

基于随机输入的束匀滑位相板研究*

杨春林, 许乔, 温圣林

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

摘 要:根据随机畸变激光波前入射确定束匀滑位相板的模型, 利用随机理论分析了光束通过位相屏后的传输特性、透射光远场分布的统计均值和方差. 通过计算得知远场分布的方差与位相屏的傅里叶谱的平方成正比. 利用数值模拟计算了随机生成的两个波前分别通过两个位相屏后的远场分布, 模拟结果证实了位相屏用于随机相位畸变激光束匀滑的可行性, 并显示了匀滑效果.

关键词:衍射光学; 激光束匀滑; 位相板; 随机理论

中图分类号: TL632

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-382-5

0 引言

在大型激光系统的运行过程中, 光学元件的加工误差、外界环境的振动、空气扰动等不可避免的客观因素, 对输出的激光光束产生明显的相位调制, 形成光束波前的相位噪声. 相位噪声最直接的影响是降低光束质量, 使其聚焦特性受到影响^[1]. 因此, 为了在远场能够获得均匀的焦斑分布, 必须在系统中采用束匀滑技术, 尽量降低波前相位噪声对激光应用的影响. 目前在光路中加入衍射光学元件是实现束匀滑的一种行之有效的技术途径.

通常情况下, 通过衍射光学元件获得的匀滑光强是在聚焦透镜的焦面上获得的, 即远场光束匀滑. 1984 年 Kato 等人首先提出了采用空间域匀滑的方法^[2]来改善激光波前畸变, 并设计了一个二值化(0 或 π)的随机相位板对 ICF 系统进行了束匀滑研究, 这就是后来在激光束匀滑技术中使用得比较多的随机位相板 RPP. 随后, 相息相位板 KPP^[3]、连续位相板 CPP^[4]等多种位相元件相继被设计出来, 并用于激光束匀滑过程的分析. 针对上述几类束匀滑元件的应用情况以及设计算法近年来国内有关单位开展了大量研究工作^[5-7], 并通过系列文献进行了详细的分析. 但是目前为止, 所有研究工作都只是考虑了已知相位分布的情况, 也就是认为激光波前畸变量以及畸变分布都是已知的. 实际上输入到束匀滑元件上的往往是一个相位分布随机变化的光信号. 对于这种随机相位输入光的情况下束匀滑位相板的工作特性的研究还未见报道. 因此一个具有确定相位分布的位相板是否能够对位相分布随机变化的光束起

到束匀滑效果, 这需要开展进一步的研究.

本文从随机理论出发, 分析带有随机相位误差的光束具有的统计性质, 并根据随机输入信号的特征, 研究了这种情况下束匀滑位相板的设计方案和传输特性. 利用数值模拟计算了两个典型随机输入波前经过位相板后的束匀滑处理效果.

1 理论分析

为了减少计算量, 考虑畸变光束和位相板都是一维分布的情况. 设畸变光束复振幅 $u(x)$ 和位相板复透过率 $t(x)$ 可以分别表示为

$$u(x) = \exp[jk\alpha(x)] \quad (1)$$

$$t(x) = \exp[jk\beta(x)] \quad (2)$$

式中 $\alpha(x)$ 表示光束波前, 考虑到受外界噪声调制, 是一个随机函数, $\beta(x)$ 表示位相板的面形, k 是波数. 根据文献[8]和[9], 可以假设畸变的波前 $\alpha(x)$ 是一个平稳高斯随机函数, 即 $\alpha(x) \sim N(0, \sigma_a^2)$, 且其自相关函数可以表示为 $B_a(s) = \sigma_a^2 \exp[-s^2/c^2]$, 其中 σ_a 是该高斯随机函数的方差.

利用高斯随机函数的性质, 可以推得带有随机相位分布的激光复振幅 $u(x)$ 是一个平稳随机函数, 它的数学期望和自相关函数分别是

$$E[u(x)] = \exp[-(k^2\sigma_a^2/2)] \quad (3)$$

$$B_u(s) = E[\exp[jk(A(x+s) - A(x))] = \exp[-(k^2\sigma_a^2/2)] = \exp[-2k^2(\sigma_a^2 - B_a(s))] \quad (4)$$

根据光传输理论, 畸变光束通过位相板后的远场分布为

$$U_{\text{inf}}(f) = F\{u(x)t(x)\} \quad (5)$$

式中 $F\{\}$ 表示傅里叶变换, 因此激光的远场分布 $U_{\text{inf}}(f)$ 也是随机函数. 经过推导可以求出光束远场分布的方差

$$D[U_{\text{inf}}(f)] = E\{\overline{U_{\text{inf}}(f)U_{\text{inf}}(f)}\} - \overline{E\{U_{\text{inf}}(f)\}} \cdot E\{U_{\text{inf}}(f)\} = F\{B_u(x)\} * |T(f)|^2 -$$

* 国家自然科学基金(60508002)和中国工程物理研究院基金(20060318)资助

Tel: 028-5139409 Email: yangchunlin@hotmail.com

收稿日期: 2007-07-25

$$u_0^2 \cdot |T(f)|^2 \quad (6)$$

式中 $u_0 = \exp[-(k^2 \sigma_a^2/2)]$ 是入射光的数学期望, $T(f)$ 是位相屏的傅里叶谱.

在光束匀滑的场合,引入位相板通常都会增大焦斑尺寸和远场分布宽度.可以认为 $F\{B_u(x)\}$ 的半宽度远小于 $|T(f)|^2$ 的半宽度,这样 $F\{B_u(x)\} \approx M\delta(f)$,其中 M 是归一化常量因子.则方差的表达式可以进一步简化为

$$D[U_{\text{inf}}(f)] \approx (M - u_0^2) \cdot |T(f)|^2 \quad (7)$$

这样就可以直接得出,激光束远场分布的方差 $D[U_{\text{inf}}(f)]$ 与位相屏的傅里叶谱强度 $|T(f)|^2$ 成正比,则位相屏的傅里叶谱强度越小,通过其匀滑处理后的光束远场分布方差越小,光强分布越均匀.这就从理论上证明了位相板对随机输入光信号具有匀滑作用.考虑到能量守恒条件 $\int_{-\infty}^{+\infty} |T(f)|^2 df = \text{const}$,则 $|T(f)|^2$ 分布宽度越大,则光束远场分布的方差越小,匀滑效果越好.

2 数值模拟

在前面的理论分析中得知随机位相板的傅里叶谱模的平方 $|T(f)|^2$ 分布宽度越大,则通过这个位相板后,随机入射光束的远场分布的方差越小,匀滑效果越好的结论.为了进一步证实并直观的显示这个结论,进行了数值模拟.

首先,生成两个随机波前用来模拟任意的随机光场输入.高斯型随机畸变光的生成函数是 $\alpha(x) = (c/s) \cdot \text{random}(-1,1) * \exp[-(x^2/s^2)]$ (8) 式中 $\text{random}(-1,1)$ 是一个随机函数,它的一阶概率密度满足 -1 到 1 之间的均匀分布, x 是自变量,“*”表示卷积, s 是常量,决定噪音的相关长度, c 是一个无量纲常量,决定噪音的振幅.利用式(8)可以计算得到两个随机波前的面型和远场光强分布见图 1 和 2.生成随机波前 I 所使用的参量为 $s=0.1 \text{ m}$, $c=0.002$;生成随机波前 II 所使用的参量为 $s=0.1 \text{ m}$, $c=0.008$.

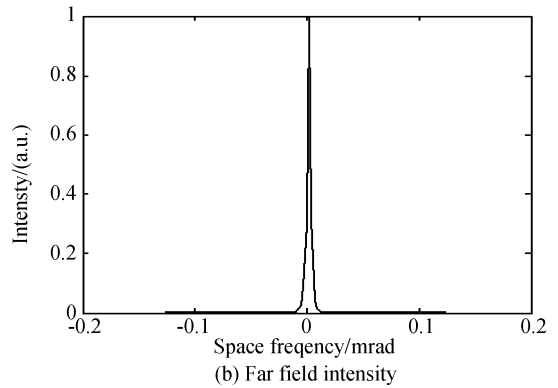
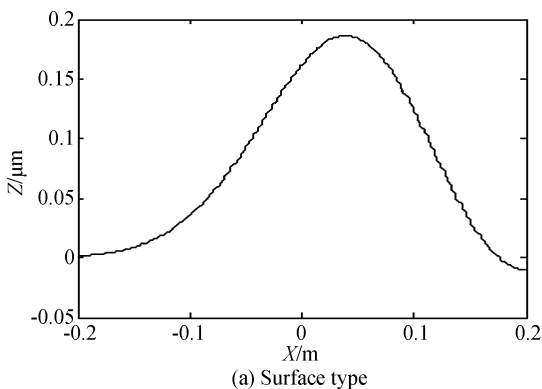


图 1 随机波前 I 的面形及远场光强分布

Fig. 1 Random wavefront I ($s=0.1 \text{ m}$, $c=0.002$)

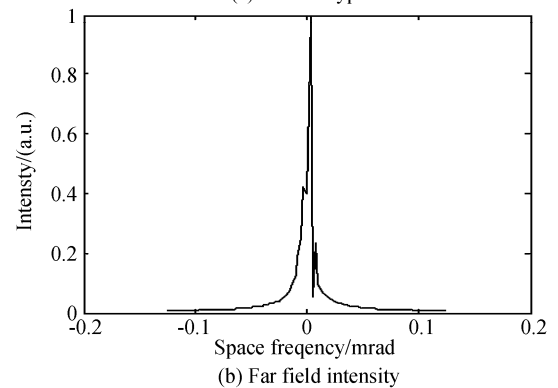
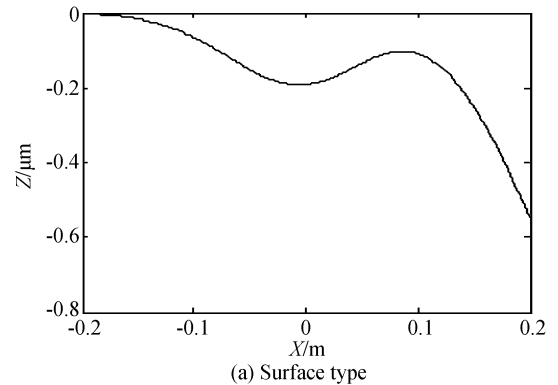


图 2 随机波前 II 的面形及远场光强分布

Fig. 2 Random wavefront II ($s=0.1 \text{ m}$, $c=0.008$)

在 ICF 等实际光学系统中,激光在通过聚焦后,要求其远场强度分布在整个焦斑面积内变化不大,最好是强度相等.但在这两个图中,明显可以看出,带有随机波前相位误差的两束激光的聚焦焦斑强度分布非常不均匀.需要一个束匀滑位相板,当光束通过后,其远场分布能够变得相对平滑,接近使用需要.

设计位相板面型.位相板的设计可以采用 G-S 算法、Y-G 算法、模拟退火法、遗传算法等,本文利用模拟退火法^[10]设计出了下面的位相板面型分布和它的透过率函数的傅里叶谱强度,如图 3 和图 4.位相板 I 的傅里叶谱强度的半宽度为 0.05 mrad ,而位相板 II 的傅里叶谱强度半宽度为 0.2 mrad ,显然位相板 II 的分布 $|T(f)|^2$ 宽度要大于位相板 I.

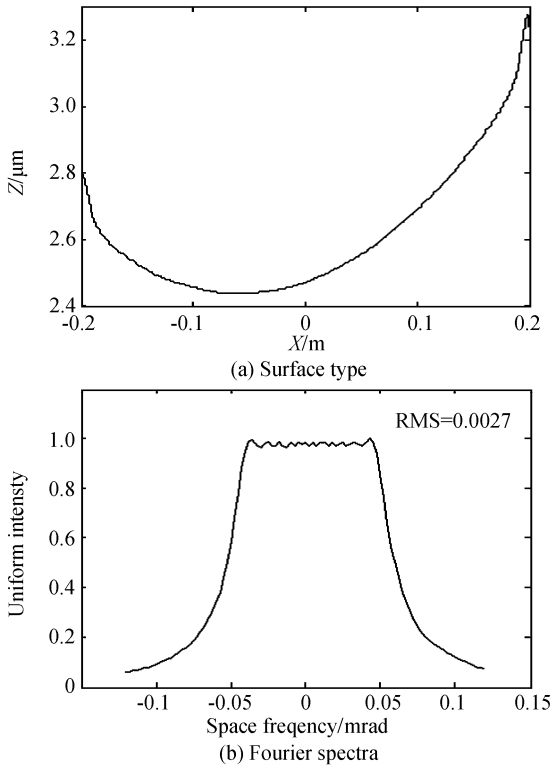


图3 位相板 I 的面形及傅里叶谱分布
Fig. 3 Surface type and fourier spectra of phase plate I

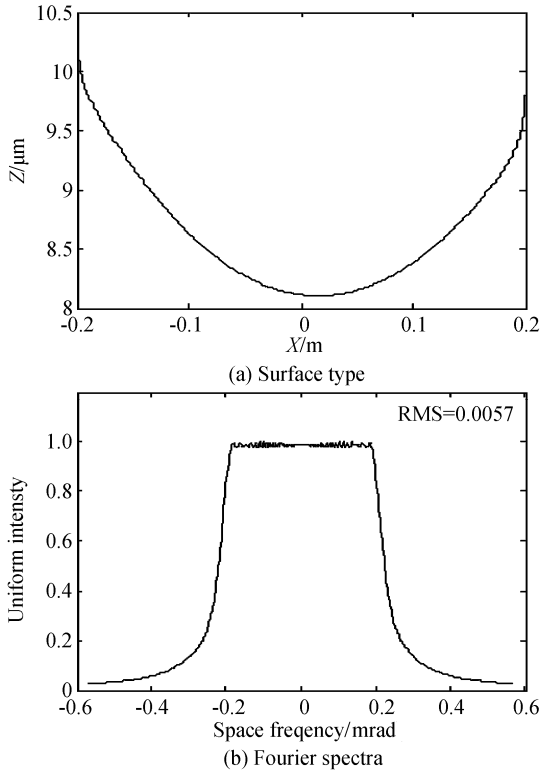


图4 位相板 II 的面形及傅里叶谱分布
Fig. 4 Surface type and fourier spectra of phase plate II

将用式(8)得到的随机波前 I 的相位数据 $\alpha(x)$ 代入式(1)得到具有相位畸变的激光复振幅 $u(x)$, 结合位相板 I 的面型数据 $t(x)$, 可以通过公(5)对该随机波前的远场分布进行计算, 这样就得到了随机波前 I 通过位相板 I 后的远场光强分布. 用同样的

计算过程, 将随机波前 II 的数据与位相板 I 的面型数据代入式(5), 就能得到随机波前 II 通过位相板 I 后的传输效果, 具体计算结果如图 5.

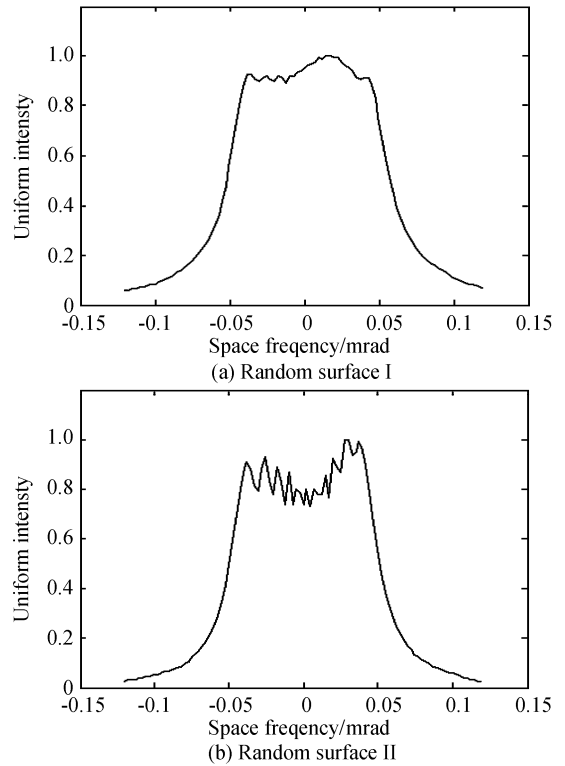
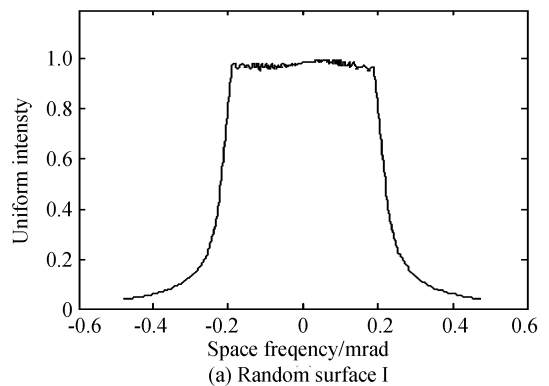


图5 通过位相板 I 后随机波前 I 与随机波前 II 的远场强度分布
Fig. 5 Far field distribution of the random surface I and II that propagate trough the phase plate I

比较图 1 与图 2 中两个随机波前的远场光强分布, 带有相位噪音的畸变波前通过束匀滑位相板后, 其聚焦光斑的强度分布都有了明显改善, 在整个聚焦斑面积内光强变化相对使用束匀滑位相板前均匀了很多.

采用相同的分析方法, 将随机波前 I 和 II 的相位数据与位相板 II 的面型数据代入式(5)计算, 同样可以得到两个畸变光束通过位相板 II 后的远场光强分布结果, 如图 6.

与两个畸变光束经过束匀滑处理前的远场强度分布比较, 也可以看出位相板 II 也具有很好的束匀滑效果.



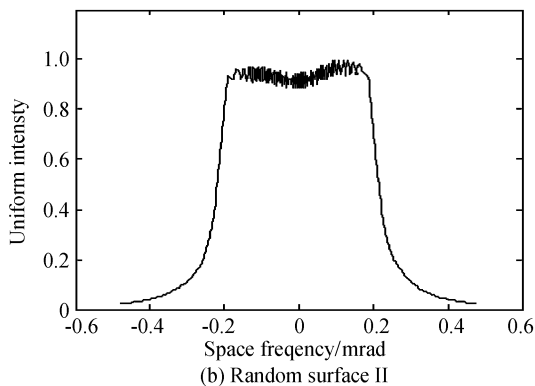


图6 通过位相板 II 后随机波前 I 与随机波前 II 的远场强度分布

Fig. 6 Far field distribution of the random surface I and II that propagates through the phase plate II

再对两个畸变波前在分别通过位相板 I 和 II 后的远场分布结果进行比较,位相板 II 的束匀滑效果明显好于位相板 I。根据随机理论分析结果,位相板的傅里叶谱宽度越大,通过的光束远场分布的方差就越小,分布越均匀。在进行位相板设计时,位相板 II 的傅里叶谱宽度大于位相板 I,因此位相板 II 的束匀滑效果也就更好。通过数值模拟计算也证明了理论推导得出的结论。

3 结论

鉴于光学系统在实际应用过程中受到各种因素影响而导致的波前畸变,利用随机位相板进行光束匀滑是一种有效改善光束质量的方法。由于实际使用中入射位相板光波前通常是不确定的,具有随机性,现阶段使用的针对确定性光场输入的位相板分析是不适用的。本文利用随机理论对输入光场通过束匀滑位相板后的传输特性进行了分析。用模拟退火法设计了位相板,并对光束的远场分布进行了数值模拟。得到的结论是,匀滑位相板的傅里叶谱越宽,输出光场的方差越小,光场的匀滑度越好。

参考文献

[1] MA Zai-ru, FENG Guo-ying, CHEN Jian-guo, *et al.* Influence of the Kerr Effect on the Focusing Property of the Gaussian Beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7):997-1000.
马再如,冯国英,陈建国等.克尔效应对高斯光束聚焦特性的影响[J].光子学报,2006, **35**(7):997-1000.

[2] KATO Y, MIM K, MIYANAGA N, *et al.* Random Phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma instability suppression [J]. *Phys Rev Lett*, 1984, **53** (11): 1057-1060.

[3] DIXIT S N, LAWSON J K, MANES K R, *et al.* Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control [J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(6):417-419.

[4] CHEN Bo, WANG Han-zi, WEI Hui, *et al.* Design of fully continuous phase plates for beam smoothing in ICF [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4):480-484.
陈波,王菡子,韦辉,等.用于惯性约束聚变束匀滑的完全连续相位板设计方法[J].光学学报,2001, **21**(4):480-484.

[5] TAN Qiao-feng, WEI Xiao-feng, XIANG Yong, *et al.* Diffractive optical element designed by YG algorithm for beam shaping in fractional fourier transform domain [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1724-1727.
谭峭峰,魏晓峰,向勇,等. YG 算法设计分数傅里叶变换衍射光学光束整形器件[J].光子学报,2005, **34**(11):1724-1727.

[6] FENG Di, YAN Ying-bai, TAN Qiao-feng, *et al.* Design multi-function diffractive phase plates for beam shaping [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):997-1000.
冯迪,严瑛白,谭峭峰,等.用于光束整形的多功能衍射相位板的设计[J].光子学报,2003, **32**(8):997-1000.

[7] TAN Qiao-feng, YAN Ying-bai, JIN Gou-fan, *et al.* Spatial frequency analysis of beam smoothing performance realized by the diffractive optical element and the smoothing by spectral dispersion technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1384-1387.
谭峭峰,严瑛白,金国藩,等.光谱色散匀滑技术与衍射光学器件联用性能的空间频谱分析[J].光子学报,2006, **35**(9):1384-1387.

[8] WILLIAMS W, AUERBACH A, HUNT J, *et al.* NIF optics phase gradient specification [R]. UCRL-ID-127297, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1997.

[9] DENG Qing-hua, ZHANG Xiao-min, JING Feng, *et al.* Scale length of optics low-frequency phase aberration [J]. *High power laser and particle beam*, 2002, **14**(4):508-510.
邓青华,张小民,景峰,等.光学元件低频位相噪声的空间尺度 [J].强激光与粒子束,2002, **14**(4):508-510.

[10] LIU Hong-liang, ZHAO Yi-qiong, LI Yong-ping, *et al.* A fast SA algorithm for the design of DOE for uniform illumination [J]. *Chinese Journal of Computation Physics*, 2005, **22**(3): 240-244.
刘洪亮,赵逸琼,李永平,等.一种用于均匀照明的衍射光学元件设计的快速模拟退火法[J].计算物理,2005, **22**(3):240-244.

Phase Plates for Beam Smoothing Based on the Random Input

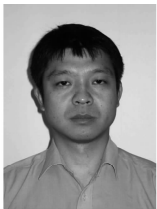
YANG Chun-lin, XU Qiao, WEN Shen-lin

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, 610041, China)

Received date: 2007-07-25

Abstract: The model that the laser beam with random phase aberration propagates through the beam smoothing phase plate has established. Using the random theory, the characteristics of the transmission light from the phase plate were studied. And the statistic mean value and the variance of the far field distribution were calculated. The analysis results show that the relationship of the phase plate's Fourier spectral $|T(f)|^2$ and the far field distribution variance is in direct ratio. That means with the increase of the width of $|T(f)|^2$ the far field distribution of the beam become smoother. The stimulated annealing method was employed to design two different phase plates for beam smoothing. And the numerical results approve the theoretic conclusion.

Key words: Diffraction optics; Beam smoothing; Phase plate; Random theory



YANG Chun-lin received his B. S. degree in optics from Sichuan University in 2000. Now he is an assistant researcher at Chengdu Fine Optical Engineering Research Center. His research interests focus on diffractive optics.