

文章编号:1004-4213(2010)06-0977-5

# 用于光束整形的衍射光学元件设计的混合算法\*

庞辉,应朝福<sup>†</sup>,范长江,林培秋,吴浩伟

(浙江师范大学 信息光学研究所,浙江 金华 321004)

**摘要:**提出了一种用于衍射光学元件优化设计的混合遗传迭代爬山算法,该算法将迭代量化傅里叶变换算法融入到遗传算法中,然后在整体遗传算法结束后,对找到的当前最优解再用爬山法进行局部寻优,从而得到最优的衍射光学元件表面相位分布.用该混合方法设计了衍射光学元件,可以将入射的高斯光束整形成方形的均匀光斑.模拟结果表明:该混合算法具有收敛速度快、设计准确度高等优点.相比于其它设计方法,本文提出的方法能较好地改善整形效果,特别适用于光束整形的衍射元件设计.

**关键词:**衍射光学元件;遗传算法;混合算法;光束整形

**中图分类号:** TN249

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103906.0977

## 0 引言

在激光的诸多应用中,对激光的波面、光强分布、模式及光斑形状与大小等提出了多种特殊的要求.例如,在光计算与光学测量中要求激光光束的振幅及相位都要均匀分布.在惯性约束核聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)等强激光光学中,对激光光斑的要求极其苛刻,要求光斑不均匀性小于 5%,衍射效率大于 90%,且光斑呈无旁瓣的平顶分布<sup>[3]</sup>.现有的基于折射原理的大功率半导体激光器阵列光束整形技术简单,工艺成熟,但重量和体积较大且衍射效率与光斑均匀性差;基于衍射原理的光束整形技术,能够实现任意的波前变换,而且衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)具有体积小、重量轻、微型化、阵列化、生产和复制成本低等优点,因此在光束整形领域具有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>.到目前为止,衍射光学元件的优化设计方法主要分为基于傅里叶变换的迭代算法<sup>[1-2]</sup>和基于搜索极值<sup>[5-6]</sup>的优化算法.基于傅里叶变换的迭代算法对初始相位选择非常敏感,而像遗传算法、模拟退火算法这类非迭代的方法,虽然对初始选择不敏感,鲁棒性强,但是要想找到最优解,需要消耗大量的搜索时间,收敛速度很慢.

不同于以往的一些混合算法<sup>[7-9]</sup>,本文提出了一种新的混合算法(GAIFTL),将迭代量化傅里叶变换方法<sup>[1]</sup>融入标准遗传算法<sup>[6]</sup>中,直接设计量化的

DOE 相位,在整体混合遗传迭代算法结束后,再对所得到的当前最优解用爬山法进行局部寻优.本文所提出的混合算法充分地利用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的全局搜索特性与迭代傅里叶变换算法(Iterative Fourier Transform, IFT)的快速收敛特性,并利用爬山法很强的局部的寻优能力,来寻找解空间中的最优解.由于制作工艺的限制,制作连续相位分布的 DOE 是有困难的,但是现有的高分辨率激光直写系统(DWL66),利用声光调制器可以将激光强度调制成 32 级不同的能量级,可以一次快速写出最多 32 级台阶结构的衍射光学元件,而不需要任何掩模板,避免了多次掩模套刻中的对准误差等问题,降低了制作成本、提高了元件的制作准确度和衍射效率.本文提出的混合算法最后设计的 DOE 相位是量化的,而已有的一些混合优化算法大多将 DOE 的相位视为连续的,然后进行设计,最后将设计的 DOE 相位进行量化,这会引入量化噪声.我们将该混合算法应用到激光高斯光束整形中,并与已有一些算法的设计结果进行了比较,结果表明,该混合算法具有收敛速度快、鲁棒性强、光斑均匀性高等优点.

## 1 DOE 的设计原理

衍射光学元件的设计问题十分类似于光场的相位恢复问题.即已知输入平面和输出平面的振幅分布,求解输入平面的相位分布.图 1 为典型的衍射光学元件设计系统,  $P_1$ ,  $P_2$  分别为输入平面和输出平面,入射光波  $u(x_0, y_0)$  经过  $P_1$  平面上的衍射光学元件的纯相位调制,经过衍射后到达  $P_2$  平面. DOE 的设计问题就是寻找合适的 DOE 相位分布  $\phi(x_0, y_0)$ .

\* 国家自然科学基金(60877002)和浙江省自然科学基金(Z1080030)资助

<sup>†</sup> Tel: 0579-82298833

Email: ying@zjnu.cn

收稿日期: 2010-01-25

修回日期: 2010-03-29

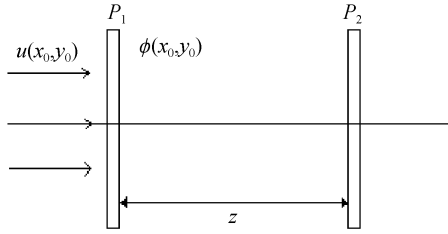


图1 衍射光学元件设计系统

Fig.1 Optical system of designing diffractive optical elements

$y_0$ ), 使入射光经过 DOE 的调制后在  $P_2$  平面形成的振幅分布  $|u_1(x_1, x_2)|$  尽可能接近理想振幅  $|\bar{u}|$  分布。

对于光束整形的 DOE 设计, 通常以衍射效率  $\eta$  (输出平面中光斑能量占全部能量的百分比) 和光斑不均匀性  $\sigma$  作为评价函数. 其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{(x,y) \in W} \left[ \frac{I(x,y) - \bar{I}}{\bar{I}} \right]^2}{n}} \quad (1)$$

$$\bar{I} = \frac{\sum_{(x,y) \in W} I(x,y)}{n} \quad (2)$$

式中  $I(x, y)$  表示实际的输出光强分布,  $W$  为输出面上均匀光斑所在区域 (信号窗),  $n$  表示信号窗  $W$  内的采样点数. 由于衍射效率跟均匀性是两个相互冲突的量, 为了得到一个比较合理的解, 采用组合的基于罚函数思想的评价函数

$$\cos t = 10R(\eta) + \sigma \quad (3)$$

$$R(\eta) = \begin{cases} 0 & \eta \geq \eta_d \\ (\eta_d - \eta) & \eta < \eta_d \end{cases} \quad (4)$$

式中 10 为罚因子,  $R(\eta)$  为惩罚项,  $\eta_d$  为所需要的衍射效率. 所以, DOE 的设计问题转换为寻找最优的  $\varphi(x_0, y_0)$ , 使得  $\cos t$  最小.

## 2 设计 DOE 的混合算法

遗传算法是一类种随机优化算法, 它具有并行搜索能力, 在全局最优搜索方面有明显的优点, 但是局部搜索能力很弱. 遗传算法的局部搜索主要是靠染色体的变异操作来实现的, 这种变异操作是无方向的, 随机的. 因此, 虽然遗传算法能够花很短的时间达到全局最优解附近, 但是想要找到最优解, 却是相当耗时的. 虽然迭代量化傅里叶变化法的局部搜索能力很强, 但是不同的初始相位分布, 往往得到不同的解. 而本文提出的混合算法, 刚好结合了遗传算法的全局搜索能力和迭代算法的强局部搜索能力. 因此既可以克服“遗传算法”耗时、收敛慢, 又能克服“迭代量化傅里叶变换法”对初始相位选择的敏感

性.

本文将 Frank. Wyrowski 提出的迭代量化傅里叶变换方法<sup>[1]</sup>融入到标准的遗传算法<sup>[6]</sup>中, 在遗传算法中的选择交叉变异操作后, 再对种群中每个个体实行迭代搜索, 在整体遗传算法结束后, 再对找到的当前最优解用爬山算法进行局部搜索, 数值模拟表明这种局部搜索可以大大提高光斑的均匀性, 最终得到比较理想的 DOE 相位分布.

由于计算机处理数据的离散性, 假设输入平面和输出平面的采样点数均为  $64 \times 64$ , 则 DOE 的相位分布可用  $64 \times 64$  的矩阵表示. 混合算法实施的流程如图 2, 算法实施的具体步骤描述如下:

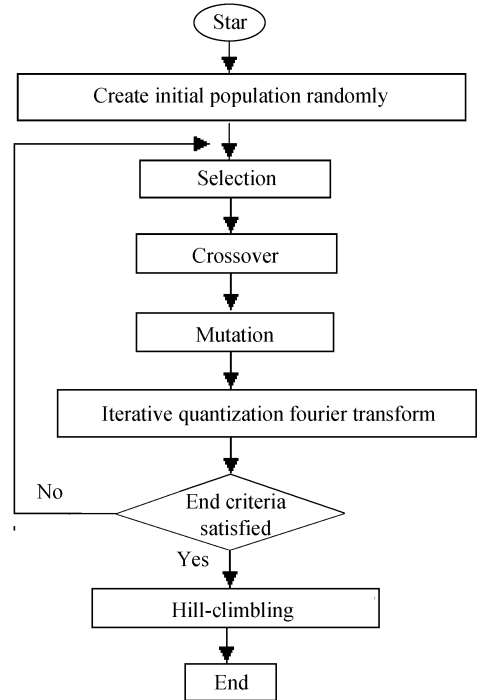


图2 GAIFTL 流程

Fig.2 Flow chart of the GAIFTL

1) 初殖: 随机产生若干个相位分布, 组成初始种群, 每个个体为一个  $64 \times 64$  的矩阵.

2) 复制: 评价每个个体的适应度值, 采用轮盘赌选择, 并采取保优策略, 即当前具有最优适应度的个体直接进入下一代. 这里个体的适应度为  $f = 1/\cos t$ , 适应度越高的个体有更大的复制概率.

3) 交叉: 将每个个体由矩阵转换成一个串, 以便于交叉与变异操作的进行. 假如个体为  $64 \times 64$  的矩阵, 则转换成  $1 \times 4096$  的串. 这里我们采用双点交叉, 任选两个个体, 随机产生两个  $1 \sim 4096$  之间的数, 代表两个个体的染色体要交换的起点和终点.

4) 变异: 随机产生一个  $1 \sim 4096$  之间的数, 代表变异位置. 假如相位为 16 阶量化, 则相位有 16 种取值, 采用随机产生一个  $0 \sim 15$  之间的数代表相位值. 如随机产生 12, 则这个染色体的相位变异为

$(24/16)\pi$ .

5) 迭代:对种群中的每个个体进行软量化的傅里叶变换迭代运算<sup>[1]</sup>. 这种方法可以直接设计量化的 DOE,收敛速度快,但是对初始相位很敏感,鲁棒性低.

6) 评价整体的遗传迭代是否满足结束准则. 是,则执行下一步;否,则转第 2)步.

7) 在整个混合遗传迭代结束后对找到的当前最优解,用爬山算法进行局部寻优. 假如  $\varphi(m, n)$  为混合遗传迭代找到的最优解,局部爬山算法是对  $\varphi(m, n)$  每一个像素,改变相位值,再判断费用函数  $\cos t$  是否减小,若减小则接收改变,否则不接受.

至此,算法结束,可以得到比较理想的 DOE 相位分布.

### 3 模拟设计结果

本文分别用 GA、GALS(混合遗传局部搜索算法)、GS 以及本文提出的混合算法(GAIFTLS)设计 DOE,将高斯光束整形成均匀矩形光斑. 在数值模拟设计计算中,具体参量选择如下:输入光波长  $0.6328 \mu\text{m}$ ,束腰半径  $0.570 \text{ mm}$ ,输入面大小  $1.216 \text{ mm}$ ,输出面大小  $3.330 \text{ mm}$ ,输入面和输出面间距  $100 \text{ mm}$ ,两个面上的取样点均为  $64 \times 64$ .

图 3 为各种算法的收敛曲线. 标准遗传算法(GA)与混合遗传局部搜索算法(GALS)在进化几万次后仍未收敛. G-S 算法在迭代 200 次后收敛到局部最优解,而本文提出的混合算法,在迭代 10 次后评价函数  $\cos t$  已经低于 GS 迭代 200 次后的  $\cos t$ ,最终在 600 次后收敛. 图中 GAIFTLS 的  $\cos t$  曲线看起来很平整,主要是由于爬山法的局部搜索特性.

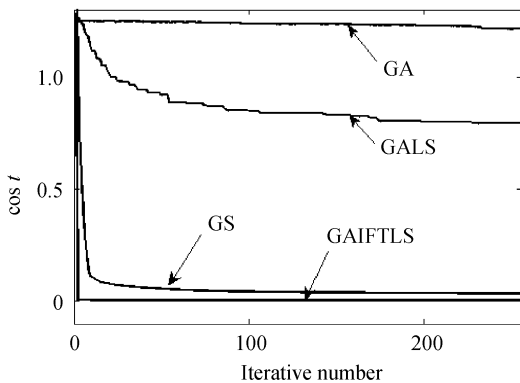


图 3 收敛曲线比较

Fig. 3 Comparison of convergence property of algorithms

图 4 为混合算法中所用的爬山法的收敛曲线. 从曲线的下降程度,可以说明爬山法具有很强的局部搜索能力. 这种强局部搜索能力,特别适合用来改善光斑的均匀性. 以相位量化 128 阶为例,用爬山法

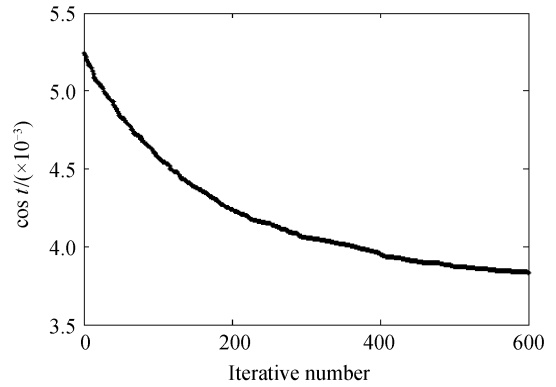
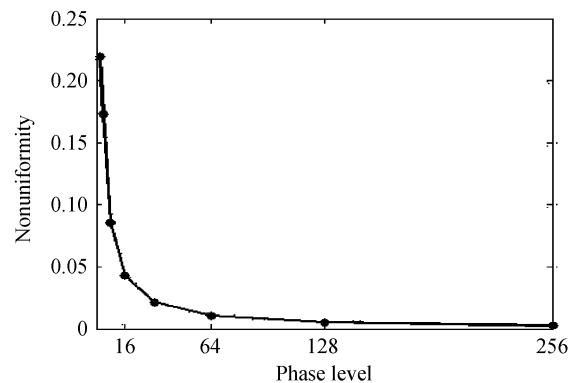


图 4 爬山法的收敛特性

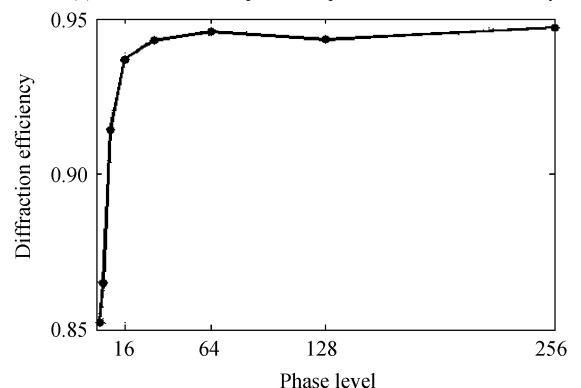
Fig. 4 Convergence property of the applied hill-climbing algorithm

搜索当前最优解后,衍射效率虽然减小了  $0.01\%$ ,但均匀性却提高了  $26.9\%$ . 数值模拟说明了这种局部爬山法可以大大提高光斑的均匀性.

图 5 为混合算法设计过程中相位量化的阶数对衍射效率和均匀性的影响. 可以看出,相位量化的阶数越高,衍射效率和光斑均匀性都会提高. 用本文的混合算法设计 16 阶相位量化的 DOE 时,光斑的不均匀性已经小于  $5\%$ ,衍射效率大于  $90\%$ . 说明本文所提出的混合算法直接设计量化的 DOE 相位分布是有效的.



(a) Influence of the quantized phase to the nonuniformity



(b) Influence of the quantized phase to the efficiency

图 5 相位量化的影响

Fig. 5 Effect of the phase quantization

图 6 为采用 G-S 算法和本文所提出的混合算法的设计结果. GS 算法得到:  $\eta=98.64\%$ ,  $\sigma=3.23\%$ .

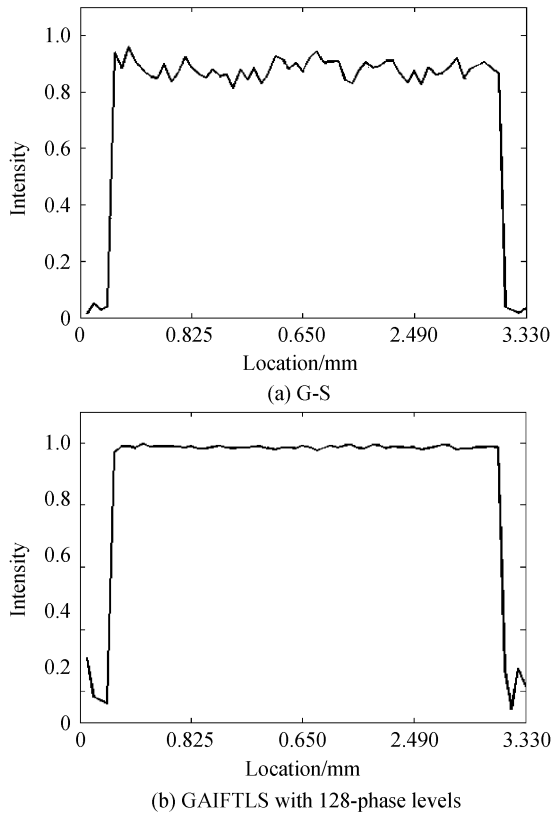


图6 G-S算法和混合算法设计的结果比较  
Fig.6 Comparison of the design result

128阶相位量化的混合算法设计结果： $\eta=95.41\%$ ， $\sigma=0.41\%$ 。虽然衍射效率略有降低，但是光斑顶部均匀性明显好于GS算法的结果。

## 4 结论

本文提出的混合算法，结合了遗传算法、迭代量化傅里叶变换算法和爬山法，用于衍射光学元件的设计，它将迭代量化的傅里叶变换算法作为一个算子放入遗传算法中，增强遗传算法的局部搜索特性，然后在整体遗传算法结束后，对找到的当前最优解再用爬山法进行局部寻优，从而得到最优的DOE相位分布。数值模拟结果表明：用本算法设计DOE不仅收敛速度快、设计准确度高、量化噪音小，而且得到的光斑均匀性好，可以直接设计量化的DOE，是一种较为有效的衍射光学元件设计新方法。在光束整形、光束匀化和其它一些强激光应用中具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] WYROSKI F. Iterative quantization of digital amplitude holograms[J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(18): 3860-3870.
- [2] SKEREN M, RICHTER I, FIALA P. Iterative fourier transform algorithm: comparison of various approaches[J]. *J Mod Opt*, 2002, **49**(11): 1851-1870.
- [3] JIN Guo-fan, YAN Yin-bai, WU Min-xian, *et al.* Binary optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 223-240. 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 223-240.
- [4] ZHOU Chong-xi, DU Chun-lei, XIE Wei-min, *et al.* Beam shaping and fiber coupling for LD stacks with micro-optical elements array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 452-455. 周崇喜, 杜春雷, 谢伟民, 等. 微光学元件阵列面阵LD光束整形及光纤耦合[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(3): 452-455.
- [5] KANG Guo-guo, XIE Jing-hui, MO Xiao-li, *et al.* Design of binary optics using improved two-step simulated annealing algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1416-1419. 康果果, 谢敬辉, 莫晓丽, 等. 用改进的两步模拟退火法进行二元光学元件的设计[J]. 光子学报, 2008, **37**(7): 1416-1419.
- [6] CHEN Tao, LUO Chong-tai, WANG Duo-shu, *et al.* Genetic algorithms used for optimization design of diffractive opticelements [J]. *Opto-Electronics Engineering*, 2004, **31**(12): 8-11. 陈焱, 罗崇泰, 王多书, 等. 遗传算法用于衍射光学元件的优化设计[J]. 光电工程, 2004, **31**(12): 8-11.
- [7] LÜ Jun-feng, ZHANG Jing-juan, ZHANG Yan, *et al.* Design of a ring-beam profile converter with the SA-BIWP hybrid algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 85-89. 吕俊峰, 张静娟, 张艳, 等. 用SA-BIWP混合算法设计三维圆环光束的BOE[J]. 光子学报, 2004, **33**(1): 85-89.
- [8] LIN Yong, HU Jia-sheng, WU Ke-nan. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping [J]. *Aata Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1682-1686. 林勇, 胡家升, 吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法[J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1682-1686.
- [9] JIANG Wen-bo, HU Song, ZHAO Li-xing, *et al.* A hybrid algorithm for designing phase diffractive optical elements[J]. *Opto-Electronics Engineering*, 2009, **36**(5): 47-51. 蒋文波, 胡松, 赵立新, 等. 位相型衍射光学元件设计的混合算法[J]. 光电工程, 2009, **36**(5): 47-51.
- [10] CHEN Lin-sen, SHAO Jie, WANG Xue-hui, *et al.* A new laser direct writing method of binary beam-shaping element [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 346-349. 陈林森, 邵洁, 王雪辉, 等. 一种二元整形元件激光直写方法的实验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 346-349.

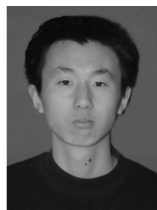
## Design Diffractive Optical Elements for Beam Shaping with Hybrid Algorithm

PANG Hui, YING Chao-fu, FAN Chang-jiang, LIN Pei-qiu, WU Hao-wei

(*Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*)

**Abstract:** A novel algorithm, which combines a genetic algorithm with an iterative quantization fourier transform algorithm and hill-climbing algorithm, is presented to design diffractive optical elements for beam shaping. This hybrid algorithm firstly takes the genetic algorithm which combines the iterative soft quantization fourier transform algorithm to obtain a solution. Secondly, the hill-climbing algorithm is applied to search the local best solution around the solution derived firstly. It can acquire good efficiency and uniformity with only a small quantity of iterative number. Simulation result shows that the hybrid algorithm is effective and robust. Compared with other algorithms, this hybrid algorithm can greatly improve the effect of the beam shaping, especially the place where the uniformity is important.

**Key words:** Diffractive optical element; Genetic algorithm; Hybrid algorithm; Beam shaping



**PANG Hui** was born in 1986. Now he is pursuing his M. S. degree at Zhejiang Normal University, and his main research interests focus on diffractive optics.



**YING Chao-fu** was born in 1964. Now he is an associate professor, and his research interests focus on optical information processing, holography, diffractive optics and 3D sensing etc.