

文章编号:1001-5078(2013)04-0380-05

· 激光应用技术 ·

# 像差对星间激光通信系统高精度对准的影响

向劲松, 杨松, 马圣明, 刘飞  
(重庆邮电大学 光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065)

**摘要:**为了减小 ATP 系统的像差对对准的影响,达到提高系统的对准精度的目的,文中以星间 ATP 系统中的高精度对准平台为基础,分析了激光器处于轴外发射状态时需要考虑的两个位置偏移量(离轴参量  $h/s$  和偏移参量  $r_a$ ),提出激光器的位置状态会对像差有着一定的影响。并通过数值仿真,分别分析了在存在激光器位置偏移量时各种像差对对准精度的影响情况。结果表明激光器发射的状态明显影响着像差对对准的影响程度,适当调节激光器发射状态有利于减小像差对对准精度的影响,进而提高对准精度。

**关键词:**星间激光通信;激光器;像差;数值仿真;对准

**中图分类号:**TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.04.007

## Influence of the aberrations on alignment in an inter-satellite laser communication system

XIANG Jing-song, YANG Song, MA Sheng-ming, LIU Fei  
(Key Lab. of Optical Fiber Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In order to reduce the effect of aberration on the alignment and enhance the system alignment accuracy in a ATP system, this paper analyzes two position laser displacement ( $h/s$  and  $r_a$ ). It also points out that the two position laser displacement will influence the aberration. This paper has respectively analyzed the effect of a variety of aberrations on alignment precision in the presence of position laser displacement through numerical simulation. The results show that the state of laser emission significantly affects the aberration's influence on the alignment. Appropriate adjustment to the state of laser will reduce the effect of aberration on alignment and improve the alignment accuracy.

**Key words:** the inter-satellite laser communication; laser; aberrations; the numerical simulation; alignment

### 1 引言

卫星激光通信链路的建立是一个 ATP(捕获、跟踪、瞄准)的过程。ATP 系统是整个卫星激光通信的重要组成部分,也是实现卫星激光通信的关键。其中高精度对准信息的获取是 ATP 系统的一个重要的环节,也是实现精跟踪的前提。而由于镜头本身存在的像差会导致接收端光斑的畸变,进而会产生对准角度误差,影响系统的对准精度,因此分析和研究系统像差对对准精度的影响是非常必要的。

目前这方面的分析和研究还较少, M. Toyoshima 等人利用了 zernike 多项式描述像差,分析了各种像

差对对准精度的影响情况,得出了当高斯信标光方向与接收平面波方向在一条直线上时,彗差对对准影响最为明显的结论<sup>[1]</sup>;孙建峰等人利用一个完全正交多项式集来改变泽尼克多项式,削弱了光斑中心模糊的问题,并进一步说明了不同的像差对对准精度影响不同的结论<sup>[2]</sup>。谭立英等人利用小波变

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61071117);重庆市科委自然科学基金项目(No. CSTC 2010BB2413)资助。

**作者简介:**向劲松(1975-),男,博士,副教授,主要从事空间光通信研究。E-mail:xiangjs@cqupt.edu.cn

**收稿日期:**2012-09-06

换去近似模拟波前像差,并分析了各种像差对对准的影响<sup>[3]</sup>。

上面的这些研究虽然都分析了像差对对准精度的影响,但共同存在着一点分析上的不足:在利用各种方法去近似描述波前像差,并进一步分析像差对对准的影响时,没有具体考虑到发射端激光器的位置状态是否会对像差产生影响。在实际光学系统中激光器很难处于轴上标准发射状态,一般都会存在着发射点偏离天线中心轴和发射天线处高斯光束中心偏离天线中心这两个位置的偏移,那么分析这两个位置偏移是否会导致像差对对准精度的影响不同,对于提高系统的对准精度是具有实际参考价值的。所以文中就是从发射端激光器这两个位置偏移出发,通过理论分析与数值模拟相结合,分别分析了在这两种情况下像差对对准精度的影响。

## 2 轴外发射天线系统

由于在卫星激光通信系统中光线基本都是轴外出射,所以对轴外天线系统特性进行分析尤其重要。下面给出了轴外发射天线系统示意图,如图1所示。

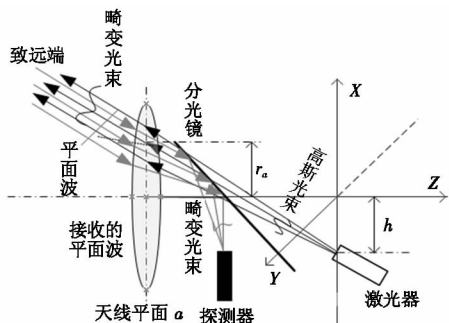


图1 轴外发射天线系统

Fig.1 the antenna system of off-axis launching

如图1所示,激光器发射的高斯光束到达天线平面a时的光场分布为:

$$U_0(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_a} \exp\left(ik\left(\frac{xh}{f}\right)\right) \cdot \exp\left(-\frac{(x+r_a)^2 + y^2}{w_a^2}\right) \quad (1)$$

式中,  $w_a$  为发射高斯光束光腰半径;  $f$  为天线的焦距。  $h$  为发射点光源距光轴的距离, 设激光器发射点到入瞳的距离为  $s$ , 则  $h/s$  反映了激光器发射方向偏离天线中心轴的程度, 所以将其定义为离轴参量。  $r_a$  为高斯光束中心到天线中心的距离, 它反应了发射的光线入瞳时偏移轴线的程度, 所以被定义为偏移参量, 这两个参量共同反应了发射的高斯光束的偏离程度。从图中可以看出, 激光

器的这两个位置偏移量影响着天线出射的方向, 进而会对远端的像差产生影响。那么文中就是从激光器的位置参量出发, 通过仿真分析发射端激光器处于离轴参量和偏移参量的状态下时, 像差对对准精度的影响。

## 3 像差的数学描述

光学天线像差会引起远场激光光斑变形、光斑直径增大及中心光强降低等现象。根据像差的数学描述, 像差引起的相位畸变可以表示为<sup>[4]</sup>:

$$\phi(\rho, \theta) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ A_1 \rho \cos\theta + A_2 \rho \sin\theta - \frac{1}{4} B \rho^4 - C \left( \frac{\lambda_1 Y_1}{s} \right)^2 \rho^2 \cos^2\theta - \frac{1}{2} D \left( \frac{\lambda_1 Y_1}{s} \right)^2 \rho^2 + E \left( \frac{\lambda_1 Y_1}{s} \right)^3 \rho \cos\theta + F \left( \frac{\lambda_1 Y_1}{s} \right)^3 \rho^3 \cos\theta \right] \quad (2)$$

式中,  $(\rho, \theta)$  是孔径上的点  $(x, y)$  对应的归一化极坐标形式;  $\lambda_1$  为天线入射与出射光瞳平面之间的放大率;  $Y_1$  为发射点经过透镜形成的高斯像点的离轴距离;  $s$  为激光器发射点到入瞳的距离。由于  $A_1, A_2, B, C, D, E, F$  是与天线性质有关的常量。

假设天线的横向放大率为  $m$ , 考虑到天线入瞳平面与出瞳平面之间一般具有对称性, 则  $\lambda_1$  与  $m$  都可被近似为 1, 由于  $Y_1 = mh$ , 所以  $Y_1$  量的大小可以用  $h$  近似。那么在近轴情况下,  $\lambda_1 Y_1/s$  就可以近似利用  $h/s$  代替。取  $W_{01x} = A_1, W_{01y} = A_2, W_{040} = -\frac{1}{4}B, W_{031} = F, W_{022} = -C, W_{120} = -\frac{1}{2}D, W_{111} = E$ , 则可将式(2)像差引起的相位畸变简化为:

$$\phi(\rho, \theta) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ W_{01x} \rho \cos\theta + W_{01y} \rho \sin\theta + W_{020} \rho^2 + W_{040} \rho^4 + W_{031} (h/s) \rho^3 \cos\theta + W_{022} (h/s)^2 \rho^2 \cos^2\theta + W_{120} (h/s)^2 \rho^2 + W_{111} (h/s)^3 \rho \cos\theta \right] \quad (3)$$

式中,  $W_{01x} \rho \cos\theta$  和  $W_{01y} \rho \sin\theta$  为  $X$  及  $Y$  方向的倾斜;  $W_{020} \rho^2$  为离焦;  $W_{040} \rho^4$  为球差;  $W_{031} (h/s) \rho^3 \cos\theta$  为彗差;  $W_{022} (h/s)^2 \rho^2 \cos^2\theta$  为像散;  $W_{120} (h/s)^2 \rho^2$  为场曲;  $W_{111} (h/s)^3 \rho \cos\theta$  为畸变。

从上述像差的表达式可以看出, 彗差、像散、场曲、畸变与离轴参量  $h/s$  有关, 即离轴参量  $h/s$  会影响这些像差, 除此之外由于高斯光束中心偏离天线中心 ( $r_a$  不为零) 会导致出射光线偏离预想的传播方向 (如图1所示), 即导致坐标  $(x, y)$  发射偏移, 当然就会对像差产生一定的影响。由此可以表明激光器的位置会影响像差, 进而会影响对准误差。

#### 4 在像差影响情况下对准误差的确立

在卫星激光通信中,对准误差是衡量对准精度的物理量,也是由于各种干扰而引起的不希望的角度偏差。提高对准精度的实质是对对准误差角度的补偿。根据文献[1],M. Toyoshima 提出在跟踪阶段,对准误差角度是发射端光轴方向与接收端光轴方向之间的夹角<sup>[1]</sup>。下面将对两个方向的确立做一定介绍。

##### 4.1 接收端实际光轴方向

基于星间高精度对准的光学系统结构框图如图1所示。由于系统两端是对称的,所以图中只画出了其中一端的光学系统。发射端发射的高斯光束经过远距离传输过后,接收端接收的光束可以被近似为平面波光束。光束经过光学透镜系统时要受到像差的影响,透镜的出射光线应该是畸变光束。根据夫琅和费衍射原理,探测器上的光强分布为:

$$I_f(x, y) = \frac{A^2}{\lambda^2 f^2} \left| \iint U_0(x_0, y_0) M(x_0, y_0) \cdot \right.$$

$$\left. \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda f}(xu + yv)] \exp[j\phi(\rho, \theta)] dudv \right| \quad (4)$$

式中,  $U_0(x_0, y_0)$  为接收平面波电场分布;  $M(x_0, y_0)$  为孔径函数;  $f$  为接收透镜的焦距;  $\phi(\rho, \theta)$  是经过像差影响过后的畸变相位。利用此光强分布可以得到探测器接收到的畸变光斑,接下来就利用质心算法找到质心位置。同样设置透镜中心位置为原点位置,然后将质心位置与原点位置所形成方向  $(-u, -v, -f)$  设置为接收端实际光轴方向。

##### 4.2 反馈的高斯光方向

在确定反馈的高斯信标光方向时,一般需要忽略光束本身的畸变,即假设光束本身一直保持高斯光束状态传输,由此先模拟出远场端光强分布:

$$I_{fp}(x, y) = \frac{A^2}{\lambda^2 Z^2} \left| \iint W(\rho, \theta) U_0(r, \theta) \cdot \right.$$

$$\left. \exp[j\phi(\rho, \theta)] \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda Z}(\eta u + \xi v)] dudv \right| \quad (5)$$

式中,  $U_0(r, \theta)$  为出射的高斯光束电场分布;  $A$  为光束振幅常数;  $\lambda$  为波长;  $Z$  为传输距离;  $\phi(\rho, \theta)$  为在像差影响下的相位畸变;  $W(\rho, \theta)$  为透镜孔径函数。利用上式就可以模拟出远场端光强分布,再利用质心算法找到光斑图像上质心位置。设置透镜的中心位置为原点位置,定义此质心位置和原点位置所形成的方向  $(\eta_{\max}, \xi_{\max}, Z)$  就为反馈的高斯信标光方向。

对准误差夹角就为接收端实际光轴方向  $(\eta_{\max}, \xi_{\max}, Z)$  与反馈的高斯信标光方向  $(-u, -v, -f)$  之

间的夹角。

#### 5 激光器处于轴外发射状态时像差对对准精度的影响

由前面的分析可知当激光器的发射点和天线中心光轴不在同一轴线上时,即离轴参量  $h/s$  不为零时,天线就处于轴外发射状态。设置的仿真参数为:天线直径  $D=0.2$  m,  $h/s=0.1$  m,  $r_a=0$ 。此时轴外像差对对准精度的影响,如图2所示。

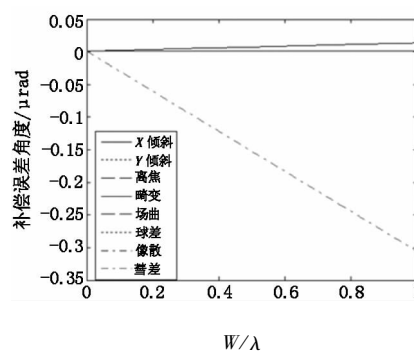


图2 存在  $h/s$  时各种像差对对准角度的影响

Fig. 2 the effect of Aberrations on pointer error for  $h/s$

图2表明当发射端处于轴外发射状态时,即离轴参量  $h/s$  不为零时,彗差相对于其他像差来说对对准角度影响最为明显,是不可忽略的。

离轴参量  $h/s$  会影响接收端像差的大小,进一步会影响对准误差角度。而且由于系统很难保证发射点光源距光轴的距离  $h=0$ ,在这种情况下彗差对对准角度的影响最大,所以图3给出了不同的  $h/s$  情况下彗差对对准误差角度的影响情况。

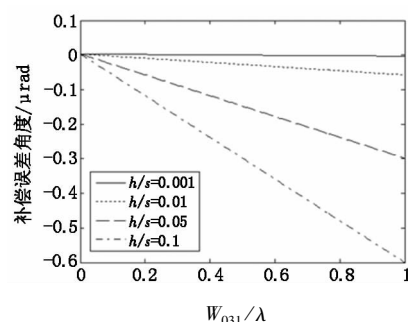


图3 不同的  $h/s$  下彗差对对准角度的影响

Fig. 3 the effect of coma on point error for different  $h/s$

图3表明,离轴参量  $h/s$  的大小对彗差影响特别明显,而且离轴参量  $h/s$  越大,对准误差就越大,这也说明尽量将离轴参量  $h/s$  调到最小对提高系统的对准精度尤其重要。

除此之外,在轴外发射状态时,发射端高斯光束的截断比率也会影响远端光斑的对准精度,由光束截断比率的定义:

$$\alpha = D/2w_{a0} \quad (7)$$

基于本节前面的仿真平台,设置仿真参数: $D = 0.2 \text{ m}$ ,  $h/s = 0.05$ ,  $r_a = 0$ ,图4给出了不同光束截断比率下彗差对对准的影响情况。

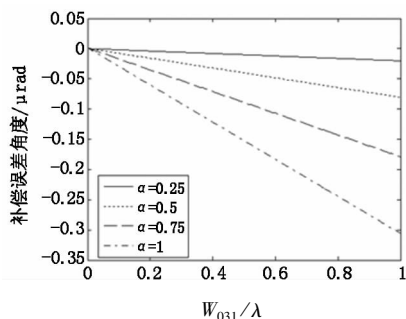


图4 不同 $\alpha$ 下彗差对对准的影响

Fig. 4 the effect of coma on point error for different  $\alpha$

图4表明:光束截断比率越大,彗差对对准的影响就越敏感。调小光束截断比率可以有效的减小彗差对对准的影响。

## 6 高斯光束中心偏离天线中心时像差对对准精度的影响

设定仿真参数: $D = 0.1 \text{ m}$ ,  $h/s = 0$ ,  $r_a = 1 \text{ mm}$ 。图5给出了存在高斯光束中心偏离天线中心时各种像差对对准精度的影响情况。

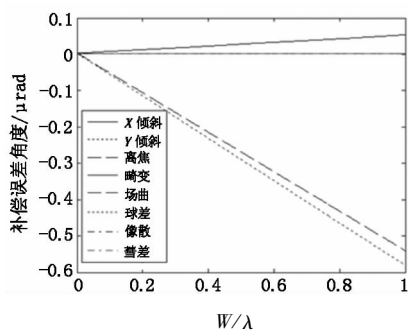


图5 存在 $r_a$ 时各种像差对对准精度的影响

Fig. 5 the effect of aberrations on pointer error for  $r_a \neq 0$

从图5可以看出,在只存在高斯光束中心偏离天线中心的情况时,离焦和球差对对准角度影响最为明显,是不可忽略的。

根据前面的定义,球差和离焦分别为 $W_{020}\rho^2$ 和 $W_{040}\rho^4$ ,它们属于轴上像差,而且对对准精度的影响是很相似的,所以下面单独提取球差进行分析。

轴上点发射的同心光轴经天线球面折射后,不同倾斜的光线交光轴于不同的位置形成球差,但若存在偏移距离 $r_a$ ,则同心光轴整体位置发生偏移,这样就引起了倾斜的光线交光轴的位置再一次发生了变化,导致球差发生变化。

设置仿真参数: $D = 0.1 \text{ m}$ ,  $h/s = 0$ ,改变偏移距

离 $r_a$ 。图7给出了不同的偏移距离下,球差对对准角度的具体影响情况。

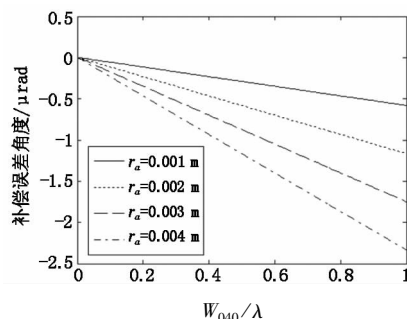


图6 不同 $r_a$ 下球差对对准角度的影响情况

Fig. 6 the effect of spherical aberration on point error for different  $r_a$

图6表明:高斯光束中心位置偏离天线中心越大,球差对对准角度的影响就越明显,调小此偏离距离可以有效减小球差对对准角度的影响。

设置仿真参数 $D = 0.1 \text{ m}$ ,  $h/s = 0$ ,  $r_a = 1 \text{ mm}$ ,图7给出了不同光束截断比率下球差对对准的影响情况。

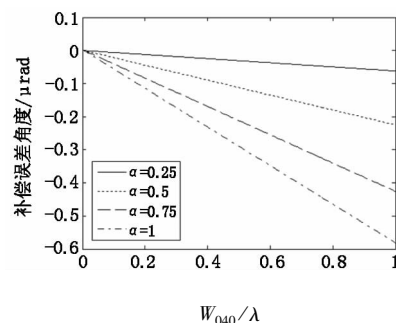


图7 不同 $\alpha$ 下球差对对准的影响

Fig. 7 the effect of spherical aberration on point error for different  $\alpha$

图7表明:光束截断比率越大,球差对对准角度的影响就越明显,这也说明适当调小光束截断比率可以减小球差对对准的影响。

## 7 结 语

在星间激光通信高精度对准阶段,像差会导致远场端光斑的畸变,进而会影响对准角度的判定。由于卫星激光通信系统中激光器的发射状态会导致像差对对准精度的影响程度的变化,所以文中针对激光器处于不同的发射位置,分析了各种像差对对准精度的影响情况。结果表明:

(1)在激光器处于轴外发射状态,即存在离轴参量时,彗差相对于其他像差来说影响最为明显,而且离轴参量越大影响就越明显,发射端可以通过调小离轴参量来减小彗差对对准的影响。

(2)高斯光束入瞳中心偏离天线中心距离会对离焦和球差有影响,而且越大影响就越明显,调小此

距离可以有效的减小球差对对准精度的影响。

(3)发射端的光束截断比率对彗差、球差与离焦都有影响,在发射端尽量调小光束截断比率可以减小这些像差对对准的影响。

综上所述,合理地调节发射端的发射状态有利于减小像差对对准精度的影响,提高系统的对准精度。

#### 参考文献:

- [1] M Toyoshima, N Takahashi. Mutual alignment errors due to the variation of wavefront aberrations in a free space laser communication link [J]. Optical Society of America, 2001, 9 (11): 592 - 602.
- [2] Jianfeng Sun, Liren Liu. Mutual alignment errors due to wave-front aberrations in intersatellite laser communications [J]. Optical Society of America, 2005, 44 (23): 4953 - 4958.
- [3] Liying Tan, Yuqiang Yang, Jing Ma. Influence of misalignment and aberrations on antenna received power in free space laser communications [C]//SPIE, 2010, 48 (12): 274 - 278.
- [4] Born M, Wolf E. Principles of optics-7th ed [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 228 - 257, 517 - 543.
- [5] Yang Yuqiang, Tan Liying, Ma Jing. Influence of spherical aberration and coma on far-field behavior of signal beam in intersatellite optical communications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35 (3): 129 - 133. (in Chinese)  
杨玉强, 谭立英, 马晶. 星间光通信中球差和彗差对信号光远场特性的影响 [J]. 中国激光, 2008, 35 (3): 129 - 133.
- [6] Jingsong Xiang, Lechun Pan. Influence of transmitting antenna's aberration on laser propagation for space optical communication [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30 (6): 913 - 917. (in Chinese)  
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.
- [7] Baowei Qiu, Jianfeng Xu. Experimental analysis of polarization aberration in optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39 (1): 124 - 128. (in Chinese)  
邱宝玮, 徐建峰. 光学系统偏振像差的实验分析 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39 (1): 124 - 128.
- [8] Hongzhan Liu, Yuefeng Ji. Effect of aberration on performance of the bit error rate in an inter satellite coherent optical communication receiving system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 39 (1): 21 - 26. (in Chinese)  
刘宏展, 纪越峰. 像差对星间相干光通信接收系统误码性能的影响 [J]. 光学学报, 2012, 39 (1): 21 - 26.