

# 时变湍流对动态移动光斑定位精度的影响

沈宝良 孙建锋 周 煜 濮莉莉 李 兵 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 为了研究时变湍流对跟瞄过程中动态平移的光斑定位和跟踪精度的影响,采用改进的逆傅里叶变换方法构造了体现大气湍流特性的随机相位屏,模拟仿真分析了不同强度时变湍流影响下光斑动态平移时探测器感受到的光斑质心与光斑实际质心之间的跟踪偏差、定位偏差与光斑在探测器上位置之间的关系,以及湍流强度对光斑质心定位精度的影响,给出了统计偏差曲线。结果表明,在时变大气湍流的影响下,光斑整体动态平移过程中实际质心的移动距离与接收端探测器感受到的光斑质心移动距离存在一个跟大气湍流强度成正比的偏差。动态平移过程中光斑质心的平移跟踪偏差与定位精度、大气湍流强度以及光斑在接收终端探测器上的位置有关。

**关键词** 光通信; 自由空间激光通信; 电荷耦合器件; 大气湍流; 仿真; 数值相位屏

**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0805004

## Influence of Time-Varying Atmospheric Turbulence to Facular Orientation Deviation in Dynamic Process

Shen Baoliang Sun Jianfeng Zhou Yu Pu Lili Li Bing Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** In order to study the influence of time-varying turbulence to facular orientation precision when the facula is moving during pointing and tracking process, a random phase screen is generated by using modified inverse Fourier transform to simulate the atmospheric turbulence. And then the orientation deviation of the facular barycenter, the relation between the deviation and the facular position in the detector and the orientation precision of the facula are analyzed under different atmospheric turbulence intensities. The results indicate that there is a deviation between actual translational amount of the facular barycenter and that of the barycenter detected by the charge-coupled device in the presence of time-varying atmospheric turbulence, and it relates with the atmospheric turbulence intensity. And the orientation precision relates with both the atmospheric turbulence intensity and the facular position in the detector.

**Key words** optical communications; free-space laser communication; charge-coupled device; atmospheric turbulence; simulation; random phase screen

**OCIS codes** 060.2605; 040.1520; 010.1330; 010.1300; 010.1290

## 1 引 言

自由空间激光通信的整个过程大致可以分为光学链路建立和数据传输两个方面。光学链路的顺利建立决定着整个通信过程的顺利进行。在空间激光通信系统中,负责光学链路建立的跟踪、瞄准和捕获(APT)系统主要由粗跟踪系统、精跟踪系统和 APT

控制系统组成。精跟踪系统对于光束偏转角的检测精度和检测速度决定了跟踪系统的跟踪精度和跟踪速度。而其中光束偏转角的检测实际上等效于光斑质心在精跟踪探测器表面上位置的检测<sup>[1~6]</sup>。

用于空间激光通信的光束其光斑内部能量分布本身是不均匀的,再加上大气湍流等对信标光束的

**收稿日期**: 2011-03-03; **收到修改稿日期**: 2011-04-21

**基金项目**: 国家自然科学基金(60907006)资助课题。

**作者简介**: 沈宝良(1985-),男,硕士研究生,主要从事空间激光通信跟瞄系统仿真等方面的研究。

E-mail: shen-young@163.com

**导师简介**: 孙建锋(1978-),男,副研究员,硕士生导师,主要从事卫星激光通信和激光雷达等方面的研究。

E-mail: sunjianfeng@163.com(通信联系人)

影响,使得最终在接收端探测器上得到的不是理想的艾里斑,而是呈现为光学散斑形式的图样。又由于接收端位置探测器大小的有限性,使得最终探测器感受到的光斑质心与实际光斑质心不一定是重合的,在跟瞄过程中光斑动态平移时甚至有可能两者的平移情况并不能相互表征,即探测器感受到的光斑质心移动情况并不能准确实时地反映实际光斑质心的动态移动情况<sup>[1]</sup>。

为了研究时变湍流下动态平移光斑的定位精度和平移跟踪偏差,给实际实验提供参考依据,本文通过模拟仿真分析了时变湍流影响下,经大气传输的信标光束在探测器上所成光斑质心平移跟踪偏差的统计特性,以及光斑定位精度与其在探测器上位置的关系。

## 2 位置探测器探测光斑质心原理

位置探测器一般为电荷耦合器件(CCD)或者互补金属氧化物半导体(CMOS)器件,它是一种半导体器件,能够把光学影像转化为数字信号。本文中以 CCD 为例进行模拟仿真。CCD 光敏面上植入的微小光敏物质称为像素,一块 CCD 探测器上包含很多个这种大小一致、规则排列的像素,如图 1 所示。在利用 CCD 进行接收探测时,成像光斑打在 CCD 光敏面上,每个像素产生光生电荷,形成光电流,每个像素感受到的光功率可表示为  $a(i, j)$ 。则光斑在探测器上移动时,由于光斑内能量的分布不均匀性,每个像素感受到的光功率将发生变化。对于光斑质心,可以采用灰度重心算法公式

$$x = \frac{\sum_{(i,j) \in S} ia(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} a(i,j)}, \quad (1)$$

$$y = \frac{\sum_{(i,j) \in S} ja(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} a(i,j)}$$

进行计算。式中  $S$  表示 CCD 面积,  $a(i, j)$  为每个像

$a(1,1)$	$a(1,2)$	$a(1,3)$	$a(1,4)$	$a(1,5)$	$a(1,6)$	...			
$a(2,1)$	$a(2,2)$	$a(2,3)$							
$a(3,1)$									
$a(4,1)$									
$a(5,1)$					$a(i,j)$				
$\vdots$									

图 1 CCD 探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CCD detection

素感受到的光功率,  $(x, y)$  则为 CCD 感受到的光斑质心坐标。

这样,利用(1)式就可以很容易地求出入射信标光斑的质心位置。

## 3 光斑质心平移偏差

在实际情况下,由于大气湍流、衰减以及散射等原因引入了随机相位,使得发射的相干信号光波不仅能量出现了衰减,而且波面也发生了畸变,使得光斑内能量分布发生了改变,如图 2 所示。这里暂时先不考虑光波振幅衰减造成的能量损失,而只考虑大气湍流引入的随机相位变化。虽然大气湍流的随机扰动影响贯穿于整个传输路径,但为了方便起见,这里可以将传输路径细分成很多段,每一段的影响相当于一块随机相位屏,这样就可以将传输路径上大气扰动对光束的影响近似简化为多块甚至于一块随机相位屏对光束的影响,其等效示意图如图 3 所示<sup>[7~11]</sup>。

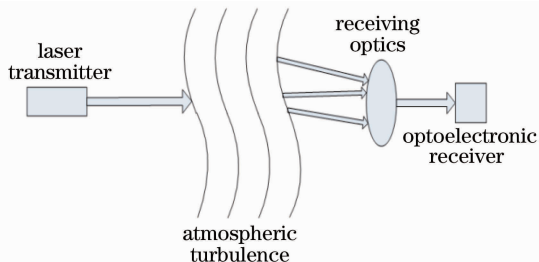


图 2 空间激光通信接收光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of receiving optical path during space laser communication

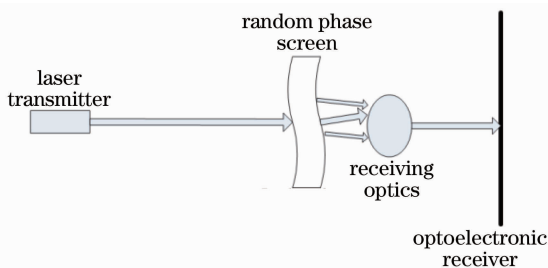


图 3 空间激光通信简化近似模型

Fig. 3 Simplified model of space laser communication

### 3.1 随机相位屏的构造

为了模拟时变湍流影响下动态平移光斑的光斑质心平移偏差,首先需要构造能体现大气湍流特性的随机相位屏。对于如何构造随机相位屏以及构造怎么样的随机相位屏这方面的讨论现在一般都是从 Kolmogorov 湍流理论条件出发的,假定湍流的功率谱密度都是符合 Kolmogorov 谱的,然后通过数值

模拟的方法来构造能近似体现湍流特性的随机相位屏。主要方法有逆傅里叶变换法、基于分形理论的协方差矩阵法以及泽尼克多项式法<sup>[12-18]</sup>。

本文采用改进了的逆傅里叶变换法,其中引入了低频子谐波信息的方法来解决逆傅里叶变换法不能体现大气湍流低频特性的问题。逆傅里叶变换法的基本思想是对一复高斯随机数矩阵用大气湍流的功率谱进行滤波,然后再进行逆傅里叶变换得到大气扰动的相位,这一过程可以表示为

$$\phi(\mathbf{r}) = \iint_{-\infty}^{+\infty} h(\mathbf{k}_r) \sqrt{F_\phi(k_r)} \exp(i\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}_r) d\mathbf{k}_r, \quad (2)$$

式中  $F_\phi(k_r) = 0.49r_0^{-5/3}(k_x^2 + k_y^2)^{-11/6}$ , 是大气折射

率起伏符合 Kolmogorov 谱的功率谱函数。 $\mathbf{r} = (x, y)$ ,  $h(\mathbf{k}_r)$  是方差为 1, 均值为 0 的复高斯随机数,  $\mathbf{k}_r = (k_x, k_y | k_z = 0)$ ,  $k_0 = 2\pi/L_0$ ,  $L_0$  为大气湍流外尺度大小, 一般为几十至几百米量级,  $r_0$  表示大气相干直径, 其大小可用来表示大气湍流强度<sup>[19, 20]</sup>。

整个随机相位屏的构造可以分成两步来进行。如果模拟的相位屏  $x$  方向和  $y$  方向的大小分别为  $G_x$  和  $G_y$ , 做傅里叶变换使得采样点数分别为  $N_x$  和  $N_y$ , 则相应的抽样间隔为  $\Delta x = G_x/N_x$  和  $\Delta y = G_y/N_y$ 。空间频率的定义为  $f_x = m' \Delta f_x$  和  $f_y = n' \Delta f_y$ , 其中  $\Delta f_x = 1/G_x$ ,  $\Delta f_y = 1/G_y$ 。则第一步先得到主相位屏的表达式为

$$\phi(m, n) = \sum_{m'=-N_x/2}^{N_x/2-1} \sum_{n'=-N_y/2}^{N_y/2-1} h(m', n') f(m', n') \exp\left[i2\pi\left(\frac{m'm}{N_x} + \frac{n'n}{N_y}\right)\right], \quad (3)$$

式中  $f(m', n') = \frac{2\pi}{\sqrt{G_x G_y}} \sqrt{0.00058} r_0^{-5/6} (f_x^2 + f_y^2)^{-11/2}$ ,  $h(m', n')$  为离散的白噪声过程, 可以表示为

$$h(m', n') = g(m', n') / \sqrt{\Delta k_x \Delta k_y}, \quad (4)$$

其中  $g(m', n') = g_{\text{real}}(m', n') + i g_{\text{imag}}(m', n')$ ,  $g_{\text{real}}(m', n')$  和  $g_{\text{imag}}(m', n')$  是均值为 0, 方差为 0.5 的高斯随机变量,  $\Delta k_x = 2\pi f_x = 2\pi/G_x$ ,  $\Delta k_y = 2\pi f_y = 2\pi/G_y$ 。

第二步, 引入低频子谐波的方法生成低频相位屏

$$\phi_{\text{LF}}(m_j, n_k) = \sum_{j'=-N'_x/2}^{N'_x/2-1} \sum_{k'=-N'_y/2}^{N'_y/2-1} \exp\left[i2\pi\left(\frac{j'j}{N_x} + \frac{k'k}{N_y}\right)\right] \beta(f_{x_{j'}}, f_{y_{k'}}), \quad (5)$$

式中

$$\beta(f_{x_{j'}}, f_{y_{k'}}) = \frac{2\pi}{\sqrt{N'_x N'_y G_x G_y}} h(f_{x_{j'}}, f_{y_{k'}}) \sqrt{0.00058 r_0^{-5/3} (f_{x_{j'}}^2 + f_{y_{k'}}^2)^{-11/6}},$$

$$f_{x_{j'}} = \frac{j'}{N'_x G_x}, \quad f_{y_{k'}} = \frac{k'}{N'_y G_y}, \quad m_j = j G_x, \quad n_k = k G_y, \quad N'_x = \frac{5L_0}{G_x}, \quad N'_y = \frac{5L_0}{G_y}.$$

将(3), (5)式两相位屏结合起来, 得到最终的相位屏表达式为

$$\phi_{\text{mod}}(m, n) = \phi(m, n) + \phi_{\text{LF}}(m_j, n_k), \quad (6)$$

$$(m_j = m, n_k = n)$$

通过上述操作, 就得到了符合 Kolmogorov 湍流功率谱的随机相位屏。

### 3.2 时变湍流过程的实现

根据 Taylor 冻结湍流假设, 湍流内部脉动速度远小于平均流动速度时, 湍流仿佛被冻结了一样, 以定常的速度平移, 也就是湍流内部是一个给定的状态<sup>[21]</sup>。则可以考虑到短曝光条件下湍流时变的实质是垂直于光波传输方向上大气湍流的运动, 因此可以将湍流的时变过程用相位屏与接收终端孔径之间的相对移动来近似代替, 如图 4 所示, 其中 1 表示信号发射端机, 4 表示接收端探测器, 虚线所画孔径

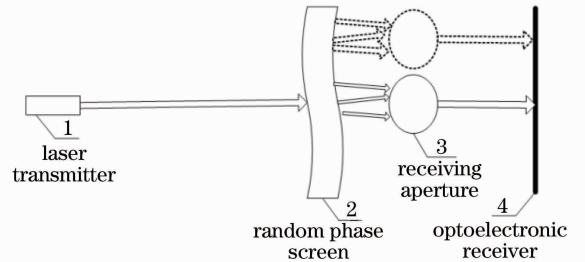


图 4 时变湍流的实现

Fig. 4 Realization of the time-dependent turbulence of relative to phase screen 2 moving after the receiving aperture 3.

### 3.3 模拟结果

大气相干直径  $r_0 = 0.1$  m ( $r_0$  越小表示湍流强度越大), 激光波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , 相位屏大小为  $1.25 \text{ m} \times 1.25 \text{ m}$ , 采样点数为  $257 \times 257$ , 采用 Kolmogorov 功率谱密度, 模拟得到的相位屏如图 5 所示。

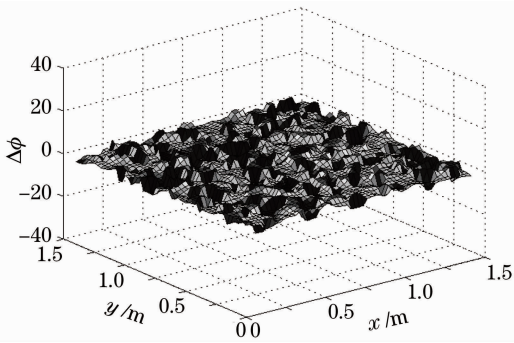


图 5 随机相位屏

Fig. 5 Realization of random phase screen

由于信标光从发射激光通信终端到接收激光通信终端,距离为数百千米至数万千米,光学上属于远场衍射,而远场下接收光斑取决于接收光学,因此这里进行光斑质心定位模拟时可以设定入射到随机相位屏上的信标光为平面波<sup>[22]</sup>。

经过随机相位屏的调制作用,最后在探测器上接收到的光斑能量随机分布,形成如图 6 所示的光学散斑(作为对比,图 7 则显示了无相位屏时的光斑图),对光斑质心的定位带来误差,从而影响光斑的动态平移探测感知,最终影响整个 APT 的精度。

这里考虑到时变湍流的随机性,采用多次仿真试验进行统计系统平均的方法来研究动态平移过程中光斑质心的平移跟踪偏差。模拟试验中,设定湍流强度、随机相位屏大小、发射的信标光,接收端接收孔径大小为 0.5 m, CCD 探测器大小为 101 pixel × 101 pixel,观察光斑质心在时变湍流影响下的平移偏差,进行 50 次模拟仿真统计得到了  $r_0$  分别为 0.05, 0.1 和 0.5 m 时光斑质心平移跟踪定位偏差与质心平移量之间的关系曲线,结果如图 8 所示。

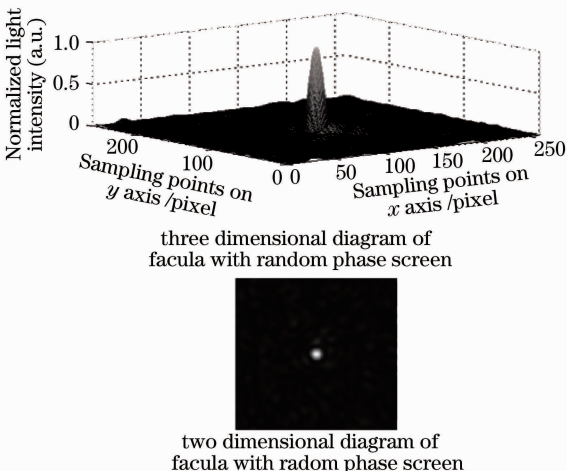


图 6 有相位屏时的光斑图

Fig. 6 Diagram of facula with random phase screen

而光斑质心平移定位偏差方差与光斑质心在 CCD 上的位置关系如图 9 所示。

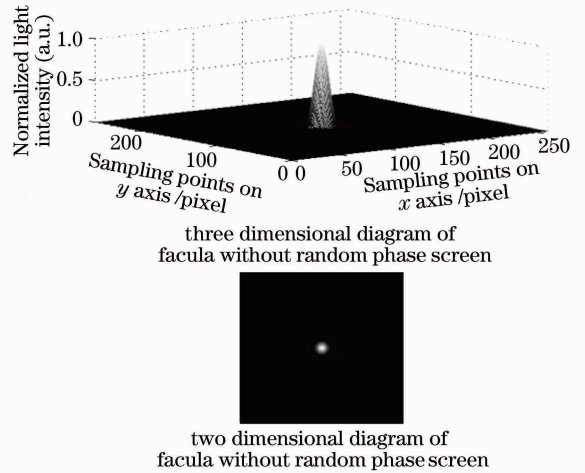


图 7 没有相位屏时的光斑图

Fig. 7 Diagram of facula without random phase screen

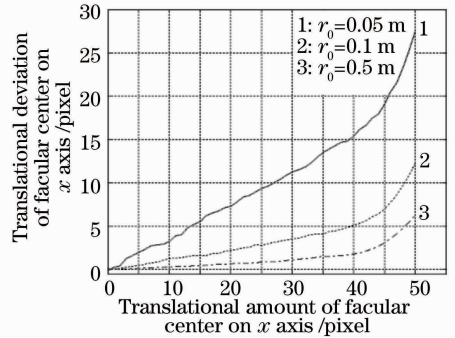


图 8 光斑质心平移偏差与质心平移量的关系

Fig. 8 Relation between the facular barycenter and translation deviation in  $x$  axis

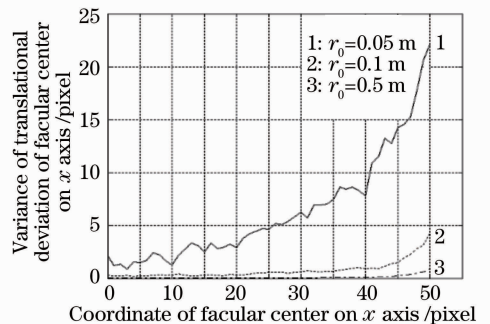


图 9 光斑质心平移偏差方差与质心在 CCD 上的位置关系  
Fig. 9 Relation between the facular barycenter in CCD and variance of translation deviation

由图 8,对比不同湍流强度下的 3 条曲线可以看到,光斑沿 CCD 探测器  $x$  轴方向动态移动时,光斑质心的实际平移量和 CCD 感受到的光斑质心平移量之间存在与大气湍流强度有关的跟踪偏差,湍流强度越大,该跟踪偏差越大。这是由于湍流强度

越大,对其中传播的光束的相位扰动越大,从而使得接收面上的光斑内能量分布越不均匀,增加了跟踪的不稳定性。观察同一湍流强度下的动态平移跟踪偏差曲线,可以看到光斑位于 CCD 探测器中心附近时,这一跟踪偏差几乎是呈线性的,而随着光斑逐渐远离 CCD 中心位置,其跟踪偏差迅速增大,几乎呈指数增长。

而由图 9 可知,在时变湍流影响下,CCD 感受到的光斑质心会围绕某一平衡位置做随机抖动,抖动越大,光斑平移跟踪偏差方差越大。对比图 9 中 3 条曲线,显而易见,湍流强度越大,光斑质心的定位精度越差,跟踪精度越低。而在同一湍流强度下,当光斑质心在 CCD 中心位置附近时,其定位精度较高,表征随机抖动的光斑定位偏差方差较小,一直维持在 1 pixel 以下。但当光斑整体动态平移至 CCD 边缘位置处时,平移跟踪偏差方差急剧增加,表明此时光斑定位的平移跟踪偏差较大。此时实际光斑质心已经处于探测器边缘或者在探测器之外了,而 CCD 探测器感受到的是其光敏面接收到的光场的质心。因此单从这个角度上来说,在 APT 过程中定位动态移动的光斑时,要通过一系列的控制措施,尽量使光斑不脱靶,此外也可以适当增加探测端 CCD 的尺寸,但在实际中还要考虑大 CCD 接收到的杂散光以及暗电流等也会增加。

## 4 结 论

在逆傅里叶变换法的基础上,通过引入低频子谐波的方法,构造了体现大气湍流特性的随机相位屏,利用随机相位屏和接收孔径之间的相对移动实现了时变湍流的近似模拟,并分析了不同强度时变湍流影响下光斑动态平移时探测器感受到的光斑质心与光斑实际质心之间的跟踪偏差、定位偏差与光斑在探测器上位置之间的关系,以及湍流强度对光斑质心定位精度的影响。模拟仿真结果分析表明,空间激光通信跟瞄过程中,受时变大气湍流的影响,光斑动态平移时信标光斑质心的实际移动距离与接收终端 CCD 探测器感受到的光斑质心移动距离并不一致,两者存在一个跟大气湍流强度成正比的跟踪偏差。在同一湍流强度下该跟踪偏差与光斑在 CCD 上的位置有关,当光斑处于 CCD 探测器中心位置附近时,跟踪偏差较小,随着光斑远离 CCD 中心位置,该跟踪偏差快速增大。同时模拟仿真发现,光斑质心的定位精度也与光斑在接收终端 CCD 探测器上的位置有关,当光斑位于 CCD 中心位置附近

时,定位精度较高,而当光斑处于 CCD 边缘位置时,其定位精度较低。并且光斑质心的定位精度与湍流强度有关,湍流强度越大,定位精度越差。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Liren. Laser communication in space. I. optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20  
刘立人. 卫星激光通信. I. 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 3~20
- 2 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Study four-quadrant detector in the free space laser communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2030~2034  
韩成, 白宝兴, 杨华民等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2030~2034
- 3 F. Cosson, P. Doubrere, E. Perez. Simulation model and on ground performances validation of the PAT system for Silex program[C]. *SPIE*, 1991, **1417**: 262~276
- 4 Yan Aimin, Zhou Yu, Sun Jianfeng *et al.*. Technology and progress of compound-axis pointing in satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 040601  
闫爱民, 周煜, 孙建锋等. 卫星激光通信复合轴光跟踪技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 040601
- 5 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 89~94  
韩成, 白宝兴, 杨华民等. 空地激光通信跟踪精度主要外界影响因素研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 89~94
- 6 Li Mingqiu, Li Hongzuo, Jiang Huilin *et al.*. Study on fine tracking robust control technology of space laser communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 87~91  
李明秋, 李洪作, 姜会林等. 空间激光通信精跟踪系统稳健控制技术研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(s2): 87~91
- 7 J. A. Fleck, J. R. Morris, M. D. Feit. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. *Appl. Phys. A*, 1972, **10**(2): 129~160
- 8 H.-X. Yan, S.-S. Li, D.-L. Zhang *et al.*. Numerical simulation of an adaptive optics system with laser propagation in the atmosphere[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(18): 3023~3031
- 9 L. C. Andrews, R. L. Philips, R. J. Sasiela *et al.*. Strehl ratio and scintillation theory for uplink Gaussian-beam waves: beam wander effects[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(7): 076001
- 10 F. Dios, J. Reolons, A. Rodriguez *et al.*. Temporal analysis of laser beam propagation in the atmosphere using computer-generated long phase screens[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2206~2220
- 11 H.-X. Yan, Hanling Wu, Shushan Li *et al.*. Cone effect in astronomical adaptive optics system investigated by a pure numerical simulation[C]. *SPIE*, 2005, **5903**: 59030U
- 12 N. Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(10): 1174~1180
- 13 R. G. Lane, A. Glindemann, J. C. Dainty. Simulation of Kolmogorov phase screen[J]. *Wave in Random Media*, 1992, **2**(3): 209~224
- 14 B. J. Herman, L. A. Strugala. Method for inclusion of low-frequency contributions in numerical representation of atmospheric turbulence[C]. *SPIE*, 1990, **1221**: 183~192
- 15 D. Alastair. Generating Kolmogorov phase screens for modeling optical turbulence[C]. *SPIE*, 2000, **4034**: 50~57
- 16 Jaime Reolons, Federico Dios. Accurate calculation of phase screens for the modeling of laser beam propagation through

- atmospheric turbulence[C]. *SPIE*, 2005, **5891**: 589107
- 17 E. M. Johansson, D. T. Gavel. Simulation of stellar speckle imaging[C]. *SPIE*, 1994, **2200**: 372~383
- 18 Cressida M. Harding, Rachel A. Johnston, Richard G. Lane. Fast simulation of Kolmogorov phase screen[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(11): 2161~2170
- 19 Hamid Hemmati. Deep Space Optical Communications [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 148~158
- 20 Zhang Yixin, Chi Zeying. Wave Propagation in the Atmosphere and Imaging [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 10~17
- 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传播与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. 10~17
- 21 G. I. Taylor. The spectrum of turbulence[J]. *Proc. R. Soc. London A*, 1938, **164**: 476~490
- 22 Liu Liren. Laser communications in space. II. test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155
- 刘立人. 卫星激光通信. II. 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 147~155