

$$\Phi_n(\kappa_x, \kappa_y) = 0.033 C_n^2 (\kappa_x^2 + \kappa_y^2 + L_0^{-2})^{-11/6} \cdot \exp\{-[\kappa_x^2 + \kappa_y^2]^{1/2} l_0 / 5.92\} \quad (2)$$

式中, C_n^2 为大气折射率结构常数,当传输路径为水平传输时, C_n^2 可视为常数。

将上式离散化,设 $x_i = m\Delta x, y_i = n\Delta y$,其中 $\Delta x, \Delta y$ 为空间域中 x 方向和 y 方向的取样间隔, $\Delta x = R_x/N_x, \Delta y = R_y/N_y, m, n$ 为整数,其中 $R_x \times R_y$ 为相位屏尺寸, N_x, N_y 分别为 x 方向和 y 方向的采样点个数; $\kappa_x = m'\Delta\kappa_x, \kappa_y = n'\Delta\kappa_y$,其中 $\Delta\kappa_x, \Delta\kappa_y$ 为波数域中 x 方向和 y 方向的取样间隔, m', n' 为整数, $\Delta\kappa_x = 2\pi/(N_x\Delta x), \Delta\kappa_y = 2\pi/(N_y\Delta y)$ 。则可以得到上式的离散化结果为:

$$\begin{aligned} \phi(m, n) &= \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} h(m', n') \cdot \sqrt{\Phi_n(m', n')} \exp\left[i2\pi\left(\frac{m'm}{N_x} + \frac{n'n}{N_y}\right)\right] \\ &= \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} \{h(m', n') \sqrt{\Phi_n(m', n')}\} \cdot \exp\left[i2\pi\left(\frac{m}{N_x}m' + \frac{n}{N_y}n'\right)\right] \\ &= \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} H(m', n') \exp\left[i2\pi\left(\frac{m}{N_x}m' + \frac{n}{N_y}n'\right)\right] \\ &= \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \left\{ \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} H(m', n') \exp\left[i2\pi\left(\frac{n}{N_y}n'\right)\right] \right\} \cdot \exp\left[i2\pi\left(\frac{m}{N_x}m'\right)\right] \\ &= \text{FFT}\{\text{FFT}[H(m', n')] |_{n'}\} |_{m'} \quad (3) \end{aligned}$$

式中:

$$H(m', n') = h(m', n') \sqrt{\Phi_n(m', n')} \quad (4)$$

上式即对 $H(m', n')$ 的二维FFT变换。

3 基于马赫-泽德光路的相干合成高斯光束

由图2可知,一束基模高斯光束经马赫-泽德干涉光发射装置的分束镜 M_0 分为 l_1 和 l_2 两束光,则两束光在分束镜 M_3 上的复振幅分布可以分别表示为:

$$S(m', n') = U_0(m', n') \cdot \exp\left[ik \frac{(m'\Delta x)^2 + (n'\Delta y)^2}{2\lambda_z}\right] \quad (13)$$

设第 i 个相位屏表示的相位为 $\phi_i(x_i, y_i)$, 激光束在相位屏入射面和出射面的复振幅分别记为 $u_i^-(x_i, y_i)$ 和 $u_i^+(x_i, y_i)$ 。则有:

$$u_i^+(x_i, y_i) = u_i^-(x_i, y_i) \exp[i\phi_i(x_i, y_i)] \quad (14)$$

对上式进行离散化处理得:

$$u_i^+(m, n) = u_i^-(m, n) \exp[i\phi_i(m, n)] \quad (15)$$

再次利用菲涅尔衍射积分公式, 则光束经过第 i 个相位屏传输距离 Δz 到达第 $(i+1)$ 个相位屏的入射面上的复振幅为:

$$\begin{aligned} & u_{i+1}^-(m'', n'') \\ &= -\frac{i}{\lambda \Delta z} \exp(ik\Delta z) \exp(ik \frac{(m''\Delta x)^2 + (n''\Delta y)^2}{2\Delta z}) \times \\ & \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} \left\{ U_i(m, n) \exp\left[ik \frac{(m\Delta x)^2 + (n\Delta y)^2}{2\Delta z}\right] \right\} \cdot \\ & \exp\left[-i2\pi\left(\frac{m''(\Delta x)}{\lambda \Delta z}m + \frac{n''(\Delta y)}{\lambda \Delta z}n\right)\right] \\ &= -\frac{i}{\lambda \Delta z} \exp(ik\Delta z) \exp(ik \frac{(m''\Delta x)^2 + (n''\Delta y)^2}{2\Delta z}) \\ & \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} T(m, n) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{m''(\Delta x)}{\lambda \Delta z}m + \frac{n''(\Delta y)}{\lambda \Delta z}n\right)\right] \\ &= -\frac{i}{\lambda \Delta z} \exp(ik\Delta z) \exp(ik \frac{(m''\Delta x)^2 + (n''\Delta y)^2}{2\Delta z}) \\ & \text{FFT}\{\text{FFT}[T(m, n)]|_n\}_m \quad (16) \\ & T(m, n) = U_i(m, n) \exp\left[ik \frac{(m\Delta x)^2 + (n\Delta y)^2}{2\Delta z}\right] \quad (17) \end{aligned}$$

重复进行上述过程, 直到到达接收屏终止。设到达接收屏上的相干光场的复振幅分布为 U_N , 则接收屏上相干场的光强分布为:

$$I_N = U_N U_N^* \quad (18)$$

5 数值仿真

初始取值为 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $L = 100 \text{ m}$, $N = 10$, $\Delta z = L/N = 10 \text{ m}$, $R_x \times R_y = 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$, $N_x = N_y = 1000$, $L_0 = 1 \text{ m}$, $l_0 = 1 \text{ mm}$, $\omega_0 = 0.002 \text{ m}$, $\alpha = 0.001^\circ$, $n = 1.5$, $c = 0.01 \text{ m}$, $h = 0.005 \text{ m}$ 。

图4为不同湍流强度下, 接收屏上的干涉图样分布情况。由图可知, 随着湍流的增强, 干涉图样的条纹分布由清晰变得模糊, 当湍流强度增大到一定程度, 干涉图样的整体形态已经破碎, 只有几条形态不规则的条纹。由于湍流强度增大, 光束在经过湍流团时的随机起伏也变得剧烈, 这就使得两束相干光之间的光程差发生不规则的变化,

甚至造成接收屏上的某些点处的光程差已经不再满足干涉的条件, 因此干涉图样的形态也就发生相应的变化。

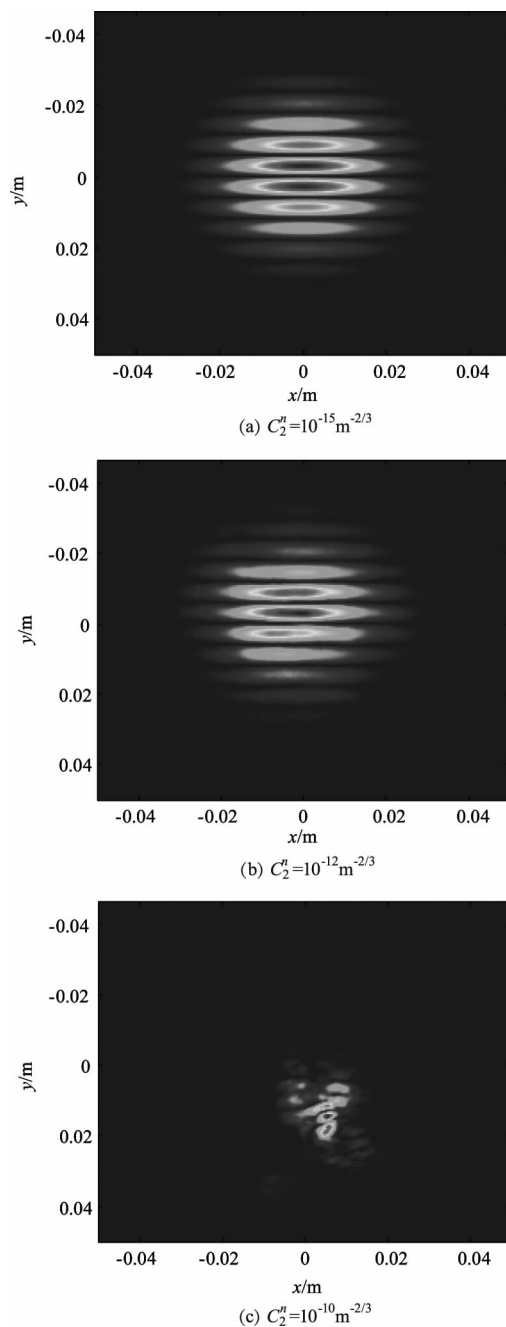


图4 干涉图样分布

Fig. 4 Interference pattern distribution

图5为接收屏上的相对光强分布情况。为方便下面计算干涉图样的条纹间距和条纹对比度, 在图中标出光强分布的波峰和波谷的位置, 并记录每一个波峰和波谷所对应的相对光强的值。由图还可以看出, 相对光强分布曲线与干涉光强的二维分布是相对应的。

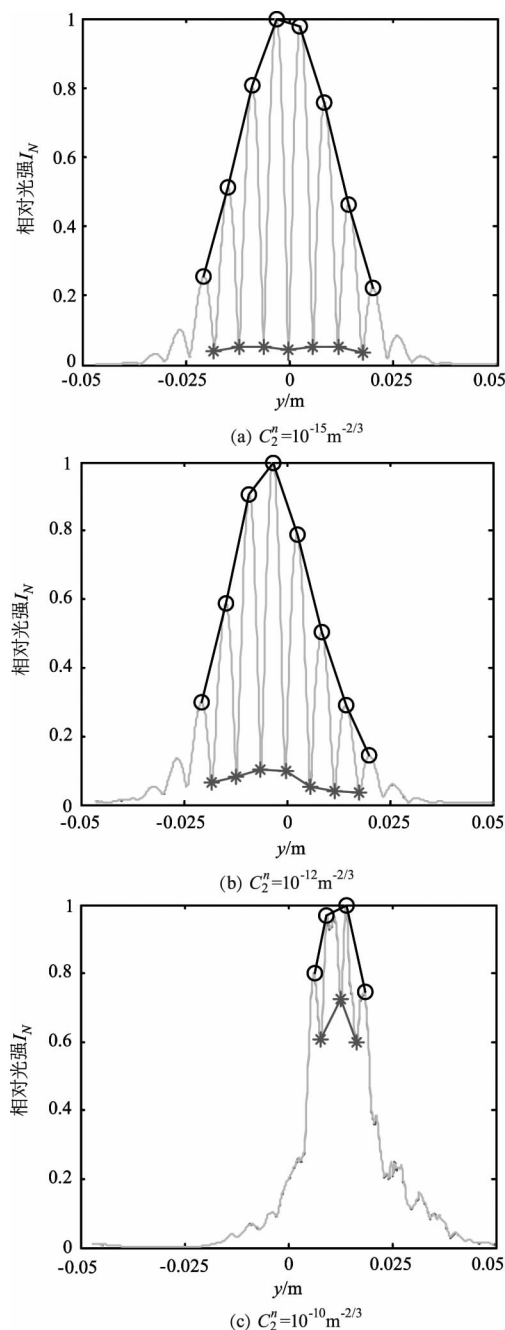


图5 相对光强

Fig. 5 Relative intensity

条纹间距是描述干涉图样特征的一个重要参数,表示相邻两条亮条纹或暗条纹之间的距离。当不考虑相干光在湍流大气环境中传输时,可以通过物理光学中对光程差的推导方法,进而推导出接收屏上干涉图样的条纹间距。但由于湍流大气对在其中传输的光束具有闪烁、漂移和光束展宽等影响效应,因此在研究湍流大气中的相干光传输时,已经不能通过简单的推导给出条纹间距的表达式。这里,我们从条纹间距的定义出发,通过计算两个相邻的波峰或者波谷之间的距离得到经过湍流大气后的相

干光形成的干涉图样的条纹间距。

图6为相对光强曲线中波峰和波谷间的峰值点距离。由图可知,由于湍流大气的影响,干涉图样已经不再是等间距的,且随着湍流的增强,条纹间距的变化随机性越来越明显,对比图6(a)和(b),可以发现条纹间距有增大的趋势,这是由于湍流大气对光束的影响在宏观体现上有整体展宽的趋势。当湍流增大到一定程度时,条纹分布已经失去规律性,此时的干涉图样已经不再适合主动干涉探测。

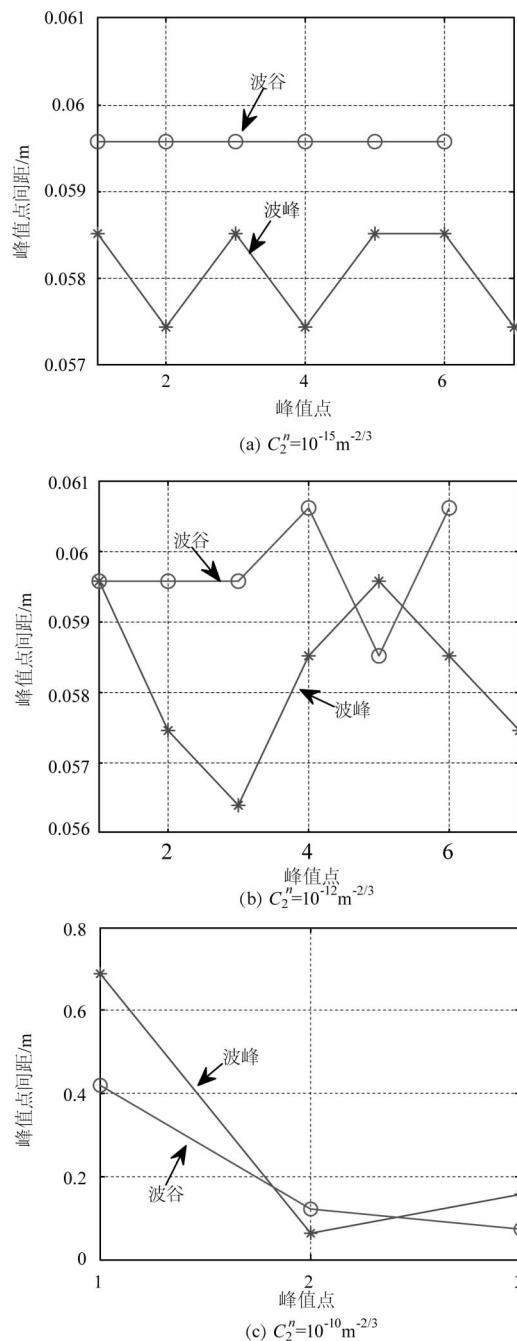


图6 峰值点间距

Fig. 6 Peak spacing

条纹对比度是描述干涉图样特征的另外一个重

要参数,用来表征干涉场中某一点附近的条纹的清晰程度。在主动干涉探测时,必须保证传输到目标处的干涉图样具有满足一定清晰度的条纹,以确保相干探测光经目标反射原路返回到接收端探测器上时能够获得目标时间化的光强变化信息。条纹对比度的定义为:

$$K = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \quad (19)$$

式中, I_M 为该点附近条纹强度的极大值; I_m 为该点附近条纹强度的极小值。上式表明,条纹对比度是在 0~1 之间变化的,其值大小与条纹亮暗差和背景光强有关。

图 7 为对应的波峰的峰值光强与其相邻的波谷之间计算得到的条纹对比度。由图可知,对比度整体呈现先增大后减小的趋势,这是由于干涉图样的光强分布整体呈现类高斯的分布,因此,中间波峰点的对比度会较两边的大。另外,随着湍流强度的增大,对比度呈现减小趋势。由于湍流大气对光束的闪烁和漂移效应加剧,使得光束中各点在接收屏上的落点的随机性变强,光分布的能量变得分散,进而使得体现光强集中性的对比度减小。

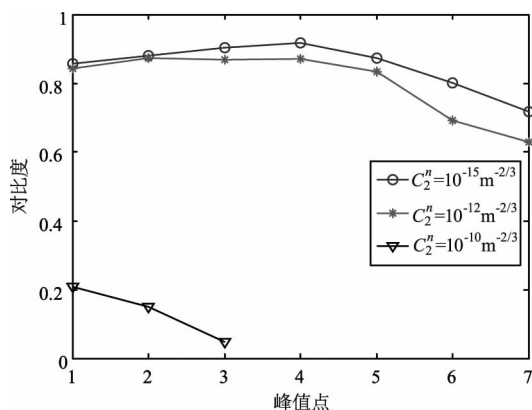


图 7 干涉图样条纹对比度

Fig. 7 Fringe contrast of interference pattern

6 结 论

本文采用数值仿真的方法模拟湍流介质中的相干高斯光束的传输过程,以基于马赫-泽德光路发射的相干光为模型,利用功率谱反演法生成随机相位屏的方法模拟湍流大气,分析了相干高斯光在湍流大气中的传输过程并建立了传输模型,推导得到了接收屏上的干涉光强。数值仿真分析了湍流大气对干涉图样分布以及条纹间距和对比度等特征参数的影响。此研究结果对于激光主动干涉探测技术的应用具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Shan Congmiao, et al. A new identification method aimed at optical targets using an active interference laser beam [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(10): 1019-1022.
- [2] Alan M Whitman, Mark J Beran. Two-scale solution for atmospheric scintillation from a point source [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1993, 5(5): 735-737.
- [3] Beran M J, Whitman A M. Scintillation index calculation using an altitude dependent structure constant [J]. Appl. Opt., 1988, 27(11): 2178-2182.
- [4] JWR Brown. Fourth moment of a wave propagating in a random medium [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1972, 62(8): 966-971.
- [5] Andrew Forbes. Laser beam propagation in non-linearly absorbing media [J]. SPIE, 2006, 6290: 629003.
- [6] YU Jiping, QI Wenzong, GUO Chunfeng, et al. Numerical simulation of laser propagation through atmospheric turbulence [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.
- [7] LI Bo, WANG Tingfeng, WANG Dinan, et al. Simulation of laser beam propagation through turbulence [J]. Chinese Optics, 2012, 5(3): 289-295. (in Chinese)
李波, 王挺峰, 王弟男, 等. 激光大气传输湍流扰动仿真技术 [J]. 中国光学, 2012, 5(3): 289-295.
- [8] XU Jiawen, SUN Huayan, WU Weiwei, et al. Research of laser propagation simulation in turbulent atmosphere [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009, 4: 43-45. (in Chinese)
许嘉文, 孙华燕, 吴伟伟, 等. 湍流大气中的激光传输仿真研究 [J]. 装备制造技术, 2009, 4: 43-45.
- [9] XU Guangyong, WU Jian, YANG Chunping, et al. Simulation and optical scintillation research of Gaussian beam in atmosphere turbulence [J]. Laser Technology, 2008, 32(5): 548-550. (in Chinese)
徐光勇, 吴健, 杨春平, 等. 高斯光束在大气湍流中的数值模拟和光强起伏 [J]. 激光技术, 2008, 32(5): 548-550.
- [10] WANG Lijin, LI Qiang, WEI Honggang, et al. Numerical simulation and validation of phase screen distorted by atmospheric turbulence [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(3): 1-5. (in Chinese)
王立瑾, 李强, 魏宏刚, 等. 大气湍流随机相位屏的数值模拟和验证 [J]. 光电工程, 2007, 34(3): 1-5.
- [11] WANG Long, SHEN Xueju, ZHANG Weian, et al. Study on propagation of flattened Gaussian beams through turbulent atmosphere utilizing multiple phase-screens [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(8): 852-856. (in Chinese)
王龙, 沈学举, 张维安, 等. 相位屏法研究平顶高斯光束的大气传输特性 [J]. 激光与红外, 2012, 42(8): 852-856.