

全频分段控制下连续相位板的优化设计

朱应成^{1,2}, 邬融¹, 张军勇¹, 周申蕾¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高聚焦光束质量, 针对高功率激光驱动器的连续相位板(CPP)进行设计, 改进了传统盖斯贝格-撒克斯通(G-S)算法的设计。设计基于分步分段控制相位板频谱的目标, 约束初始相位的选取, 保留带有目标焦斑低频信息的初始相位信息, 在迭代过程中适当控制中高频信息。实验结果表明, 相对于传统随机连续初始相位, 改进后 CPP 作用下的焦斑顶部光强方均差误差(RMS)能更快地收敛到目标阈值。改进的初始相位不仅避免了 G-S 算法可能产生局部最优的问题, 而且也能很好地应用于非对称焦斑的设计。

关键词 光学器件; 光束质量; 连续相位板; 盖斯贝格-撒克斯通算法; 初始相位

中图分类号 TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0723001

Optimal Design for Continuous Phase Plate under Segmental Control Across Full-Spectrum

Zhu Yingcheng^{1,2}, Wu Rong¹, Zhang Junyong¹, Zhou Shenlei¹

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract We design a kind of continuous phase plate (CPP) used in high power laser driver to improve the focus beam quality. The optimal design based on controlling segmented spatial spectrum is modified from traditional G-S algorithm. The improved algorithm chooses a restrained initial phase that is related with the low frequency information of goal focal spot's spatial spectrum, and the medium frequency and high frequency can be appropriately controlled in iterations. The experimental results show that the root mean square error (RMS) of the focal spot can quickly converge to the target threshold under the effect of improved CPP, which compared with that under the effect of the traditional random continuous initial phase. The improvement of initial phase not only can avoid the G-S algorithm easily produces local optimum value, but also the improved method has a good application for the design of asymmetric focal spot.

Key words optical devices; beam quality; continuous phase plate; G-S algorithm; initial phase

OCIS codes 230.1950; 050.1940; 100.3008

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)的研究对靶面激光焦斑的光强均匀性、能量集中度^[1]等焦斑特性都提出了很高的要求; 直接驱动下的光强不均匀性要求达到1%~2%, 能量利用率要求大于90%; 虽间接驱动的不均匀性要求可降低至5%~10%, 但能量利用率需大于95%, 而且要求旁瓣非常小^[2]。因此学者

们对光束匀滑技术展开了广泛研究, 其中连续相位板(CPP)由于其焦斑形态具有易于控制、能量利用率高等优点而被认为是最可行的解决方案之一^[3-4]。

CPP的传统设计方法包括常规的盖斯贝格-撒克斯通(G-S)算法^[5]、杨顾(Y-G)算法^[6]、模拟退火(SA)算法^[7]、遗传算法(GA)^[8]等, 还包括这些基础算法上的混合算法和改进优化算法^[9]。Marozas等^[10]用改进的G-S算法对OMEGA和NIF进行设

收稿日期: 2017-12-07; 收到修改稿日期: 2018-02-07

作者简介: 朱应成(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事衍射光学元件设计方面的研究。E-mail: zyc92@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 周申蕾(1977—), 男, 研究员, 主要从事高功率激光的束匀滑等方面的研究。E-mail: slzhou@mail.shnc.ac.cn (通信联系人)

计,控制焦斑中高频信息获得了较好的结果,但传统 G-S 算法本身对初始条件敏感,随机选取连续相位作为初始相位可能产生局部最优的问题。本文提出一种基于传统 G-S 的改进算法,改进了初始相位的选取,迭代过程中适当控制焦斑中高频信息,最后得到 CPP 相位的设计分布,迭代设计中兼顾相位的连续性和加工等基本要求^[11-12]。

2 改进 G-S 算法模型

G-S 算法是一种基于快速傅里叶变换的迭代

优化算法^[13],改进 G-S 算法基本流程如图 1 所示。图中 E 表示振幅,下标 in 表示初始近场,下标 obj 表示目标远场,下标 nf 表示近场,下标 ff 表示远场; Φ 表示相位; \mathcal{F} 表示傅里叶算符; \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆算符。实线框中为传统 G-S 算法流程,能充分发挥快速傅里叶变换的优点,能够较快地得到误差小于给定阈值的设计结果,而且对输出面形的控制比较灵活,设计得到的相位板能量利用率较高^[14],但是传统 G-S 算法可能会导致局部最优的问题,并且无法有效控制焦斑的空间频谱。

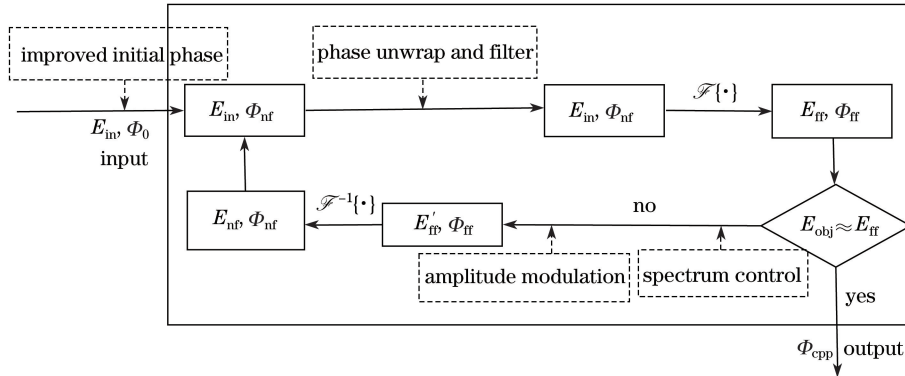


图 1 改进 G-S 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of improved G-S algorithm

针对以上不足,基于传统算法对相应边界条件的优化约束和流程进行改进,虚线框中表示相对传统 G-S 算法的改进步骤,包括近场初始相位的选取,近场相位解相、滤波,远场振幅调制和远场的焦斑频谱控制。由于 G-S 算法对初始条件敏感,因此初始相位的选取是整个设计的关键。假设近场分布为

$$\tilde{E}(x_{nf}, y_{nf}) = E(x_{nf}, y_{nf}) \exp[i\Phi(x_{nf}, y_{nf})], \quad (1)$$

远场分布为

$$\tilde{E}(x_{ff}, y_{ff}) = E(x_{ff}, y_{ff}) \exp[i\Phi(x_{ff}, y_{ff})], \quad (2)$$

远场和近场之间满足傅里叶变换关系

$$\mathcal{F}[\tilde{E}(x_{nf}, y_{nf})] = \tilde{E}(x_{ff}, y_{ff}), \quad (3)$$

远场焦斑频谱为

$$\tilde{G}_{ff}(\omega) = \mathcal{F}[\tilde{E}(x_{ff}, y_{ff})], \quad (4)$$

式中: $\tilde{G}_{ff}(\omega)$ 为远场焦斑的空间频谱函数; ω 为远场焦斑的空间频率。根据(1)~(4)式可以得到初始相位

$$\exp[i\Phi_0(x_{nf}, y_{nf})] = C \frac{\mathcal{F}\{\tilde{E}(x_{ff}, y_{ff}) \exp[i\Phi(x_{ff}, y_{ff})]\} \Psi_1(k_{x_{ff}}, k_{y_{ff}})}{E(x_{nf}, y_{nf})}, \quad (5)$$

式中: C 为常数因子; $E(x_{nf}, y_{nf}) \neq 0$,如 $E(x_{nf}, y_{nf}) = 0$ 表示入射光场的非有效区域,故不需要考虑。初始设计取 $\Phi(x_{ff}, y_{ff})$ 为 $[-\pi, \pi]$ 的随机远场相位分布, $\Psi_1(k_{x_{ff}}, k_{y_{ff}}) = \exp\left[-\left(\frac{k_{ff}}{k_{f1}}\right)^n\right]$, 表示低通滤波, 式中 $k_{ff} = (k_{x_{ff}}^2 + k_{y_{ff}}^2)^{1/2}$ 为远场波数, k_{f1} 为初始相位下的低频截止频率, n 为超高斯阶次,得到的初始相位 $\Phi_0(x_{nf}, y_{nf})$ 保留了目标焦斑空间频谱的大部分低频相位信息。

对于焦斑空间频谱的中频段(如 $10 \sim 100 \mu\text{m}$),可采用时域匀滑技术进行改善,但其轮廓中还包含影响最终焦斑平滑性的频谱成分,在 CPP 的设计中需加以控制^[15],而高频部分在物理热平滑效应及时域匀滑技术作用下可适当放宽,因此在迭代设计中对焦斑频谱采用带阻滤波处理,使焦斑的包络逐步逼近目标焦斑^[10],以达到有效抑止焦斑频谱中中频能量占比的目的,设计中采用的中高频频谱控制函数为

$$\Psi_2(k_{x_{ff}}, k_{y_{ff}}) = \begin{cases} 1, & k_{ff} \leq k_{f2} \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{k_{ff}}{k_{f1}}\right)^n\right], & k_{ff} > k_{f2} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: k_{f_1} 、 k_{f_2} 分别为控制焦斑频谱的高、低频截止频率。改进算法实现了有效控制低频段、抑制中频段、放宽高频段的目标,既可以形态匹配,又可优化焦斑频谱的能量分布。

另外,为了兼顾相位连续且满足加工的要求,迭代过程中远场振幅采用弱调制,调制过程为

$$E'_{ff} = \eta E_{ff} + (1 - \eta) E_{obj}, \quad (7)$$

式中: $\eta \in (0, 1)$ 为权重因子,当 η 趋向于1时,相位缓慢变化,新的近场相位 Φ'_{nf} 相对于前一次近场相位 Φ_{nf} 只是微扰,所以将 Φ'_{nf} 与 Φ_{nf} 的差按 2π 整数倍进行分层。近场相位解相结果为 Φ'_{nf} 与该分层叠加,保证了迭代中相位的连续。为避免引入高频调制,控制相位板结构单元大小,近场相位还需加入滤波步骤^[10],从而实现基于设计分步分段控制相位板频谱的目标,得到满足加工要求的相位板分布。

3 实验仿真

3.1 改进算法的设计结果

为验证改进算法的可行性,将改进方法与传统随机初始相位设计方法的结果进行比较,从神光 II 装置的设计要求出发,设计参数选择如下:

输入光强分布为 12 阶超高斯方形光束,其 1% 光强处的口径为 310 mm,近场振幅表示为

$$E_{nf} = \exp\left\{-\left[\left(\frac{x^2}{R^2}\right)^{12} + \left(\frac{y^2}{R^2}\right)^{12}\right]\right\}, \quad (8)$$

式中: R 为近场束腰半径。输出光强分布为 5 阶超高斯圆形光束,其 1% 光强处的口径为 600 μm ,远场振幅表示为

$$E_{ff} = \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right)^5\right], \quad (9)$$

式中: r 为远场束腰半径。相位板大小为 336 mm \times 336 mm,采样点为 1024 \times 1024,透镜焦距为 $f = 2232$ mm,激光波长为 $\lambda = 0.351$ μm ,低频截止频率 $k_{f_1} = 2\pi \times 0.025$ rad/ μm ;用于控制频谱的高低截止频率分别为: $k_{f_1} = 2\pi \times 0.1$ rad/ μm , $k_{f_2} = 2\pi \times 0.01$ rad/ μm ;滤波函数超高斯阶次 $n = 20$,权重因子 $\eta = 0.9$,加工工艺约束的最小周期约为 10 mm。两种算法下得到的 CPP 面形分布如图 2 所示。

由图 2 可见,改进算法设计得到的 CPP 面形和传统算法相似,能保证面形连续且结构单元大小可控,满足加工工艺的要求。进一步对 CPP 作用下两种方法得到的焦斑及一维分布进行比较,如图 3 所示。

由图 3 可知,两种方法均得到均匀的焦斑分布,

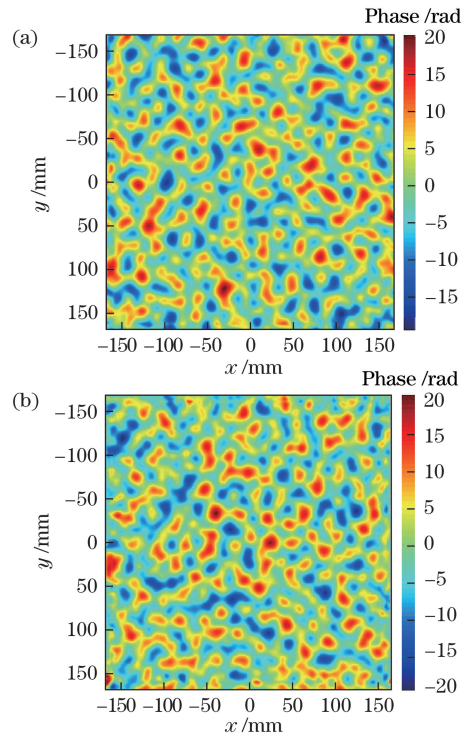


图 2 两种不同算法下的 CPP 分布。

(a) 传统算法; (b) 改进算法

Fig. 2 Resulting CPP distribution of two different algorithms.

(a) Traditional algorithm; (b) improved algorithm

从一维分布可知,焦斑存在强度调制,但焦斑轮廓线和目标基本一致。由于对焦斑频谱能量的重新分配,改进算法下的焦斑能量最大强区得到抑制,均匀性得到改善,可用焦斑的 FOPAI (fraction power above intensity) 能半定量地反映焦斑的均匀性。FOPAI 是指二维离散焦斑分布中大于某阈值光强 I_0 所包含的激光能量和焦斑总能量的比例,其定义为

$$F_{\text{OPAI}}(I_0) = \frac{\int_{I(x,y) > I_0} I(x,y) dx dy}{\int I(x,y) dx dy}. \quad (10)$$

两种设计下的焦斑 FOPAI 曲线如图 4 所示。由图 4 可知,改进算法下的 FOPAI 曲线更陡,表明其能量强区较少,焦斑的均匀性更好。为了进一步研究 CPP 的性能,定义顶部光强均方差 σ_{RMS} 和焦斑强度功率谱密度 (PSD) 分布等参量,并对输出光场质量进行定量评价^[17],各参量定义如下:

$$\sigma_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum (I - \bar{I})^2 / \bar{I}^2}{N - 1}}, \quad (11)$$

$$X_{\text{PSD}} = \frac{|\mathcal{F}[E(x_{ff}, y_{ff})]|^2}{N}, \quad (12)$$

式中: I 为输出光强顶部各采样点的大小; \bar{I} 为顶部平均光强; N 为计算点数。传统算法下焦斑 $\sigma_{\text{RMS}} =$

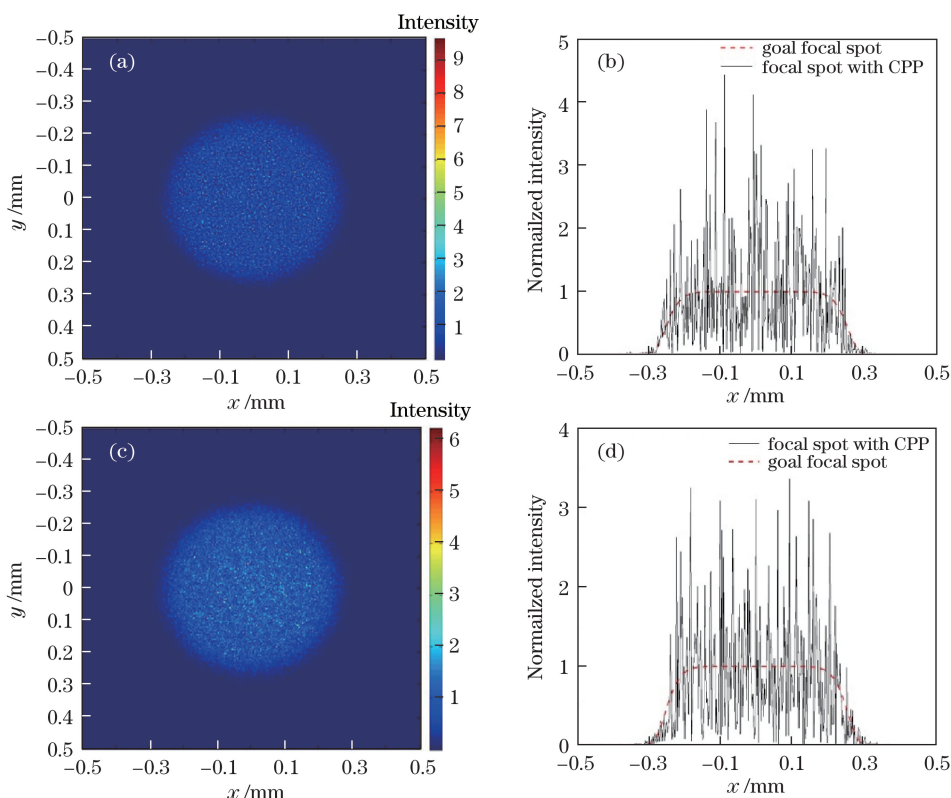


图 3 两种算法得到的焦斑及一维分布。(a)(b)传统算法;(c)(d)改进算法

Fig. 3 Focal spots and one-dimensional distributions obtained by two different algorithms.

(a)(b) Traditional algorithm; (c)(d) improved algorithm

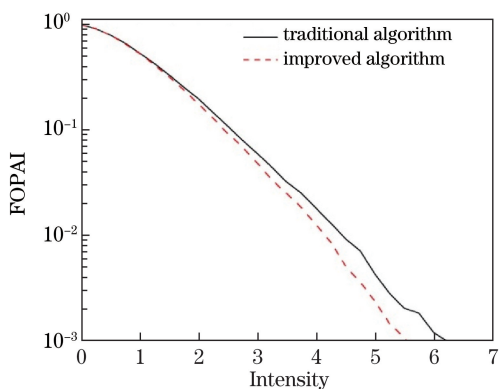


图 4 两种算法下焦斑的 FOPAI 曲线

Fig. 4 FOPAI of focal spot with two different algorithms

37.5%,改进算法下焦斑 $\sigma_{\text{RMS}} = 34.3\%$,改进算法设计的 CPP 焦斑均匀性有改善。频谱控制前后, PSD 分布如图 5 所示。

由图 5 可知,频谱控制后,10~100 μm 频段的 PSD 有明显下降,而高于 10 μm 频段的 PSD 则被放宽,频谱优化重新分配了焦斑频谱的能量分布,且更适合与光谱色散匀滑(SSD)等时域匀滑技术连用。为了验证所设计 CPP 的整形能力和匀滑效果,对加工后的 CPP 进行了实验验证,连续光测量下的

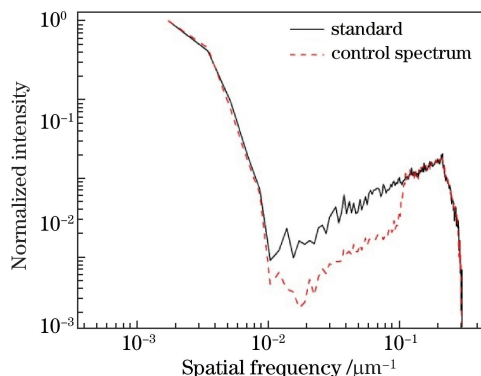


图 5 频谱控制前后的焦斑强度功率谱

Fig. 5 PSD of far field intensity distribution with and without spectrum control

衍射焦斑及一维图如图 6 所示。

测试中光学系统放大倍率为 2 倍,采集到的图像的像素尺寸为 13 μm ,从图 6(a)中可以看出焦斑边缘 1%光强处对应的两个像素数约为 480 和 575,所以测量的焦斑尺寸约为 1235 μm ,基本符合设计 1200 μm 的要求;对图 3(c)中的设计结果加入低频滤波得到一维滤波结果如图 6(c)所示,比较实验焦斑与设计焦斑,可以看出焦斑轮廓和调制度与设计目标基本符合。

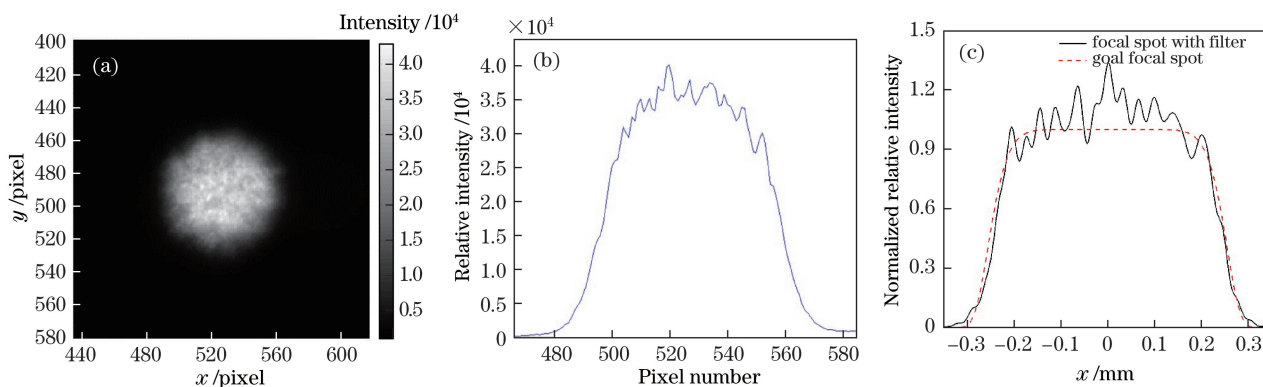


图 6 实验结果与设计理论值比较。(a)实验焦斑;(b)一维分布图;(c)设计焦斑的一维滤波结果

Fig. 6 Comparison of experimental and designed results. (a) Experimental focal spot; (b) 1-D distribution chart; (c) 1-D filtering results of design focal spot

3.2 讨论与分析

设计模型中远场目标函数采用弱调制,迭代中加入解相、滤波,一方面需兼顾 CPP 面形的连续性及加工工艺的约束,另一方面也决定了最终 CPP 面形与初始相位的相关性。初始近场相位低频滤波尺度的选择受多方面限制,选择太大则会失去对焦斑中低频结构约束的意义;选择太小则会影响后期迭代中加工工艺约束条件下的设计选择,所以要根据设计目标和加工工艺对低频滤波尺度进行合理选择。一般情况下选取低频滤波的空间尺度约是加工工艺中选取参数的 2 倍。选取的初始相位和最终 CPP 面形的一维分布曲线如图 7 所示。

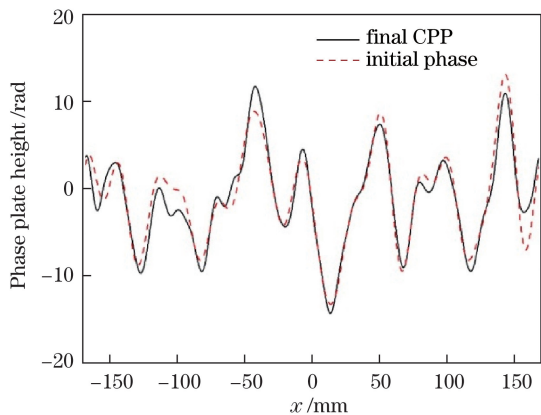


图 7 初始相位和 CPP 面形的一维分布

Fig. 7 1-D distribution of initial phase and final CPP

由图 7 可知, CPP 面形分布是在初始相位分布的基础上调制得到的,保留了初始相位的低频信息,因而选取带有目标焦斑低频信息的相位作为初始相位,不仅可提高计算效率,而且可保证迭代的收敛。为进一步分析改进初始相位方法在计算效率上的优势,分别用随机和改进算法对初始相位进行 CPP 设计,比较迭代相同次数时, CPP 作用下的焦斑顶部

光强方均根(RMS)误差的变化情况, RMS 下降曲线如图 8 所示。

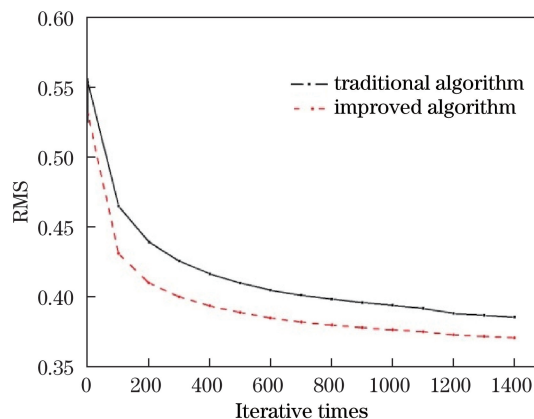


图 8 不同算法下迭代中 RMS 的变化

Fig. 8 Variations of RMS in the same iterative times with different algorithms

由图 8 可知,迭代相同的次数时改进算法的 RMS 更小,可见采用带有目标焦斑低频信息的相位作为初始相位时计算效率有明显提升。

鉴于改进方法在计算效率和保证迭代收敛方面的优势,可将此方法用于非对称焦斑的设计。与对称焦斑相比,非对称焦斑的频谱分布更复杂,如果采用随机初始相位进行设计,效率慢、耗时长,而且不能保证每次的初始相位都能够收敛。采用改进的初始相位进行设计后,可改善这种情况。对非对称焦斑的设计结果如图 9 所示。

4 结 论

提出了一种基于设计目标为频谱分步分段控制相位板的算法,采用设计带有目标焦斑低频信息的初始相位的方法,有效地保留了焦斑的低频信息,并在后期的优化迭代设计中控制低频、抑制中频、放宽

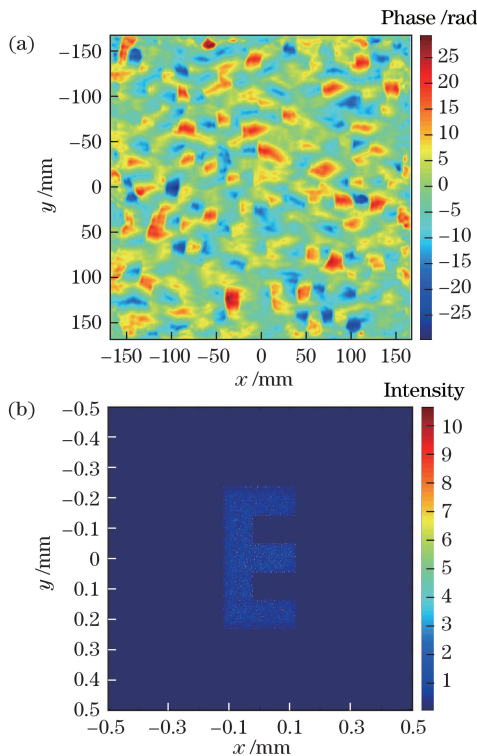


图 9 非对称焦斑设计结果。(a) CPP 面形分布;
(b) CPP 作用下远场非对称焦斑

Fig. 9 Results of asymmetric focal spot. (a) CPP distribution;
(b) far field intensity distribution with CPP

高频,使焦斑能量在频谱上重新分配,改善最终焦斑的均匀性。改善新方法可有效提高设计效率,避免了 G-S 算法可能产生局部最优的问题,保证了迭代的收敛性,为设计不同形状的焦斑提供了一种快速可行的方法。对于初始近场相位低频滤波尺度的选择,需兼顾焦斑的低频控制和加工工艺因素,今后的研究将着眼于低频滤波尺度的选择对设计的影响。

参 考 文 献

- [1] Kilkenny J D, Glendinning S G, Haan S W, *et al.* A review of the ablative stabilization of the Rayleigh-Taylor instability in regimes relevant to inertial confinement fusion[J]. *Physics of Plasmas*, 1994, 1(5): 1379-1389.
- [2] Wen S L, Hou J, Yang C L, *et al.* Uniformity of near-field caused by continuous phase plates for beam smoothing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6): 1543-1547.
温圣林, 侯晶, 杨春林, 等. 用于光束匀滑的连续相位板近场均匀性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1543-1547.
- [3] Wegner P J, Auerbach J M, Biesiada T, Jr, *et al.* NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[J]. *Proceedings of SPIE* 2004, 5341: 180-189.
- [4] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(20): 1703-1705.
- [5] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237-246.
- [6] Yang G Z, Gu B Y. On the amplitude-phase retrieval problem in the optical system[J]. *Acta Physica Sinica*, 1981, 30(3): 410-413.
- [7] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Jr, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 220(4598): 671-680.
- [8] Prügel-bennett A, Shapiro J L. Analysis of genetic algorithms using statistical mechanics[J]. *Physical Review Letters*, 1994, 72(9): 1305-1309.
- [9] Feng D, Tan Q F, Yan Y B, *et al.* A new hybrid algorithm for designing the continuous phase screen used for beam shaping[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4443: 16-23.
- [10] Marozas J A. Fourier transform-based continuous phase-plate design technique: a high-pass phase-plate design as an application for OMEGA and the National Ignition Facility[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2007, 24(1): 74-83.
- [11] Wen S L, Xu Q, Ma P, *et al.* Process-based design of continuous phase plates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3179-3182.
温圣林, 许乔, 马平, 等. 基于工艺连续相位板设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3179-3182.
- [12] Li P, Ma C, Su J Q, *et al.* Design of continuous phase plates for controlling spatial spectrum of focal spot[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1114-1118.
李平, 马驰, 粟敬钦, 等. 基于焦斑空间频谱控制的连续相位板设计[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(7): 1114-1118.
- [13] Gerchberg R W, Saxton W O. Phase determination from image and diffraction plane pictures in the electron-microscope[J]. *Optik*, 1971, 34(3): 275-286.
- [14] Tan Q F, Yan Y B, Jin G F, *et al.* Continuous-phase diffractive optical element to realize uniform target illumination in inertial confinement fusion (ICF)[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3740: 424-427.
- [15] Zhang R, Li P, Su J Q, *et al.* Experimental research

- of target uniform illumination using smoothing by spectral dispersion and continuous phase plate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 054204.
- 张锐, 李平, 栗敬钦, 等. 采用光谱色散平滑和连续相位板实现靶面均匀辐照的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 054204.
- [16] Wen S L, Tang C X, Zhang Y H, *et al.* Effects of least spatial period on the fabrication and performance of continuous phase plate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0908001.
- 温圣林, 唐才学, 张远航, 等. 最小空间周期对连续相位板加工和性能的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0908001.
- [17] Wen S L, Yang C L, Zhou L S, *et al.* Design of the continuous phase plates for beam smoothing[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 91-93.
- 温圣林, 杨春林, 周礼书, 等. 用于光束匀滑的连续相位板设计[J]. *激光技术*, 2009, 33(1): 91-93.