

# 基于遗传算法的空间光调制器鬼成像研究

王 凯 黎 全 林惠祖 孙 帅 段振涛 高少博

国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 提出了基于空间光调制器(SLM)进行相位调制产生赝热光源的方案,并讨论了不同空间光调制器的像素阵列的排布方式对关联成像的影响,着重对空间光调制器的像素阵列排布方式进行了基于遗传算法的优化设计方法的研究,以提高赝热光场性能。结果表明,空间光调制器方案克服了毛玻璃方案的局限性,其产生的赝热光二阶关联性好,满足关联成像的需要,系统成像质量较高,该方案对新型关联成像赝热光源设计具有重要参考意义。

**关键词** 量子光学; 关联成像; 赝热光源; 空间光调制器; 遗传算法

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0227002

## Ghost Imaging with Spatial Light Modulator Based on Genetic Algorithm

Wang Kai Li Quan Lin Huizu Sun Shuai Duan Zhentao Gao Shaobo

College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** A new program based on the spatial light modulator(SLM) to modulate the phase and generate pseudo-thermal light is put forward. The influence of ghost imaging with different spatial light modulator pixel array arrangements is discussed. To improve the performance of pseudo-thermal light field, the design of spatial light modulator pixel array arrangement based on genetic algorithm is studied emphatically. The result shows that the spatial light modulator program overcomes the limitation of the ground glass program and the second-order correlation of the pseudo-thermal light produced by the spatial light modulator program is quite good. The light field generated by the spatial light modulator program can meet the needs of ghost imaging and the quality of the image is quite high. So the spatial light modulator program has an important reference for the new pseudo-thermal light source of ghost imaging.

**Key words** quantum optics; ghost imaging; pseudo-thermal light; spatial light modulator; genetic algorithm

**OCIS codes** 270.5585; 030.6600; 110.2960; 100.2960

## 1 引 言

关联成像是一种新型的成像技术,近几年受到广泛关注。关联成像方案最早是由前苏联学者 Klyshko<sup>[1]</sup>根据纠缠的双光子行为在 1988 年提出。1995 年, Pittman 等<sup>[2]</sup>利用自发参量下转化产生的纠缠双光子实现了纠缠光的关联成像。2002 年, Bennink 等<sup>[3]</sup>实验证明了纠缠不是关联成像的必要条件。2005 年, Valencia 等<sup>[4]</sup>利用赝热光实现了关联成像。在理论方面, 2004 年, 意大利 Gatti 等<sup>[5]</sup>指出关联成像可以由非相干光源获得。同年, Cheng 等<sup>[6]</sup>分析了完全非相干光的关联成像,提出了通过关联成像实现非相干光无透镜傅里叶变换成像。

目前关联成像实验常用赝热光源进行理论和应用研究,最常用的产生赝热光源的方法是使用激光打照旋转的毛玻璃,可以通过控制毛玻璃的转速来控制赝热光相干时间,使得关联成像的单个采样在 1 个相干时间内完成<sup>[7]</sup>即可。但实际应用中使用毛玻璃会带来一些问题: 1) 毛玻璃的发射效率极低,通常功率损耗达

收稿日期: 2015-09-02; 收到修改稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家 863 计划(2014AA813010)

作者简介: 王 凯(1990—),男,硕士研究生,主要从事强度关联成像方面的研究。E-mail:279568121@qq.com

导师简介: 黎 全(1976—),男,博士,副教授,主要从事强度关联成像方面的研究。

E-mail:15063119422@163.com(通信联系人)

到95%以上,限制了关联成像的探测距离;2) 损耗的能量转化为热能,容易破坏毛玻璃,降低了系统的应用价值。随着对赝热光源的深入研究,其他产生赝热光源的方案也被人们发现,如利用空间光调制器(SLM)调制光源产生赝热光场<sup>[8]</sup>、利用数字微镜器件调制光源产生赝热光场<sup>[9-10]</sup>以及其他产生赝热光源的方案<sup>[11]</sup>。

SLM具有调制频率快、光的能量利用率高、易控制等优点。调制频率是衡量SLM性能的重要指标,其中寻址时间是影响调制频率的重要因素,像素点越多,所需寻址时间越长。本文使用含有100像素点的非满阵SLM作为相位调制器件,并使用基于整数编码的遗传算法对SLM的像素阵列的排布方式进行优化,并加以数值模拟验证。该方案相比毛玻璃方案有望大幅提高发射效率,有望在光源系统功率有限的条件下有效地提高关联成像探测距离、提高成像质量。

## 2 理论分析

由文献[12-13]可知,不同光场强度分布会影响系统的成像质量,因此,分析SLM像素点阵列的不同排布方式对光场的影响。首先讨论一维情况,假设每1个子光源都是具有相同波长 $\lambda$ 的高斯光束,根据文献[14]中的激光光场传递模型,可得稀疏阵发射面上第 $m$ 个独立子光源在传播距离为 $z$ 处的光场分布为

$$U_m(x) = \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{(x-s_m)^2}{w^2(z)}\right] \exp\left\{-j\left[k\left[z + \frac{(x-s_m)^2}{2R(z)}\right] - \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中 $w_0$ 为高斯光束腰斑半径, $z$ 为光场传播距离, $z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ 为高斯光束瑞利长度, $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$ 、

$R(z) = z + \frac{z_0^2}{z}$ 为与传播轴交于 $z$ 点的等相位面光斑半径和波面曲率半径, $s_m$ 为光源面上子光源光束的中心坐标。在单次测量中第 $m$ 个独立子光源的预置相位为 $\Phi_m$ ,则 $N_s$ 子光源合束后光场分布函数为

$$U(x) = \sum_{m=1}^{N_s} U_m(x) \exp(j\Phi_m), \quad (2)$$

$N_s$ 个子光源相干合束产生的光场的强度分布为<sup>[15]</sup>

$$I(x) = \sum_m \exp\left[-\frac{2(x-s_m)^2}{w^2(z)}\right] + \sum_m \sum_{m'} \exp\left[-\frac{(x-s_m)^2 + (x-s_{m'})^2}{w^2(z)}\right] \cos\left[k \frac{(x-s_m)^2 + (x-s_{m'})^2}{2R(z)} + \phi_m - \phi_{m'}\right]. \quad (3)$$

将一维情况推广到二维情况,可以得到 $N_s$ 个子光源相干合束产生的光场的强度分布为

$$I(x,y) = \sum_{pq} \exp\left[-\frac{2r_{pq}^2}{w^2(z)}\right] + \sum_{pq} \sum_{uv} \exp\left[-\frac{r_{pq}^2 + r_{uv}^2}{w^2(z)}\right] \cos\left[k \frac{r_{pq}^2 + r_{uv}^2}{2R(z)} + \phi_m - \phi_{m'}\right]. \quad (4)$$

式中 $r_{pq}^2 = (x-x_{pq})^2 + (y-y_{pq})^2$ , $r_{uv}^2 = (x-x_{uv})^2 + (y-y_{uv})^2$ , $pq$ 、 $uv$ 为不同的子光源的坐标序号。

遗传算法具有全局搜索能力好、收敛性好、随机性良好等优点。本文使用基于整数编码的遗传算法<sup>[16]</sup>对SLM的像素阵列排布方式进行优化,来抑制图像周期性、提高图像信噪比。所用的遗传算法的流程图如图1所示,使用依据轮盘赌法的选择操作和自适应的变异、交叉操作,能够一定程度地抑制传统遗传算法的早熟问题。

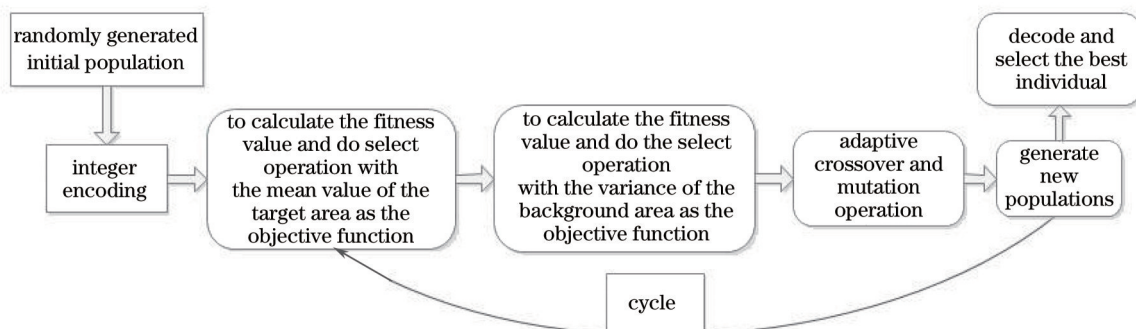


图1 遗传算法流程图

Fig.1 Flowchart of genetic algorithm

### 3 数值模拟分析

图2为数值模拟所用赝热光关联成像的实验装置示意图。波长 $\lambda=1064\text{ nm}$ 的激光通过SLM,从SLM系统出射的赝热光场经分束镜(PBS)分成2束光,折射光经过 $d_1$ 的传输距离后照射到透射分布函数为 $T(x)$ 的物体上,最后输入到桶探测器 $D_1$ ,这一路称为物臂,透射光经过 $d_1=d_2$ 的传输距离后到达具备空间分辨能力的探测器 $D_2$ ,这一路称为参考臂,最后对2束光进行符合测量。

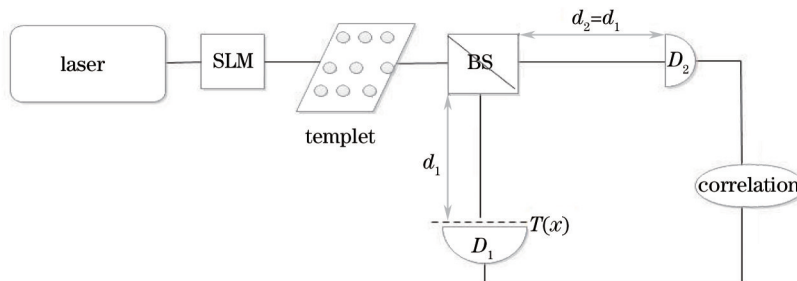


图2 赝热光关联成像实验装置示意图

Fig.2 Experimental setup of pseudo-thermal ghost imaging

数值模拟的图像尺寸为 $L=7.5\text{ mm}$ ,光源尺寸 $D=L/4$ ,传播距离 $d_1=d_2=0.5\text{ m}$ ,所用成像物体是透射函数为二极型的双缝,双缝尺寸为 $(5 \times 20) \times L/100$ ,缝边缘间距为 $5 \times L/100$ 。

图3是光场中心点的二阶关联函数值 $g^{(2)}$ 的分布图,其中图3(a)、(b)分别为毛玻璃方案与本文方案产生的赝热光场的二阶关联函数值分布图。由图3可知,毛玻璃方案和本文方案产生的赝热光场的二阶关联最大值分别为1.944和1.98,证明了本文方案产生的赝热光源满足鬼成像(GI)需求。

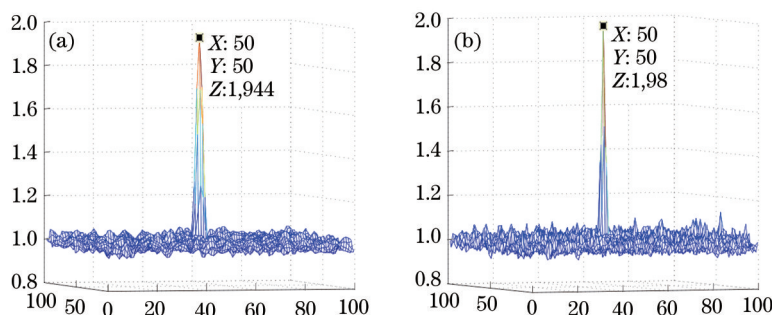


图3 光场中心点二阶关联函数值分布图

Fig.3 Second-order correlation value of the central point

图4是本文方案的不同像素阵列排布方式的GI数值模拟结果图。图4(a)、(c)分别是未限定像素阵列分布区域的随机排布图和其GI结果图,图像的信噪比为2.0051。图4(b)、(d)是像素阵列的均匀排布图和其GI结果图,图像信噪比为1.2494。由图4可知,图4(a)、(c)清晰度低,信噪比较差,且有较为明显的周期性结构,成像结果不理想。结合光源、物体的尺寸,为了避免出现物体跨周期的现象,将像阵列分布区域限定在视场中心的 $(50 \times 50) \times L/100$ 区域内。图4(b)、(d)是限定区域后的均匀排布和其GI图,可以看出,图像信噪比较低、周期性严重,无法明显区分旁瓣和主瓣,成像结果较差,需要进行优化。

图5是使用改进的遗传算法优化所得结果图,图5(a)~(c)依次是迭代次数分别为1、10、30时得到的最优像素阵列的排布方式图,图5(d)~(f)是最优像素阵列的关联成像结果图,图像信噪比依次为3.7554、6.8802、7.1095。从图5的结果可以看出,随着遗传算法迭代次数的增加,所得图像的周期性得到了抑制,信噪比得到了提高,证明了本文算法是有效的。

图6是使用不同方案产生赝热光源的关联成像结果对比图,图6(a)是使用毛玻璃方案产生赝热光源的关联成像结果图,图6(b)是使用SLM方案产生赝热光源的关联成像结果图。图6(a)的信噪比为7.9465,图6(b)的信噪比为7.2839,略小于图6(a)。可以看到图6(a)的物体有较为明显的失真,图6(b)仍有轻微的周期性结构,本底较之毛玻璃方案也相对较大,但物体的失真度相对较小,所以SLM方案仍具有重要参考价值。

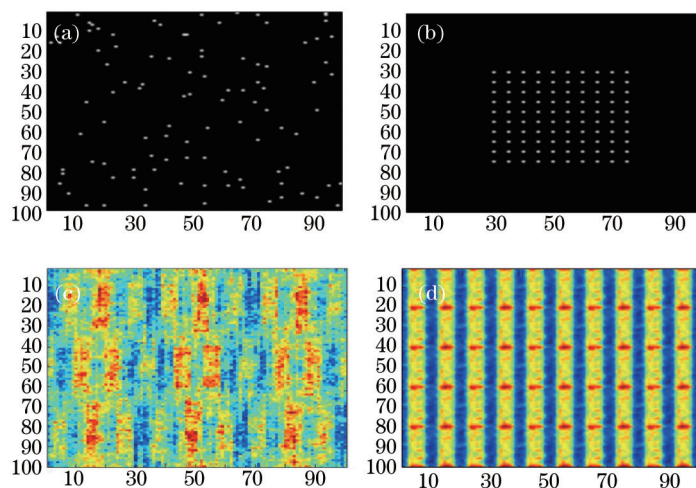


图 4 不同的像素阵列排布方式的 SLM 关联成像模拟结果。(a) 随机排布图; (b) 均匀排布图;  
(c) 随机排布 GI 结果图; (d) 均匀排布 GI 结果图

Fig.4 Simulating results of different pixel array arrangements of the SLM correlation imaging. (a) Random configuration diagram;  
(b) uniform configuration diagram; (c) GI diagram of random configuration; (d) GI diagram of uniform configuration

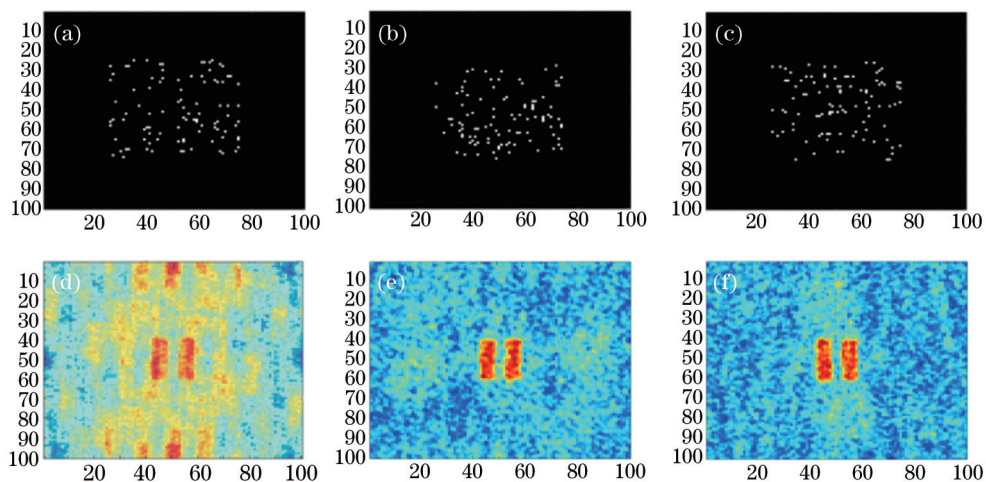


图 5 遗传算法对 SLM 像素阵列排布方式优化结果。(a) 迭代 1 次; (b) 迭代 10 次; (c) 迭代 30 次; (d) 迭代 1 次 GI 结果图;  
(e) 迭代 10 次 GI 结果图; (f) 迭代 30 次 GI 结果图

Fig.5 Optimization results of the SLM pixel array arrangement with genetic algorithm. (a) Iteration 1 time; (b) iteration 10 times;  
(c) iteration 30 times; (d) GI diagram of iteration 1 time; (e) GI diagram of iteration 10 times; (f) GI diagram of iteration 30 times

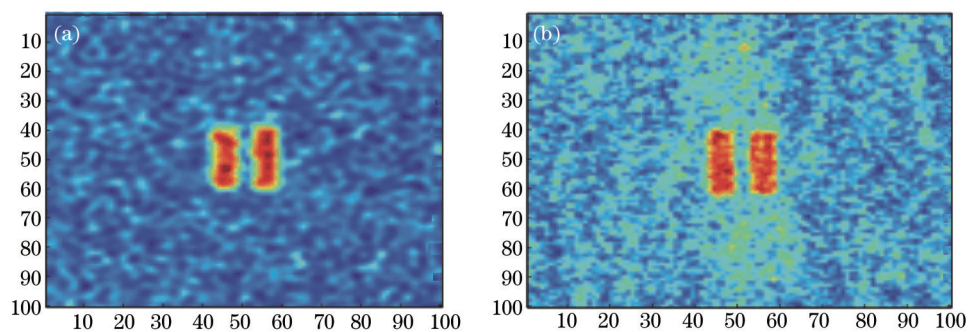


图 6 由不同方案产生的关联成像结果对比图。(a) 毛玻璃方案; (b) SLM 方案

Fig.6 Comparison of the correlation imaging results generated by different programs. (a) Frosted glass scheme; (b) SLM scheme

## 4 结 论

从理论和数值模拟两方面论证了利用 SLM 子光源合束产生赝热光源进行关联成像的可行性,分析了不

同的像素阵列排布方式对成像质量的影响,并使用基于整数编码的遗传算法对像素阵列的排布方式进行了优化。数值模拟结果表明,所提出的SLM方案产生的赝热光场满足关联成像的成像需求,也证明了所用的遗传算法是有效的,可以得到较高质量的图像。此外,还对毛玻璃方案和SLM方案进行了对比性研究,证明了SLM方案具有重要参考价值。

本文方案为下一步进行赝热光关联成像实验中新型光源系统的设计提供了理论参考,而且随着人们对SLM的开发、研究,多系列、多型号的SLM已经面世。本文方案在实验环境下实现的可能性较大,如控制振幅、相位混合型SLM的振幅可以实现本文的特殊优化阵列,控制其相位可以实现对激光的相位调制,因此,该方案具有重要的理论和应用参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 D N Klyshko. Photon and Nonlinear Optics[M]. New York: Gordon and Breach Science, 1988.
- 2 T B Pittman, Y H Shih, D V Strekalov, *et al.*. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Phys Rev A, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- 3 R S Bennink, S J Benley, R W Boyd. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(11): 113601.
- 4 A Valencia, G Scarcelli, M D Angelo, *et al.*. Two-photon imaging with thermal light[J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(6): 063601.
- 5 A Gatti, E Brambilla, M Bache, *et al.*. Correlated imaging, quantum and classical[J]. Phys Rev A, 2004, 70(1): 013802.
- 6 J Cheng, S S Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(9): 093903.
- 7 Chen Mingliang, Li Enrong, Wang Hui, *et al.*. Ghost Imaging based on sparse array pseudothermal light system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0503001.  
陈明亮, 李恩荣, 王 慧, 等. 基于稀疏阵赝热光系统的强度关联成像研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0503001.
- 8 Fan Xiaolei, Zhang Erfeng, Xu Yaokun, *et al.*. Comparison of pseudo-thermal light source based on different method of modulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress. 2014, 51(4): 041101.  
范晓磊, 张二峰, 徐耀坤, 等. 基于不同调制方法产生赝热光源的性能比较[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041101.
- 9 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0711002.  
陆明海, 沈 夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0711002.
- 10 Tang Wenzhe, Cao Zhengwen, Shi Jianhong, *et al.*. Back-side correlation imaging with digital micro mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0511004.  
唐文哲, 曹正文, 石剑虹, 等. 基于数字微镜器件的“后视”关联成像[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0511004.
- 11 Wu Nan, Gong Wenlin, Han Shensheng. Experimental research on pseudo-thermal light ghost imaging with random phase plate based on variable motion trail[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0711005.  
吴 楠, 龚文林, 韩申生. 基于运动轨迹可调式随机相位板的赝热光鬼成像实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0711005.
- 12 K W Chan, M N O Sullivan, R W Boyd. Optimization of thermal ghost imaging: high-order correlation vs. background subtraction[J]. Opt Express, 2010, 18(6): 5562-5573.
- 13 P Zerom, Z Shi, M N O Sullivan, *et al.*. Thermal ghost imaging with averaged speckle patterns[J]. Phys Rev A, 2012, 86(6): 063817.
- 14 Chen Yuqing, Wang Jinghuan. Laser Principle[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992: 180-186.  
陈钰清, 王静环. 激光原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992: 180-186.
- 15 Dong Hongcheng, Tao Chunxian, Zhao Yuanan, *et al.*. Combination characteristics analysis of Gaussian beams[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 171-176.  
董洪成, 陶春先, 赵元安, 等. 高斯光束的合成特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 171-176.
- 16 Wang Lingling, Fang Dagang. Genetic algorithm for the synthesis of thinned array[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 2135-2138.  
王玲玲, 方大纲. 运用遗传算法综合稀疏阵列[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 2135-2138.

栏目编辑: 苏 岑