

# 微弧度量级远场发散角光束发射系统的设计与实现

况耀武<sup>1,2</sup>, 何志平<sup>1</sup>, 袁立银<sup>1</sup>, 张亮<sup>1</sup>, 舒嵘<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 建立了发射光束通过带有波像差的望远镜系统后的远场光斑分布数学模型, 采用数值计算, 结合 Monte Carlo 方法分析了波像差方均根(RMS)值对发射光束远场发散角的影响, 据此确定望远镜波像差的容差, 以实现特定发射光束的远场发散角。结果表明: 对于采用偏轴发射方案的激光通信系统, 当望远镜的波像差 RMS 值优于  $0.13\lambda$  ( $\lambda$  为光束的波长) 时, 发射光束远场发散角小于  $10 \mu\text{rad}$ , 当 RMS 值小于  $0.2\lambda$  时, 发射光束远场发散角小于  $16.2 \mu\text{rad}$ , 且仍有 60% 的概率小于  $10 \mu\text{rad}$ 。在实验室中, 不同温度下望远镜波像差及其对应的发射光束远场发散角的测试结果很好地验证了以上分析结果。

**关键词** 光通信; 激光传输; 远场发散角; Zernike 多项式; 激光通信

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0605004

## Design and Development of Beam Transmitting System with Far-Field Beam Divergence Angle of Micro-Radian Dimension

Kuang Yaowu<sup>1,2</sup>, He Zhiping<sup>1</sup>, Yuan Liyin<sup>1</sup>, Zhang Liang<sup>1</sup>, Shu Rong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A mathematical model of the far-field beam distribution is built after the transmitted beam passes through the telescope with wave-front error. The effect of root mean square (RMS) value of wave-front error on the divergence angle of the transmitted beam is analyzed by numerical calculation combined with Monte Carlo method. Based on this, the tolerance of the telescope wave-front error required by the far-field divergence angle of the transmitted beam is determined. The analysis results show that for the laser communication system which the transmitted beam is off-axis on the telescope pupil, the far-field divergence angle is smaller than  $10 \mu\text{rad}$  when the RMS of wave-front error is smaller than  $0.13\lambda$  ( $\lambda$  is the light wavelength). The far-field divergence angle is smaller than  $16.2 \mu\text{rad}$  when the RMS is smaller than  $0.2\lambda$  and the probability of the divergence angle smaller than  $10 \mu\text{rad}$  is 60%. The testing results of the wave-front errors of the telescope at different temperatures and the corresponding far-field divergence angles of the transmitted beams are well coincided with the analysis results.

**Key words** optical communications; laser transmission; far-field divergence angle; Zernike polynomials; laser communication

**OCIS codes** 140.3295; 140.3460; 260.1960

## 1 引 言

在远距离自由空间激光通信系统中, 发射光束

的远场发散角是一个关键性能指标。对于大功耗等资源严重受限的星载激光通信系统来说, 压缩通信光束远场发散角至微弧度量级对于提高激光通信系

收稿日期: 2017-12-08; 收到修改稿日期: 2018-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(61302181)

作者简介: 况耀武(1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事光学系统设计仿真方面的研究。

E-mail: kyw0104@163.com

\* 通信联系人。E-mail: shurong@mail.sitp.ac.cn

统数据传输效率,降低通信光发射功率以致降低系统功耗具有重要意义。当前国际上在轨运行的典型激光通信系统的通信光束远场发散角均在  $15 \mu\text{rad}$  以下,其中最小的为欧洲 SILEX (Semi-Conductor Intersatellite Link Experiment) 系统,通信光束远场发散角为  $8 \mu\text{rad}$  (以光斑质心为中心包围能量占总能量 86.5% 时)<sup>[1-4]</sup>。若要实现微弧度量级的激光光束发散角,通常要求发射光学系统的波像差达到衍射极限,但是受限于热力变形等因素的影响,大口径光学系统通常会产生不规则波像差,从而导致远场光束分布发生不可预知的变化<sup>[5]</sup>。因此分析光学系统波像差对激光光束远场分布的影响对于在工程上实现微弧度量级的极窄发散角光束具有重要意义。

学者们针对光学系统波像差对激光光束远场分布的影响均做过相关的研究,如日本宇航局的 Morio 等,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Sun 等以及哈尔滨工业大学的 Tan 等<sup>[6-9]</sup>,但研究大多集中于波像差对光束远场指向分布的影响,未分析激光光束远场发散角。刘宏展等<sup>[10]</sup>对有相位变化的高斯光束远场发散度进行了理论分析,但是所用相位变化模型局限于特定形状和大小的局部波面变形,其代表性不足,对工程应用的指导意义有限。

本文以光束远场衍射传输模型为基础,通过 Zernike 多项式建立了高斯光束远场分布与发射光学系统波像差之间的定量关系,采用 Monte Carlo 分析方法对光学系统波像差与激光通信光束远场发

散角之间的定量关系进行深入分析。分析结果不仅可用于评估激光传输光学系统受热力环境的影响,还可在工程研制初期对光学系统波像差的容差提出要求。所用方法可广泛适用于各种激光传输控制光学系统的设计仿真和研制,具有较强的工程实用性。

## 2 数学模型

实际的望远镜光学系统并不理想,光学加工误差、装调误差和光机系统受环境影响导致的系统性能退化等因素都可能引入波像差。令发射光学系统的波像差为  $W(r, \varphi)$ , 其作用相当于在光学系统出瞳面上引入一个额外的相位调制项  $\exp[ikW(r, \varphi)]$ , 光束传输模型如图 1 所示。图 1 中  $k$  为真空中的波数,  $r$  和  $r_1$  分别为光学系统出瞳面和观察面光场中任意点距极坐标原点的距离,  $\varphi$  和  $\varphi_1$  分别为光学系统出瞳面和观察面光场中任意点与极坐标横轴的夹角,  $\Sigma$  为发射光学系统出瞳面,  $R$  为发射光学系统出瞳半径,  $U_e$  为带有波像差的发射光学系统出瞳处的光场分布,  $U_r$  为观察面上远场夫琅禾费衍射光场分布,  $a$  为出射高斯光束在出瞳面处的偏轴量,  $w$  为腰斑半径,  $f$  为模拟远场的平行光管焦距。以望远镜出瞳中心为坐标原点, 带有波像差的发射光学系统出瞳处的光场分布可表示为

$$U_e(r_1, \varphi_1) = \sqrt{\frac{2}{\pi w^2}} \exp\left[-\frac{(r_1 \cos \varphi_1)^2 + (r_1 \sin \varphi_1 + a)^2}{w^2}\right] \cdot \exp[ikW(r, \varphi)]. \quad (1)$$

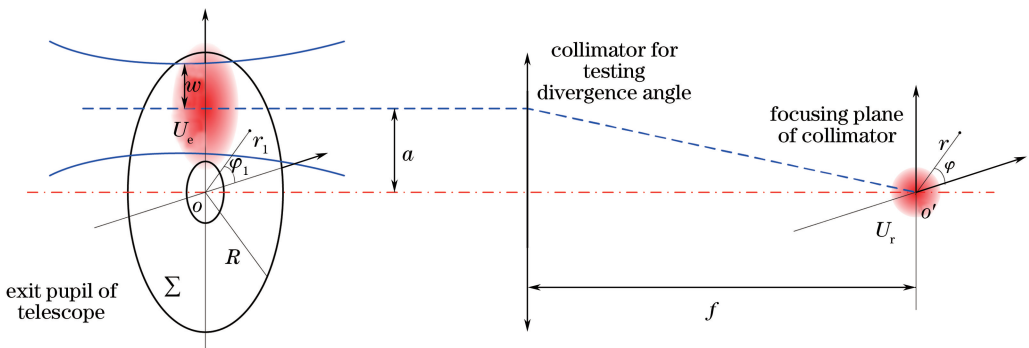


图 1 光束传输模型

Fig. 1 Layout of beam transmission model

为便于分析,假定通信光束束腰位于望远镜出射光瞳,且认为通信终端间的距离无穷远,高斯光束等相位面为平面,因此在高斯光场分布中可不考虑相位因子。以焦距为  $f$  的平行光管来模拟光束远

场特性,令  $A = \sqrt{\frac{2}{\pi w^2}} \frac{1}{i\lambda f} \exp\left(-\frac{a^2}{w^2}\right)$ , 定义角半径  $\theta = \frac{r}{f}$ , 则观察面上远场夫琅禾费衍射光场分布为

$$U_r(\theta, \varphi) = A \cdot \int_{aR}^R \exp\left(-\frac{r_1^2}{\omega^2}\right) \times r_1 \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{2ar_1 \sin \varphi_1}{\omega^2} + ikW(r, \varphi)\right] \cdot \exp[-ik\theta r_1 \cos(\varphi_1 - \varphi)] d\varphi_1 dr_1, \quad (2)$$

式中： $\alpha$  为遮拦比。

光强分布为

$$I_r(\theta, \varphi) = |U_r(\theta, \varphi)|^2 = A^2 \left| \int_{aR}^R \exp\left(-\frac{r_1^2}{\omega^2}\right) \times r_1 \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{2ar_1 \sin \varphi_1}{\omega^2} + ikW(r, \varphi)\right] \cdot \exp[-ik\theta r_1 \cos(\varphi_1 - \varphi)] d\varphi_1 dr_1 \right|^2. \quad (3)$$

波像差  $W(r_1, \varphi_1)$  可用 36 项的 Fringe Zernike

表 1 Fringe Zernike 多项式

Table 1 Fringe Zernike polynomials

Number	Zernike polynomial	Aberration type
1	1	Piston (constant)
2	$\rho \cos \theta$	Distortion-tilt ( $x$ -axis)
3	$\rho \sin \theta$	Distortion-tilt ( $y$ -axis)
4	$2\rho^2 - 1$	Defocus-field curvature
5	$\rho^2 \cos(2\theta)$	Astigmatism, primary (axis at $0^\circ$ or $90^\circ$ )
6	$\rho^2 \sin(2\theta)$	Astigmatism, primary (axis at $\pm 45^\circ$ )
7	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	Coma, primary ( $x$ -axis)
8	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	Coma, primary ( $y$ -axis)
9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Spherical aberration, primary
10	$\rho^3 \cos(3\theta)$	Trefoil, primary ( $x$ -axis)
11	$\rho^3 \sin(3\theta)$	Trefoil, primary ( $y$ -axis)
12	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos(2\theta)$	Astigmatism, secondary (axis at $0^\circ$ or $90^\circ$ )
13	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin(2\theta)$	Astigmatism, secondary (axis at $\pm 45^\circ$ )
14	$(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \cos \theta$	Coma, secondary ( $x$ -axis)
15	$(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \sin \theta$	Coma, secondary ( $y$ -axis)
16	$20\rho^5 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$	Spherical aberration, secondary

根据 Zernike 多项式的定义可以建立 Zernike 系数与波像差方均根(RMS)值的对应关系,采用随机算法生成组合 RMS 值为特定大小的 Zernike 系数  $(a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ ,系统波像差  $W(r_1, \varphi_1)$  可以表示为

$$W(r_1, \varphi_1) = \sum_{i=1}^n a_i Z_i, \quad (4)$$

式中： $Z_i$  为第  $i$  项 Zernike 像差项,具体表达式如表 1 所示; $a_i$  为第  $i$  项 Zernike 像差对应的系数。将 (4) 式代入 (3) 式中即可将远场光强分布用具体的 Zernike 系数表示,对 (3) 式进行数值计算即可分析当望远镜带有特定大小的波像差 RMS 值时发射光束的远场特性。

### 3 激光通信系统发射光路设计

以一个实际研制的星载激光通信系统为例,通

多项式表示,多项式的阶数越高,对应的空间频率越大,对系统波像差的贡献越小。高阶像差通常为光学加工的面型误差,一般为光学镜面加工完成后的固有属性,在系统使用过程中不易随着温度和力学条件的变化而变化。最低阶的倾斜和离焦项则易随着温度和力学(重力)条件的变化而变化,离焦和球差一般是由望远镜次镜轴向偏差引起,初级慧差和像散通常由光学镜面的装夹应力、光学系统失调或镜面热变形等因素导致。一般而言,前 16 项 Fringe Zernike 多项式已足以表达光学系统中由于装调误差、结构变形和热变形等因素引入的波像差退化。前 16 项 Fringe Zernike 多项式如表 1 所示。

信波长为 810 nm,望远镜采用卡塞格林式系统。考虑到出射光束为高斯分布,为避免次镜遮挡引起的能量损失,激光发射光束采用偏轴发射的方案,其光路模型如图 2 所示。

通信光经过准直镜准直后依次通过一级扩束镜

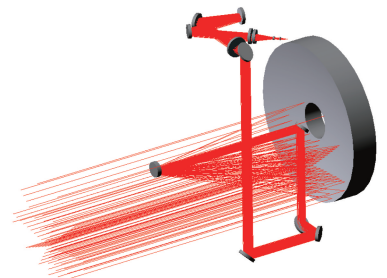


图 2 810 nm 通信光发射光路模型

Fig. 2 Optical path model of communication beam transmitter at 810 nm

和主望远镜扩束至  $7 \mu\text{rad}$  左右出射,其中一级扩束镜扩束倍率为  $4\times$ ,主望远镜扩束倍率为  $12\times$ 。由于光束在主望远镜上为偏轴发射,受望远镜口径限制会出现孔径切趾效应,使得远场光束分布略呈椭

圆形且远场发散角相比理论值略有增大。图 3 为通信光束在望远镜出瞳上的投影和采用 CODE V 软件模拟的  $810 \text{ nm}$  光束偏轴发射情况下的远场光斑分布,图中  $\phi$  为直径。

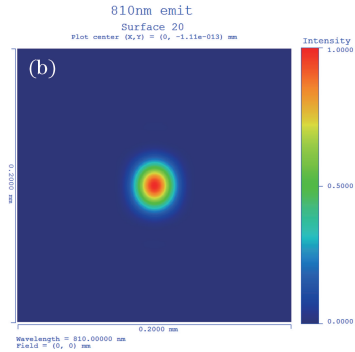
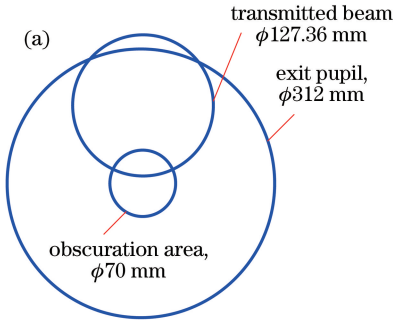


图 3 (a)偏轴发射时光斑投影;(b) CODE V 软件模拟远场光斑分布

Fig. 3 (a) Projection of off-axis transmitted beam on the pupil; (b) far-field beam pattern simulated by CODE V

#### 4 望远镜像差对远场发散角的影响分析

对于上述星载激光通信系统进行仿真分析,涉及到的参数如表 2 所示。

定义通信光远场发散角为以光斑质心为中心包围能量占总能量  $86.5\%$  时对应的角直径。当波像差 RMS 值在  $0\sim 0.2$  波长范围内变化时,不同 Zernike 项情况下量子光远场发散角随波像差 RMS 值变化

规律如图 4 所示。

表 2 星载激光通信系统参数

Table 2 Parameters of space laser communication system

R					
number /	$\tau$ / mm	$\alpha$	$a$ / mm	$\lambda$ / nm	$f$ / mm
156	63.28	0.225	92.4	810	810

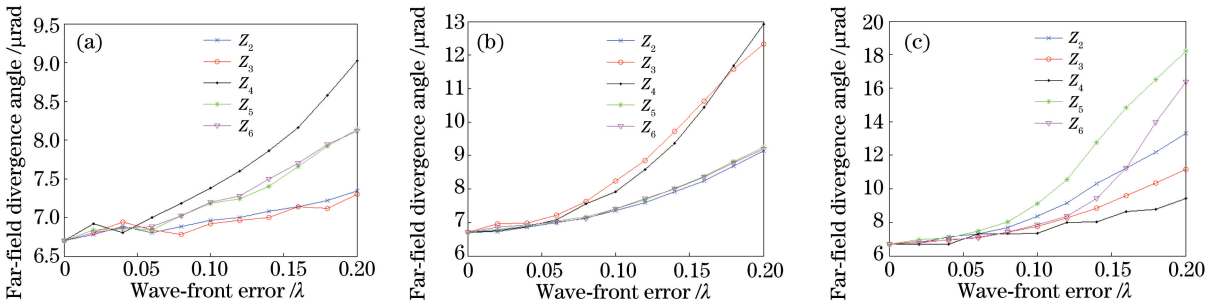


图 4 不同 Zernike 像差项对远场发散角的影响。(a)  $Z_2\sim Z_7$ ;(b)  $Z_8\sim Z_{11}$ ;(c)  $Z_{12}\sim Z_{16}$

Fig. 4 Far-field divergence angle versus wave-front error influenced by different Zernike polynomials.

(a)  $Z_2\sim Z_7$ ; (b)  $Z_8\sim Z_{11}$ ; (c)  $Z_{12}\sim Z_{16}$

当像差 RMS 值在  $0\sim 0.2$  波长范围内变化时,分析以上数据可得出如下结论:

1) 不论何种像差,光束远场发散角均随波像差 RMS 的增大而增大,且高阶像差的影响普遍大于低阶像差。

2) 望远镜 Y 方向慧差和  $90^\circ$  方向像散对通信光束远场分布的影响是最大的,这是由于光束在望远镜上为偏轴发射。此外,球差和离焦对远场分布的影响也较大。

3) 考虑仅存在单项波像差,当波像差 RMS 值

小于  $0.10$  波长时,可确保通信光束远场发散角在理想情况下的  $1.2$  倍以内。

实际望远镜系统装调残差和热力变形引入的波像差通常是由多种像差组合而成。采用 Monte Carlo 分析方法对光束远场发散角和望远镜系统波像差的关系进行分析,随机生成  $3000$  组  $Z_1\sim Z_{16}$  对应的 Zernike 系数  $(a_1, a_2, \dots, a_{16})^T$ ,代入(3)式和(4)式中进行数值积分。根据上述远场发散角的定义,给出远场发散角与系统波像差的统计分布图和系统带有固定数值的波像差时的概率分布图,分别如图 5 和图 6 所示。

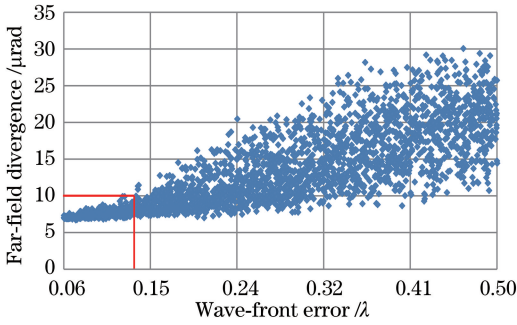


图 5 通信光束远场发散角的统计分布

Fig. 5 Statistical distribution of far-field divergence angle of communication laser beam

分析上述结果可知,当系统波像差 RMS 值在  $0.13\lambda$  以内时,可确保通信光束远场发散角小于  $10 \mu\text{rad}$ ;当波像差 RMS 值小于  $0.15\lambda$  时,远场发散角小于  $10 \mu\text{rad}$  的概率在 90% 以上,小于  $11 \mu\text{rad}$  的概率为 100%;当波像差 RMS 值小于  $0.2\lambda$  时,远场发散角小于  $10 \mu\text{rad}$  的概率为 60%,最大不超过  $16.2 \mu\text{rad}$ 。

## 5 通信光束远场发散角测试验证

上述激光通信系统主望远镜装配完成后,在实

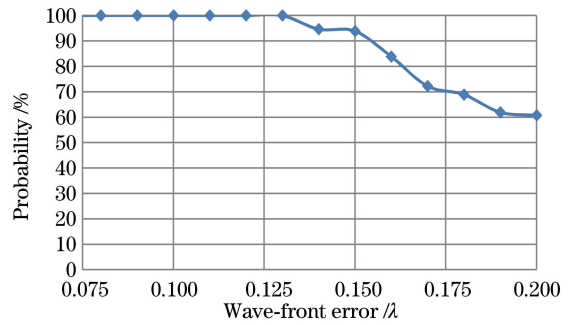


图 6 不同波像差大小时远场发散角小于  $10 \mu\text{rad}$  的概率分布曲线

Fig. 6 Probability of far-field divergence angle under  $10 \mu\text{rad}$  versus wave-front error

验室环境下通过温控仪对不同温度下的波像差进行测试,结果如图 7 所示。3 个温度下波像差测试结果分别为  $0.075\lambda$ 、 $0.124\lambda$  和  $0.198\lambda$ ,其中  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,转换为  $\lambda = 810 \text{ nm}$  时分别为  $0.059\lambda$ 、 $0.097\lambda$  和  $0.155\lambda$ 。

在激光通信系统整机集成完成后,采用温控仪对不同温度下的通信光远场发散角进行测试,在上述 3 个不同温度下的远场发散角分别为  $(7 \times 8) \mu\text{rad}$ 、 $(9 \times 10) \mu\text{rad}$  和  $(9 \times 11) \mu\text{rad}$ ,很好地吻合了第 4 节中的分析结果,结果如图 8 所示。

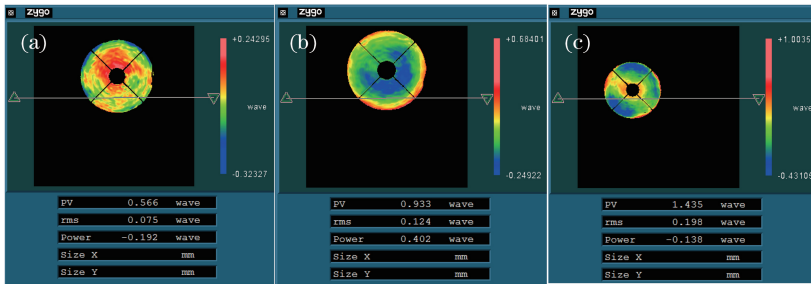


图 7 不同温度下望远镜波像差测试结果。(a)  $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (c)  $22.5 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 7 RMS wave-front errors of telescope under different temperatures. (a)  $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (c)  $22.5 \text{ }^\circ\text{C}$

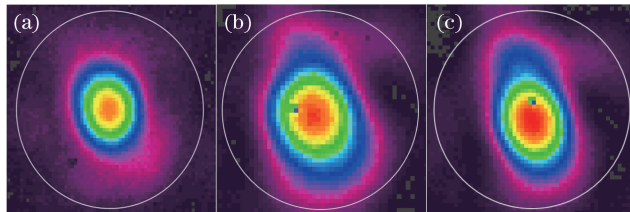


图 8 集成后的激光通信系统在不同温度下远场发散角测试结果。(a)  $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (c)  $22.5 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 8 Far-field divergence angle testing results of transmitted beam for integrated laser communication system under different temperatures. (a)  $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (c)  $22.5 \text{ }^\circ\text{C}$

## 6 结 论

基于 Zernike 像差理论和夫琅禾费衍射传输理

论,建立了激光通信光束通过带有波像差的望远镜系统后的远场光斑分布数学模型,采用数值计算,结合 Monte Carlo 方法分析了发射望远镜波像差

RMS 值大小对通信光束远场发散角的影响。结果表明,对于所研制的偏轴发射激光通信系统,当望远镜系统的波像差 RMS 值小于  $0.13\lambda$  时可确保通信光束的远场发散角小于  $10 \mu\text{rad}$ ;当波像差 RMS 值小于  $0.2\lambda$  时,远场发散角仍有较大概率小于  $10 \mu\text{rad}$ 。对不同温度下望远镜波像差的测试结果和相应温度下光束远场发散角的测试结果很好地验证了模拟分析结果。本文所提出的方法不仅可对激光发射望远镜的波像差提出容差要求,还可预测不同条件下激光发射光束的远场特性,对于远场发散角为  $10 \mu\text{rad}$  以下的极窄光束激光发射系统的研制具有重要意义,并且对激光聚焦等激光传输与控制的光学系统研制具有较大的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Romba J, Sodnik Z, Reyes M, *et al.* ESA' s bidirectional space-to-ground laser communication experiments[C]. SPIE, 2004, 5550: 287-299.
- [2] Toyoshima M, Takizawa K, Kuri T, *et al.* Ground-to-OICETS laser communication experiments [C]. SPIE, 2006, 6304: 63040B.
- [3] Biswas A, Kovalik J M, Wright M W, *et al.* LLCD operations using the optical communications telescope laboratory ( OCTL ) [ C ]. SPIE, 2014, 8971: 89710X.
- [4] Yu S, Ma Z, Wu F, *et al.* Overview and trend of steady tracking in free-space optical communication links[C]. SPIE, 2015, 9521: 95210N.
- [5] Yao C, Wang H, Zhang Z, *et al.* Wave front error modeling and control method for large aperture optical unit in high power solid-state laser[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0714003.
- 姚超, 王辉, 张政, 等. 高功率固体激光器中大口径光学器件波前误差的建模及控制方法[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0714003.
- [6] Morio T, Nobuhiro T, Takashi J, *et al.* Mutual alignment errors due to the variation of wave-front aberrations in a free-space laser communication link [J]. Optics Express, 2001, 9(11): 593-602.
- [7] Sun J F, Liu L R, Yun M J, *et al.* Mutual alignment errors due to wave-front aberrations in intersatellite laser communications[J]. Applied Optics, 2005, 44(23): 4953-4958.
- [8] Tan L Y, Yang Y Q, Ma J, *et al.* Pointing and tracking errors due to localized deformation in intersatellite laser communication links [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13372-13380.
- [9] Mu J, Zhou K N, Wang X, *et al.* Effect of wavefront distortion on beam pointing detection in coherent combination of large aperture beams [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0605001.
- 母杰, 周凯南, 王道, 等. 波前畸变对大口径光束相干合成中光束指向探测的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0605001.
- [10] Liu H Z, Huang X G. Analysis of far-field divergence of a Gaussian beam with phase variation under circular aperture diffraction[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(11): 2138-2141.
- 刘宏展, 黄旭光. 圆孔限制下有相位变化的高斯光束远场发散度的理论分析[J]. 光子学报, 2007, 36(11): 2138-2141.