

像差对空间激光通信系统发射光束远场分布的影响

姜承志^{1*}, 张文睿^{1,2}, 汪波¹, 张若凡¹, 朱晓程¹, 张锦龙¹, 裘磊¹, 葛照琪¹, 陈伟军¹

¹中国空间技术研究院西安分院激光事业部, 陕西 西安 710000;

²西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 基于菲涅耳标量衍射理论, 推导了离焦状态下激光发射系统远场光斑分布的解析式, 提出了一种基于相似度系数的采样间隔寻优法。用最佳采样间隔得到的数值仿真结果与解析计算结果的偏差小于0.04%。采用傅里叶变换法仿真了存在像差时的远场光斑分布情况, 并分析了角位移、发散角、增益等关键参数对光场分布的影响。当激光波长为 λ 、指向允许偏差为 $3\ \mu\text{rad}$ 、中心增益裕量为3 dB时, 基于公差分配理论得到离焦、倾斜、球差、慧差、像散的容差需分别小于等于 0.36λ 、 0.07λ 、 0.43λ 、 0.13λ 、 0.5λ 。

关键词 光通信; 像差; 远场分布; 标量衍射理论; 相似度系数

中图分类号 E963

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2206001

Influence of Aberration on Far-Field Distribution of Laser Beam Emitted by Space Laser Communication System

Jiang Chengzhi^{1*}, Zhang Wenrui^{1,2}, Wang Bo¹, Zhang Ruofan¹, Zhu Xiaocheng¹,
Zhang Jinlong¹, Qiu Lei¹, Ge Zhaoqi¹, Chen Weijun¹

¹Laser Business Division, China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi 710000, China;

²School of Physics and Optoelectronics Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract Based on Fresnel scalar diffraction theory, the analytical formula of far-field spot distribution of laser emission system in defocused state is derived, and a sampling interval optimization method based on similarity coefficient is proposed in this paper. The deviation between the analytical results from optimal sampling interval and numerical simulation is less than 0.04%. Fourier transform method is used to simulate the far-field spot distribution in the presence of aberration, and the influence of key parameters such as angular displacement, divergence angle, and gain on the light field distribution is analyzed. When the laser wavelength is λ , the allowable pointing deviation is $3\ \mu\text{rad}$, and the center gain margin is 3 dB, based on the tolerance allocation theory, the tolerances of defocus, tilt, spherical aberration, coma aberration, and astigmatism should be less than or equal to 0.36λ , 0.07λ , 0.43λ , 0.13λ , and 0.5λ , respectively.

Key words optical communications; aberration; far-field distribution; scalar diffraction theory; similarity coefficient

OCIS codes 200.2605; 060.2605; 070.0070

1 引 言

空间激光通信以激光为载体, 在空间中进行远距离信息传输。相比传统微波通信, 空间激光通信具有体积小、重量轻、功耗低、速率高、抗干扰性强等优点, 是近年来国际空间通信领域的研究热点。

美国、欧洲、日本开展了一系列在轨实验项目, 如欧洲数据中继系统(EDRS)项目、美国的月球激

光通信演示验证(LLCD)项目、日本的光学数据中继系统(JDRS)项目, 国外空间激光通信技术已基本完成各项关键技术的验证, 进入工程应用发展阶段。我国从“十五”计划开始布局空间激光通信技术的研究工作, 已成功发射了“海洋二号”、“墨子号”、“实践十三号”、“实践二十号”等系列卫星, 搭载的激光通信终端完成了一系列星地、星间激光通信实验^[1-10]。但我国空间激光通信技术仍处于在轨验证阶段, 对

收稿日期: 2020-05-13; 修回日期: 2020-07-17; 录用日期: 2020-07-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62001375)、装备预研航天科技联合基金(6141B060301)

* E-mail: wangjcz@163.com

在轨问题的分析、解决方案的提出、后续激光终端的优化设计及激光链路性能的提升都依赖于远场光斑的分布情况,与国外先进水平仍存在一定差距。因此,有必要对激光终端发射空间光的远场分布进行高精度仿真。

激光终端发射光学系统的像差会导致远场光斑的位置、强度分布发生变化,最终影响激光链路的捕获、跟踪及通信情况。Sun 等^[11]采用数值积分方法研究了发射光学系统像差对远场增益分布的影响,向劲松等^[12]研究了发射光学系统像差对远场轴上增益的影响,但未对远场光强分布进行研究。

本文基于标量衍射理论推导了有限孔径高斯光束远场复振幅分布的解析式,采用基于相似度系数度量的采样间隔寻优法,得到数值仿真的最佳采样间隔。基于菲涅耳标量衍射理论,利用 Matlab 建立

远场分布仿真模型,仿真了发射系统存在各种像差时的远场光强分布情况,讨论了各种像差对空间光通信系统的影响,对激光终端光学系统的设计和激光链路在轨问题的分析与解决具有重要意义。

2 基本原理

2.1 无像差激光发射光学系统的远场分布解析式

激光终端光学天线主要分为离轴反射式和同轴折反式,其中,离轴天线不存在中心遮拦,同轴天线存在一定的遮拦,实验主要讨论离轴天线。图 1 所示的坐标系中, xoy 平面为天线出瞳, $x'o'y'$ 为观察平面, P 为出瞳上任意一点,可用极坐标表示为 (ρ, θ) , Q 为观察平面上任意一点,可用极坐标表示为 (ρ', θ') , P 、 Q 之间的距离为 r ,通信距离为 d 。

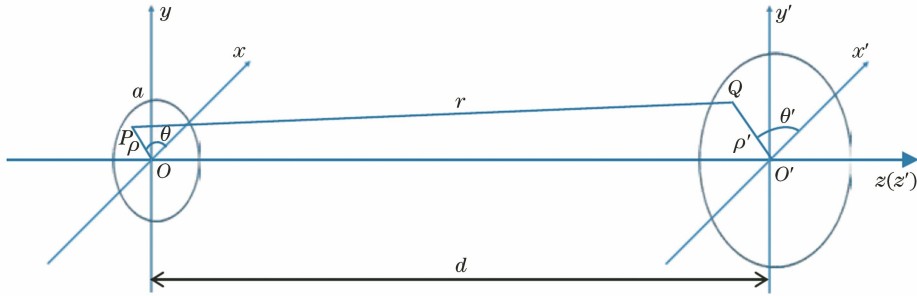


图 1 坐标系的定义

Fig. 1 Definition of coordinate system

设天线的半径为 a , 高斯光束的束腰半径为 ω_0 , 波长为 λ , 全角发散角为 θ , 束腰位置位于光学天线出瞳处, 则高斯光束在传输距离为 z 时的光场分布可表示为

$$E(\rho) = \frac{c}{\omega_z} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_z^2}\right) \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{\rho^2}{2R_z}\right) + \Phi_z\right]\right\}, \quad (1)$$

式中, c 为常数, 令发射功率为 p , 则 $c = (2p/\pi)^{\frac{1}{2}}$, $k = 2\pi/\lambda$ 为空间角频率, $\omega_z = \omega_0 \{1 + [\lambda z / (\pi\omega_0^2)]^2\}^{\frac{1}{2}}$ 为 z 处的光腰半径, $R_z = z \{1 + [\pi\omega_0^2 / (\lambda z)]^2\}$ 为 z 处的波前曲率半径, $\Phi_z = \arctan[\lambda z / (\pi\omega_0^2)]$ 为 z 处附加的相位因子。束腰处的光场分布可表示为

$$E(\rho) = \frac{c}{\omega_0} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_0^2}\right). \quad (2)$$

由于激光发散角通常为几十微弧度量级, 满足近轴条件, 根据菲涅耳-基尔霍夫衍射公式, 得到观察平面上 Q 的复振幅为

$$E(Q) = \frac{1}{i\lambda d} \int_0^a \int_0^{2\pi} E(\rho) \exp(-ikr) \rho d\rho d\theta. \quad (3)$$

由对称性可知, 观察平面上的光场分布仅与 ρ' 有关, 令 Q 点的坐标为 $(\rho', 0)$, 则 P 、 Q 之间的距离 r 可表示为

$$r = d \left(1 + \frac{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \theta}{d^2}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

满足近轴条件时, 可将(4)式近似为

$$r = d + \frac{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \theta}{2d}. \quad (5)$$

将(2)式、(5)式代入(3)式, 得到 Q 点的光场分布为

$$E(Q) = \frac{c \exp\left[-ik\left(d + \frac{\rho'^2}{2d}\right)\right]}{i\lambda d \omega_0} \int_0^a \int_0^{2\pi} \exp\left[-\rho^2\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{ik}{2d}\right)\right] \exp\left(\frac{ik\rho\rho' \cos \theta}{d}\right) \rho d\rho d\theta. \quad (6)$$

令 $f(\rho') = \frac{c \exp[-ik(d + \rho'^2/2d)]}{i\lambda d \omega_0}$, $b = 1/\omega_0^2 + ik/(2d)$, $\beta = k\rho\rho'/d$, 则(6)式可简化为

$$E(Q) = f(\rho') \int_0^a \int_0^{2\pi} \exp(-b\rho^2) \exp(i\beta \cos \theta) \rho d\rho d\theta. \quad (7)$$

由零阶贝塞尔函数^[13] $J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(ix \cdot \cos \theta) d\theta$ 得到

$$E(Q) = 2\pi f(\rho') \int_0^a \exp(-b\rho^2) J_0(\beta) \rho d\rho. \quad (8)$$

将积分变量 ρ 变换为 β , 得到

$$E(Q) = 2\pi \left(\frac{d}{k\rho'}\right)^2 f(\rho') \int_0^{k a \rho'/d} \exp\left[-b \left(\frac{d}{k\rho'}\right)^2 \beta^2\right] J_0(\beta) \beta d\beta. \quad (9)$$

利用贝塞尔导数递推公式 $[x^n J_n(x)]' = x^n J_{n-1}(x)$, 对(9)式循环使用分部积分, 得到

$$E(Q) = \frac{\pi}{b} f(\rho') \exp(-ba^2) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2abd}{k\rho'}\right)^n J_n\left(\frac{k a \rho'}{d}\right). \quad (10)$$

当 $|2abd/k\rho'| \leq 1$ 即 $\rho' \geq |2abd/k|$ 时, (10)式收敛; 当 $\rho' < |2abd/k|$ 时, 令 $t = 2abd/k\rho'$, $s = k a \rho'/d$, 由 $\exp\left[\frac{x}{2}(t-1/t)\right] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(x) t^n$, 可推导出 $\sum_{n=1}^{\infty} t^n J_n(s) = \exp\left[\frac{s}{2}(t-1/t)\right] - \sum_{n=-\infty}^0 t^n J_n(s)$, 此时 $\sum_{n=-\infty}^0 t^n J_n(s)$ 收敛, 因此, 当 $\rho' < |2abd/k|$ 时, 可得到

$$E(Q) = \frac{\pi}{b} f(\rho') \exp(-ba^2) \left\{ \exp\left[\frac{s}{2}\left(t - \frac{1}{t}\right)\right] - \sum_{n=-\infty}^0 t^n J_n(s) \right\}. \quad (11)$$

对于远场轴上点 o' 的复振幅, 令 $\rho' = 0$, 得到

$$E(o') = -\frac{\pi}{b} f(0) [\exp(-ba^2) - 1]. \quad (12)$$

特别地, 当系统存在轴上离焦时, 设离焦的波像差 $W_{\text{defocus}}(\rho) = a_1 \rho^2$, a_1 为离焦量系数, 可将(7)式中的复常数 b 表示为 $b_{\text{defocus}} = 1/\omega_0^2 + ik/(2d) - ika_1$, 用 b_{defocus} 替换 b , 可得到存在轴上离焦时远场

复振幅的分布解析式。

2.2 基于相似度系数度量的采样间隔寻优法

当光学系统存在像差时, 很难得到光斑远场分布的解析式, 因此, 只能通过数值仿真方法求取。实验基于菲涅耳标量衍射理论^[14], 采用傅里叶变换方法计算远场光强复振幅的分布, 可表示为

$$E(Q) = \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \exp\left[\frac{ik(x'^2 + y'^2)}{2d}\right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(P) \exp\left[\frac{ik(x^2 + y^2)}{2d}\right] \exp\left[-ik\left(\frac{xx'}{d} + \frac{yy'}{d}\right)\right] dx dy. \quad (13)$$

数值仿真的精度主要由采样点数 N 和采样间隔 δ 决定。采样点数通常基于计算机的最大能力选取, 采样间隔则根据香农采样定理选取。对于频谱为有限带宽的信号, 为了使得到的频谱不失真, 采样频率应不小于信号频谱中最高频率的 2 倍。由于原始光场频谱的带宽都是无限宽的, 存在频谱交叠现象, 即采样间隔越小, 采样频率越高, 频谱间隔越远, 因频谱交叠导致的仿真误差越小。但当采样点数固定时, 采样间隔越小, 采集的源光场区域越小, 导致仿真误差增大。综上所述, 存在最优采样间隔使仿真误差达到最小。设采样间隔数列为 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$, 且 $\delta_1 > \delta_2 > \dots > \delta_n$, 对应仿真得到的远场光强分布分别为 $I_{\delta_1}(x', y'), I_{\delta_2}(x', y'), \dots, I_{\delta_n}(x', y')$,

在最优采样间隔附近, 仿真结果的变化最小。用模式识别中常用的相似度系数(SC)衡量仿真结果的变化情况, 包括海明距离(HD)、欧氏距离(ED)、相关系数(CC)^[15] 三种相似度系数。其中, HD 与 ED 越接近 0, CC 越接近 1, 表明仿真结果之间的变化越小。为了方便对比, 对三种系数进行了(0, 1)归一化处理, 取使相似度系数达到最小时的 δ_i 作为最优采样间隔。HD 与 ED 的归一化方法为 $S_{\text{norm}} = (S - S_{\text{min}})/(S_{\text{max}} - S_{\text{min}})$, CC 的归一化方法为 $S_{\text{norm}} = 1 - (S - S_{\text{min}})/(S_{\text{max}} - S_{\text{min}})$ 。其中, S_{norm} 为归一化后的 SC, S 为归一化前的 SC, $S_{\text{min}}, S_{\text{max}}$ 分别为归一化 SC 中的最小值、最大值。

当发射系统的离焦量为 λ 、采样点数为 8192

时,取采样间隔序列为 $0.01, 0.005, \dots, 0.01/2^9$ m, 以验证采样间隔寻优法的有效性,图 2 为相邻采样间隔仿真结果的归一化 SC 曲线,可以发现,三种相似系数均是 X_{SC}^6 最小, X_{SC}^5 次之, X_{SC}^6 是 δ_6, δ_7 采样间隔仿真结果间的相似系数, X_{SC}^5 是 δ_5, δ_6 采样间隔仿真结果间的相似系数,因此,将 $\delta_6 = 0.3125$ mm 确认为最优采样间隔。

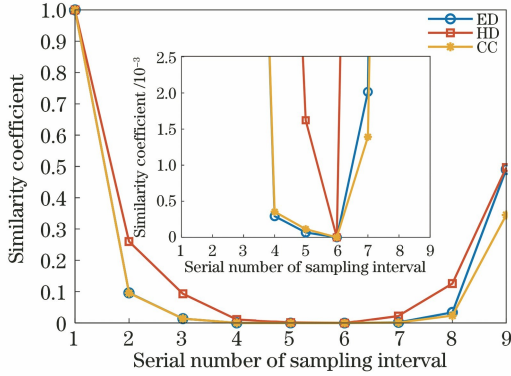


图 2 数值仿真结果的 SC 曲线

Fig. 2 SC curves of numerical simulation results

图 3 为 10 种不同采样间隔的仿真结果与解析结果归一化 SC 曲线,可以发现,采样间隔取 δ_6 时,三种 SC 均最小,即此时的仿真误差最小。三种 SC 的判据结果相同,均可得到同一最佳采样点,由于 HD 判据的运算量最小,因此,仿真时建议选择 HD 进行判定。

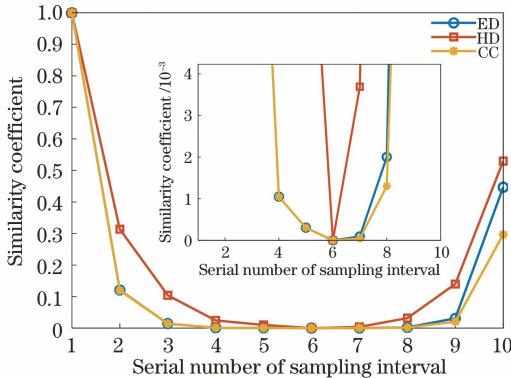


图 3 解析结果的归一化 SC 曲线

Fig. 3 Normalized SC curve of analytical results

图 4 为采样间隔取 δ_6 时数值仿真与解析计算得到的远场光强分布曲线,可以发现,数值仿真与理论计算的结果基本重合,且两者的偏差小于 0.04% ,这表明基于 SC 度量的采样间隔寻优法可以得到最优的仿真结果。

3 不同像差对远场光强分布的影响

对于激光通信系统,采用单模光纤发射信号光,

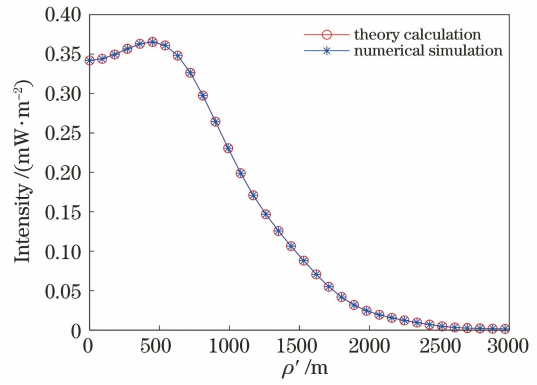


图 4 两种方法得到的远场光强分布

Fig. 4 Far-field light intensity distribution obtained by two methods

以单模光纤端面在 x 轴方向偏移到 x_0 时为例,研究各种像差对发射信号光远场分布的影响。由波像差理论^[16]得到

$$W(\rho, \theta, x_0) = a_1 \rho^2 + a_2 x_0 \rho \cos \theta + b_1 \rho^4 + b_2 x_0 \rho^3 \cos \theta + b_3 x_0^2 \rho^2 \cos^2 \theta + b_4 x_0^2 \rho^2 + b_5 x_0^3 \rho \cos \theta + \dots, \quad (14)$$

式中, $W(\rho, \theta, x_0)$ 为光学系统的波像差,多项式中的第一项为轴上离焦,第二项为倾斜(垂轴离焦),即物点偏离轴上时引入的波面倾斜,第三项到第七项为初级像差,分别为球差、彗差、像散、场曲、畸变, $a_1, a_2, b_1 \sim b_5$ 分别为各像差的系数,高级球差、彗差、像散、场曲、畸变较小,可以忽略。通过(14)式可以发现,当 x_0 确定时,场曲与轴上离焦、畸变与倾斜的表示形式相同。因此,实验主要讨论轴上离焦、倾斜、球差、彗差、像散五种像差对发射信号光远场分布的影响。

波像差为 λ 时,离焦、倾斜、球差、彗差、像散的远场光强分布如图 5 所示。可以发现,不同像差对远场分布的影响不同,离焦和球差均会导致光斑变大,且存在波像差时,离焦后的远场光斑大于含球差的远场光斑,但两者均为圆对称,且光斑中心没有平移,仍在轴上;倾斜会导致光斑平移,但光斑的大小、分布均没有变化;彗差会导致光斑变大,呈彗星状分布,且光斑中心的位置会发生偏移;像散会导致光斑变大,呈椭圆型分布,且光斑中心仍在轴上。可用中心点角位移、远场发散角、光斑中心增益、增益角分布描述各种像差对远场分布的影响。空间激光通信中,中心点角位移即最大光强位置偏离轴上点的角度量,可以表征像差导致的激光终端指向偏差;远场发散角为远场光强分布降至光斑中心点光强为 e^{-2} 时对发射终端的视角,对于非旋转对称光斑,采用长短轴定

义两个方向的发散角,可以表征天线的远场平均增益情况;发射中心的增益 $G_{t0} = \frac{I_0}{p/(4\pi d^2)}$,其中, I_0 为中

心点的光强,中心增益可表征最佳链路情况,即完全对准时的链路情况;增益角分布即增益随着角度的变化情况,可以表征不同对准偏差时的链路情况。

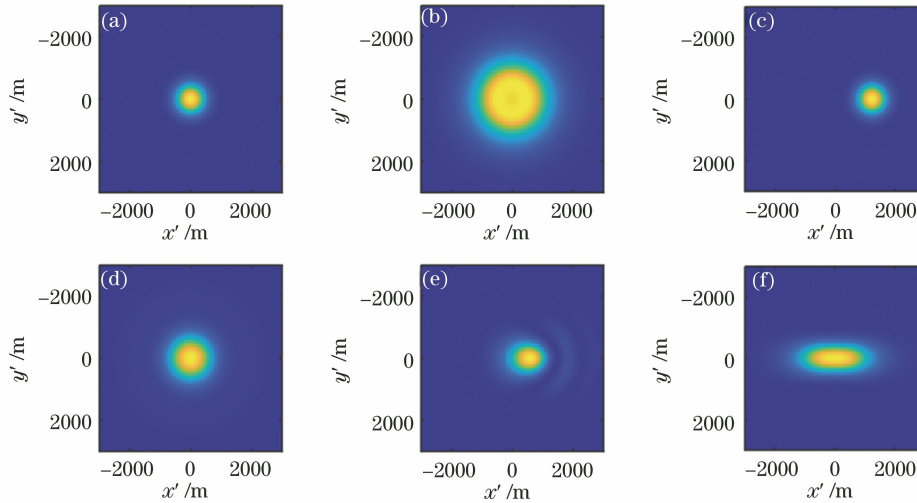


图 5 波像差为 λ 时的远场光强分布。(a)无像差;(b)离焦;(c)倾斜;(d)球差;(e)彗差;(f)像散

Fig. 5 Far-field intensity distribution when the peak wave aberration is λ . (a) No aberration; (b) defocus; (c) tilt; (d) spherical aberration; (e) coma aberration; (f) astigmatism

图 6 为存在倾斜、彗差时远场光斑角位移随波像差的变化情况,可以发现,倾斜角位移 ϵ 随波像差 W_{tilt} 的增加呈线性增加,与理论计算结果相吻合,此时, $\epsilon = W_{\text{tilt}}/a$ 。彗差角位移随波像差的增加呈近似线性增加,且波像差相同时,倾斜角的位移约为彗差角位移的两倍。当波像差为 λ 时,倾斜导致的角位移达到 $30.9 \mu\text{rad}$,彗差导致的角位移为 $14.5 \mu\text{rad}$ 。远场光斑角位移会影响激光终端指向的准确性,进而影响激光链路的建立,当指向允许偏差为 $3 \mu\text{rad}$ 时,根据公差分配理论^[17],倾斜的波像差应小于 0.07λ ,彗差的波像差应小于 0.133λ 。

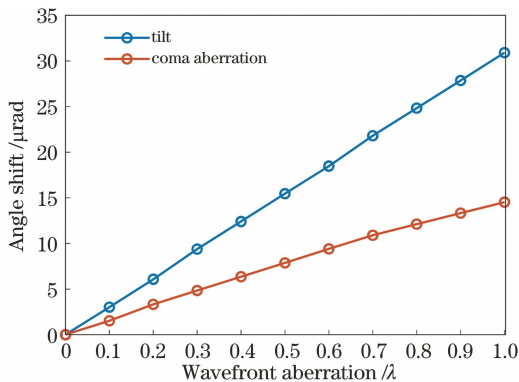


图 6 远场光斑角位移随波像差的变化情况

Fig. 6 Variation of far-field spot angle displacement with wave aberration

图 7 为不同像差发散角随波像差的变化情况,可以发现,除彗差、像散在 y 方向的发散角随着波

像差的增加基本不变外,其他像差发散角均随着波像差的增加而增大。当波像差为 λ 时,离焦与像散在 x 方向的发散角受波像差的影响在同一量级,在 $80 \sim 90 \mu\text{rad}$ 之间。其次是球差发散角,为 $49.8 \mu\text{rad}$,彗差在 x 方向上发散角为 $42.6 \mu\text{rad}$ 。

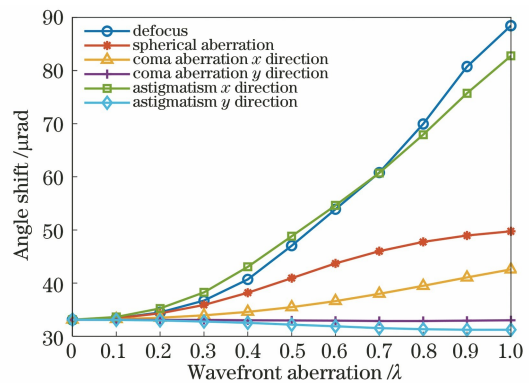


图 7 发散角随波像差的变化情况

Fig. 7 Variation of divergence angle with wave aberration

图 8 为不同像差中心增益随波像差的变化情况,可以发现,与发散角的变化曲线相同,中心增益随离焦量的增加快速减小。当波像差为 λ 时,中心增益下降到 95 dB ,相比理想情况下下降了约 10 dB ;球差和像散对中心增益的影响在同一量级,当波像差为 λ 时,中心增益下降到 100 dB ,相比理想情况下下降了约 5 dB 。而彗差引起的中心增益降低最少,当波像差为 λ 时,中心增益下降到 103 dB ,相比理想情况下下降了约 2 dB 。

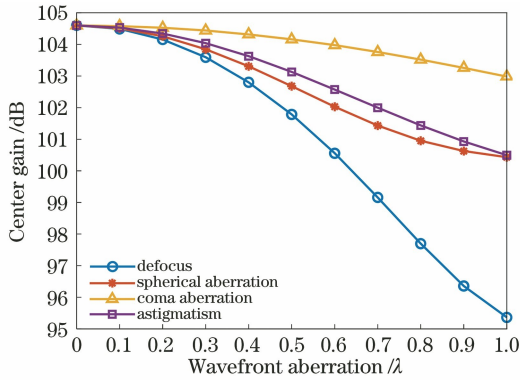


图 8 中心增益随波像差的变化情况

Fig. 8 Variation of center gain with wave aberration aberration

当系统链路中心增益存在 3 dB 的裕量时,根据公差分配理论^[17],离焦量需小于 0.36λ ,球差需小于 0.43λ ,像散需小于 0.5λ ,彗差需小于 0.95λ 。考虑

到指向与链路增益,得到发射光学系统的各像差分配如表 1 所示。

表 1 不同像差的容差分配

Table 1 Tolerance distribution of different aberrations

Aberration	Tolerance distribution / λ
Defocus	0.36
Tilt	0.07
Spherical aberration	0.43
Coma aberration	0.13
Astigmatism	0.50

图 9 为不同像差的远场光斑增益角分布曲线,可以发现,随着角位移的增大,各像差的远场光斑增益均呈下降趋势,像差较小时,增益出现由衍射引起的波浪形变化;像差较大时,增益的下降逐渐平缓。

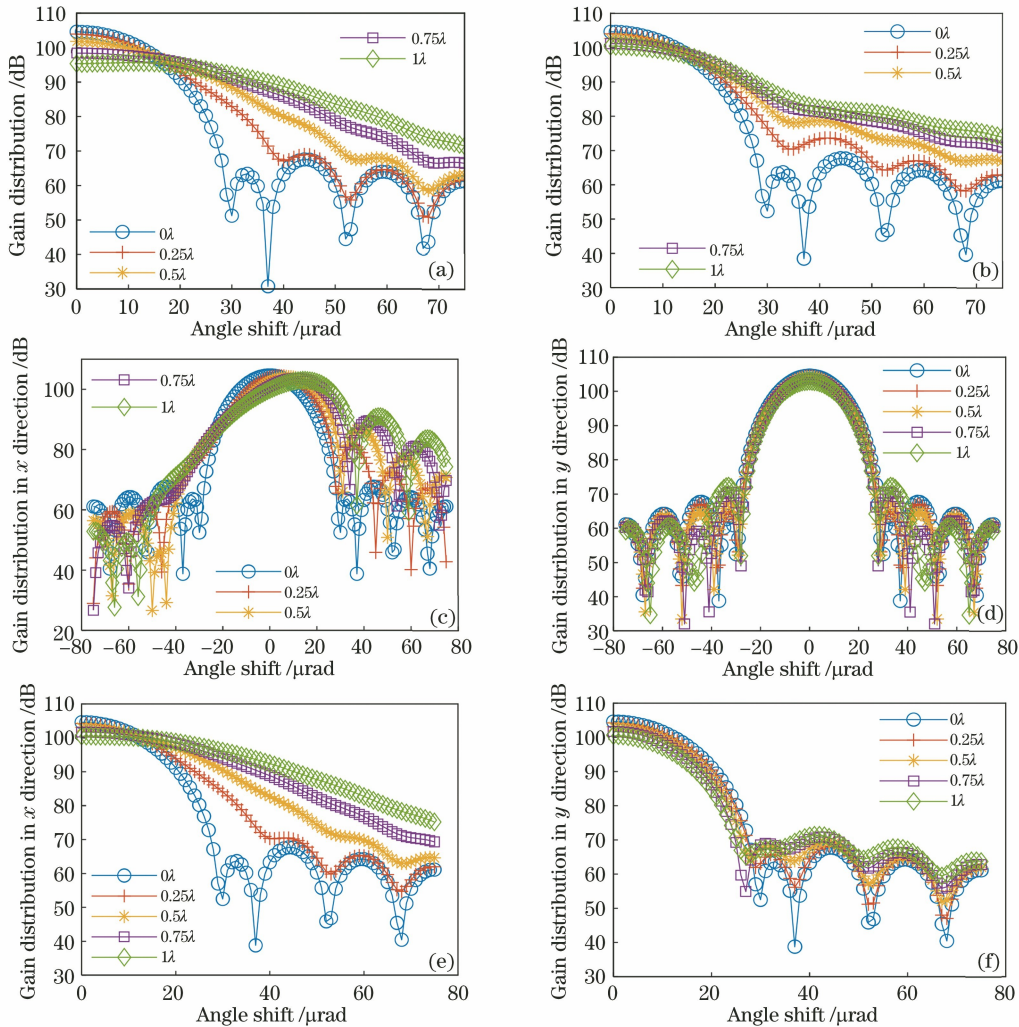


图 9 不同像差的远场光斑增益角分布。(a)离焦;(b)球差;(c)彗差 x 方向;(d)彗差 y 方向;(e)像散 x 方向;(f)像散 y 方向

Fig. 9 Angle distribution of far-field spot gain with different aberrations. (a) Defocus; (b) spherical aberration; (c) coma aberration in x direction; (d) coma aberration in y direction; (e) astigmatism in x direction; (f) astigmatism in y direction

不同像差的远场光斑增益角分布曲线可用于激光通信链路在轨性能的评估。

4 结 论

基于 SC 度量的采样间隔寻优法, 仿真分析了空间激光通信光学发射系统存在不同像差时的远场分布情况。结果表明, 当波像差为 λ 时, 离焦会使发散角由 $30 \mu\text{rad}$ 扩大到 $88.5 \mu\text{rad}$, 中心增益下降 10 dB; 球差会使发散角扩大到 $49.8 \mu\text{rad}$, 中心增益下降 5 dB; 倾斜会使远场光斑角位移达到 $30.9 \mu\text{rad}$, 光强分布不变; 彗差会使远场光斑角位移达到 $14.5 \mu\text{rad}$, 中心增益下降 2 dB; 像散会导致远场光斑变成椭圆形, 中心增益下降 5 dB。在波像差相同时, 倾斜导致的远场光斑角位移量约是彗差的两倍, 对中心增益影响最大的是离焦, 其次是球差、像散、彗差。当指向允许偏差为 $3 \mu\text{rad}$, 中心增益裕量为 3 dB 时, 基于公差分配理论得到离焦、倾斜、球差、彗差、像散的容差需分别小于等于 0.36λ 、 0.07λ 、 0.43λ 、 0.13λ 、 0.5λ 。

参 考 文 献

- [1] Jiang H L, Fu Q, Zhao Y W, et al. Development status and trend of space information network and laser communication[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8.
姜会林, 付强, 赵义武, 等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.
- [2] Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X, et al. Development status of space laser communication and new method of networking[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 143-150.
任建迎, 孙华燕, 张来线, 等. 空间激光通信发展现状及组网新方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 143-150.
- [3] Wang Y, Chen P Y, Song Y W, et al. Progress on the development and trend of overseas space laser communication technology [J]. Flight Control & Detection, 2019, 2(1): 8-16.
王燕, 陈培永, 宋义伟, 等. 国外空间激光通信技术的发展现状与趋势[J]. 飞控与探测, 2019, 2(1): 8-16.
- [4] Gao D R, Li T L, Sun Y, et al. Latest developments and trends of space laser communication[J]. Chinese Journal of Optics, 2018, 11(6): 901-913.
高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901-913.
- [5] Zeng Z L, Liu X, Sun H, et al. Latest developments of space laser communications and some development suggestions[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(6): 1-5.
曾智龙, 刘兴, 孙晖, 等. 空间激光通信最新进展及发展建议[J]. 光通信技术, 2017, 41(6): 1-5.
- [6] Wu W R, Chen M, Zhang Z, et al. Overview of deep space laser communication [J]. Science China Information Sciences, 2017, 61(4): 040301.
- [7] Zhong C X. Current status, development trend and key technology analysis of space laser communication [C]//Proceedings of the 2018 6th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2018), June 2-3, 2018. Jinan, China. Paris, France: Atlantis Press, 2018: 393-398.
- [8] Zhao B Q, Meng L X, Yu X N, et al. Spatial light to single-mode fiber nutation coupling technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1105001.
赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 空间光到单模光纤章动耦合技术研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1105001.
- [9] Zhang X Y, Cui S, Liu D M, et al. Performance analysis of multi-aperture coherent optical receiver for satellite-to-ground downlink[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 210101.
张晓玉, 崔晟, 刘德明, 等. 星地下行链路中多孔径相干光接收机性能分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 210101.
- [10] Tian Q J, Zhang J H, Zhang H H, et al. Design of off-axis four-mirror optical antenna with long exit pupil distance[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1822001.
田棋杰, 张建华, 张缓缓, 等. 长出瞳距离轴四反光学天线的研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1822001.
- [11] Sun J F, Liu L R, Yun M J, et al. Study of the transmitter antenna gain for intersatellite laser communications [J]. Optical Engineering, 2006, 45(5): 058001.
- [12] Xiang J S, Pan L C. Influence of transmitting antenna's aberration on laser propagation for space optical communication[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(6): 913-917.
向劲松, 潘乐春. 空间光通信中发射天线像差对激光传输的影响 [J]. 半导体光电, 2009, 30(6): 913-917.
- [13] Xi D P. Bessel functions [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998: 93-96.
奚定平. 贝塞尔函数 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 93-96.
- [14] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M].

- 2nd ed. New York: McGraw-Hill Companies, 1996: 66-71.
- [15] Shu N, Ma H C, Sun H L. The theories and methods of pattern recognition[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004: 79.
舒宁, 马洪超, 孙和利. 模式识别的理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 79.
- [16] Wang Z J. Theoretical principle of optical design [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1985: 158-168.
王之江. 光学设计理论基础[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1985: 158-168.
- [17] Ma H, Wang J B. Error theory and instrument precision [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2007: 342-345.
马宏, 王金波. 误差理论与仪器精度[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 342-345.