微反射镜阵列在光束整形中的应用

杜 猛[1,2],邢廷文[1],袁家虎[1]

(1. 中国科学院光电技术研究所,四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:在激光的实际应用中,需要利用光束整形技术将激光器的输出光束调制为期望的光强分布。微机电系统的发展为光束整形提供了一种解决方案。采用微反射镜阵列,实现了激光光束的整形。基于随机化的思想提出了相应的算法,分析了算法在不同单元数目和不同噪声水平下的表现,为实际应用提供了有价值的参考依据。最后,建立了实际的光路模型,进行了光线追迹,给出单模高斯光束以及考虑噪声情况下的仿真结果。分析结果表明,使用微反射镜阵列可以有效地实现不同输入下的激光光束整形,并且具有极大的灵活性,为光束整形提供了一种新的手段。

关键词:光束整形; 微反射镜阵列; 仿真

中图分类号:TH74; O435 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)04-1210-05

Application of micromirror array in beam shaping

Du Meng[1,2], Xing Tingwen[1], Yuan Jiahu[1]

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the application of laser, the technique of beam shaping was used to modulate the beam to expected intensity distribution. The development of micro electronic and mechanic system provided a solution. The beam shaping was realized by the using of micro mirror array. Based on the idea of randomization, an algorithm was proposed for the application, and the performance under different unit numbers and different noise levels was analyzed so as to present valuable reference in practical application. At the end, a practical optical system model was built and beam trace was performed, and the results under single-mode Gaussian beam and with-noise beam were given. The analysis on results show that beam shaping is achieved effectively using micromirror array under different inputs. And because of the independent addressing property of the micromirror array, the method has flexibility which can satisfy a variety of application requirement.

Key words: beam shaping; micromirror array; simulation

收稿日期:2013-08-18; **修订日期**:2013-09-20

作者简介:杜猛(1988-),男,硕士生,主要从事光束整形和光学设计的研究。Email:du_meng1988@126.com

导师简介:邢廷文(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事应用光学方面的研究。Email:xingtw@ioe.ac.cn

袁家虎(1963-),男,研究员,博士生导师,主要从事光学制造技术研究。Email:jhyuansz@163.com

0 引　言

在激光材料加工、光刻术、激光雷达、光学信息处理等领域，都需要对激光的强度分布进行调制以获得期望的强度分布，即光束整形[1-2]。经过数十年的发展，光束整形的手段从早期的光阑遮挡，到利用透镜系统，反射镜系统，微透镜阵列，以及衍射光学元件等[3-7]。这些方法各有其优缺点和适用性。但总体而言，都缺少一定程度的灵活性。目前，已有学者提出了利用液晶空间光调制器进行光束整形的系统，可以增加系统的灵活性，但由于液晶空间光调制器本身的透射率以及衍射效应，使这种系统存在能量利用率以及衍射光斑的问题[8-9]。随着半导体集成电路微细加工技术和超精密机械加工技术的发展[10]，微机电系统(MEMS)得到了很大的发展。微反射镜阵列[11]的出现为光束整形提供了一种新的方法，由于是阵列化的反射器件，所以可以通过计算机实时控制，并且通过镀膜，可以适用于宽波段的光谱范围。提出了一种利用微反射镜阵列进行光束整形的算法，设计了实际的光路，并进行了仿真分析，证明了此方法的有效性和可行性。

1 算法分析

所使用的微反射镜阵列具有 X，Y 方向独立偏转能力。则利用微反射镜阵列将入射光束整形为期望光强分布，只需确定每个镜单元的 X 和 Y 方向的偏转角度。此问题即为一个最小化问题。利用优化算法复杂而费时，现提出算法如下：

(1) 对当前输入光束的采样点处光强 $I_i(m,n)$，随机选取信号窗(即期望光强分布不为零的区域)内一个采样点(x,y)，将 $I_i(m,n)$偏转到此采样点上；(2) 若(x,y)处的光强小于期望光强，则选取下一个输入光强的采样点，转至(1)；(3) 若(x,y)处的光强大于期望光强，则在信号窗内再随机选取一个采样点$(x',y')\rightarrow(x,y)$，将输入光束 $I_i(m,n)$偏转到此采样点处，转至(2)；(4) 若对输入光束采样点处光强 $I_i(m,n)$偏转至信号窗内任一点，均使其光强大于期望光强，则选取超出期望光强最小的采样点，将偏转至此采样点处，转至(1)；(5) 得到输入光束采样点和输出光束采样点之间的映射关系，利用实际光路的参数，计算得到微反射镜阵列镜单元 X 方向和 Y 方向的偏转角度。

2 仿真分析

2.1 算法仿真

2.1.1 正确性验证

仿真条件为采样点数 128×128，即镜单元的数目为 128×128，入射光束为单模高斯光束，场分布的表达式为：

$$E_i=\exp(-(x^2+y^2)/w^2) \tag{1}$$

式中：w 为束腰半径，令束腰半径为光斑大小的一半，对应的光强分布如图 1 所示。期望输出的光强分布为四极照明光束，其强度分布如图 2 所示。算法得到结果的三维强度分布如图 3 所示。

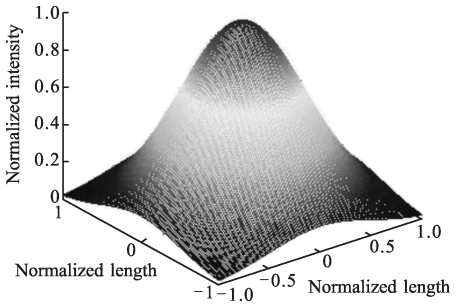

图 1 输入单模高斯光束强度分布

Fig.1 Single-mode gauss beam intensity distribution

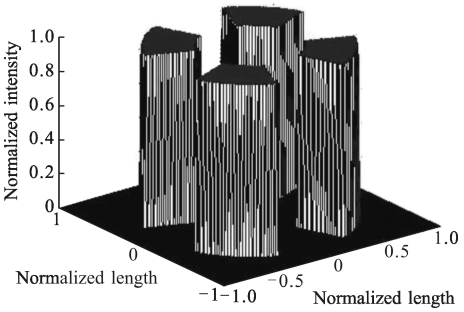

图 2 期望输出的光强分布

Fig.2 Expected intensity distribution

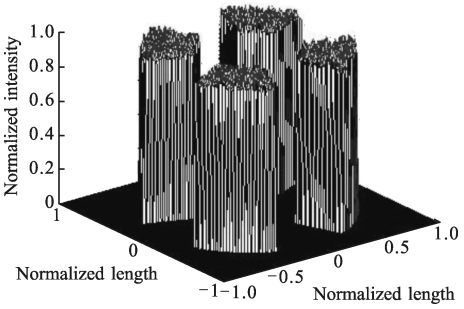

图 3 理想单模输入时的整形结果

Fig.3 Shaping result on ideal single-mode input

同样地,对多模高斯光束进行仿真分析,并进行评价。多模高斯光束场分布表达式采用超高斯函数来表示,场分布表达式为:

$$E_i=\exp\left(-\left(\frac{|x|}{w_{sg}}\right)^{r1}-\left(\frac{|y|}{w_{sg}}\right)^{r2}\right) \tag{2}$$

式中:r_1,r_2 分别为 x,y 方向的阶数;w_{sg} 为束腰半径。考虑一个一般的激光器的输出,此处设 r_1=14,r_2=40,束腰半径为光斑大小的一半, 对应的强度分布如图4所示,算法所得结果如图 5 所示。

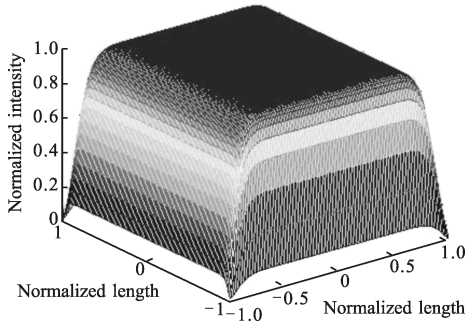

图 4 多模高斯光束强度分布

Fig.4 Multimode Gaussian beam intensity distribution

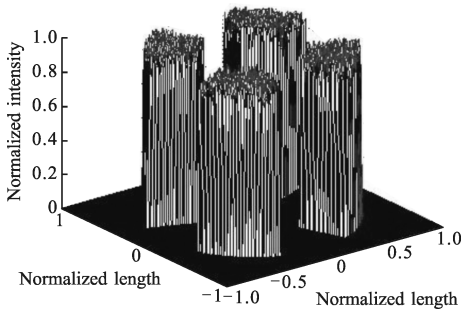

图 5 理想多模输入时的整形结果

Fig.5 Shaping result on the ideal multymode input

光束整形的评价指标一般用能量利用率、均方误差、顶部不均匀度来衡量。由于采用反射镜阵列,利用的是几何光线理论, 能量利用率主要取决于反射率和微镜阵列的填充率,与算法关系不大,此处不予考虑。均方误差 MSE(Mean Square Error)和顶部不均匀度 σ 的定义分别为:

$$MSE=\frac{\sum_n |I_e-I_o|^2}{\sum_n I_e^2},\ \sigma=\sqrt{\sum_{(x,y)\in W}\left[\frac{I_o(x,y)-\bar{I}_o}{\bar{I}_o}\right]/(n-1)} \tag{3}$$

其中:

$$\bar{I}_o=\sum_{(x,y)\in W} I_o(x,y)/n \tag{4}$$

式中:I_e 为期望的光强分布;I_o 为实际输出光强分布;W 为信号窗;$\bar{I}_o$ 为信号窗内的光强的平均值;n 为信号窗内的采样点数。将采样点数与镜单元数目选为一致,对上述仿真结果进行评价,结果见表 1。

表 1 光束整形结果评价

Tab.1 Evaluation of shaping results on Gaussian beam

	Single-mode	Multimode
MSE	1.358 0e−004	0.001 9
σ	0.011 7	0.043 0

可以看出,算法对不同的输入,均实现了光束整形,指标在可接受的范围之内,验证了此方法的正确性和通用性。

2.1.2 镜阵列单元数以及随机噪声的影响

所述方法的一个基本假设是认为由于微镜阵列将光源分割为许多个子光源,所以对每一个镜单元,光场近似为平面波。在此前提下,考察镜单元个数对调制结果的影响。假设镜单元数目为 $N\times N$,令 N分别为 16、32、64、128、256,而为了统一的比较结果,评价时的采样点数都取为 512×512。结果如图 6、图 7 所示。

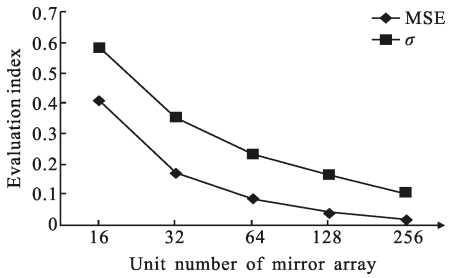

图 6 不同单元数目时的算法表现(单模输入)

Fig.6 Algorithm performance vs different unit numbers of mirror array(single-mode input)

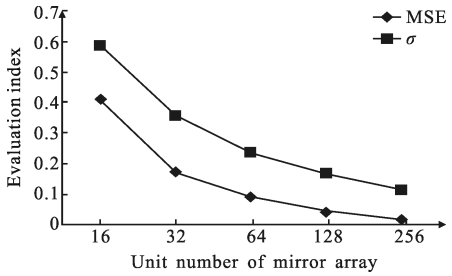

图 7 不同单元数目时的算法表现(多模输入)

Fig.7 Algorithm performance vs different unit numbers of mirror array(multimode input)

可以看出,随着微镜阵列单元数目的增加,对单模和多模高斯输入, 均方误差和光束顶部不均匀度都在下降,光束整形质量有明显的提高,而且对于输入的变化,结果并没有明显的差异,说明了算法的通用性。

激光器受其自身工作原理的限制,输出激光光场的强度分布波动比较大, 严重时甚至超过 30%,而且其强度分布也具有随机性。对一个照明系统,稳定性是基本的要求。分别对单模和多模高斯光束添加一定程度的随机噪声,作为算法的输入,考察输出。基于上面的分析,镜阵列单元数选用 128×128,评价时的采样点数亦取为 128×128, 结果如图8、图 9所示。

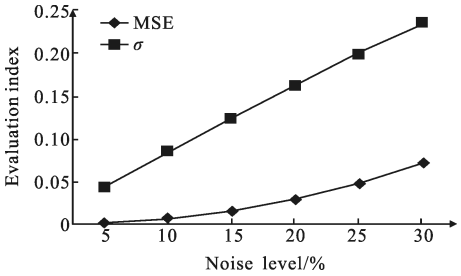

图 8 算法在不同噪声水平时的表现(单模输入)

Fig.8 Algorithm performance vs different noise levels (single-mode input)

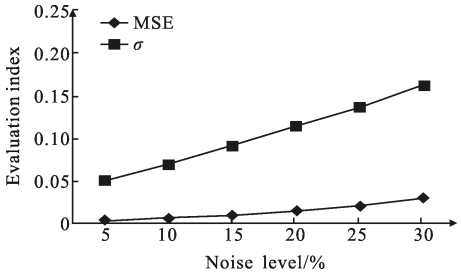

图 9 算法在不同噪声水平时的表现(多模输入)

Fig.9 Algorithm performance vs different noise levels (multimode input)

可以看出: 算法表现随噪声水平的提高而变差,但均方误差和顶部不均匀度并没有出现迅速的增加,而是近似线性的变化,在较高噪声水平时,仍有较好的表现, 表明算法对噪声有一定的抑制能力。另外,相比多模输入, 单模输入的情况下算法表现较差,原因可能是单模情况下光强强度的差异性更大导致噪声的影响增大。对噪声的影响亦可以通过将输入进行均匀化,使高斯输入变为平顶输入来消除。

2.2 光线追迹

在 Lighttools 中建立光路,通过光线追迹来验证算法的有效性。实际应用中,在光路中加入微透镜阵列和反射镜。微透镜阵列的作用是将光束分割为多个子光束,并聚焦在微反射镜阵列平面上,这样可以去除填充率带来的能量损失,并且消除微镜单元偏转造成的子光束光斑的变形,同时减弱系统的衍射效应。而反射镜的作用是减小光路长度, 并且保持光路的同轴性。鉴于仿真条件的限制,微透镜阵列和微反射镜阵列的单元数设为 32×32,单元大小为1 mm×1 mm。入射光束为经过准直、扩束之后的单模高斯光束,期望输出为四极照明分布。最终设计的光路如图 10 所示。分别用无噪声的单模高斯光束和 15%噪声的单模高斯光束作为光源, 追迹 2 000 000 条光线。将追迹后的数据进行评价, 与算法得到的结果进行比较(采样点数选为 512×512),如表 2 所示。

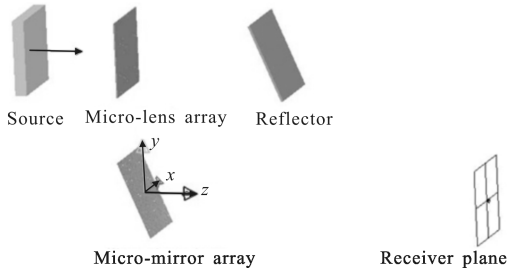

图 10 Lighttools 中设计的实际光路

Fig.10 Practical optical system in Lighttools

表 2 光束整形结果评价比较

Tab.2 Comparison of evaluation of shaping results

	Trace result	Algorithm result	Trace result (15% noise)	Algorithm result (15% noise)
MSE	0.248 9	0.171 6	0.256 3	0.243 4
σ	0.466 3	0.355 9	0.479 9	0.443 7

看以看出:算法结果与追迹的结果比较接近,验证了所述方法的正确性。可以预见,更好的结果可以由增加单元数目来得到。而对结果的差异进行分析,一是由于光线追迹时采用的是对离散点进行插值得到的连续强度分布的光源, 与算法的平面波假设有一定的差别; 二是由于光束偏转之后在接收器平面上会产生略微的变形, 导致光强不是全部打在期望的位置,而是有一定的延展。这两方面的影响都可以

通过增加微镜阵列的单元数目来减弱。

3 结 论

文中提出了一种用于微反射镜进行光束整形的方法,通过算法仿真和光线追迹,验证了所述方法的有效性和通用性。分析了在不同微镜单元数目和不同随机噪声水平下算法的表现, 结果表明随微镜单元数目的增加,整形效果变好,并且算法在噪声情况下仍有较好的表现。所述方法的优点是可以实时控制微镜单元偏转角度,产生期望的照明分布;所有能量均在信号窗之内,有很高的能量利用率;具有较好的顶部不均匀度,并且通过加入振动反射镜,可以进一步提高均匀性。不足之处在于若要达到较好的整形效果,则需要有大量单元数目的微镜阵列,这对器件的生产提出了很高的要求。下一步的工作主要是建立实际光路进行实验验证。

参考文献:

[1] Shealy David L, Hoffnagle John A. Laser beam shaping profiles and propagation [J]. ***Applied Optics***, 2006, 45(21): 5118-5131.

[2] Shealy David L. Historical perspective of laser beam shaping [C]//SPIE, 2002, 4770: 28-47.

[3] Van Wonterghem B M, Salmon J T, Wilcox R W. Beamlet pulse-generation and wavefront-control system [C]//UCRL-LR-105821-95-1: 42-51.

[4] Schott Paul W, Southwell W H. Reflective optics for irradiance redistribution of laser beams: design [J]. ***Applied Optics***, 1981, 20(9): 1606-1610.

[5] Evans Neal C, Shealy David L. Design and optimization of an irradiance profile-shaping system with a genetic algorithm method[J]. ***Applied Optics***, 1998, 37(22): 5216-5221.

[6] Dirk Hauschild, Oliver Homburg, Thomas Mitra, et al. Optimizing laser beam profiles using micro-lens arrays for efficient material processing_applications to solar cells [C]// SPIE, 2009, 7202: 72020U1-72020U15.

[7] Fan Zengming, Li Zhuo, Qian Lixun. Aspherical lens laser beam shaping system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(20): 353-357. (in Chinese)
范增明, 李卓, 钱丽勋. 非球面透镜组激光光束整形系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(20): 353-357.

[8] Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei, et al. Spatial shaping to laser beam with liquid crystal light modulator[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2001, 21(9): 1107-1111. (in Chinese)
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.

[9] Chen Xiaoxi, Huang Ziqiang, Yang Wenjun. Controllable system and design algorithm for laser beam shaping using optical addressing liquid crystal spatial light modulator [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(1): 47-50. (in Chinese)
陈晓西, 黄子强, 杨文君. 光寻址液晶空间光调制器用于激光光束整形的可控系统和设计算法 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 47-50.

[10] Zhao Xiaofeng, Wen Dianzhong. Research and future development on MEMS [J]. ***Journal of Natural Science of Heilongjiang University***, 2002, 19(1): 64-69. (in Chinese)
赵晓峰, 温殿忠. MEMS 研究与发展前景 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2002, 19(1): 64-69.

[11] Hubert Lakner, Peter Durr, Ulrike, et al. Design and fabrication of micromirror arrays for UV-Lithography [C]// SPIE, 2001, 4561: 255-264.