

# 星间光通信中球差和彗差对信号光远场特性的影响

杨玉强<sup>1,2</sup> 谭立英<sup>1</sup> 马 晶<sup>1</sup> 韩琦琦<sup>1</sup> 刘剑锋<sup>1</sup> 俞建杰<sup>1</sup> 杨 阳<sup>3</sup> 官莉莉<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001  
<sup>2</sup> 哈尔滨理工大学应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; <sup>3</sup> 哈尔滨电业局太平供电所, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要** 星间光通信中,波前畸变是影响信号光远场特性的主要因素。分析了球差和彗差对信号光远场分布、天线接收光功率的影响,引入了畸变衰减因子,给出了畸变衰减因子与波前畸变均方根(RMS)值的关系。理论分析和数值仿真结果表明,球差和彗差畸变越大,对天线接收功率的影响越大。在天线对准的条件下,当彗差和球差畸变均方根值分别约为  $0.120\lambda$  和  $0.135\lambda$  时,天线的接收功率为无畸变时的  $1/2$ 。彗差对天线接收功率的影响主要是峰值移动造成的,球差对天线接收功率的影响主要是次峰的增强造成的。

**关键词** 光通信; 远场特性; 接收光功率; 球差; 彗差

**中图分类号** TN929.13 **文献标识码** A

## Influence of Spherical Aberration and Coma on Far-Field Behavior of Signal Beam in Intersatellite Optical Communications

Yang Yuqiang<sup>1,2</sup> Tan Liying<sup>1</sup> Ma Jing<sup>1</sup> Han Qiqi<sup>1</sup> Liu Jianfeng<sup>1</sup> Yu Jianjie<sup>1</sup>  
Yang Yang<sup>3</sup> Gong Lili<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup> Institute of Application Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

<sup>3</sup> Taiping Administration of Power Supply in Harbin, Harbin, Heilongjiang 150000, China

**Abstract** In intersatellite communications, wave front aberration is main factor in affecting far-field behavior of signal beam. In this paper the influence of coma and spherical aberration on the far-field distribution and antenna receiving power is analyzed, in which aberration attenuation factor is introduced and the relation of it to root mean square (RMS) of wavefront aberration is given. The results show that the deeper coma and spherical aberration are, the heavier the influence on receiving power is. In the condition of the antennae being aligned correctly, receiving power becomes half of that for signal beam without aberration, when the values of root mean square for coma and spherical aberration are  $0.120\lambda$  and  $0.135\lambda$ , respectively. The influence of coma on receiving power is mainly caused by the moving of the intensity peak, and for spherical aberration it is the increasing of secondary intensity peak.

**Key words** optical communications; far-field behavior; receiving optical power; spherical aberration; coma

## 1 引 言

与微波通信相比,卫星光通信终端具有体积小、重量轻、通信容量大和保密性强等优点,近年来已成为通信领域研究的热点<sup>[1~7]</sup>。

在星间光通信中,信号光的远场特性决定了接收天线的接收光功率和输入信噪比,从而直接影响本端误码率和对准误差。由于卫星间的距离非常远,通常理想光束在接收平面上的光场可认为是平面波或高斯波<sup>[8]</sup>。但是,由于运行于轨道中的卫星

终端系统受周围环境的影响,如空间辐射、污染、温度不均匀等,特别是温度的不均匀性,严重影响了光学系统的性能,所以由发射机天线发射的激光光束通常都不是理想光束,而是具有一定波前误差的畸变光束。M. Toyoshima 等<sup>[9]</sup>利用泽尼克多项式描述信号光波前畸变,分析了波前畸变对对准偏差的影响。

本文根据卡塞格伦望远系统的特点,利用泽尼克多项式描述了像差畸变,分析了球差和彗差对信

**基金项目:** 哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

**作者简介:** 杨玉强(1977—),男,山东人,博士研究生,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: yqyang0@gmail.com

**导师简介:** 谭立英(1957—),男,黑龙江人,博士生导师,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: tanly@hit.edu.cn

号光远场分布和天线接收光功率,引入了畸变衰减因子,给出了畸变衰减因子与波前畸变均方根值的关系。

## 2 波前畸变描述

卫星光通信经反射式望远系统的信号光束可认

为是环状高斯光束。对于环状高斯光束的波前相位畸变可以用泽尼克多项式来描述<sup>[10]</sup>

$$\Phi(\rho, \epsilon, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=-n}^n \mu_l b_{nl} Z_n^l(\rho, \epsilon, \theta), \quad (1)$$

$$Z_n^l(\rho, \epsilon, \theta) = \sqrt{n+1} S_n^l(\rho, \epsilon) \exp(il\theta), \quad (2)$$

式中

$$S_n^l(\rho, \epsilon) = M_n^l \left[ R_n^l(\rho, \epsilon) - \sum_{i \geq 1}^{(n-|l|)/2} (n-2i+1) \langle R_n^l(\rho, \epsilon) S_{n-2i}^l(\rho, \epsilon) \rangle S_{n-2i}^l(\rho, \epsilon) \right], \quad (3)$$

$$R_n^l(\rho, \epsilon) = N_n^l \left[ R_n^l(\rho, \epsilon) - \sum_{i \geq 1}^{(n-|l|)/2} (n-2i+1) \langle R_n^l(\rho, \epsilon) S_{n-2i}^l(\rho, \epsilon) \rangle S_{n-2i}^l(\rho, \epsilon) \right], \quad (4)$$

$$R_n^l(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|l|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+l)/2-s]! [(n-l)/2-s]!} (\rho)^{n-2s}, \quad (5)$$

$\rho$  为无量纲变量,  $\epsilon$  为单位圆环的内圆半径,  $l$  为整数,  $n$  为非负整数, 且  $n - |l| \geq 0$  为偶数。

如果  $\Phi(r, \theta)$  表示发射平面上环状高斯光束的波前畸变函数, 光束的内外半径分别为  $R_2$  和  $R_1$ , 利用无量纲变量  $\rho = r/R_1$  和  $\epsilon = R_2/R_1$ ,  $\Phi(r, \theta)$  可以展开为

$$\Phi(R_1, R_2, \rho, \epsilon, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{l=-n}^n \mu_l b_{nl} Z_n^l(\rho, \epsilon, \theta). \quad (6)$$

球差和彗差为泽尼克多项式中的其中两项, 分别为

$$\Phi_s(\rho, \epsilon) = A \left[ \rho^4 - (1 - \epsilon^2) \rho^2 + (1 + 4\epsilon^2 + \epsilon^4) \right], \quad (7)$$

$$\Phi_c(\rho, \epsilon, \theta) = A \left( \rho^3 - \frac{2}{3} \frac{1 + \epsilon^2 + \epsilon^4}{1 + \epsilon^2} \rho \right) \cos \theta, \quad (8)$$

式中,  $A$  为常量。由(7)式和(8)式知, 球差畸变是旋转对称的, 与角度无关; 彗差畸变不具有对称性, 既与半径有关, 又与角度有关。

## 3 球差与彗差对信号光远场分布和天线接收光功率的影响

在星间光通信中, 发射和接收系统的坐标系如图 1 所示, 发射天线之后的平面为发射平面, 接收天线之前的平面为接收平面。发射平面上球差或彗差高斯光束可以表示为

$$\psi(\rho_0, \theta_0) = \psi_0 P(\rho_0, \theta_0) \exp(j\Phi), \quad (9)$$

$$\psi_0(\rho_0, \theta_0) = C \exp \left[ -\frac{\rho_0^2}{2\omega_0^2} - j \frac{k\rho_0^2}{2F} \right], \quad (10)$$

$$P(\rho_0, \theta_0) = \begin{cases} 1, & R_2 < \rho_0 < R_1 \\ 0, & \rho_0 < R_2 \text{ or } \rho_0 > R_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\psi_0$  为理想高斯光束在发射平面上的复振幅,  $C$  为常量,  $P(\rho_0, \theta_0)$  为孔径函数,  $F$  为发射平面上高斯光束的曲率半径,  $\omega_0$  为高斯光束的束腰半径,  $\Phi$  为球差或彗差畸变。

假设发射平面与接收平面间的距离为  $z_f$ , 根据夫朗禾费衍射积分理论, 接收平面上的光场分布为

$$U_{re}(\rho_1, \theta_1) = B \iint_{S_0} \psi(\rho_0, \theta_0) \exp \left[ -\frac{jk}{z_f} \rho_0 \rho_1 \cos(\theta_0 - \theta_1) \right] \rho_0 d\rho_0 d\theta_0, \quad (12)$$

$$B = \frac{1}{\lambda z_f} \exp \left( j \frac{k\rho_1^2}{2z_f} \right), \quad (13)$$

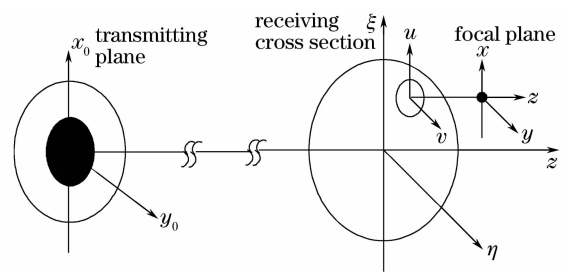


图 1 卫星间光通信中坐标系的定义

Fig. 1 Definition of coordinate system in intersatellite optical communication

利用泰勒级数把畸变项  $\exp(j\Phi)$  展开得

$$\exp(j\Phi) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(j\Phi)^k}{k!} \quad (14)$$

把(14)式代入(12)式得

$$U_{re}(\rho_1, \theta_1) = U_1(\rho_1, \theta_1) + U_2(\rho_1, \theta_1), \quad (15)$$

$$U_1(\rho_1, \theta_1) = B \iint_{S_0} \psi_0(\rho_0, \theta_0) \exp\left[-\frac{jk}{z_f} \rho_0 \rho_1 \cos(\theta_0 - \theta_1)\right] \rho_0 d\rho_0 d\theta_0, \quad (16)$$

$$U_2(\rho_1, \theta_1) = B \iint_{S_0} \psi_0(\rho_0, \theta_0) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(j\Phi)^k}{k!} \exp\left[-\frac{jk}{z_f} \rho_0 \rho_1 \cos(\theta_0 - \theta_1)\right] \rho_0 d\rho_0 d\theta_0, \quad (17)$$

式中  $U_1(\rho_1, \theta_1)$  为不存在相位畸变时接收平面上的光场复振幅分布,  $U_2(\rho_1, \theta_1)$  为畸变高斯光束和理想高斯光束在接收平面上的光场复振幅之差, 表示存在相位畸变时接收平面上光场复振幅的变化。

接收平面上光场强度分布为

$$I_{re}(\rho_1, \theta_1) = \frac{1}{\lambda^2 z_f^2} \left| \iint \psi(\rho_0, \theta_0) \exp\left[-\frac{jk}{z_f} \rho_0 \rho_1 \cos(\theta_0 - \theta_1)\right] \rho_0 d\rho_0 d\theta_0 \right|^2. \quad (18)$$

利用积分公式 
$$\int_0^{2\pi} \exp[i\alpha(x \cos \varphi + y \sin \varphi)] d\varphi = 2\pi J_0(\alpha \rho), \quad (x^2 + y^2 = \rho^2), \quad (19)$$

得球差高斯光束在接收平面上的强度分布为

$$I_{re}(\rho_1, \theta_1) = \frac{1}{\lambda^2 z_f^2} \left| \int_{K_2}^{K_1} \psi(\rho_0, \theta_0) J_0\left(-\frac{k\rho_0\rho_1}{z_f}\right) \rho_0 d\rho_0 \right|^2. \quad (20)$$

天线的接收功率为

$$\alpha_{RMS} = I_r(0, 0, RMS) / I_i(0, 0). \quad (25)$$

$$P_{re} = \iint_S I_{re}(\rho_1, \theta_1) ds, \quad (21)$$

式中  $S$  为天线的接收面积。由于星间光通信中发射端和接收端的距离非常远, 即使最近的低轨卫星与低轨卫星间的距离也在几千千米以上, 此时接收平面上光束束腰远远大于天线的接收口径, 所以接收天线的接收光功率可表示为

$$P_{re} = I_{re}(\rho_j, \theta_j) S, \quad (22)$$

式中  $(\rho_j, \theta_j)$  为天线口径中心坐标。由(22)式知, 天线的接收光功率正比于天线中心光强与天线口径面积。

定义畸变衰减因子为

$$\alpha = 1 - I_r(\rho_1, \theta_1) / I_0(0, 0), \quad (23)$$

式中  $I_0(0, 0)$  为无畸变时接收平面中心光强。由定义可知, 畸变衰减因子与天线的接收功率成反比, 即畸变衰减因子越大, 天线接收到的功率越少。以波前畸变均方根 (RMS) 值表示球差和彗差的畸变程度, 则畸变衰减因子应为 RMS 的函数, 表示为

$$\alpha_{RMS} = I_r(\rho_1, \theta_1, RMS) / I_0(0, 0). \quad (24)$$

当发射和接收天线对准时 (接收天线位于接收平面中心处), 畸变衰减因子为

## 4 数值计算与分析

为分析光学系统中球差与彗差对信号光远场分布、接收光功率以及通信误码率的影响, 本文以中继卫星间通信为例, 利用以上理论分析模型进行了数值仿真。计算参量如下: 卫星光学终端所用激光器的波长为  $\lambda=800$  nm, 发射功率为 100 mW, 光学终端发射天线的内外口径分别为 4 mm 和 500 mm, 中继卫星间的通信距离为 40000 km。

图 2 为彗差畸变均方根值分别为  $0, 0.1\lambda, 0.2\lambda, 0.3\lambda$  时, 天线接收光功率分布和对应的等高线分布。由图 2 可知, 彗差存在条件下, 天线接收光功率分布呈现非对称性, 且彗差畸变越大, 天线接收功率峰值越小。图 2 还表明, 彗差存在时天线接收光功率峰值位置偏离接收平面中心位置, 并且彗差越大, 偏离越远。

图 3 为球差畸变均方根值分别为  $0, 0.1\lambda, 0.2\lambda, 0.3\lambda$  时, 天线接收光功率分布和对应的等高线分布。由图 3 可知, 随着球差畸变的增大, 天线接收光功率的主峰逐渐减弱, 而次峰逐渐增强, 甚至可增大到与主峰相比拟, 但其分布仍保持其球对称性。

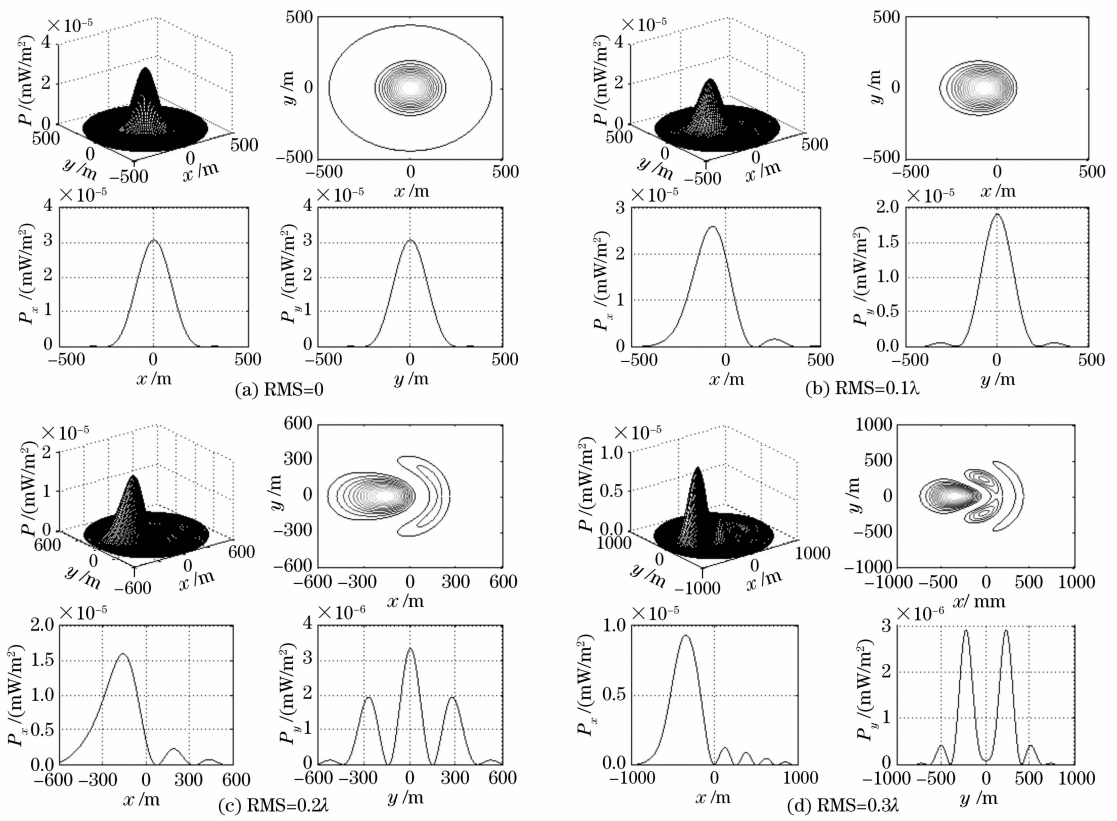


图 2 彗差存在条件下天线的接收光功率及其对应的等高线分布

Fig. 2 Receiving power and contour line distribution of antenna for signal beam with coma

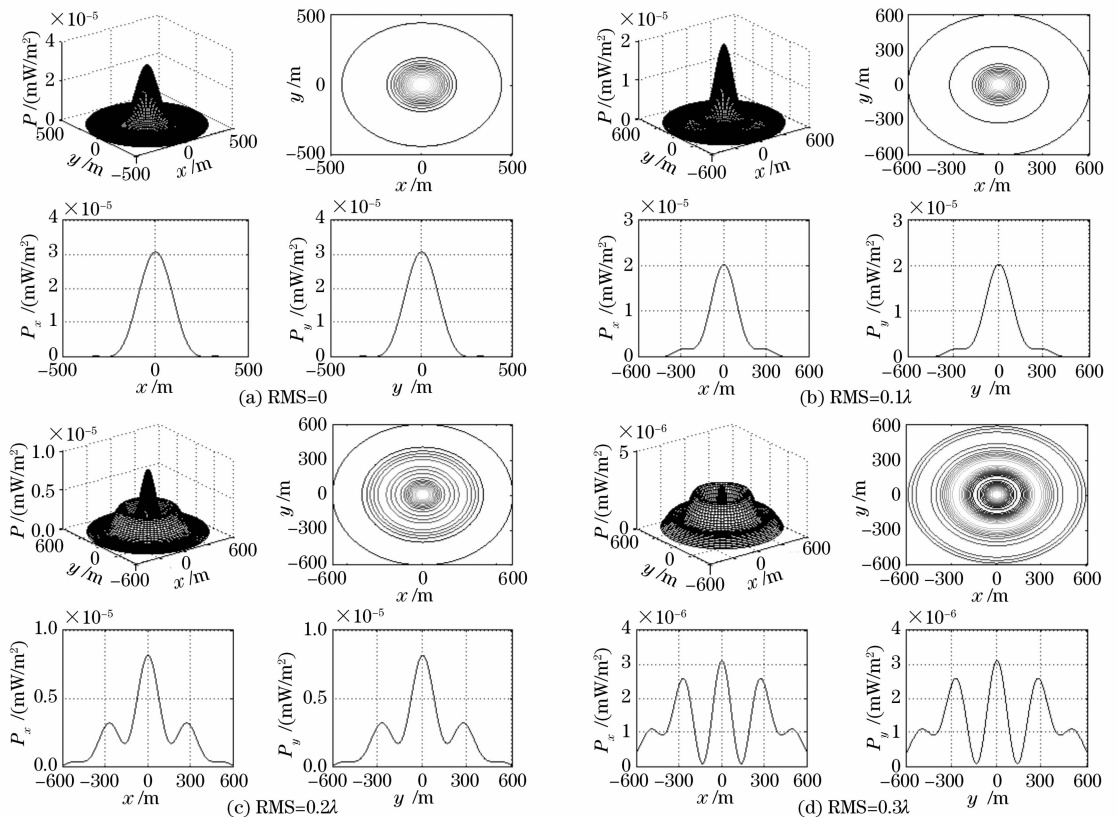


图 3 球差存在条件下天线的接收光功率及其对应的等高线分布

Fig. 3 Receiving power and contour line distribution of antenna for signal beam with spherical aberration

为进一步分析球差和彗差对信号光远场特性的影响,图4给出了天线对准条件下,畸变衰减因子 $\alpha$ 和天线接收光功率随畸变均方根值的变化曲线。由图4可知,天线对准条件下,随球差和彗差畸变均方

根值的逐渐增大,天线接收到的功率逐渐减少,功率衰减比逐渐增大。结合图2和图3可知,彗差对天线接收功率的影响主要是峰值移动造成的,球差对天线接收功率的影响主要是次峰的增强造成的。

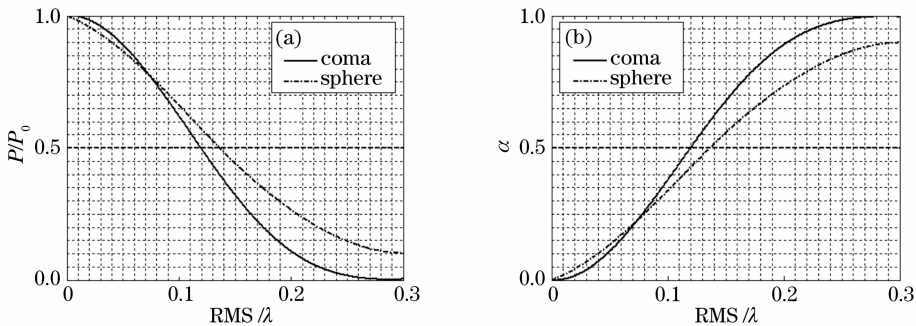


图4 对准条件下天线接收功率(a)和畸变衰减因子(b)随畸变均方根值的变化关系

Fig. 4 Receiving power and aberration attenuation factor to root mean square with antennae being aligned correctly

## 5 结 论

根据卡塞格伦望远系统的特点,利用泽尼克多项式描述波前畸变,分析了球差和彗差对信号光远场分布和天线接收光功率的影响,引入了畸变衰减因子,给出了畸变衰减因子与波前畸变均方根值之间的关系。结果表明,畸变越大,对天线接收功率的影响越大。天线对准条件下,当彗差和球差畸变均方根值分别约为 $0.12\lambda$ 、 $0.135\lambda$ 时,天线的接收功率降为无畸变时的一半。彗差对天线接收功率的影响主要是峰值移动造成的,球差对天线接收功率的影响主要是次峰的增强造成的。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Yunliang, Yu Siyuan, Ma Jing *et al.*. Simulation and optimization of multi-field scanning acquisition in intersatellite optical communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 975~978  
陈云亮,于思源,马晶等. 卫星间光通信中多场扫描捕获的仿真优化[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 975~978
- 2 Wang Jianmin, Tang Junxiong, Sun Dongxi *et al.*. Study on the uniform beacon used for the free space laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 7~10  
王建民,汤俊雄,孙东喜等. 卫星激光通信均匀信标光的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 7~10
- 3 Takashi Jono, Yoshihisa Takayama, Nobuhiro Kura *et al.*. OICETS on-orbit laser communication experiments[C]. *SPIE*,

2006, **6105**: 13~24

- 4 Ding Tao, Xu Guoliang, Zhang Xuping *et al.*. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 499~502  
丁涛,许国良,张旭平等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 499~502
- 5 Yang Changqi, Jiang Wenhan, Rao Changhui. Impact of aperture averaging on bit error rate for free space optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 212~218  
杨昌旗,姜文汉,饶长辉. 孔径平均对自由空间光通信误码率的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 212~218
- 6 Yu Siyuan, Han Qiqi, Ma Jing *et al.*. Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication terminal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 67~71  
于思源,韩琦琦,马晶等. 卫星光通信终端CCD成像光斑弥散圆尺寸选择[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 67~71
- 7 Wei Lu, Liren Liu, Jianfeng Sun. Variation analysis of turbulence resistance and angular spreading for partially coherent beam in turbulence[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7): 373~375
- 8 Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1166~1172  
梁波,朱海,陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1166~1172
- 9 Morio Toyoshima, Nobuhiro Takahashi, Takashi Jono *et al.*. Mutual alignment errors due to the variation of wave-front aberrations in a free-space laser communication link[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(11): 592~602
- 10 Virendra N. Mahajan. Zernike annular polynomials for imaging systems with annular pupils[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(1): 75~85