

# 离轴格里高利系统中失调对远场时空特性影响

胡必龙<sup>1,2\*</sup>, 李伟<sup>1,2</sup>, 王逍<sup>1,2</sup>, 左言磊<sup>1,2</sup>, 母杰<sup>1,2</sup>, 王晓东<sup>1,2</sup>, 吴朝辉<sup>1,2</sup>, 李钊历<sup>1,2</sup>,  
曾小明<sup>1,2</sup>, 粟敬钦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900

**摘要** 扩束是超高峰值功率激光装置中必不可少的一环,由离轴抛物面镜组成的反射式扩束系统可解决传统透射式扩束带来的色散、色差及激光脉冲前沿畸变等问题。利用光线追迹法和惠更斯-菲涅耳原理对反射式扩束和聚焦过程进行分析,计算了在反射式扩束系统参数不同时,离轴抛物面镜失调对激光脉冲远场时空特性的影响,给出了激光脉冲斯特列尔比和峰值强度的误差允许范围。

**关键词** 物理光学; 几何光学设计; 激光扩束; 离轴抛物面镜; 光线追迹; 矢量衍射; 超快激光脉冲; 时空特性

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2126003

## Misalignment Effect on Far-Field Spatio-Temporal Characteristics in Off-Axis Gregorian System

Hu Bilong<sup>1,2\*</sup>, Li Wei<sup>1,2</sup>, Wang Xiao<sup>1,2</sup>, Zuo Yanlei<sup>1,2</sup>, Mu Jie<sup>1,2</sup>, Wang Xiaodong<sup>1,2</sup>,  
Wu Zhaohui<sup>1,2</sup>, Li Zhaoli<sup>1,2</sup>, Zeng Xiaoming<sup>1,2</sup>, Su Jingqin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Beam expander is an essential part of ultrahigh peak power laser system. The reflective beam expander can solve the problem of dispersion, chromatic aberration, and pulse front distortion, which can be produced by transmission beam expander. The reflective beam expansion and focusing process based on ray tracing method and Huygens-Fresnel principle is analyzed. The influence of the off-axis parabolic mirror misalignment on the spatio-temporal characteristics of the laser pulse are calculated, when the parameters of the reflective beam expander system are different, and the error tolerance range of Strehl ratio and peak intensity is given.

**Key words** physical optics; geometric optical design; laser beam expansion; off-axis parabolic mirror; ray tracing; vector-diffraction theory; ultrafast lasers; spatio-temporal characteristic

**OCIS codes** 260.1960; 220.2740; 320.7090

### 1 引言

激光扩束是高峰值功率激光装置中必不可少的部分,其主要作用是降低光学元器件的损伤风险,同时压缩激光的空间发散角<sup>[1]</sup>。目前通常是用透镜组成的开普勒式或伽利略式系统进行扩束,而这种透

射式系统将给激光脉冲引入色差、色散、自聚焦以及其他时空畸变效应<sup>[2]</sup>。这些畸变虽然可以在一定程度上进行补偿,但随着超短激光技术的发展,所需激光的光束口径和谱宽逐渐增大,此时激光脉冲经过透镜产生的时空畸变也会随之增大<sup>[3-4]</sup>,这导致完全补偿这种畸变的难度也会相应提高。相比于透镜,

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-05-04; 录用日期: 2021-05-27

基金项目: 等离子体物理重点实验室基金(jckys2018212024)

通信作者: \*hbl1271@163.com

离轴抛物面镜会引入较小的非线性效应和色散效应(如由反射膜层带来的),因此采用离轴抛物面镜组成的反射式扩束系统可以很好地解决上述问题。

虽然离轴抛物面镜具有上述优点,但离轴抛物面镜准直难度较高,尤其是在短焦时其对角度的调整精度甚至会达到微弧度量级<sup>[5]</sup>,这种误差可能会影响光束指向精度和光束质量<sup>[6-7]</sup>。目前针对离轴抛物面镜作为终端聚焦元件的分析较多,文献[8-9]中采用几何光学的方法分析了入射角度偏差和离轴抛物面镜失调产生的像差;文献[10-12]采用衍射方法<sup>[13-16]</sup>对离轴抛物面镜聚焦激光脉冲远场的空间分布进行了分析。而对于离轴抛物面镜组成的反射式扩束系统,只有少量文献简单分析了其几何光学成

像特性<sup>[17-18]</sup>,缺乏对激光脉冲远场的衍射分析以及激光脉冲时域特性的分析。

本文结合光线追迹法和惠更斯-菲涅耳原理,在高峰值功率激光装置中扩束系统的结构和参数不同时,计算了离轴抛物面镜的失调误差对激光脉冲远场的斯特列尔比和峰值功率的影响,计算结果可为离轴格里高利式扩束系统设计提供理论依据。

## 2 理论模型

目前常用的反射式扩束系统大致可分为两种:卡塞格林系统和格里高利系统。而这两种系统又可分为轴对称式和离轴式,如图 1 所示。

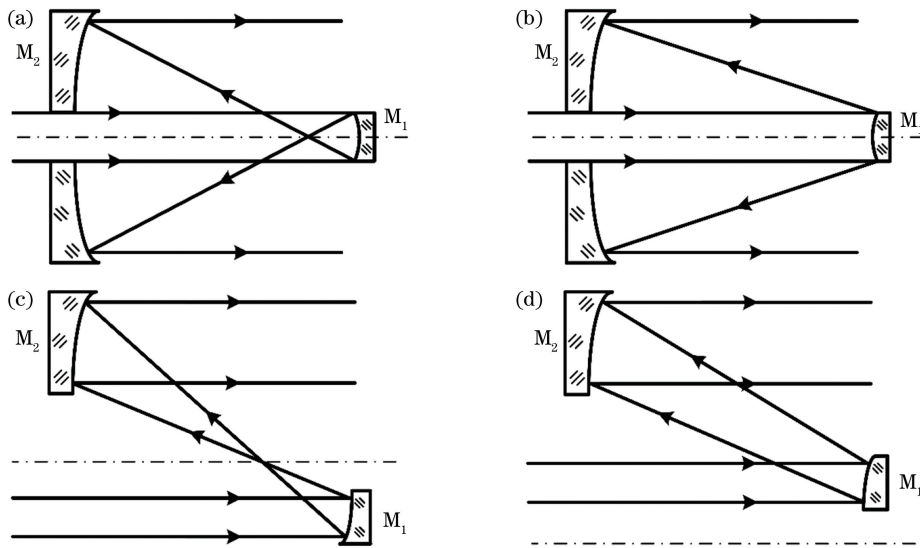


图 1 常见的反射式扩束系统。(a)轴对称式格里高利系统;(b)轴对称式卡塞格林系统;(c)离轴式格里高利系统;(d)离轴式卡塞格林系统

Fig. 1 Common reflective beam expander systems. (a) Axial symmetric Gregorian system; (b) axial symmetric Cassegrain system; (c) off-axis Gregorian system; (d) off-axis Cassegrain system

图 1(a)和(b)中所所示的轴对称反射式扩束会使激光中心部分的光线沿原方向返回,损失掉中心部分的激光能量,所以轴对称式不适合作为高峰值功率激光装置的扩束系统,若同时考虑扩束过程中对激光脉冲进行空间滤波,则只有存在焦点的离轴格里高利系统适合作为扩束系统。

为了研究扩束系统对激光脉冲远场影响,假设最终采用一个理想聚焦元件对激光脉冲进行聚焦,如图 2 所示。

图 2 中所有离轴抛物面镜的光轴都是  $z$  轴方向, $\theta$  为离轴角,表示入射光中心光线与反射光线的夹角,图中任一抛物面镜和入射光线的方程分别可以表示为

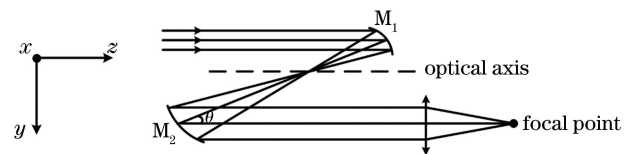


图 2 反射式扩束和聚焦示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reflective beam expansion and focusing system

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = 4f(z - z_0), \quad (1)$$

$$\frac{(x - x_1)}{m_1} = \frac{(y - y_1)}{n_1} = \frac{(z - z_1)}{p_1}, \quad (2)$$

式中: $(x_0, y_0, z_0)$ 是离轴抛物面镜中心坐标; $f$ 是其焦距; $(x_1, y_1, z_1)$ 是入射光线经过某一点的坐标; $(m_1, n_1, p_1)$ 是其方向向量。联立(1)(2)两式,

即可得到入射光线与抛物面的交点  $P(x_2, y_2, z_2)$ 。对(1)式求偏导可以知道  $P$  处的法线为

$$\frac{x-x_2}{x_2-x_0} = \frac{y-y_2}{y_2-y_0} = \frac{z-z_2}{-2f} \quad (3)$$

通过(2)(3)两式以及光的反射定律可求得反射光线的方向向量,假设为  $(m_2, n_2, p_2)$ ,反射光线方程即可表示为

$$\frac{(x-x_2)}{m_2} = \frac{(y-y_2)}{n_2} = \frac{(z-z_2)}{p_2} \quad (4)$$

通过上述方程即可从点光源出发追迹入射面所有的光线至像面,进而得到所有光线传输的方向和光程,若已知入射面光场的复振幅分布,则根据惠更斯-菲涅耳原理即可求得激光脉冲在远场的空间分布。

实际使用过程中由于光学平台抖动,空调、水箱等引起的振动以及装调误差将会造成  $M_1$  和  $M_2$  偏离理想位置,用  $\Delta$  表示  $M_1$  和  $M_2$  可能产生的误差。将  $\Delta$  代入(1)式,按照上述方法同样能求出有误差情况下的任意平面的光场分布。

### 3 数值计算与分析

在高峰值功率激光装置中,为了避免激光元件损伤,激光脉冲的空间分布通常采用平顶高斯分布或超高斯分布。假设入射激光脉冲口径为  $D=60$  mm,由于此时激光脉冲的口径较大,发散角较小,在此条件下可将入射光近似为强度均匀分布的平行光处理。两离轴抛物面镜焦距分别为  $f_1=600$  mm 和  $f_2=2400$  mm,理想聚焦元件距第二抛物面镜的距离和自身焦距均为 5000 mm。离轴抛物面镜失调误差大致可分为五种,分别是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的离心误差和  $x$ 、 $y$  方向的旋转误差(由于  $z$  方向是离轴抛物面镜光轴方向,沿  $z$  方向的旋转不会对激光脉冲产生任何影响),并模拟了在扩束系统具有这五类不同误差时激光脉冲远场的时空分布特性。

#### 3.1 离轴角不同时误差对激光脉冲空间特性影响

地基和光学平台<sup>[19]</sup>、支撑镜架<sup>[20]</sup>及其他可能的振动源<sup>[21]</sup>带来的影响,将导致偏心以及旋转的误差达到数十至数百微米/微弧度量级。在此假设反射式扩束系统的离轴角为  $45^\circ$ ,分别取不同方向离心/旋转误差 50、100、200  $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$ ,对入射场采样  $128 \times 128$ ,远场采样为  $256 \times 256$ ,远场采样间隔为 0.5  $\mu\text{m}$ ,激光脉冲经过扩束系统后聚焦于远场的空间分布情况如图 3 所示。

采用斯特列尔比对激光脉冲远场空间分布进行评价,从图 3 中可以看出,误差越大时激光脉冲远场

斯特列尔比越低,而不同种类误差对远场空间分布的影响有所不同。考虑通过改变离轴角来减小误差对远场空间分布的影响,图 4 模拟了在离心误差和旋转误差分别为 50  $\mu\text{m}$  和 50  $\mu\text{rad}$  时,激光脉冲远场斯特列尔比随扩束系统离轴角的变化情况。

图 4 的结果表明,沿  $x$ 、 $y$  方向的离心和旋转误差对激光脉冲斯特列尔比的影响随离轴角的增大呈现先减后增的趋势;而  $z$  方向的离心误差对激光脉冲空间和时间的的影响随离轴角的变化呈单调递减趋势。因此越小的离轴角越能提高扩束系统对这五种误差的容忍程度。值得一提的是,当失调误差大小发生变化时,仅会影响图中曲线的幅值,而变化趋势保持不变,故在此不作赘述,后文中同样会采取 50  $\mu\text{m}$  和 50  $\mu\text{rad}$  这一数值进行计算。

#### 3.2 离轴角不同时误差对激光脉冲时间特性影响

除了误差对激光脉冲空间特性有影响以外,近场不同位置的激光脉冲到达远场时间不一致也会影响激光脉冲时间特性。计算了离轴角为  $45^\circ$  时,近场不同位置到达远场的时间分布,如图 5 所示。

由图 5 可知,不同误差都会造成边缘位置与中心位置激光脉冲传输存在时间差,在该条件下约为 0.2 fs。文献[22]指出这种时间差会对远场激光脉冲的脉宽造成等量的影响,事实上这种说法是不准确的。这是由于激光脉冲传输至远场时,大部分光线会集中在中心位置,虽然边缘位置传输的时间差较大,但其所占权重较低。采用如下公式进行计算,

$$E_{\text{far}}(\omega_{\text{all}}) = E_{\text{near}}(x_{\text{near}}, y_{\text{near}}, z_{\text{near}}, \omega_{\text{all}}) \cdot \exp\left(i \frac{\omega_{\text{all}} d}{c}\right) \quad (5)$$

式中:  $(x_{\text{near}}, y_{\text{near}}, z_{\text{near}})$  是一光线在近场的坐标;  $\omega_{\text{all}}$  是所有的频率分量;  $d$  是近场某一点到达焦平面经过的光程。通过(5)式可以得到近场不同位置对远场频域的影响,对相同频率成分的电场进行相干叠加,不同频率成分的电场进行非相干叠加即可得到最终远场的频域信息,对其作傅里叶逆变换即可得到远场的时域信息。据此模拟了激光脉冲远场峰值功率随扩束系统离轴角的变化情况,如图 6 所示。

结果表明,沿  $x$ 、 $y$  方向的离心和旋转误差对激光脉冲峰值功率的影响随离轴角的变化呈现先减后增的趋势,因此越小的离轴角越能提高扩束系统对这四种误差的容忍程度;而  $z$  方向的离心误差对激光脉冲峰值功率的影响随离轴角的变化呈单调递增趋势,因此越大的离轴角越能提高扩束系统对  $z$  方向的离心误差的容忍程度。结合 3.1 节中结果,同



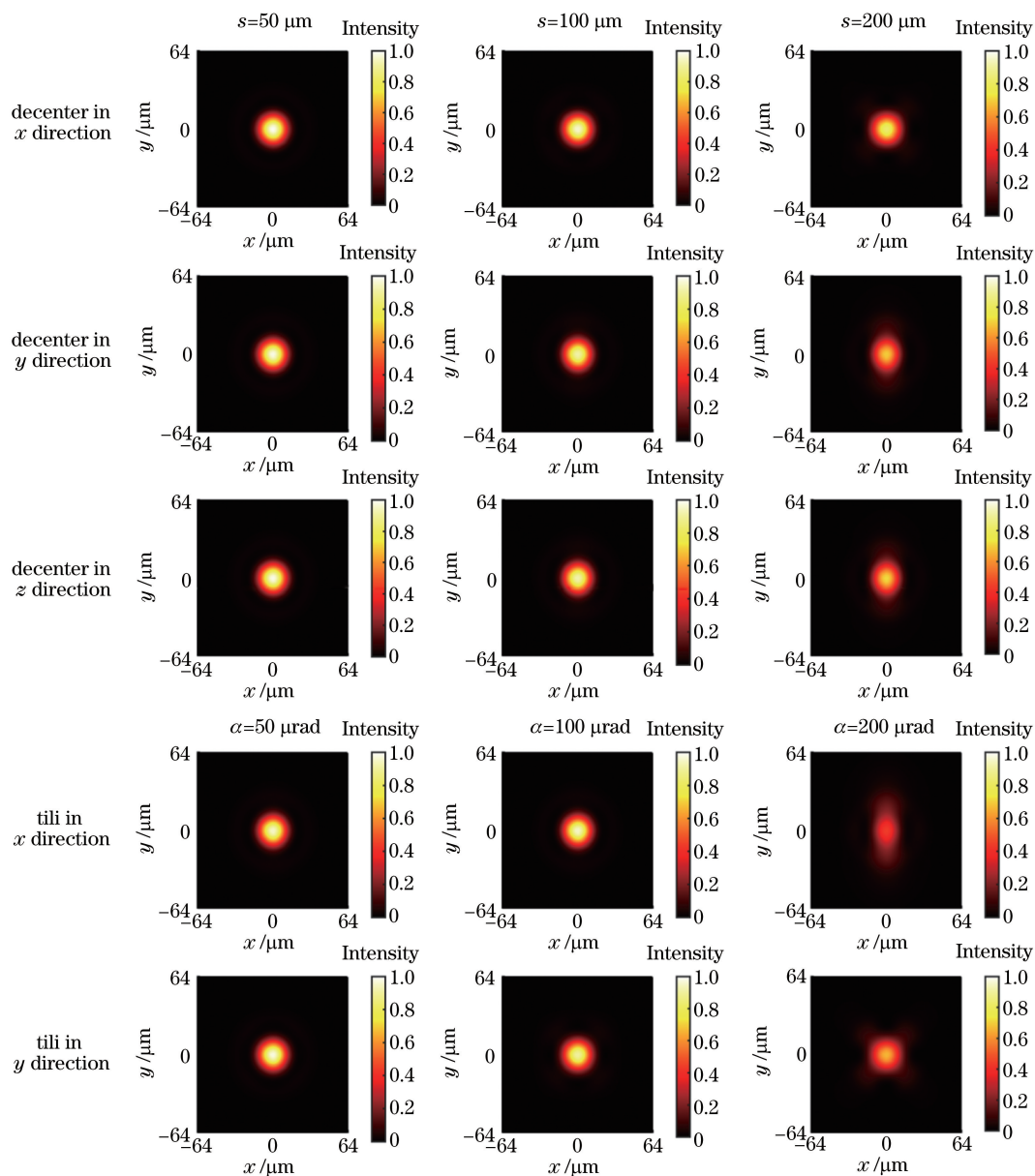


图 3 离轴抛物面镜具有不同失调误差时激光脉冲远场的空间分布。(a)  $x$  方向离心;(b)  $y$  方向离心;  
(c)  $z$  方向离心;(d)  $x$  方向旋转;(e)  $y$  方向旋转

Fig. 3 Far-field spatial distribution with different misalignment of off-axis parabolic mirror. (a) Decenter in  $x$  direction; (b) decenter in  $y$  direction; (c) decenter in  $z$  direction; (d) tilt in  $x$  direction; (e) tilt in  $y$  direction

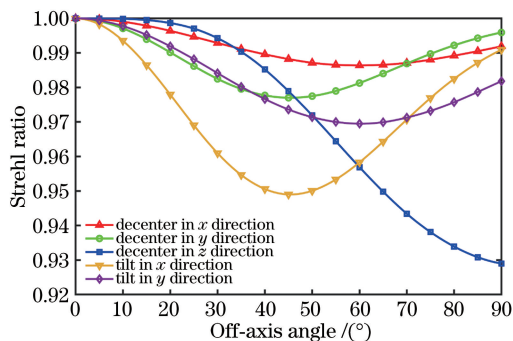


图 4 斯特列尔比随离轴角的变化

Fig. 4 Strehl ratio varying with off-axis angle

时考虑这五种误差对时间分布和空间分布的影响,反射式扩束系统的离轴角越小,其对装调误差容忍程度越高。若考虑到边缘光束遮拦的问题,离轴抛物面镜的离轴量至少应大于光束口径的一半,即

$$f_1 \tan \theta \geq \frac{D}{2} \quad (6)$$

因此该系统最佳的离轴角度应设为  $\theta = \arctan(D/2f_1)$ 。

### 3.3 其他因素对激光脉冲远场时空分布影响

除了离轴角这一因素,同样考虑了其他因素对激光脉冲远场时空分布的影响,如离轴抛物面镜焦

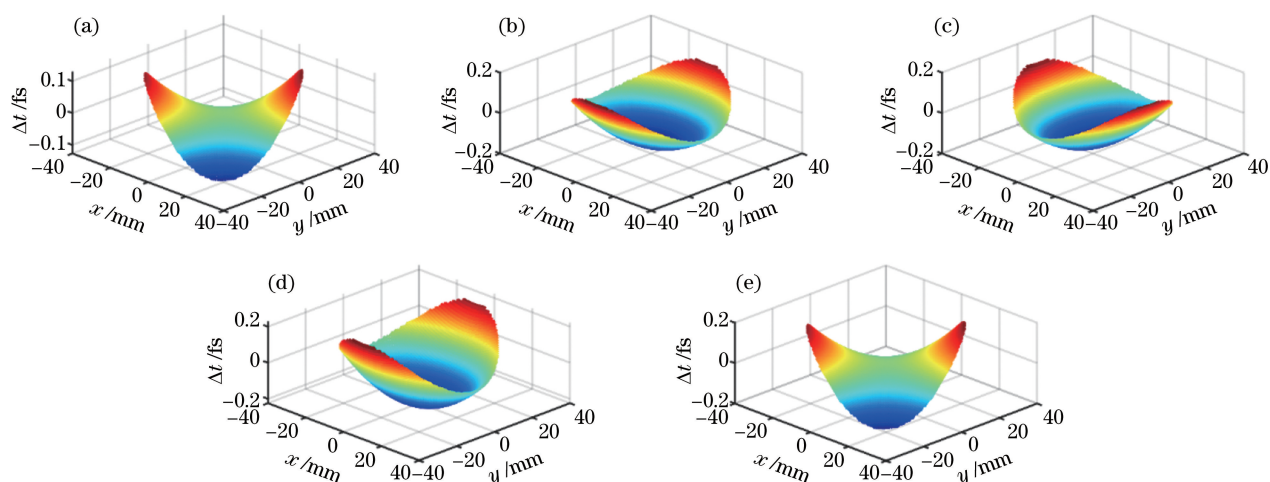


图 5 离轴抛物面镜具有不同失调误差时激光脉冲远场的时间分布。(a)  $x$  方向离心;(b)  $y$  方向离心;(c)  $z$  方向离心;(d)  $x$  方向旋转;(e)  $y$  方向旋转

Fig. 5 Far-field temporal distribution with different misalignment of off-axis parabolic mirror. (a) Decenter in  $x$  direction; (b) decenter in  $y$  direction; (c) decenter in  $z$  direction; (d) tilt in  $x$  direction; (e) tilt in  $y$  direction

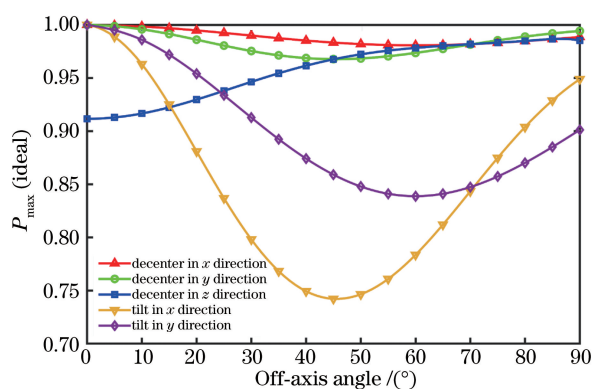


图 6 峰值功率随离轴角的变化

Fig. 6 Peak power varying with off-axis angle

距;或将 1 次 4 倍扩束分解为 2 次 2 倍扩束,寻求是否能通过多级扩束补偿这种误差对激光脉冲造成的影响。

假设离轴角为  $\theta = \arctan(D/2f_1)$ ,分为以下三种情形:1)采用一级 4 倍扩束,  $f_1 : f_2 = 600 \text{ mm} : 2400 \text{ mm}$ ;2)采用一级 4 倍扩束但减小焦距,  $f_1 : f_2 = 500 \text{ mm} : 2000 \text{ mm}$ ;3)采用两级 2 倍扩束,第一级  $f_1 : f_2 = 600 \text{ mm} : 1200 \text{ mm}$ ,第二级  $f_3 : f_4 = 1200 \text{ mm} : 2400 \text{ mm}$ 。同样根据上文中所用到的方法,以斯特列尔比  $\eta_{sr} > 95\%$  作为误差容限,经过计算得到表 1。

表 1 不同情况下的误差容限

Table 1 Error tolerance under different conditions

Misalignment	Error tolerance (Strel ratio > 95% / peak power > 95%)		
	Case I	Case II	Case III
Decenter in $x$ direction / ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	1220/622	706/341	620/501
Decenter in $y$ direction / ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	675/480	395/268	348/305
Decenter in $z$ direction / ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	12030/74	5810/52	6390/20
Tilt in $x$ direction / ( $\mu\text{rad}/\mu\text{rad}$ )	454/418	318/216	248/217
Tilt in $y$ direction / ( $\mu\text{rad}/\mu\text{rad}$ )	1309/667	939/453	450/364

从表 1 可以看出,在离轴角选择为最小离轴角时,相比于情形 1,情形 2 和情形 3 的误差容限都会降低。因此选择更长的焦距以及更少的扩束级数有助于提高扩束结构对误差的容忍度。

## 4 结 论

本文利用光线追迹法和惠更斯-菲涅耳原理,对

格里高利式扩束系统中离轴抛物面镜平动和角度失准误差对激光脉冲远场时空特性的影响进行分析。结果表明这种误差一方面会产生像差,造成远场斯特列尔比降低;另一方面会导致远场不同位置激光脉冲到达时间不一致,造成远场峰值功率降低。采用小离轴角、长焦距以及尽可能少的扩束级数有助于提高激光脉冲对离轴抛物面镜失调的误差容忍度。

## 参 考 文 献

- [1] Kong X L, Hao P M, Zhou S K, et al. Study on aspherical reflecting beam expander[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18(S1): 40-44.  
孔祥蕾, 郝沛明, 周士康, 等. 非球面反射型扩束器的研究[J]. 量子电子学报, 2001, 18(S1): 40-44.
- [2] Yue F, Zhu J Q, Zhao D F. Study on focusing characteristic of large aperture off-axis paraboloidal mirror in the high-energy petawatt laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0914001.  
岳峰, 朱健强, 赵东峰. 高能拍瓦激光系统中大口径离轴抛物面聚焦特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0914001.
- [3] Bor Z. Distortion of femtosecond laser pulses in lenses and lens systems [J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35(12): 1907-1918.
- [4] Bor Z. Distortion of femtosecond laser pulses in lenses[J]. Optics Letters, 1989, 14(2): 119-121.
- [5] Luo X, Chen P F, Wang Y. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 682-687.  
罗曦, 陈培锋, 王英. 离轴 90° 抛物面镜焦斑特性分析[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 682-687.
- [6] Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang-II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002.  
朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.
- [7] Lin W H, Zhu J Q, Ren L. Advances in target alignment and beam-target coupling technologies of laser fusion facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0400001.  
林炜恒, 朱健强, 任磊. 高功率激光装置中的靶定位及束靶耦合技术研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0400001.
- [8] Shi H B, Cheng Z G, Xu G L, et al. Study on focusing spot characteristic by off-axis parabolic mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(10): 880-886.  
石鸿斌, 程兆谷, 许国良, 等. 激光束经离轴抛物面镜聚焦后光斑特性的研究[J]. 中国激光, 2000, 27(10): 880-886.
- [9] Liu X Y, Lu Z W, Wang X, et al. Study on the focusing characteristics of off-axis parabolic mirror focusing system [C]//2011 Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology, October 12-16, 2011, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2011: 116-119.
- [10] Labate L, Ferrara P, Fulgentini L, et al. Effects of small misalignments on the intensity and Strehl ratio for a laser beam focused by an off-axis parabola[J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6506-6515.
- [11] Zeng X H, Chen X Y. Far-field vector-diffraction of off-axis parabolic mirror under oblique incidence[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(3): 034202.
- [12] Howard J E. Imaging properties of off-axis parabolic mirrors[J]. Applied Optics, 1979, 18(15): 2714-2722.
- [13] Stratton J A, Chu L J. Diffraction theory of electromagnetic waves [J]. Physical Review, 1939, 56(1): 99-107.
- [14] Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, et al. Characterization of focal field formed by a large numerical aperture paraboloidal mirror and generation of ultra-high intensity ( $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>) [J]. Applied Physics B, 2005, 80(7): 823-832.
- [15] Varga P, Török P. Focusing of electromagnetic waves by paraboloid mirrors I Theory [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(11): 2081-2089.
- [16] Varga P, Török P. Focusing of electromagnetic waves by paraboloid mirrors. II. Numerical results [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(11): 2090-2095.
- [17] Yi T S, Wu C J, Yan C X, et al. Optical design of wide field laser beam expander with reflection method [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1156-1160, 1184.  
衣同胜, 吴从均, 颜昌翔, 等. 大视场反射式激光扩束系统光学设计[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1156-1160, 1184.
- [18] Wu Y. Research of off-axis reflection beam expander [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.  
武越. 离轴反射式扩束系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [19] Trummer D J, Foley R J, Shaw G S. Stability of optical elements in the NIF target area building [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3492: 363-371.
- [20] Feng S P. Research on transmission and pointing control of laser beam in vibration environment [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.  
冯世鹏. 激光在振动环境中的传输及指向控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [21] Zhang C, Tang G X, Liu Z G, et al. Structural stability of adjustable support mirror mount in laser system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1001002.  
张朝, 汤更秀, 刘志刚, 等. 激光系统中可调节支撑镜架的结构稳定性研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1001002.
- [22] Liu Z Y, Li L, Hu B T. Focusing property for ultra-short pulse laser reflected by off-axis parabolic mirrors [J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 657-661.  
刘作业, 李露, 胡碧涛. 离轴抛物面镜对超短激光脉冲紧聚焦特性的研究[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 657-661.