

像差对通信捕获光斑质心的影响分析

吴从均^{1,2} 颜昌翔¹ 刘伟¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学一部, 吉林 长春 130033; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 捕获是激光通信建立的必要手段,为探索通信中光学系统各像差对捕获性能的影响,从信标光传输过程和激光通信像质评价方式出发,分析了单色像差均方根小于 0.2λ 时对捕获质心处光强的影响,采用质心和加权质心方法计算了彗差、倾斜(畸变)所造成的捕获偏差;同时分析了各种单色像差之间对质心光强、捕获偏差的补偿关系。分析表明离焦能对球差、像散造成的质心光强下降有较好的补偿作用,畸变产生的捕获偏差可以用彗差进行完全补偿。采用 Zemax 软件设计了卡塞格林式和离轴三反(TMA)通信天线系统,利用该方法计算了在视场小于 0.3° 、像差综合作用时捕获的质心光强和引入的捕获偏差。计算结果很好地验证了分析结论,这些结论对空间激光天线选型、像质优化策略具有一定的借鉴作用。

关键词 光通信; 光学天线; 单色像差; 质心光强; 捕获偏差

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1005004

Analysis of Optical Aberration Impact on Acquisition Performance

Wu Congjun^{1,2} Yan Changxiang¹ Liu Wei¹

¹Space Optical Research Repartment One, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Acquisition is essential to laser communication link's establishing. In order to study the impact of optical aberrations on acquisition performances, based on the transmission process of beacon beam and image quality evaluation of laser communication system, the impact of monochromatic aberrations on acquisition centroid intensity and acquisition errors caused by tilt and coma with centroid and weighted centroid algorithm is analyzed as the root mean square (RMS) of monochromatic aberrations is less than 0.2λ . Besides, compensations between aberrations to the centroid intensity and acquisition errors are also discussed. The analysis reveals that acquisition errors caused by tilt (distortion) and coma can completely compensate for each other, and defocus can greatly compensate the centroid intensity decrease caused by sphere and astigmatism. The Cassegrain and three-mirror anastigmat (TMA) antenna systems are designed by Zemax optical software, and by using the method, the combined effect of aberration on centroid intensity and acquisition errors within 0.3° circle field is calculated. The result can sufficiently support the above view. These conclusions can give some guides to antenna type selection and image quality optimization strategy in laser communication optical system design.

Key words optical communications; optical antenna; monochromatic aberration; centroid intensity; acquisition error

OCIS codes 060.4510; 000.4430

1 引言

空间激光通信系统具有频带宽、速度快、抗干扰和抗截获能力强、构造轻小等优点,非常适合深空、星际、星地、空空、空地等链路之间的通信^[1]。建立空间激光通信必须经过瞄准、粗跟踪、捕获和精跟踪等准备过程,其目的都是调整接收和发射之间的光

轴方向,实现点对点的准确对准,该过程是整个激光通信设备研制的难点^[2]。激光通信光学系统对于激光光束质量要求非常高,都采用波像差均方根(RMS, f_{RMS})大小进行描述,如德国研制的用于 LEO-GEO 之间的发射和接收口径为 250 mm 的相干激光通信系统,光学天线中心视场波像差均方根

收稿日期: 2013-05-06; 收到修改稿日期: 2013-05-23

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103)

作者简介: 吴从均(1986—),男,博士研究生,主要从事空间光学仪器光学设计方面的研究。

E-mail: wucongjun789@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

仅为 $\lambda/30$ ^[3]。目前对于波前畸变研究主要是针对大气引起的波前畸变进行的^[4-6]，杨玉强^[7]对波前畸变对于瞄准、捕获和通信的影响进行了较全面的研究，但是采用波像差的计算方法不够精确，仅给出了彗差和倾斜对捕获偏差影响的数值分析结果，未考虑对质心光强度影响和像差之间相互作用情况；Toyoshima等^[8]采用泽尼克多项式展开研究了波前畸变对于激光瞄准的影响；Sun等^[9-10]采用泽尼克环多项式对存在中心遮拦的光学天线和相干位置探测误差进行研究；刘宏展等^[11]分析了像差对于相干通信误码率的影响。本文从远场分布的光波复振幅分布开始，采用波像差的一般表述形式和精确计算方法，分析了不同单色像差对目标捕获质心光强度的影响，采用质心法和加权质心法计算了像差造成的捕获偏差，分析了初级单色像差的相互作用关系。并设计了卡塞格林系统和离轴三反(TMA)系统，分析了两种天线中波像

差综合作用时对捕获偏差，质心光强度的影响，为激光通信光学系统的设计提供参考。

2 激光通信捕获系统的光学性能描述

2.1 像差形式下捕获接收的光强度

天线口径上所发射的信标光束相当于高斯光束通过望远系统变换后，再由主口径进行限制的高斯光束。由于通信距离远，如两通信终端相距约为36000 km时，满足夫琅禾费衍射条件，远场光强度相当于经过主镜口径限制后发射的高斯光束，其第一衍射极大位置距中心位置约为100 m，而天线口径一般仅为几百毫米，接收天线孔径上的光波分布均匀，可以按照平行光进行处理^[12]，而且强度十分微弱。因此，根据有像差存在时光的衍射理论，焦平面的光电场正比于有相位畸变的出瞳函数所进行的傅里叶变换如(1)式所示，畸变的相位即是系统波像差：

$$E(x, y) = \iint_{\Sigma} C \exp[ik\Delta W(\eta, \xi)] \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(x\eta + y\xi)\right] d\eta d\xi, \quad (1)$$

式中 C 为常数， ΔW 表示出瞳面上波像差， η, ξ 表示出瞳面坐标，天线系统出瞳面多为圆形，因此采用极坐标表示波像差极为方便，在物面归一化时，出瞳面上波像差级数可表示为

$$\Delta W = \sum_{l,m} W_{l,m} \rho^l \cos^m \varphi, \quad (2)$$

式中 $W_{l,m}$ 为像差系数， l, m 取不同的值时，表示不同的单色像差，(2)式能定量地反映了光学系统像差情况，在物面归一化时，波像差与波像差RMS、斯特雷尔比(Strehl ratio, 大小为 S)之间的关系如(3)、(4)式所示，表1给出了常用的几种初级像差在均方根为 0.2λ 时的像差系数大小：

$$f_{\text{RMS}}^2 = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \Delta W^2(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right] - \frac{1}{\pi^2} \left[\int_0^{2\pi} \int_0^1 \Delta W(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right]^2, \quad (3)$$

$$S = \frac{1}{\pi^2} \left| \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp[i2\pi\Delta W(\rho, \theta)] \rho d\rho d\theta \right|^2. \quad (4)$$

表1 $f_{\text{RMS}} = 0.2\lambda$ 时单色像差系数

Table 1 Monochromatic wave-front aberration coefficients with $f_{\text{RMS}} = 0.2\lambda$

W_{20} (defocus)	W_{11} (tilt)	W_{40} (sphere)	W_{31} (coma)	W_{22} (astigmatism)
0.6928λ	0.4λ	0.6708λ	0.5656λ	0.8λ

对 CCD 探测器或者四象限接收系统来说接收到的像元信号强度正比于焦面上光强度大小：

$$I(x, y) = E(x, y)E^*(x, y). \quad (5)$$

因此分析信号在质心位置的强弱可转化为对质心光强度信息的分析，再者光学系统波像差可以很方便地给出斯特雷尔比、RMS等光学像质评价指标的值，因此通过波像差的桥梁关系，建立像质和接收面质心位置、质心光强度之间的关系。

2.2 捕获光强度和捕获偏差计算

空间激光通信终端都用信标光实现捕获功能，

捕获是为了准确获取信标光的空间方向，再者为了保证解算的准确性，光斑质心位置一定要有足够高的能量，避免光斑弥散过大，解算不够准确，因此衡量天线系统捕获光斑的两个重要参数就是捕获位置和质心光强度，像差对前者的影响可以采用捕获偏差进行定义，后者可以采用质心能量归一化进行描述。

捕获偏差定义为实际解算的信标光轴与理论光轴的夹角。平台振动、大气环境变化、姿态计算误差、光学系统自身设计缺陷、温度变化等都会造成捕获偏差，相干激光通信中要求跟踪捕获精度不能大于

2 μrad , 光学系统的捕获偏差不能大于 0.5 μrad ^[13]。本文重点讨论光学系统设计中残留的各种单色像差所造成的捕获偏差。通信中捕获支路多采用像元细分方法, 提高空间分辨率。像元细分中常用普通质心法、加权质心法和阈值质心法解算接收光斑位置, 计算信标光束光轴信息, 如(6)~(8)式所示:

普通质心法:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint xI(x,y)dx dy}{\iint I(x,y)dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\iint yI(x,y)dx dy}{\iint I(x,y)dx dy} \end{cases} \quad (6)$$

阈值质心法:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint x[I(x,y) - T]dx dy}{\iint [I(x,y) - T]dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\iint y[I(x,y) - T]dx dy}{\iint [I(x,y) - T]dx dy} \end{cases} \quad (7)$$

加权质心法:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint xI^2(x,y)dx dy}{\iint I^2(x,y)dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\iint yI^2(x,y)dx dy}{\iint I^2(x,y)dx dy} \end{cases} \quad (8)$$

在信噪比较低的情况下, 采用阈值质心法, 精度最高, 但是此时必须设定阈值大小和背景电平一致, 然而背景电压一般会随信号强度变化而变化, 传统计算方法精度最低, 加权质心的方法居中^[1]。得到光斑质心位置后, 可据焦距 f 求解捕获偏差角度 θ , 计算公式如下:

$$\theta = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}/f. \quad (9)$$

捕获质心光强分布情况, 可根据系统的斯特雷尔比估算, 该值越接近 1, 表明光强度越集中, 光斑弥散越小。斯特雷尔比是根据波像差 RMS 大小进行衡量的, 各种大小不同的单色像差会导致相同大小的 RMS 值, 因此, 有必要讨论单色像差对光强分布的影响, 这样可根据接收质心光强大小和单色像差之间的关系, 对某些像差进行严格的限制, 提高质心位置接收光强, 提高系统性能。

3 单色像差对捕获性能影响数值分析

3.1 单色像差对捕获偏差和接收光强度的影响

单色像差中, 离焦、像散、球差都是沿光轴方向对称分布的像差, 其光强分布也是沿着光轴对称的, 质心位置也必然位于光轴上, 对捕获偏差没有任何影响, 仅仅影响焦面质心位置的光强度, 引起光斑弥散; 倾斜、彗差为非对称式像差, 这些像差会影响光斑的质心位置, 使其偏离高斯像点位置, 产生捕获偏差, 同时也可能会对质心位置的光强度产生影响。因此分析捕获偏差时, 只需分析彗差和倾斜, 对于质心光强度大小, 需要对每种像差进行全面分析。

对此分析了焦距为 2 m, 出瞳大小为 10 mm, 波长为 974 nm 的信标光, 在出瞳面上仅存在彗差、倾斜时的捕获偏差情况。在出瞳归一化时, 每一种单色像差 RMS 值一定时, 都可以计算得到其单色像差系数, 如(3)式所示, 利用得到的像差系数, 依次代入(2)、(1)、(5)式就可以得到像面光强分布情况, 根据光强分布采用(6)~(8)式的计算形式, 就可以得到质心位置, 进而根据(9)式求取捕获偏差。图 1 给出了单色像差与捕获偏差的关系。由图 1 可以看出倾斜所造成的捕获偏差和倾斜波像差均方根成正比。彗差造成的捕获偏差为非线性变化, 三次曲线拟合后, 偏差大小为 0.02 μrad 。图 2(a) 给出了每一种初级单色像差均方根在 0~0.2 λ 变化时, 高斯像点位置归一化光强度值, 图 2(b) 给出了在质心位置处的光强分布情况。文中采用 20 dB 进行描述, 这是因为质心光强的大小对应了像元探测能量的高低, 当光强为 0 dB 时, 表明相对光强为 1, 没有任何损失。采用这种表示, 便于后续的能量计算。

图 2 中 RMS 计算曲线表示采用波像差 RMS 法计算的光强度情况, 从图 2(a) 中可以看出当

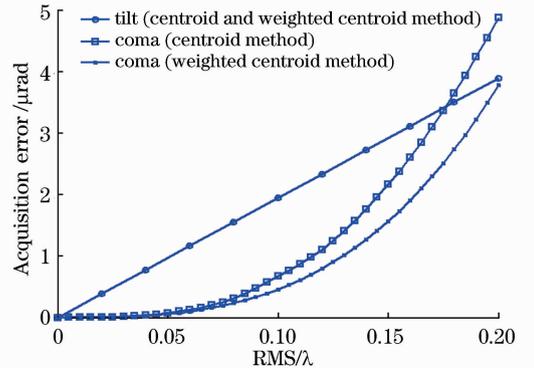


图 1 单色像差和捕获偏差的关系

Fig. 1 Relationship between monochromatic aberration and acquisition error

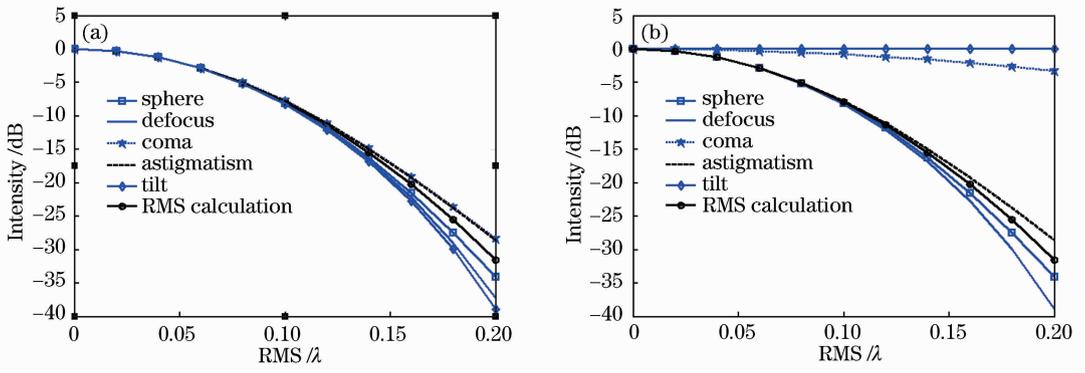


图 2 单色像差和焦面接收光强的关系。(a) 高斯像点位置；(b) 质心位置

Fig. 2 Relationship between monochromatic aberration and receive intensity on focal plane. (a) Gauss image position; (b) centroid position

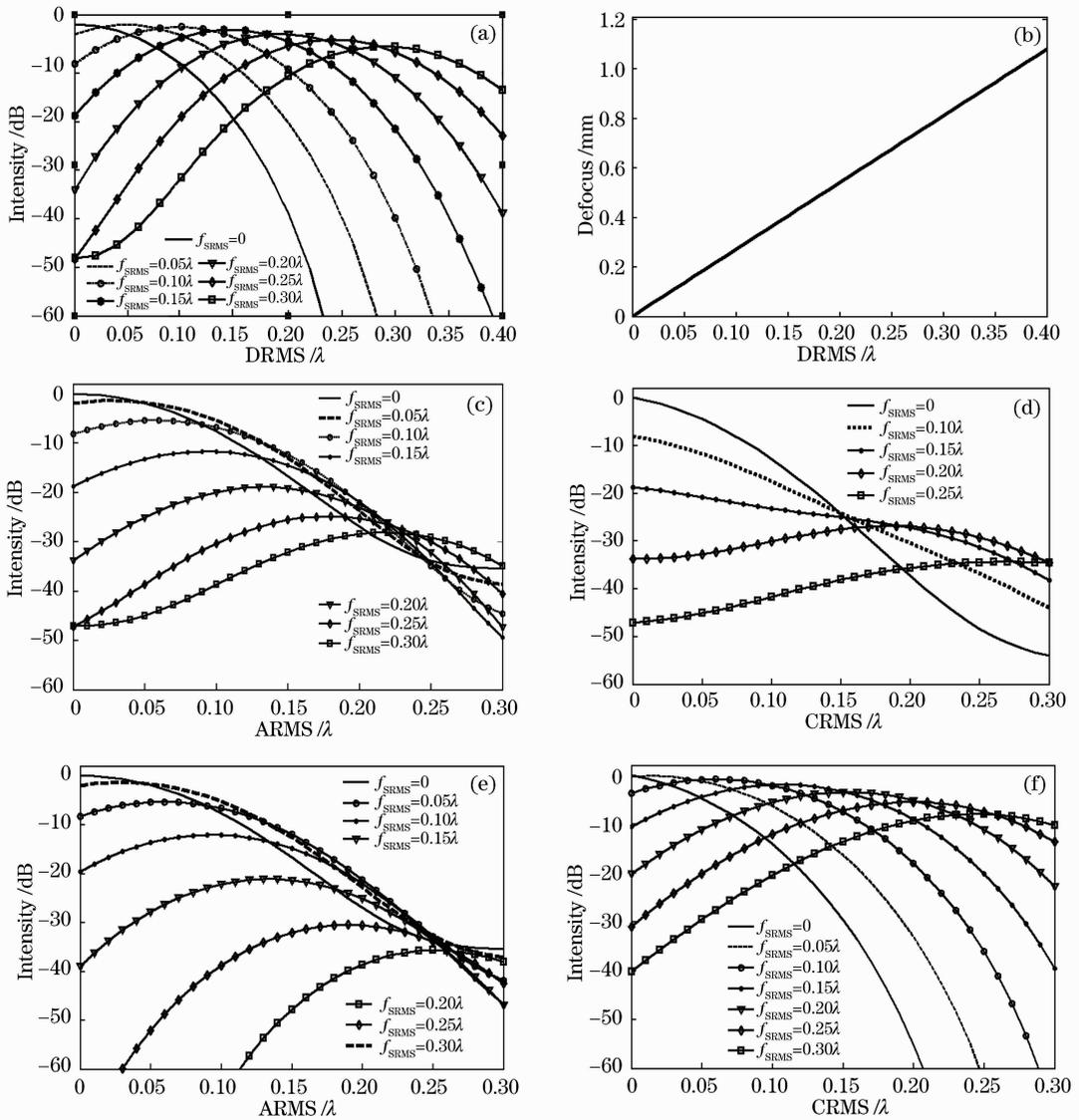


图 3 不同像差之间对质心光强的补偿关系。(a) 离焦和球差；(b) 离焦和成像位置；(c) 球差和像散；(d) 球差和慧差；(e) 离焦和像散；(f) 倾斜和慧差

Fig. 3 Centroid intensity compensation between different aberrations. (a) Defocus and sphere; (b) defocus and image position; (c) sphere and astigmatism; (d) sphere and coma; (e) defocus and astigmatism; (f) tilt and coma

RMS 值小于 0.1λ 时,各种初级单色像差在高斯像点位置对质心光强度影响基本相同;当 RMS 值大于 0.1λ 时,各单色像差对光强影响出现不一致情况,影响从大到小依次是倾斜、离焦、球差、像散、彗差,其中彗差和像散影响基本相同,图中很难分清;在波像差 RMS 为 0.2λ 时,倾斜造成的光强度下降为 -38.2 dB ,彗差造成的光强度下降为 -28.5 dB ,相差近 10 dB 。从图 2(b)中可以看出在质心位置上,球差、像散、离焦计算的光强度下降没有任何改变,这是因为这些轴向对称像差不会改变光斑的质心位置,质心仍在高斯像点位置;而倾斜(畸变)在质心位置光强仍为 1,不会造成像面上的强度弥散,这也是倾斜(畸变)不会造成像面质量下降的原因,仅是将像面中心位置偏离理论高斯位置;彗差在质心位置光强要比高斯像点高 20 dB ,它是唯一一种既能造成光斑弥散,又能改变光斑质心位置的单色像差。

3.2 单色像差之间对质心光强度和捕获偏差的相互作用

图 3 和图 4 中 ARMS、DRMS、TRMS、CRMS、SRMS 分别表示像散、离焦、倾斜、彗差、球差的波像差 RMS,其值分别对应 f_{ARMS} 、 f_{DRMS} 、 f_{TRMS} 、 f_{CRMS} 、 f_{SRMS} 。计算思路和 3.1 节中相同,但是在任何两种像差补偿时,像差系数符号相反,分析的结论也都是基于 3.1 节中的光学系统参数,只是将两种初级单色像差添加到出瞳面上进行计算分析。从图 3 可知,离焦对于球差造成的质心光强度下降补偿作用非常明显,因此在球差比较大的情况下,可以通过离焦方法,提高像面光能集中度,减小像斑弥散大小;离焦能够通过像面移动进行完全补偿;像散也可以对球差进行一定的补偿,但是补偿效果明显不如离焦;彗差和球差之间的补偿关系很差,补偿效果很不明显;离焦可对像散造成的质心光强下降进行一定

的补偿;彗差和倾斜之间的补偿也十分明显,通过倾斜可以大幅度弥补彗差造成的像面质心光强下降。

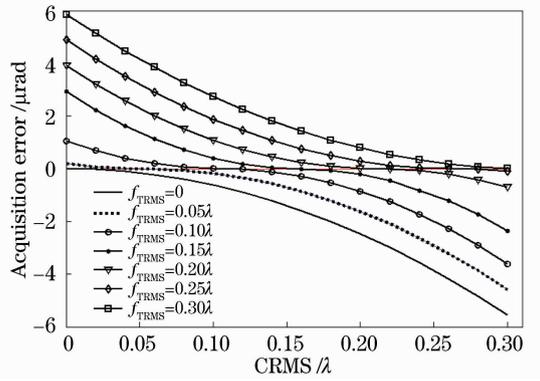


图 4 彗差和倾斜(畸变)的捕获偏差补偿关系
Fig. 4 Acquisition error compensation between tilt (distortion) and coma

从图 4 可以看出,彗差和倾斜的像差系数相反时候可以补偿捕获偏差,当两像差系数选取合适时,可以实现完全补偿,这时采用质心计算得到的光轴信息将会非常准确,没有任何偏差。

4 实例分析

对 3.1 节中提出的光学系统要求,分别采用 TMA 和卡塞格林结构设计了全视场波像差 RMS 都小于 0.045λ 天线系统,设计结果和像质情况如图 5 和图 6 所示。对视场角(FOV)为 0.3° 圆视场内的捕获偏差和质心光强度(归一化)进行了计算,计算结果如图 7 和图 8 所示。

从图 6 中可以看出光学系统的彗差大小是随着视场的增大呈线性增大的,卡塞格林系统的畸变在 0° 和边缘视场进行了校正,由于结构对称,彗差和畸变在正负视场内分布相同,TMA 系统不具有对称性特点在正负视场都沿着视场增大。图 7 中表示,

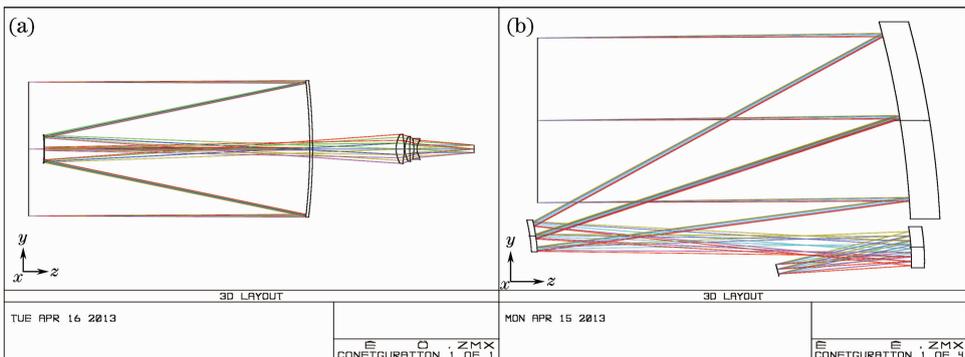


图 5 空间激光通信天线光学系统。(a) 卡塞格林; (b) 离轴三反

Fig. 5 Antenna of space laser communication. (a) Cassegrain; (b) TMA

卡塞格林系统的质心位置光强比 TMA 系统大 35%，这主要是由于卡塞格林系统的中心遮挡导致的；设计中卡塞格林系统的畸变系数和彗差系数符号相反，因此可以进行相互补偿，所以捕获偏差呈现图 8 分布情况，TMA 系统畸变和彗差符号也相反，但是随着视场增大，畸变变化明显迅速加快，如图 6 所示。因此，当选择在 0° 视场对捕获偏差进行了完全补偿时，在 -0.3° 和 0.3° 仍有较大残余量，而且呈

不对称分布，在 $0^\circ \sim 0.3^\circ$ 视场捕获偏差增大速度远大于 $0^\circ \sim -0.3^\circ$ 视场，这也是由于畸变在视场较大时增大速度远大于彗差增大的速度所造成的。从采用普通质心法和加权质心法计算结果可得，加权质心计算的结果小于普通质心计算结果，因此该方法计算的光轴信息更为准确，其精度高于普通质心计算方式，上述结果可以很好地验证 3.2 节的分析结果。

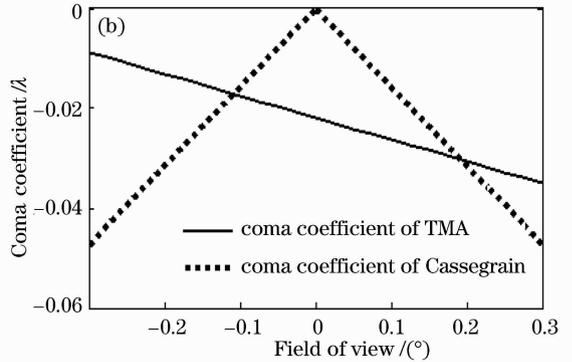
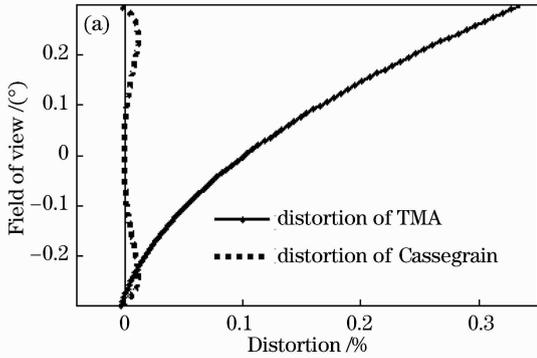


图 6 天线系统像质。(a) 畸变；(b) 彗差

Fig. 6 Image quality of antenna. (a) Distortion; (b) coma

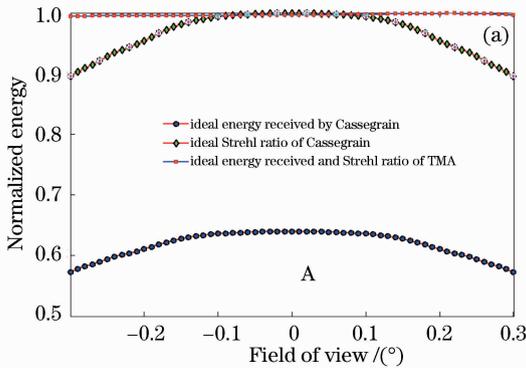


图 7 接收面质心光强度

Fig. 7 Centroid intensity in receive plane

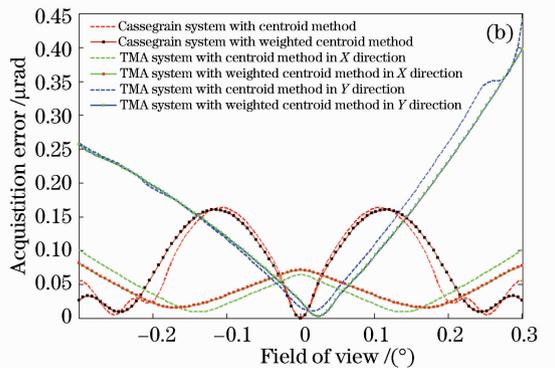


图 8 捕获偏差

Fig. 8 Acquisition error

5 结 论

激光通信距离很远，光学系统接收到的能量极其微弱，必须采用优良的光学系统提高系统的接收面质心位置附近的光能；再者为了保证捕获光轴的准确性，要求接收光斑尽量呈现圆形，以免造成捕获偏差。通过上述分析可以得到以下结论：1) 球差、像散、场曲、离焦能降低光学系统接收面质心位置能量，造成光斑能量弥散，而且在单色像差的波像差 RMS 大于 0.1λ 时，这四种单色像差对光强分布影响存在差别；2) 畸变和倾斜能够使光学系统像点质心位置偏移理想高斯像点，从而造成捕获偏差，但不会造成质心光强度下降；3) 彗差不仅会造成质心光

强度下降，同时也会造成实际像点质心偏移理论高斯像点位置，引起捕获偏差；4) 合适选取畸变、倾斜、彗差像差系数，可以对捕获偏差进行有效补偿，从而降低像差对捕获偏差的影响；5) 合理地选择离焦位置，能够对光学系统产生的球差、像散造成的质心能量下降进行很好的补偿，减小光斑弥散。对 TMA 系统和卡塞格林系统分析可以看出加权质心解算光斑位置会更加接近理论光轴，捕获偏差更小，而且捕获偏差也会根据视场的不同随着像差大小变化而变化。

对于空间激光通信系统的光学设计，指标中一般都不对各种像差进行严格要求，仅对波像差提出

总体要求。但从本文分析来看,必须要求光学设计者重视对每一种单色像差的严格控制。在满足系统波像差的前提下,尽量使畸变和彗差系数相反,减小捕获偏差,利用离焦补偿像散、球差造成的光斑弥散,补偿质心能量大小,控制每一种单色像差的像差系数大小,利用相互补偿原理可充分提高光学系统的性能。

参 考 文 献

- 1 Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technology and System of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 2-5.
姜会林,佟山峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 2-5.
- 2 Li Rui, Zhao Hongli, Zeng Dexian. Free-space laser communication and its key technology[J]. J Applied Optics, 2006, 27(2): 152-154.
李睿,赵洪利,曾德贤. 空间激光通信及其关键技术[J]. 应用光学, 2007, 27(2): 152-154.
- 3 K Böhmer, M Gregory, F Heine, *et al.*. Laser communication terminals for the European data relay system[C]. SPIE, 2012, 8246: 82460D.
- 4 Wang Qingquan. Analysis of the Influence of Atmospheric Turbulence on the Performance of Partially Coherent Laser Communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. 9-21.
汪清泉. 部分相干激光通信性能受大气湍流影响的分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011. 9-21.
- 5 Ke Xizheng, Song Peng, Pei Guoqiang. Research on multi-aperture reception in wireless laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1201003.
柯熙政,宋鹏,裴国强. 无线激光通信中的多孔径接收技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1201003.
- 6 Wang Zhou. The Research of Algorithm for Wave-Front

- Distortion Compensation in Atmospheric Optical Communication [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009. 8-32.
- 汪洲. 大气光通信中波前畸变补偿算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009. 8-32.
- 7 Yang Yuqiang. Research on the Influence of Wave-Front Aberrations on Inter-Satellite Laser Link[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. 21-118.
杨玉强. 波前畸变对星间激光通信链路性能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. 21-118.
 - 8 M Toyoshima, N Takahashi, T 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.
 - 9 J Sun, L Liu, M Yun, *et al.*. Mutual alignment errors due to wave-front aberrations in intersatellite laser communications[J]. Appl Opt, 2005, 44(23): 4953-4958.
 - 10 Xu Nan, Liu Liren, Wang Lingyu, *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser communications[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 347-350.
许楠,刘立人,万玲玉,等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 347-350.
 - 11 Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Liu Liren. Effect of aberration on performance of the bit error rate in an inter-satellite coherent optical communication receiving system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0106002.
刘宏展,纪越峰,刘立人. 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, 32(1): 0106002.
 - 12 Chen Jing, Xue Haizhong, Liu Xuewen, *et al.*. Low-power laser jamming techniques to free space optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0106005.
陈静,薛海中,刘学文,等. 无线激光通信系统弱光干扰技术[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0106005.
 - 13 P W Young, L M Germann, R Nelson. Pointing, acquisition, and tracking subsystem for space-based laser communications [C]. SPIE, 1986, 616: 118-128.

栏目编辑: 王晓琰