

基于模拟退火算法的自适应近场光束整形

余 湛 马浩统 杜少军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 在激光实际应用中,为了提高系统的利用效率,常常需要将激光器的输出光束整形为特定光强分布光束。基于纯相位液晶空间光调制器的高空间分辨率、实时可编程控制等特性,结合模拟退火算法搭建了一套自适应近场光束整形系统。理论模拟了该系统对于理想高斯光束的近场整形效果,并基于这一闭环系统,对固体激光器输出的近高斯光束进行了近场光束整形实验,在近场得到了近平顶的光强分布,分析表明整形光束 64% 的功率集中在了均匀性误差小于 9% 的范围内。

关键词 激光光学;光束整形;模拟退火算法;泽尼克多项式

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0314003

Adaptive Near-Field Beam Shaping Based on Simulated Annealing Algorithm

Yu Zhan Ma Haotong Du Shaojun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In practical applications, it is always necessary to convert the intensity distributions of the laser beams into desired profiles for improving the efficiency. Based on the high spatial resolution and programmable controller of the phase-only liquid crystal spatial light modulator, an adaptive near-field beam shaping system composed of simulated annealing algorithm is built. The feasibility of the system is validated by translating an ideal Gaussian beam into a flattop beam in the near field theoretically. Finally, the experimental closed control loop system is built to convert a quasi-Gaussian beam emitting from a solid laser into a quasi-flattop beam in the near field. The experimental results show that 64% energy of the actual output beam concentrates in a region which has a relative root mean square (RMS) intensity variation less than 9%.

Key words beam shaping; laser optics; simulated annealing algorithm; Zernike polynomials

OCIS codes 140.3300; 010.1080; 350.4600

1 引 言

在激光的热加工、激光光学存储和激光印刷等应用领域,为了得到特定的均匀光强分布,常常需要应用到光束整形技术^[1~4]。实现光束整形的技术和方法有很多^[5~9],几种典型的技术包括衍射光学元件(DOE)、光楔阵列(SWA)聚焦系统、双折射透镜组、随机相位板和纯相位液晶空间光调制器(LC-SLM)等。

然而在实际应用中,上述衍射光学元件、光楔阵列聚焦系统和双折射透镜组等方法只适用于特定输入输出条件下的光束整形,当输入输出条件变化或

不稳定时,这些方法的实际整形效果就会明显降低,因此很难满足自适应光束整形的需要。LC-SLM作为一种光束整形元件,具有实时、可编程、分辨率高和衍射效率高等特点,当输入输出条件改变时能够实时地生成整形相位屏,实现自适应的光束整形,因此近年来越来越受到关注^[10~14]。

模拟退火算法是一种常用的全局搜索算法^[15],算法理论上能够以概率 1 收敛于评价函数的最优值。然而,当整形系统的采样数很大的时候,模拟退火算法存在收敛效率低、运算时间长等缺陷,限制了

收稿日期: 2010-08-16; 收到修改稿日期: 2010-09-19

作者简介: 余 湛(1984—),男,硕士研究生,主要从事光束整形方面的研究。E-mail: yu_zhan08@163.com

导师简介: 杜少军(1972—),男,研究员,硕士生导师,主要从事高能激光传输方面的研究。E-mail: d_sj@tom.com

模拟退火算法在自适应光束整形中的应用。

本文在模拟退火算法的基础上,结合泽尼克(Zernike)模式法,对算法的初始相位、扰动方式和评价函数进行了改进,通过这样的改进加快了算法的收敛速度,得到了匀滑的相位屏,使得模拟退火算法可以适用于自适应的近场光束整形。基于模拟退火算法和纯相位 LC-SLM 构建了自适应的近场光强整形闭环系统,利用美国 BNS 公司生产的 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 纯相位 LC-SLM 实现了对固体激光器的近场光强整形,在近场得到了近平顶的光强分布。

2 原 理

模拟退火算法的提出源于这样一个物理实例^[16]:对于一个在温度 T 处为热平衡状态的系统,其能量按照 Metropolis 几率分布于所有不同的能量状态中。它以优化问题的求解与物理系统退火过程的相似性为基础,利用 Metropolis 算法并适当地控制温度的下降过程实现模拟退火,从而达到求得全局最优解的目的。然而常规的模拟退火算法存在着算法结构比较复杂,运算量大等缺陷,为此提出了结合 Zernike 多项式的模拟退火算法,简化了算法的结构并能够产生可以用 Zernike 多项式展开的匀滑相位屏。

Zernike 多项式是一种常用的表述像差的方式,由 F. Zernike 在 1934 年构造出来,在光学工程中应用广泛。常用的定义中 Zernike 多项式 $Z_i(x, y)$ 是在单位圆上正交完备的一组基,理论上任意相位都能用一组 Zernike 多项式进行拟合。任意相位 $Q(x, y)$ 用 M 阶 Zernike 多项式拟合可以表示为

$$Q(x, y) = \sum_i^M a_i Z_i(x, y) + \epsilon, \quad (1)$$

式中 a_i 为归一化系数, ϵ 为拟合后的残差。

当 Zernike 多项式总阶数足够大的时候,可以忽略残差项的影响,(1)式用矩阵形式可表示为 $Q = \mathbf{Z}\mathbf{A}$ 。通过上式,新方法就可以将优化相位屏的问题转化为优化由 Zernike 多项式各阶系数组成的 $1 \times M$ (M 为选取的 Zernike 多项式阶数) 向量 \mathbf{A} 的问题。这样的改进,一方面把求解一个 $N \times N$ 矩阵的问题转化为求解一个 $1 \times M$ 向量的问题,优化了算法结构,改善了算法的收敛特性;另一方面,由于整个算法过程中相位屏都是基于 Zernike 多项式构造的,所以最终可以得到匀滑分布的相位屏。算法的流程主要包括以下几步:

1) 由系统生成的 $1 \times M$ 随机向量构成初始相位分布 Q_0 , 根据初始化的输入光强分布 I_{in} 和目标光强分布 I_{target} , 应用菲涅耳衍射原理计算输出的光场分布 I_{out1} ;

2) 定义近场光束整形的评价函数 f_{cost} , 基于输出的光场分布计算 $f_{cost}(Q_0)$;

3) 根据选定的扰动机制,在初始相位 Q_0 的基础上施加一个随机扰动 δ , $Q_1 = Q_0 + \delta$, 其中 δ 同样是基于 Zernike 多项式产生的;

4) 选一个较高的初始温度 T_0 和最大的尝试新构型次数 N_{max} ;

5) 计算新相位与初始相位的评价函数差值 $\Delta = f_{cost}(Q_1) - f_{cost}(Q_0)$;

6) 若 $\Delta < 0$, 直接接受新构型;若 $\Delta \geq 0$, 依照 Metropolis 概率 $\exp(-\Delta/T)$ 接受 Q_1 , 具体方法为:用 $[0, 1]$ 之间的随机数和 Metropolis 概率相比, $\text{Rand}[0, 1] < \exp(-\Delta/T)$ 则接受, 否则保持原相位;

7) 尝试数达到最大后,降温进行新温度点测试,降温采用 $T_{k+1} = T_k \times \beta$, β 为退火常数。在达到给定的退火次数或者评价函数优化到设定值的情况下终止运算。

3 理论模拟

理论模拟时采用的相关系数如下:输入激光光强 I_{in} 为理想高斯分布,波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 高斯光束的腰斑半径 $\omega_0 = 2 \text{ mm}$, 采样空间尺寸为 $L \times L$ ($L = 7.68 \text{ mm}$), 采样数 $N = 512$, 每个采样单元的尺寸为 $l \times l$ ($l = L/N = 15 \mu\text{m}$), 选取的 Zernike 多项式总阶数 $M = 120$, 衍射距离 $L = 25 \text{ cm}$ 。

理论模拟时以 10 阶超高斯光强分布作为目标光强分布,目标光强的表达式 I_{target} 为

$$I_{target} = g_0(x, y) = \exp\{-2[(x^2 + y^2)^{1/2}/\omega_0]^{10}\}, \quad (2)$$

理论模拟时选取的整形效果评价函数定义为

$$f_{cost} = \sqrt{\sum_x \sum_y (I_{out} - I_{target})^2}, \quad (3)$$

式中 I_{out} 为实际输出的光强分布。

由算法原理可知,所得相位屏可以用 120 阶 Zernike 多项式展开,因此为匀滑相位屏。理论模拟时的目标光强分布和实际光强分布分别如图 1, 2 所示,由理论模拟可知,评价函数 f_{cost} 最终收敛到 0.084。通过以上理论模拟验证了上述方法用于近场光束整形的可行性,并得到了较好的整形效果。

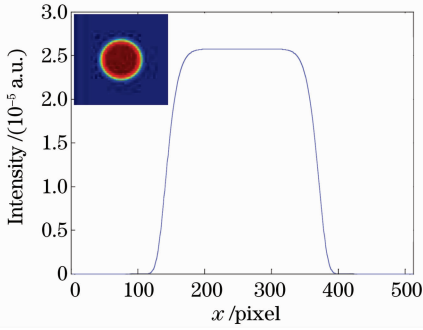


图 1 目标光束的光强二维分布及其截面图

Fig. 1 Cross section and 2D intensity profile of target beam

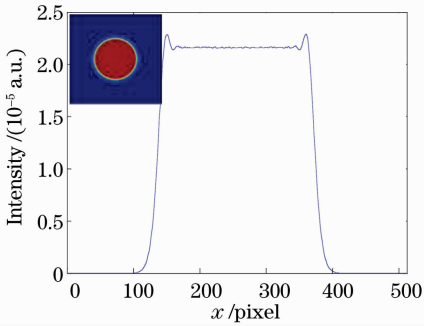


图 2 实际输出光束光强二维分布及其截面图

Fig. 2 Cross section and 2D intensity profile of actual output beam

4 实验及分析

实验中搭建了基于纯相位 LC-SLM 和模拟退火算法的闭环系统,系统的实验装置如图 3 所示,输入的固体激光首先经过望远镜系统扩束,随后经过分束镜,一束到达 CCD1 测量输入光强分布,另一束进入 LC-SLM,经过 LC-SLM 反射以后光束进入 CCD2 测量实际输出光强分布,输入光强分布信息和实际输出光强分布信息输入计算机并由计算机输

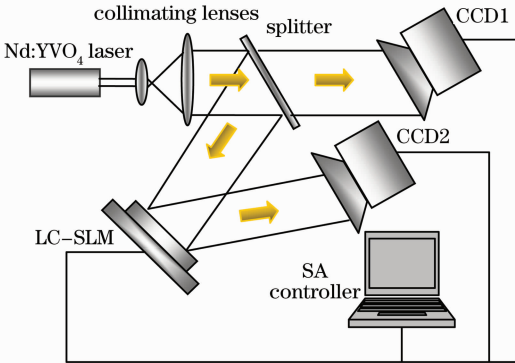


图 3 近场光束整形系统实验装置图

Fig. 3 Experimental configuration of near-field beam shaping system

出控制指令,驱动 LC-SLM,构成近场光束整形的闭环系统。

使用的 LC-SLM 为美国 BNS 公司产的 512 pixel×512 pixel 纯相位型 LC-SLM,口径为 7.68 mm×7.68 mm,单个像素大小 15 μm×15 μm,响应频率为 67 Hz;电荷耦合器件(CCD)相机单个像素大小为 6.45 μm×6.45 μm,实验中 CCD 相机工作在 960 pixel×1280 pixel 的模式。输入的固体激光器波长 λ 为 1064 nm,光强分布为近高斯分布,如图 4 所示。以 10 阶超高斯光束为目标光束,应用如上所述的近场光速整形系统,我们在实验中最终得到了近平顶的近场光强分布如图 5 所示。

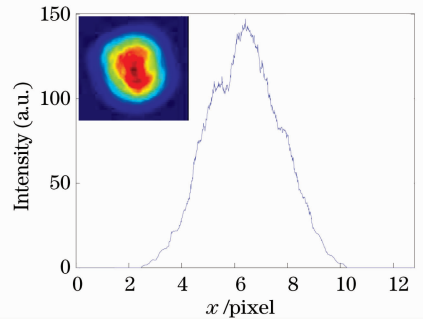


图 4 输入光束的光强二维分布及其截面图

Fig. 4 Cross section and 2D intensity profile of input beam

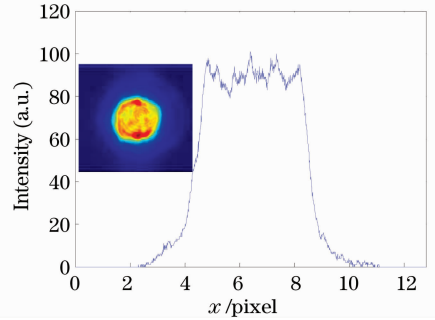


图 5 实际输出光束光强二维分布及其截面图

Fig. 5 Cross section and 2D intensity profile of actual output beam

实际应用中通常使用衍射效率 η 来衡量光束整形系统的光强利用效率,使用光强均匀度(SSE) M_{SSE} 来衡量实际输出光束的均匀性,它们的定义分别为

$$\eta = \frac{\sum_x \sum_y I_{out}}{\sum_x \sum_y I_{in}}, \quad (4)$$

$$M_{SSE} = \frac{\sqrt{\sum_s [I_{out} - \bar{I}(s)]^2}}{\bar{I}(s)}, \quad (5)$$

式中 s 为所要考察的整形后光束以光轴为中心的圆形区域,其半径为 a , $\bar{I}(s)$ 为该区域内的光强平均值。

实验测得衍射效率为 91.37%, 得到的算法收敛曲线如图 6 所示, 评价函数 f_{cost} 最终收敛到 0.15。由(4),(5)式, 根据实际输出的光强分布, 通过改变 a 计算目标光束和实际输出光光束的光强均匀度与衍射效率 η 的关系曲线如图 7 所示, 纵坐标为光强均匀度的均方根值(RMS)分析表明整形后的 64% 的功率集中在均匀性误差小于 9% 的范围内。

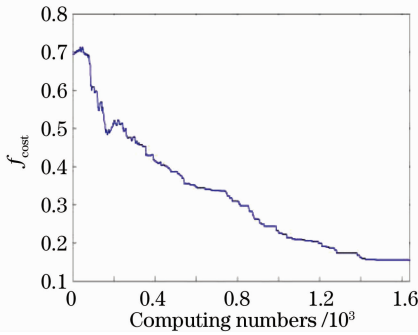


图 6 误差评价函数与运算次数曲线

Fig. 6 Error control function versus computing number

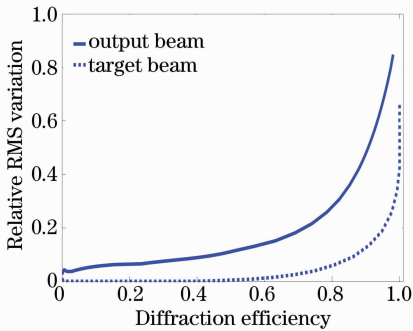


图 7 光强均匀度与衍射效率曲线

Fig. 7 Relative RMS variation versus diffraction efficiency of the output beam and the target beam

从目前近场整形的效果来看, 实验结果相对理论模拟结果存在一定的差距, 还有很大的提升空间。通过进一步分析发现, 原因主要存在于两个方面: 1) 液晶空间光调制器在响应由 Zernike 像差组成的相位屏时, 存在一定的误差, 而且 Zernike 阶数对整形效果的影响以及哪些像差对整形效果起主要作用还有待进一步研究; 2) 算法的各种参数对算法收敛效果的影响比较复杂, 而且彼此之间又有相互影响, 因此如何在有限的运算次数下选定一组较优的参数是能否得到更好结果的关键。

5 结 论

结合模式法, 对模拟退火算法的初始相位、扰动

方式和评价函数进行了改进, 基于 LC-SLM 和模拟退火算法搭建了一套自适应的近场光束整形系统, 并对这套系统的整形效果进行了模拟。通过这样的理论模拟, 生成了能够用 Zernike 多项式展开的匀滑相位屏, 实现了较好的近场光束整形效果。应用实验室搭建的近场光束整形系统, 在实验中得到了近平顶的近场光强分布。

参 考 文 献

- Lu Si, Yi Deer. Beam-shaping application in laser heat processing [C]. *SPIE*, 2001, **4274**: 452~460
- J. M. Auerbach, V. P. Karpenko. Serrated-aperture apodizers for high-energy laser systems [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3179~3183
- Yu Jianjie, Tan Liying, Ma Jing *et al.*. A novel method to improve the efficiency of satellite optical communication terminal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 581~586
俞建杰, 谭立英, 马晶等. 一种提高卫星光通信终端发射效率的新方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 581~586
- Ma Xiaoyu, Fan Zhihua, Rao Changhui *et al.*. Application of Hartmann-Shack sensor in optical readout system of uncooled infrared imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 490~495
马晓焯, 樊志华, 饶长辉等. 基于哈特曼波前传感器的非制冷红外成像光学读出系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 490~495
- Zhang Yan, Zhang Jingjuan, Situ Guohai. Investigation on diffractive optical elements for converting Gaussian beam into square uniform focused spot [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1183~1187
张艳, 张静娟, 司徒国海. 高斯光束变换成方形均匀焦斑的衍射光学元件的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1183~1187
- Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1704
杨向通, 范薇. 利用双折射透镜组实现激光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1704
- Jiang Yanbing, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Beam shaping method for uniform illumination by superposition of multi-tilted Gaussian beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1012~1017
姜燕冰, 严惠民, 张秀达等. 基于倾斜多高斯光束叠加的均匀化照明整形方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1012~1017
- M. A. Karim, A. M. Hanafi, F. Hussain *et al.*. Realization of a uniform circular source using a two-dimensional binary filter [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(10): 470~471
- J. Y. Liang, R. N. Kohn, Jr., M. F. Becker *et al.*. 1.5% root-mean-square flat-intensity laser beam formed using a binary-amplitude spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(10): 1955~1962
- Ma Haotong, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Near-field beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2032~2036
马浩统, 周朴, 王小林等. 基于液晶空间光调制器的激光束近场整形[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2032~2036
- D. C. Dayton, S. L. Browne. Theory and laboratory demonstrations on the use of a nematic liquid-crystal phase modulator for controlled turbulence generation and adaptive optics [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5579~5589
- Yang Huafeng, Rao Changhui, Zhang Yudong *et al.*. Adaptive optic system based on combination deformable mirror for improving wavefront spatial correction capability [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 587~593
- 杨华锋, 饶长辉, 张雨东 等. 一种提高波前空间校正能力的组合变形镜自适应光学系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 587~593
- 13 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1107~1111
- 陈怀新, 隋 展, 陈祯培 等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1107~1111
- 14 Cai Dongmei, Ling Ning, Jiang Wenhan. The performance of phase-only liquid crystal spatial light modulator used for generating Zernike terms [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 897~903
- 蔡冬梅, 凌 宁, 姜文汉. 纯相位液晶空间光调制器拟合泽尼克像差性能分析[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 897~903
- 15 J. S. Liu, A. J. Caley. Comparison of simulated quenching algorithms for design of diffractive optical elements [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(6): 807~816
- 16 S. Kirkpatrick. Optimization by simulated annealing [J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~680