

脉冲展宽分幅相机的最优空间分辨能力分析

陈欢¹, 白雁力¹, 李姮^{1*}, 高海英²¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;²桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004

摘要 短磁聚焦脉冲展宽分幅相机是一种具有长漂移区的二维超快诊断设备。通常采用轴上和离轴的点空间分辨率对其近轴空间分辨能力和工作面积进行评估,但由于像场弯曲会引起高斯像面的空间分辨不均匀,因此难以评价相机的整体空间分辨能力,所以研究一种能量化空间分辨能力的方法具有重要意义。为探讨新方法,采用COMSOL软件建立模型,基于场曲特性重建三维成像曲面,采用标准差分析成像曲面与高斯像面之间的偏离程度,通过融合点空间分辨率和整体调制度构建高斯像面空间分辨率,并运用相对误差量化高斯像面空间分辨均匀性。研究结果显示,在组合磁透镜的孔距为200 mm、漏磁缝隙为10 mm、轴向宽度为100 mm、漂移区长度为400 mm、成像半径为21 mm、阴极为-3.75 kV的情况下,随着成像磁场变化,成像曲面与高斯像面之间的偏离程度,以及高斯像面空间分辨率均呈开口向上的抛物线形状,并在成像磁场为41.97 Gs(1 Gs=10⁻⁴ T)时,两像面偏离程度标准差达到最小,为2.82 mm,高斯像面空间分辨率提升至最优,为292.80 μm,表征空间均匀性的调制度差值降低至最小,为330%。本文研究为评估短磁聚焦脉冲展宽分幅相机的最优空间分辨性能提供了一种可量化的参考方法。

关键词 超快诊断技术; 脉冲展宽分幅相机; 短磁聚焦; 高斯像面; 空间分辨能力

中图分类号 TN143

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230674

Analysis of Optimal Spatial Resolution Capability of Pulse-Dilation Framing Camera

Chen Huan¹, Bai Yanli¹, Li Heng^{1*}, Gao Haiying²¹School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;²School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract The pulse-dilation framing camera, with a short magnetic focus, is a two-dimensional, ultrafast diagnostic device with a long drift region. It evaluates the paraxial spatial resolution and detection area by the point spatial resolution of the on-axis and off-axis, respectively. However, because of the spatial nonuniformity of the Gaussian image plane caused by the field curvature, the overall spatial resolution of the camera is difficult to evaluate. Therefore, this study proposes a new method to quantify the spatial resolution of a pulse-dilation framing camera. The proposed method is based on a model constructed using the COMSOL software. In this model, the three-dimensional imaging surface is reconstructed based on the characteristics of the field curvature. The degree of deviation between the imaging surface and the Gaussian image plane is analyzed by standard deviation (SD), and the spatial resolution of the Gaussian image plane is obtained by combining the point spatial resolution and the overall modulation. The spatial resolution uniformity of the Gaussian image plane is quantified using relative error. The results of our study show that, when the lens aperture is 200 mm, slit width is 10 mm, axial width is 100 mm, length of drift region is 400 mm, imaging radius is 21 mm, and the cathode voltage is -3.75 kV, with the change in magnetic field, the degree of deviation between the imaging surface and the Gaussian image plane, and the spatial resolution of the Gaussian image plane both have an upward parabolic shape. When the imaging magnetic field is 41.97 Gs (1 Gs=10⁻⁴ T), the SD of the deviation of the two image planes is minimized to 2.82 mm, the spatial resolution of the Gaussian image plane is optimal

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-03-06; 录用日期: 2023-04-28; 网络首发日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(11865007)、广西自然科学基金面上项目(2022GXNSFAA035561)、广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金(YQ22101)

通信作者: *leheng@guet.edu.cn

at 292.80 m, and the modulation difference characterizing the spatial uniformity is minimized to 330%. In conclusion, this study proposes a quantifiable reference method for evaluating the optimal spatial resolution performance of a pulse-dilation framing camera with a short magnetic focus.

Key words ultrafast diagnosis technology; pulse-dilation framing camera; short magnetic focusing; Gaussian image plane; spatial resolution capability

1 引言

惯性约束聚变(ICF)是以高功率脉冲激光作为驱动源辐照填充DT(氘氚)燃料的靶丸,通过产生满足点火要求的热核等离子体,实现聚变能量的输出^[1-2]。在ICF实验中,皮秒分幅相机是获取等离子体时空演化过程的二维超快诊断设备,其诊断结果可为热核等离子体燃烧不稳定性的改善提供重要依据^[3]。基于微通道板(MCP)的分幅相机受制于在MCP中的渡越时间弥散的光电子,时间分辨率为60~100 ps^[4]。而脉冲展宽分幅相机则由加速区、漂移区和MCP分幅相机构成。通过在加速区加载时变电场,先产生的光电子具有更大的速度,这样光电子信号经过漂移区到达MCP时,其时间宽度将被展宽,最后采用MCP选通脉冲测量展宽后的信号,以获得优于10 ps的时间分辨率^[5-6]。

与近贴聚焦成像的MCP分幅相机不同,脉冲展宽分幅相机采用长漂移区设计,并通过磁聚焦实现成像,其理论空间分辨率的获取方法主要包括以下几种。在大孔径螺线管透镜^[7]和长磁透镜^[8]成像系统中,研究者利用电子在均匀磁场中的运动特点,将电子绕轴运动半径的4倍标定为阴极空间分辨率^[7-8];在组合螺线管透镜成像系统中,研究者设计5 lp/mm的分辨率板发射源,利用分辨成像分布的方式获得空间分辨率^[9];在短磁透镜成像系统中,研究者基于电子成像分布特性,分别采用空间调制传递函数^[10]和成像半峰全宽两种方法获取空间分辨率^[11]。在评估空间分辨性能的方法中,研究者通常以阴极某一位置的点空间分辨率为评价标准,在组合螺线管透镜和长磁透镜中,理论和实验上均采用轴上位置的点空间分辨率进行评估^[7-8];在短磁透镜中,理论上以轴上的点空间分辨率标定近轴分辨能力,以离轴位置的点空间分辨率标定成像区域,而在实验上采用2号分辨率板和镀制分辨率板的阴极实现,前者由于最低线对为10 lp/mm,因此仅应用于评估近轴空间分辨率^[12],后者则受限于线对组之间的大跨度,目前只能粗略地对整体空间分辨率进行评估^[12-13]。然而在磁聚焦成像系统中,由于轴上和离轴位置的磁场强度不同,场曲存在,以至于离轴物点之间的点空间分辨率完全不一致,因此对于实现二维成像的脉冲展宽分幅相机,仅依靠目前理论和实验方法很难直接评估其空间分辨能力,所以如何结合磁聚焦成像特性,探讨一种能直接量化整体空间分辨能力的理论研究方法,对未来标定脉冲展宽分幅相机整体空间分辨性能的实验方案设计具有重要意义。

为对整体空间分辨能力进行深入研究,以短磁聚焦脉冲展宽分幅相机为研究对象,分析场曲的成因和重建三维成像曲面,研究理想成像曲面与实际高斯像面之间的偏离程度,建立偏离程度与空间分辨率的关系,探讨直接定量评估整体空间分辨能力的可行性。首先,采用COMSOL软件建立短磁透镜脉冲展宽分幅相机模型,基于场曲重建三维成像曲面;然后,分析点和面空间分辨率的计算方法;最后,建立磁场、理想成像曲面与高斯像面偏离程度和面空间分辨率的关系,通过分析最优面空间分辨率,定量标定相机整体空间分辨能力。

2 脉冲展宽分幅相机的成像特性

COMSOL Multiphysics软件(简称COMSOL软件)是一种多物理仿真平台,能对单个或多个物理场耦合进行模拟,可应用于电磁场计算和带电粒子追踪。采用COMSOL软件建立的脉冲展宽分幅相机模型及其轴上磁场分布如图1所示,系统由阴极、阳极、短磁透镜、漂移区和高斯像面组成。短磁透镜的轴心分别置于漂移区100 mm和300 mm处,短磁透镜孔径、轴向宽度和漏磁缝隙分别为200 mm、100 mm和10 mm。当阴极、阳极及其之间的间距分别为-3.75 kV、0 kV和1 mm,漂移区长度为400 mm和成像倍率为1:1时,轴上物点在高斯像面实现最优成像的磁场如图1(b)所示,其呈现双波峰形状,最大值为42.70 Gs。

基于相机研究模型,离轴物点的电子运动轨迹如图2(a)所示,随着离轴距离增加,磁场对电子的作用力将逐渐增大,导致电子的最优成像轴向位置出现差异。当轴上物点的最优像点 P_0 落在高斯像面时,离轴21 mm物点的最优成像点并不是高斯像面上的点 P_2 ,而是相距高斯像面一定距离的点 P_1 。根据文献[14]中场曲与物点离轴距离平方成正比的理论,三维理想成像曲面可通过旋转抛物面得到拟合重建,公式^[15]为

$$z(x, y) = a + b(x^2 + y^2), \quad (1)$$

式中: (x, y, z) 为三维直角坐标; a 为曲面顶点在轴上(z 轴)上的位置; b 为抛物面二次项系数,表示离轴像点与高斯像面的偏离程度。当轴上磁场强度峰值为42.70 Gs时,根据电子轨迹中各离轴点的最优成像轴向位置,重建的理想三维成像曲面如图2(b)所示,由于磁场强度随离轴而变大,因此理想成像面为一个曲面,成像曲面的弯曲程度也随着成像半径的变大而增加。当三维成像曲面的半径为3 mm时,成像曲面与高斯像面的最大偏离距离为0.5 mm;而当成像半径扩

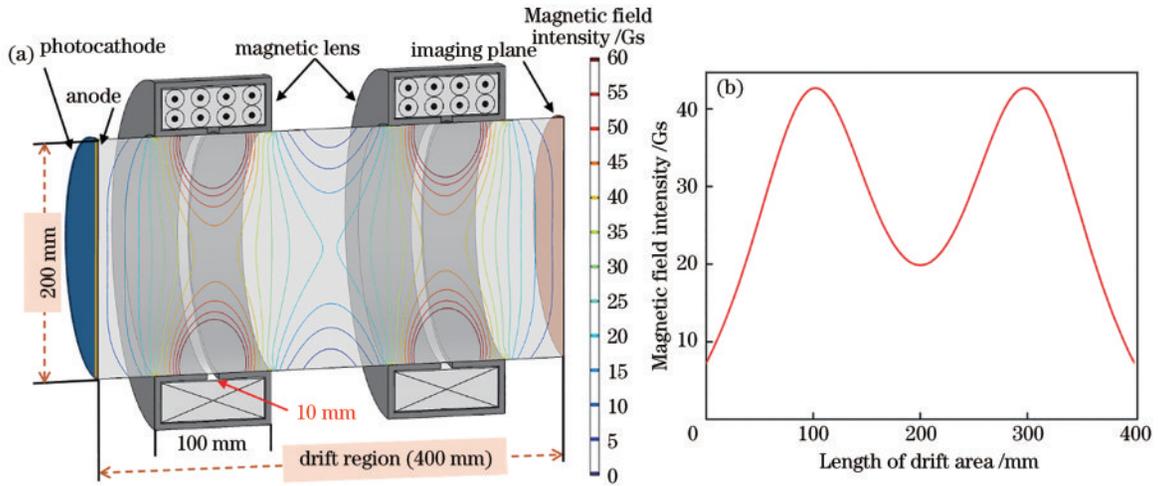


图 1 短磁透镜脉冲展宽分幅相机模型。(a)模型参数;(b)沿漂移区的轴上磁场分布
Fig. 1 Model of pulse-dilation framing camera using short magnetic focus. (a) Model parameter;
(b) magnetic field distribution on axis along drift area

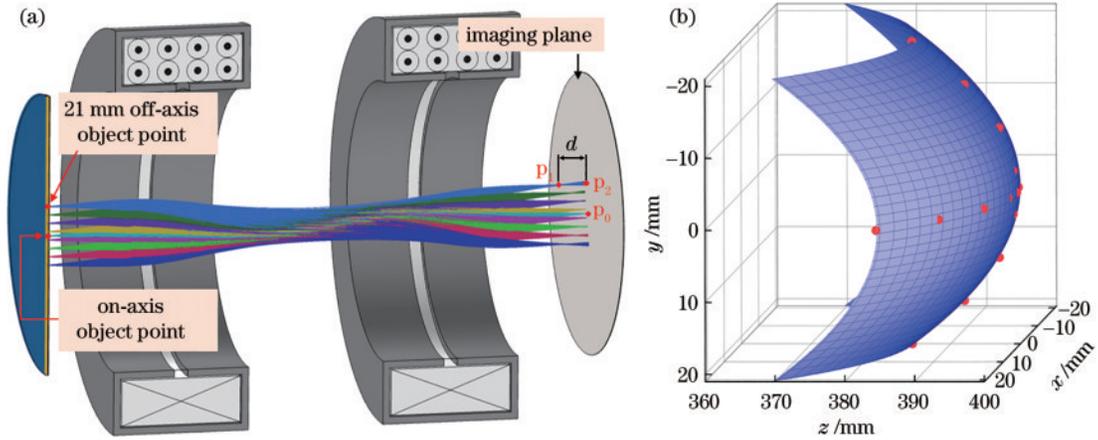


图 2 脉冲展宽分幅相机的成像特性。(a)电子轨迹;(b)重建的三维成像曲面
Fig. 2 Imaging characteristic of the pulse-dilation framing camera. (a) Electronic trajectory;
(b) reconstructed three-dimensional imaging surface

大到 21 mm 时,最大偏离距离增加到 15 mm,像场弯曲程度逐渐变大。

3 空间分辨率计算方法

3.1 点空间分辨率分析

点空间分辨率是根据某一物点的成像分布计算的局部空间分辨率,在采用 COMSOL 软件分析时,遵循以下步骤。首先,利用蒙特卡罗法对光电子初始参量进行抽样,使其满足一定的分布,其中出射能量满足 Henke 分布^[16],其概率密度函数 $f(\epsilon)$ 为

$$f(\epsilon) = a \frac{\epsilon}{(\epsilon + b)^4}, \quad (2)$$

在 X 光入射下 $a=6b^2$, Au 阴极对应的 $b=3.7$ 。发射俯仰角 θ 满足 $(0, \pi/2)$ 内的余弦分布^[17],其概率密度函数 $c(\theta)$ 为

$$c(\theta) = \sin(2\theta). \quad (3)$$

发射方位角满足 $(0, 2\pi)$ 内的均匀分布。发射位置满足发射半径内的均匀分布。然后,从阴极轴上位

置同时发射若干个光电子,获得的成像分布如图 3(a) 所示。接着,通过计算成像分布的均方根半径,建立空间调制传递函数(MTF)曲线,表达式为

$$\overline{\Delta r} = \sqrt{(\overline{\Delta x})^2 + (\overline{\Delta y})^2}, \quad (4)$$

$$M = \exp[-(\pi \overline{\Delta r} f)^2], \quad (5)$$

$$S = 1000/f, \quad (6)$$

式中: $(\overline{\Delta x}, \overline{\Delta y})$ 为弥散斑中各电子落点坐标与理想像点坐标之差的平均值; M 为调制度; f 为空间频率,单位为 lp/mm。最后,将 MTF 曲线标定为极限点空间分辨率,图 3(b) 的调制度 $M=0.1$ 对应的空间频率 f_s 为 24.65 lp/mm (或 S 为 40.57 μm)。根据该方法,离轴物点的成像分布及其点空间分辨率对比如图 4 所示,当成像曲面的顶点恰好落在理想成像面时[图 2(b)已给出],随着物点离轴距离(0~21 mm)增加,成像分布的弥散程度及其对应的点空间分辨率逐渐变大,而且成像半径 21 mm 内的各点空间分辨率之间的波动范围非常大(40.57~718.52 μm)。由此可见,仅通过点

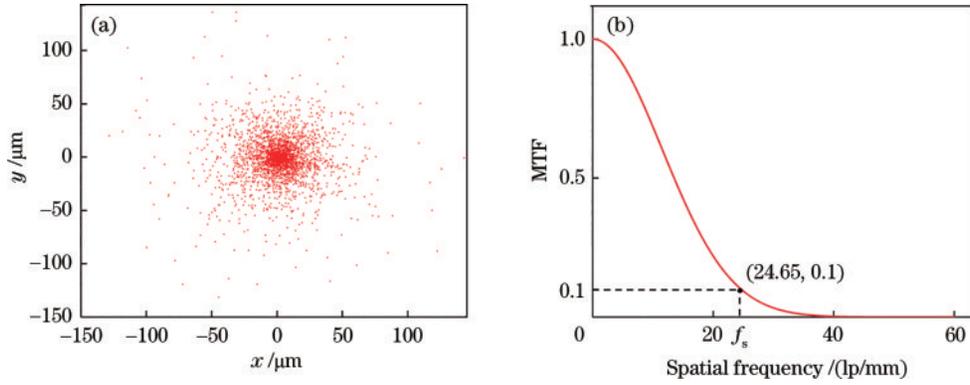


图 3 点空间分辨率计算。(a)轴上电子成像分布;(b)对应的调制传递函数曲线

Fig. 3 Point spatial resolution calculation. (a) Electric imaging distribution on axis; (b) corresponding MTF curve

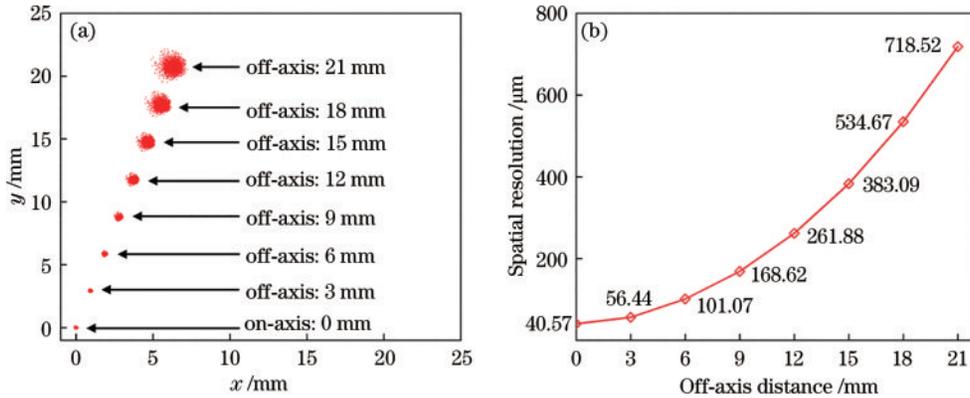


图 4 成像区域内的点空间分辨率。(a)离轴电子成像分布;(b)调制为 0.1 的点空间分辨率变化趋势

Fig. 4 Point spatial resolution in the imaging area. (a) Electric imaging distribution off axis; (b) tendency of point spatial resolution with MTF of 0.1

空间分辨率,很难对脉冲展宽分幅相机的空间分辨能力进行直接评价。

3.2 高斯像面空间分辨率及其均匀性分析

脉冲展宽分幅相机是实现二维成像的超快诊断设备,为评估其空间分辨能力,需从高斯像面的整体空间分辨率及其均匀性展开分析。在构建面空间分辨率的过程中,首先,在一定的成像区域内,以离轴物点为对象,通过模拟电子发射和运动轨迹计算物点的成像分布;然后,根据成像分布,采用式(4)~(6)建立各像点

的空间调制传递函数;最后,将恰能使整个成像区域内调制度均优于 0.1 所对应的空间频率标定为高斯像面的面空间分辨率,并基于相对误差能反映测量可信程度的原理^[18],量化高斯像面空间分辨的均匀性。基于图 4(a)离轴物点成像分布的点空间调制传递函数曲线如图 5 所示,其最大成像区域的半径为 21 mm。由于受到磁场和像场弯曲的影响,随着成像区域半径(0~21 mm)的变大,点空间分辨率也随之变差,根据成像区域内离轴空间频率的调制度均优于 0.1 的原

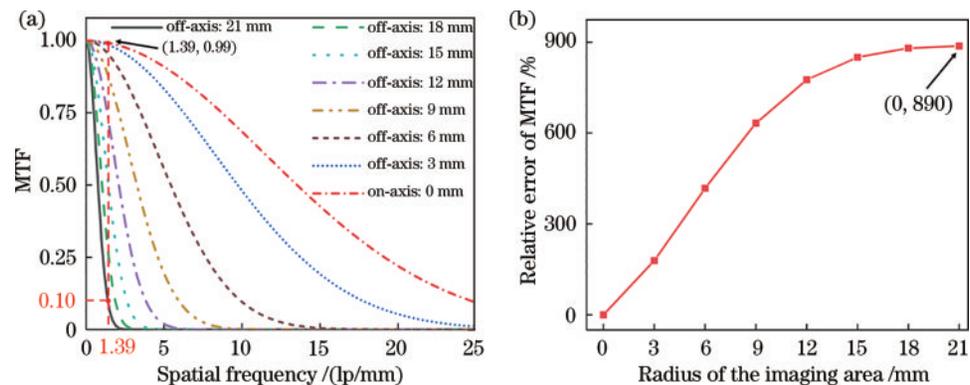


图 5 高斯像面空间分辨率及其均匀性。(a)调制传递函数和面空间分辨率标定;(b)均匀性变化趋势

Fig. 5 Spatial resolution and uniformity of Gaussian image plane. (a) Calibration of MTF and plane spatial resolution; (b) tendency of uniformity

则,当成像区域为轴上时,高斯像面的面空间分辨率为 24.65 lp/mm(即 40.57 μm);而当成像区域半径扩大至 21 mm 时,面空间分辨率为 1.39 lp/mm(即 718.52 μm),此时轴上 0 mm 空间调制传递函数曲线对应的调制度为 0.99。采用相对误差原理,

$$\gamma_i = \frac{M_i - M_r}{M_r} \times 100\%, \quad (7)$$

成像区域半径为 21 mm 时,面空间分辨率对应的轴上 0 mm(M_i)与离轴 21 mm(M_r)的调制度差值为 890%。随成像区域半径(0~21 mm)增大,轴上 0 mm 与不同离轴位置(0~21 mm)的调制度差如图 5(b)所示,随着成像区域半径变大,成像区域内的调制度差越来越大,当成像区域为轴上(0 mm)时,调制度之差为 0,而当成像区域半径为 21 mm 时,调制度之差为 890%。这表明在该磁场下,半径为 21 mm 的成像区域的高斯像面空间分辨均匀性非常差,因此获得最优的高斯像面空间分辨率及其均匀性是评价脉冲展宽分幅相机空间分辨率的关键技术问题。

4 最优空间分辨能力研究

在短磁聚焦成像系统中,磁场不仅影响电子运动轨迹,而且还会引起理想成像曲面与高斯像面之间不

同程度的偏离,以至于高斯像面上的离轴点空间分辨率出现很大的差异。所以为探讨最优的整体空间分辨能力,基于动态磁场,分析理想成像曲面与高斯像面之间偏离程度的变化趋势,获取高斯像面的最优空间分辨率及其均匀性。

采用式(1)重建的理想成像曲面与高斯像面(400 mm)的轴向位置,各离轴物点最优成像的轴向位置变化如图 6(a)所示,随着轴上磁场从 39.89 Gs 增加到 43.06 Gs,理想成像曲面的顶点轴向位置从 429.5 mm 移动到 396.5 mm,边缘(离轴 21 mm)最优像点从 414 mm 移动到 381 mm,两者之间的偏离量始终保持在 15.5 mm,由此可见随着成像磁场的增大,理想成像曲面的整体轴向位置虽然向发射面偏移,但其像场弯曲程度保持不变。以判别数据离散程度的标准差为理论基础^[19-20]和高斯像面轴向位置(400 mm)为基准,理想成像曲面与高斯像面的偏离程度 σ_d 计算公式为

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (D_k - \bar{D})^2}, \quad (8)$$

式中: N 为像点个数; D_k 为第 k 个像点与高斯像面的偏移距离; \bar{D} 为所有像点偏移距离的均值。随着磁场变化,半径为 21 mm 的理想成像曲面与高斯像面的偏离

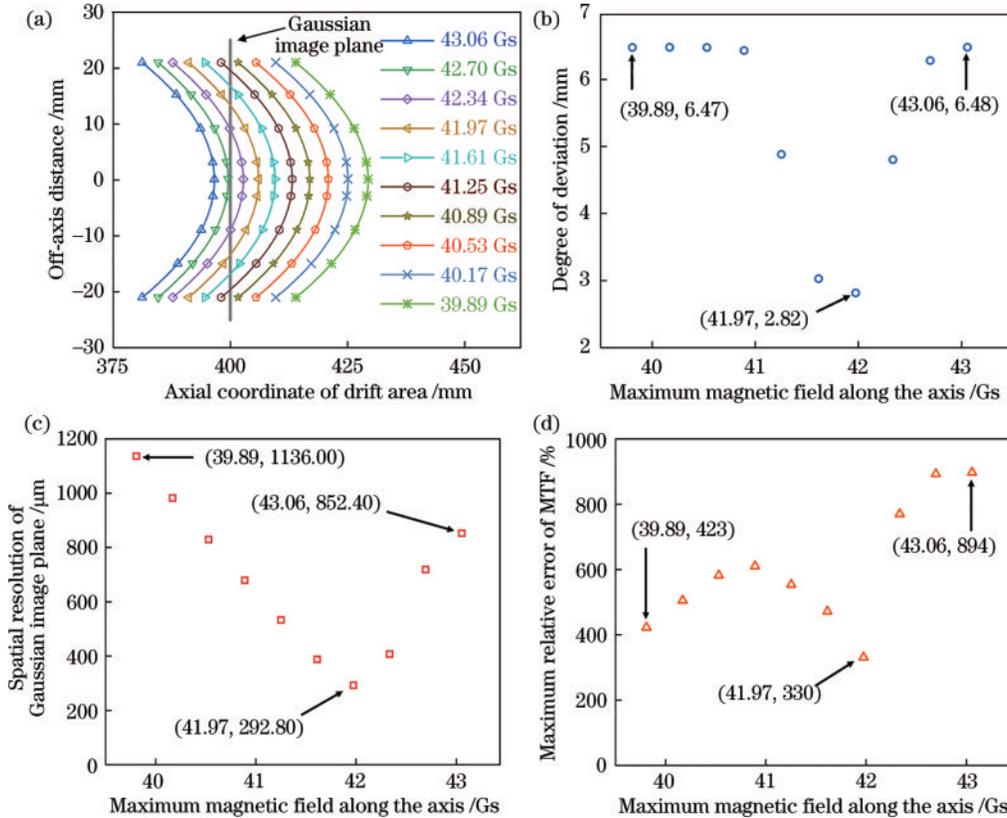


图 6 最优空间分辨能力分析。(a)理想成像曲面与高斯像面之间的轴向位置;(b)理想成像曲面与高斯像面的偏移程度;(c)高斯像面的空间分辨率;(d)高斯像面空间均匀性

Fig. 6 Analysis of optimal spatial resolution. (a) Axial position between ideal imaging surface and Gaussian image plane; (b) degree of deviation between ideal imaging surfaces and Gaussian image plane; (c) spatial resolution of Gaussian image plane; (d) spatial uniformity of Gaussian image plane

程度、高斯像面空间分辨率及其均匀性变化趋势分别如图 6(b)~(d) 所示。当磁场为 39.89 Gs 时,理想成像面与高斯像面的偏离标准差为 6.47 mm,高斯像面空间分辨率为 1136.00 μm ,根据式(7)计算的成像区域内调制度的最大差值为 423%;当磁场为 41.97 Gs 时,两像面的偏离标准差下降到最小,为 2.82 mm,面空间分辨率提升到最优,为 292.80 μm ,调制度最大差值降低至 330%;当磁场为 43.06 Gs 时,两像面的偏离标准差增加至 6.48 mm,面空间分辨率变差至 852.40 μm ,调制度的最大差值增加至 894%。结果显示,通过分析理想成像曲面与高斯像面的偏离程度,不仅能获得最优的高斯像面空间分辨率及其均匀性,而且还能对脉冲展宽分幅相机的空间分辨能力进行定量评估。

5 结 论

采用 COMSOL 多物理仿真软件构建短磁透镜脉冲展宽分幅相机研究模型,基于磁聚焦成像原理和场曲特性重建相机的理想三维成像曲面,采用标准差原理分析理想成像曲面与高斯像面之间的偏离程度,采用空间调制传递函数计算点空间分辨率,结合整体调制度分析高斯像面空间分辨率,并基于相对误差的物理意义,量化高斯像面空间分辨均匀性。研究结果显示:在组合磁透镜的孔距为 200 mm、漏磁缝隙为 10 mm、轴向宽度为 100 mm、漂移区长度为 400 mm、成像半径为 21 mm 和阴极为 -3.75 kV 情况下,随着成像磁场变化,理想成像曲面与高斯像面之间的偏离程度、高斯像面的空间分辨率及其均匀性都呈现一个开口向上的抛物线变化趋势;当成像磁场为 41.97 Gs 时,两像面偏离程度标准差减少至最小,为 2.82 mm,高斯像面空间分辨率提升至最优,为 292.80 μm ,表征空间均匀性的调制度差值降低至最小,为 330%。所提方法基于量化理想成像曲面与高斯像面之间的偏离程度、高斯像面空间分辨率及其均匀性的思想,不仅为评估脉冲展宽分幅相机最优空间分辨性能提供了一种新的参考方法,而且对标定分幅相机整体空间分辨性能的实验方案设计具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 曹柱荣,王强强,邓博,等. 激光聚变极端环境下 X 光高速摄影技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(11): 112004
Cao Z R, Wang Q Q, Deng B, et al. Progress of X-ray high-speed photography technology used in laser driven inertial confinement fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112004.
- [2] Zylstra A B, Hurricane O A, Callahan D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. Nature, 2022, 601(7894): 542-548.
- [3] 田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(11): 112003.
Tian J S. Introduction to development of streak and framing cameras[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(11): 112003.
- [4] Schneider M B, Jones O S, Meezan N B, et al. Images of the laser entrance hole from the static X-ray imager at NIF[J]. The Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10E538.
- [5] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited)[J]. The Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10E317.
- [6] Bai Y L, Long J H, Liu J Y, et al. Demonstration of 11-ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation technology and a magnetic lens[J]. Optical Engineering, 2015, 54(12): 124103.
- [7] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager (invited) [J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(11): 11E504.
- [8] Wang Q Q, Cao Z R, Chen T, et al. Theoretical study on temporal and spatial performance of magnetic solenoid used in dilation X-ray imager[J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91(7): 073302.
- [9] 袁铮,杨志文,李晋,等. 基于光电子脉冲展宽的高时间分辨成像技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 052007.
Yuan Z, Yang Z W, Li J, et al. Ultrafast time resolution 2D imaging technology based on photoelectron pulse quasi-linearly dilation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(5): 052007.
- [10] Li X D, Bai Y L. Influence of lens aperture size on spatial performance of short magnetic focusing framing camera[J]. Optik, 2020, 202: 163659.
- [11] Liu J Y, Fu W Y, Deng P K, et al. Simulation of a pulse-dilation framing tube with sensitive diameter of 60 mm using large aperture short magnetic lens[J]. Optik, 2020, 203: 163974.
- [12] 白雁力,龙井华,蔡厚智,等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 013201.
Bai Y L, Long J H, Cai H Z, et al. Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 013201.
- [13] 罗秋燕,林楷宣,陈嘉杰,等. 脉冲展宽 X 射线分幅相机空间分辨特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 2311001.
Luo Q Y, Lin K X, Chen J J, et al. Study on spatial resolution characteristics of pulse broadening X-ray framing camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(23): 2311001.
- [14] 张珂,蔡厚智,刘进元,等. 时间展宽 X 射线分幅相机空间分辨特性[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 0211003.
Zhang K, Cai H Z, Liu J Y, et al. Spatial resolution for the time dilation X-ray framing camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 0211003.
- [15] 廖昱博,刘进元,蔡厚智,等. 磁聚焦变像管像场弯曲

- 的改善研究[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1004004
- Liao Y B, Liu J Y, Cai H Z, et al. Improvement of field curvature in magnetic-focusing image converter tube[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1004004.
- [16] Henke B L, Smith J A, Attwood D T. 0.1–10-keV X-ray-induced electron emissions from solids: models and secondary electron measurements[J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(5): 1852-1866.
- [17] 顾礼, 李翔, 周军兰, 等. 光电阴极光电子发射特性的蒙特卡罗方法研究[J]. 量子电子学报, 2018, 35(5): 539-543.
- Gu L, Li X, Zhou J L, et al. Photoelectron emission characteristics of photocathode by Monte Carlo method [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(5): 539-543.
- [18] Lin J F. Simultaneous measurement of optical rotation angle and retardance[J]. Optics Communications, 2008, 281(5): 940-947.
- [19] Thoreson E J, Burnham N A. Standard-deviation minimization for calibrating the radii of spheres attached to atomic force microscope cantilevers[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(5): 1359-1362.
- [20] 罗杰, 秦来安, 侯再红, 等. 激光光斑分布测量系统中光纤传光特性[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214002.
- Luo J, Qin L A, Hou Z H, et al. Light-transmitting characteristics of optical fiber in laser spot distribution measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214002.