

空间光调制器用于多光束二维偏转的算法研究

杨飞跃, 黄子强, 彭逸葳

引用本文:

杨飞跃, 黄子强, 彭逸葳. 空间光调制器用于多光束二维偏转的算法研究[J]. 液晶与显示, 2020, 35(6): 537–546.

YANG Fei-yue, HUANG Zi-qiang, PENG Yi-wei. Algorithm research of spatial light modulator for multi-beam two-dimensional deflection[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(6): 537–546.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0537>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于液晶相控阵的光束偏转控制方法研究

Beam deflection control method based on liquid crystal phased array

液晶与显示. 2018, 33(10): 857–863 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183310.0857>

基于液晶空间光调制器的变倍率激光扩束技术研究

Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator

液晶与显示. 2018, 33(9): 764–771 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183309.0764>

用于智能显示的相位型计算全息图的设计

Design of phase type computer-generated-hologram for intelligent display

液晶与显示. 2018, 33(3): 245–253 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183303.0245>

温度对液晶波前校正器响应速度及LUT的影响研究

Effect of temperature on LUT and response speed of liquid crystal wavefront corrector

液晶与显示. 2018, 33(11): 911–917 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183311.0911>

基于液晶空间光调制器的相位差波前探测技术定量研究

Quantitative analysis on phase diversity technique based on liquid crystal spatial light modulator

液晶与显示. 2017, 32(3): 234–239 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173203.0234>

文章编号:1007-2780(2020)06-0537-10

空间光调制器用于多光束二维偏转的算法研究

杨飞跃, 黄子强*, 彭逸葳

(电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 611731)

摘要:提出一种采用光寻址液晶空间光调制器(LCSLM)作为二维激光分束和多光束偏转的无机械光束扫描系统, 可对平行入射的激光光束分束、偏转, 且只用 1 片 LCSLM 就能够对每一束光的方向和强度分别控制。采用 G-S 相位迭代算法来实现多光束可编程控制的相位模版的生成过程与仿真。先运用子孔径法在相位模版上生成所需要的相位分布作为初始值, 然后采用 GS 相位迭代过程优化相位分布, 使各子孔径中的相位分布渐次扩展到整个相位模版, 其间还提出了改进的 GS 相位迭代算法, 最后对计算所获相位分布进行反演模拟。结果表明: 所提出的多光束二维偏转的算法能够满足应用需要, 且改进的 GS 相位迭代算法能提高多光束偏转的衍射效率, 优化光束光斑强度, 降低光束的均方根误差。

关键词:GS 相位迭代算法; 液晶空间光调制器; 多光束的偏转; 相位调制

中图分类号:O439; O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20203506.0537

Algorithm research of spatial light modulator for multi-beam two-dimensional deflection

YANG Fei-yue, HUANG Zi-qiang*, PENG Yi-wei

(University of Electronic Science and Technology of China,
Research Institute of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

Abstract: A non mechanical beam steering system with light addressed liquid crystal spatial light modulator(LCSLM) is proposed and designed to resolve the problem of two-dimensional laser beam splitting and muti-beam deflection, which can control the direction and intensity of each beam separately with only one LCSLM. The generation process and simulation of the phase template of multi-beam programmable control is realized by G-S phase iterative algorithm. Firstly, the sub-aperture method is used to generate the required phase distribution as the initial value. Then, the G-S phase iterative algorithm is used to optimize the phase distribution, so that the phase distribution in each sub-aperture is gradually extended to the entire phase template. An improved G-S phase iterative algorithm is proposed. Finally, the inverse phase simulation of the calculated phase distribution is performed. The simulation results show that the proposed multi-beam two-dimensional deflection algorithm can meet the application needs, and the diffraction efficiency of multiple beams is enhanced and the root mean square error of the beam is reduced.

Key words: G-S phase iterative algorithm; liquid crystal spatial light modulator; multiple beams steering; phase modulation

收稿日期:2019-11-11; 修订日期:2020-02-11.

* 通信联系人, E-mail: zqhuang@188.com

1 引言

近年来,随着雷达目标检测与跟踪技术、空间光通信技术、航天技术等领域的快速发展,对多光束偏转技术方面的要求逐渐增高^[1-2]。传统的激光雷达采用万向节等机械式扫描器件,这种器件结构繁琐,体积和重量都很大,响应时间长,使系统的性能受到了限制。近年发展的液晶光栅本质上是以大量的一维排列的光学移相器分别对光的相位进行调制的非机械式调制器件^[3]。这种器件的主要优点是能够对激光实现可编程的快速、高精度的光束偏转,液晶光学移相器的重量轻、功耗功耗小,是新型的分束、偏转控制器件。然而,目前对于液晶光束控制的研究仅局限于一维标量衍射理论的计算,这种计算只考虑了一维衍射的问题,单个光学移相器无法实现光束的二维偏转。为了实现二维偏转,必须用两个一维的光学移相器对 x 、 y 方向分别作相位分布的计算、控制^[4-5]。即使如此,多光束的分束偏转仍然会有镜像光束而无法应用于激光通信上。

近年来基于液晶有源矩阵的空间光调制器(AMLC-SLM)的应用,使光束的整形获得了进展^[6],通过将平行光束整形为分布在多个不同角度的光斑,为光束的直接二维偏转应用提供了可能。然而,有源矩阵中的单元数量有限,导致空间光调制器的有效面积与单元尺寸的要求相矛盾。此外,薄膜晶体管的尺寸较大,从而相位分布的周期大,也造成了光束偏转角度小和相位单元的开口率低下,像素的矩阵结构还会造成严重的黑栅效应。此外,AMLC-SLM 在较高功率激光入射时,像元遮挡层、像元之间的黑色矩阵的光吸收热效应还会使 AMLC-SLM 中的薄膜晶体管温度升高,造成相位分布的不可忽略的偏移,严重时还可能损毁 SLM。

光寻址空间光调制器(Optical Addressed SLM, OASLM)的相位分布是二维分布的,与写入光的强度分布相关^[7],所以只需单片器件就能够实现光束的分束、偏转。由于相位分布没有像素矩阵的限制,所以没有黑栅效应。OASLM 的分辨率只受到液晶层厚度的限制,理论上能实现较大的偏转角度。OASLM 有效孔径只与基片材料的尺寸有关,与 AMLC-SLM 相比有很多优点,

值得认真研究。

本文探讨使用紫外光寻址的 LCSLM 对垂直入射的激光光束实现分束、二维偏转,研究 LCSLM 的相位分布对分束比、偏转角度与衍射效率的关系。

作为本文的研究基础,参考了一维液晶相控阵的部分孔径法^[8]在单方向上的光束分束、偏转的方法,将其扩展至二维作为计算 LCSLM 诸单元相位分布的起始值。克服了光束发散角与部分孔径的大小成反比、各波束无法利用全部阵元的相位特性而使有效口径降低、衍射效率较低的缺点。

本文报告了改进的 G-S (Gerchberg & Saxton)优化迭代算法^[9],按照光束整形的思路,以在像面干涉而生成多光束束斑为目标函数,确定焦平面上透明模版的相位分布的分析过程和模拟结果。该方案的特点在于通过确定 OASLM 上 DOE(Diffraction Optical Element)面适当的二维相位分布,以高斯平行光束通过 DOE 以后重构波阵面,生成多个强度受控、角度受控的束斑,以此实现平行入射的光束在二维任意角度的分束和偏转。

模拟结果表明,改进的 G-S 算法所获 DOE 相位分布,经过 OASLM 重构波阵面,实现了光束向任意角度偏转的可编程控制,且光束的衍射效率对比部分孔径法和朴素 G-S 算法有明显提高,生成光束相比目标光束其均方根误差也有明显改善。

2 激光光束偏转的二维标量仿真

2.1 光寻址液晶空间光调制的系统结构

反射式 OASLM 器件^[10]结构如图 1 所示,其主要功能材料包括对蓝紫光敏感的材料硅酸铋($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{12}$, BSO)、氧化铟锡(ITO)透明电极、液晶层、介质反射镜。

其中 BSO 单晶属于立方晶系,是一种优良的光功能材料,具有良好的光电导效应,同时分子之间具有非常高的对称性。BSO 材料的能带结构图如图 2 所示,由图可以得出 BSO 材料的禁带宽度为 3.25 eV,由于 BSO 材料对蓝紫外光的激励下电阻率会急剧减小,因此当写入光的波长 $\lambda \leq 380 \text{ nm}$ 时,根据能带理论,使得存储在价带中的

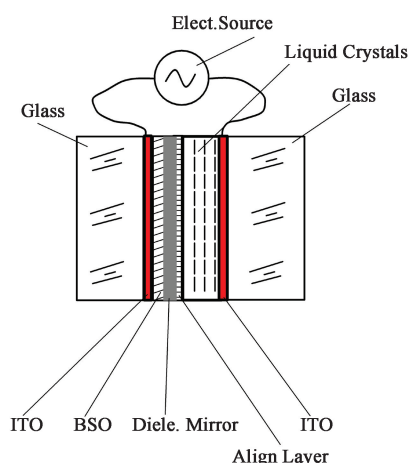


图1 反射式 OASLM 的结构

Fig.1 Structure of reflective OASLM

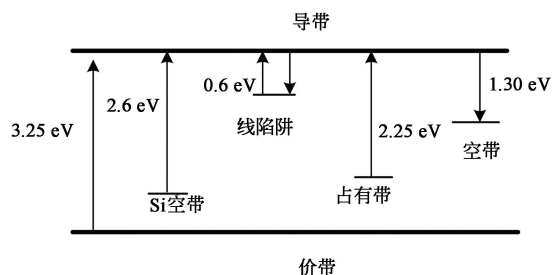


图2 常温下 BSO 晶体的能带图

Fig.2 Energy band diagram for BSO

电子将会被激励到导带中,形成自由电子,此时在外电场的作用下,自由电子将会产生定向迁移形成电流。

图3展示了 BSO 晶体在不同波长激励下的响应,取入射光分别为绿光、蓝光和紫光,对应的波长分别为 530, 475, 384 nm。由图可以得出不同的光波长激励下的 BSO 材料的光电导率不同,当由波长为 384 nm 的紫光激励时产生的光电导率最高,由波长为 530 nm 的绿光激励时最低,由此可以得出,写入光的光波长越小,光电导率越明显。

综上所述,本文采用紫外光作为寻址光照射到反射式 OASLM 上,BSO 晶体在紫外光的激励下,随着光功率的增大电阻率成倍降低^[11],所以紫外光的强度分布在 BSO 上转换成电阻率分布,与液晶层分压后呈电压分布,最终引起液晶层与紫外光强度相对应的折射率分布,从而对介质反

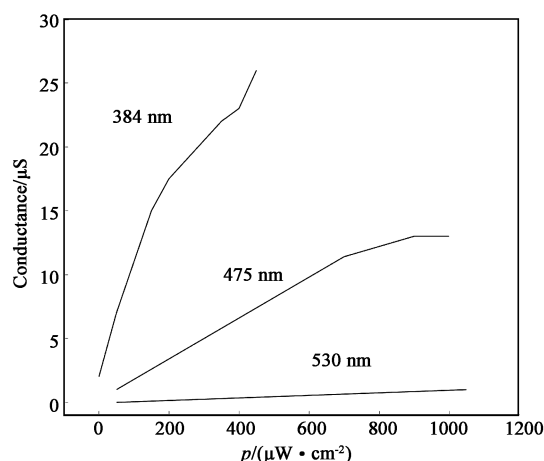


图3 BSO 晶体在不同波长激励下的响应

Fig. 3 Response of BSO with different wavelengths illumination

射镜另一侧入射的读出光(红外光)的相位进行调制。

在反射式 OASLM 中,功率极强的读出红外光与紫外光被介质镜隔离,可防止红外光通过倍频而影响到紫外光在 BSO 上的寻址,终使液晶层的折射率分布不至于受到读出光的干扰。

2.2 二维标量计算方法

为方便计算,将 OASLM 离散化为 $N \times N$ 个像素单元组成, N 的大小与液晶层的厚度、BSO 的厚度有关。任一像素对应区域的 BSO 以紫外光照射可以改变其电阻率,通过分压后改变像素液晶的偏转角度而调制其相位延迟量。

设单个像素尺寸为 $w \times w$,则透过率函数可以表示为^[12]:

$$t_{\text{pixel}}(x, y) = e^{i\varphi(x, y)} \text{rect}\left(\frac{x}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{w}\right), \quad (1)$$

其中: m 为像素所在位置的行坐标, $x = m \times w$; n 为像素所在位置的纵坐标, $y = n \times w$ 。从而可得出像素单元所组成的纯相位液晶空间光调制的透过率函数。

$$t(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{Nw}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{Nw}\right) t(x, y) \text{comb}\left(\frac{x}{w}, \frac{y}{w}\right) * \left[\text{rect}\left(\frac{x}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{w}\right) \right], \quad (2)$$

其中: $\text{rect}\left(\frac{x}{Nw}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{Nw}\right)$ 为空间光调制器的口径函数,其傅里叶变换可表示为:

$$F\left[\text{rect}\left(\frac{x}{Nw}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{Nw}\right)\right] = \text{sinc}(Nw\xi)\text{sinc}(Nw\eta), \quad (3)$$

其中: ξ 和 η 为空间频率坐标 $\xi = \frac{x}{\lambda f}$, $\eta = \frac{y}{\lambda f}$, f 为入射面与远场之间的距离。方程中 $\text{rect}\left(\frac{x}{w}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{w}\right)$ 为像素函数, 其傅里叶变换可表示为:

$$F\left[\text{rect}\left(\frac{x}{w}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{w}\right)\right] = \text{sinc}(w\xi)\text{sinc}(w\eta), \quad (4)$$

方程(2)中 $t(x, y)\text{comb}\left(\frac{x}{w}, \frac{y}{w}\right)$ 为对相位型空间光调制器透过率函数 $t(x, y)$ 进行采样的结果。其数字化结果可以作为驱动液晶空间光调制器的数据图, 数字化的透过率函数可以表示为^[13]:

$t_D(m, n) = e^{i\varphi(m, n)}$, 设入射光束的复振幅分布为 $G_{\text{in}}(x, y)$, 出射光束的光场复振幅分布为 $G_{\text{out}}(x_0, y_0)$, 公式如下所示:

$$G_{\text{out}}(x_0, y_0) = H(x, y, x_0, y_0) \cdot t(x, y) \cdot G_{\text{in}}(x, y), \quad (5)$$

式中: $H(x, y, \xi, \eta)$ 为空间传递函数, 在夫琅禾费衍射近似条件下, 光束在远场的复振幅分布公式如式(6)所示:

$$G_t(\xi, \eta) = \frac{\exp(ikf)\exp\left[\frac{ik}{2f}(\xi^2 + \eta^2)\right]}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} G_{\text{out}}(x_0, y_0) \exp\left[\frac{ik}{2f}(x_0\xi + y_0\eta)\right] dx_0 dy_0, \quad (6)$$

即

$$G_t(\xi, \eta) = \frac{\exp(ikf)\exp\left[\frac{ik}{2f}(\xi^2 + \eta^2)\right]}{i\lambda f} \times F\{G_{\text{out}}(x_0, y_0)\}, \quad (7)$$

显然夫琅禾费衍射就是入射光场的傅里叶变换。 $G_t(x_i, y_i)$ 为光束的远场分布, $F\{G_{\text{out}}(x_0, y_0)\}$ 为 $G_{\text{out}}(x_0, y_0)$ 的傅里叶变换, f 为空间光调制器距离远场的距离。由式(7)可知, 光束在远场的分布取决于光调制器上各个点的相位值, 改变各个点的相位, 远场的衍射图将会被改变, 因此可以通过改变相位值来逼近目标光束, 称此过程为对目标光束的相位恢复过程。

3 多光束形成方法

3.1 子孔径法原理

当前使用液晶相控阵实现多光束的偏转常用的方法有部分孔径法、子孔径交叉法、迭代傅里叶变换法^[14], 部分孔径法的原理是将液晶相控阵根据所需光束的多少进行划分, 每个孔径所需的权重不同, 得到的光束的偏转效率也就有一定的偏差。

本文中将使用 LCSLM 通过子孔径法来得到光束的二维偏转。在微波天线领域和相控阵雷达领域, 子孔径的概念已得到了广泛应用, 因此使用同样的原理, 可以在液晶空间光调制器中引入子孔径来形成光学多波束, 其原理是将液晶空间光调制器分为 N 份, 在每部分内实现对单个光束的单独管理及控制。理论上说, N 个子孔径可以形成 N 个独立的转向光束, 每个子孔径的大小不一定需要相等, 可以根据特定的需求进行随意分配, 这里的 LCSLM 加载的是纯相位函数。显而易见, 这种方法没有迭代过程, 当多光束的数目较大时只有 $1/N$ 个像素来进行干涉实现某一个光束的再现, 而其他部分的相位值对该光束没有贡献, 因此这种方法的光能利用率低。

子孔径分布的原理图如图 4 所示, 如图将空间光调制器分为 n 个部分, 每个子孔径都有各自的相位差, 可以分别表示为 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3 \dots \Delta\varphi_n$, 每个子孔径也拥有不同的权重向量, 权重向量不同, 子孔径的大小也就互不相同。

设第 n 个子孔径的权重系数为 a_n , a_n 为大于 0 小于 1 的整数, L 为液晶空间相控阵的大小,

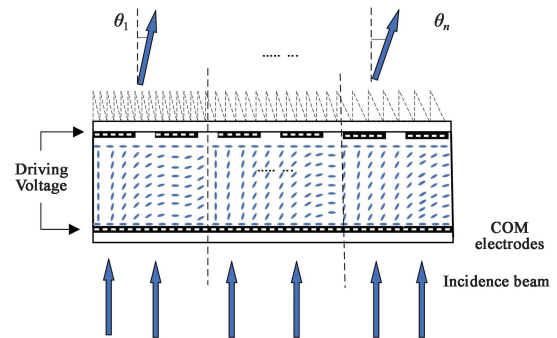


图 4 子孔径法的示意图

Fig.4 Schematic of the subaperture method

L_n 为单个子孔径的长度。

各个子孔径区域中每个电极的相移量可以表示为 $\varphi_{1i}, \varphi_{2i}, \varphi_{3i} \cdots \varphi_{ni}$, 根据上文可以得到相移量:

$$\varphi_i \begin{cases} \varphi_{1i} = \text{rem}((i-1)k_0 d \cdot \sin\theta_1, 2\pi) \\ \varphi_{2i} = \text{rem}((i-1)k_0 d \cdot \sin\theta_2, 2\pi) \\ \varphi_{3i} = \text{rem}((i-1)k_0 d \cdot \sin\theta_3, 2\pi) \\ \dots \\ \varphi_{ni} = \text{rem}((i-1)k_0 d \cdot \sin\theta_n, 2\pi) \end{cases} \quad (8)$$

当高斯光束入射到 LCSLM 器件后, 远场处的光束相干重叠区域可以表示成为:

$$E_{\text{far}} = E_{1\text{far}} + E_{2\text{far}} + \dots + E_{n\text{far}} \quad (9)$$

式中: $E_{1\text{far}}, E_{2\text{far}} \dots E_{n\text{far}}$ 分别是由 n 个子孔径区域的相位调制所得。当要产生 n 个波束时, 可以将 LCSLM 划分成 n 个区域, 一维方向的相位分布如图 4 所示。

3.2 G-S 相位迭代算法原理

国内外众多研究者开发了许多方法来解决相位恢复问题, 其中 Gerchberg-Saxton (G-S) 相位迭代算法是最受欢迎的算法。G-S 算法是由 Gerchberg 和 Saxton 在 1972 年提出的^[15], 这种算法的基本概念是通过重复应用傅里叶变换和傅里叶逆变换对来找到空间域和频域中幅度约束相匹配的最优解。该算法已应用于不同的图像处理中^[16-17], 通过实验和理论计算充分证明了算法的收敛性和有效性。因此本文主要是运用 G-S 算法与光寻址液晶空间光调制器相结合, 设计出一种迭代傅里叶变换多波束形成算法。

光从入射面传播到出射面这个过程是一个傅里叶变换过程, 假设入射面的出射光振幅为 E_0 , 出射面的复振幅为 E_1 , 公式如下:

$$E_0(x, y) = A_0(x, y) \exp[j\varphi_0(x, y)] \quad (10)$$

$$E_1(u, v) = A_1(u, v) \exp[j\varphi_1(u, v)] \quad (11)$$

入射面与出射面的光场复振幅分布为一对傅里叶变换对, 表示如下:

$$\begin{cases} E_1(u, v) = F[E_0(x, y)] \\ E_0(x, y) = F^{-1}[E_1(u, v)] \end{cases} \quad (12)$$

G-S 迭代算法的计算步骤如下, 首先, 确定初始相位, 通过给目标光场振幅叠加一个随机相位, 将所得的复振幅分布进行逆傅里叶变换, 提取相位值

作为第一次迭代的相位值, 这样可以缩短算法的迭代过程。将初始相位与入射光束的振幅 $A_0(x, y)$ 相结合形成入射光场, 其次给定远场目标光束的振幅分布 $A_1(u, v)$, $A_0(x, y)$ 和 $A_1(u, v)$ 即为算法在空间域和频域的幅度约束值。迭代开始将初始相位带入 GS 算法中进行傅里叶变换, 对所得的频域空间的图像进行判断, 看是否与期望的光强幅度 $A_1(u, v)$ 逼近, 如果满足预设条件则退出程序, 否则用 $A_1(u, v)$ 代替傅里叶变化的幅值, 相位保持不变进行反傅里叶变换得到新的物空间像, 保持相位不变用 $A_0(x, y)$ 代替幅值进行傅里叶变换, 如此循环迭代直到得到合适的相位解。迭代过程的流程图如图 5 所示。

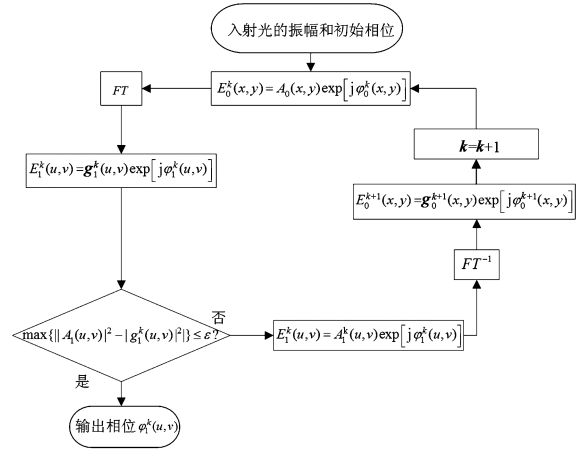


图 5 G-S 迭代傅里叶变换流程图

Fig.5 Flowchart of G-S iterative Fourier transform

使用评价参数^[18] η 和 RMS 作为偏转效果的评价函数, 衍射效率 η 定义如公式(13)所示, 用来评价光束经过衍射元件后的能量损耗情况, 其中 I_i 为目标光束的光斑强度, I_0 为观察平面出射波束的强度总和。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_0} \times 100\% \quad (13)$$

均方根误差 RMS 定义如式(14)所示, 用来评价远场光斑与目标光斑的符合程度。

$$\text{RMS} = \frac{\sqrt{\sum_x \sum_y (|g(u, v)| - |A_1(u, v)|)^2}}{\sqrt{\sum_x \sum_y A_1(u, v)^2}} \quad (14)$$

式中: $g(u, v)$ 为观察平面波束的幅度值, $A_1(u, v)$ 为期望的目标光束的幅度值。

4 仿真结果分析

4.1 子孔径法仿真分析

光寻址液晶空间光调制器的写入光为紫外光,读出光为红外光,我们设入射光束为波长为 1 054 nm 的高斯光束,有效光斑半径为 3 mm,液晶相控阵的尺寸为 5 mm×5 mm,利用第 3 节的理论仿真子孔径法的多波束的形成。

设目标光束的偏转角度为 $\theta=(0,0.6^\circ)$ 和 $\theta=(-0.6^\circ,0)$ 子孔径的权重分别为 0.5 和 0.5,将子孔径进行均匀划分。仿真结果如图 6 所示。

由于部分孔径法的孔径大小为 D/N ,在上述仿真中孔径大小为 $D/2$,因此导致了部分孔径法的分辨率较低。当 N 增大时,部分孔径法所得的光束的分辨率将持续降低,影响光束的衍射效率。

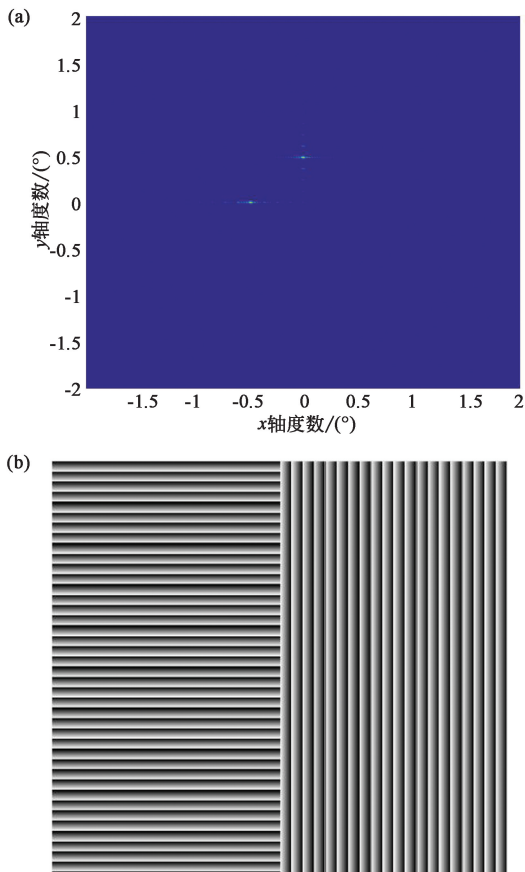


图 6 (a)子孔径法的远场衍射图;(b)输入面的相位灰度图。

Fig.6 (a) Far field distribution of the beam on sub-aperture method; (b) Phase diagram of input surface.

如图 6 所示,6(a)为观察平面的双波束的衍射图形,6(b)为输入面的相位灰度图,由图可以看出两波束的相位在入射面上平均分布,所占的权重值都为 0.5。

4.2 G-S 迭代傅里叶算法仿真分析

设目标光束为双光束,波束 1 和波束 2 在二维平面的偏转角度 (θ_x,θ_y) 分别为 $(-0.48^\circ,0.60^\circ)$ 和 $(0.48^\circ,-0.60^\circ)$ 时,不同采样数下光束的衍射效率不同,如表 1 所示。表 1 列出了采样数不同时光束的衍射效率的变化,可以看出采样数越大,光束的衍射效率越高。采样数为 256 时,光束的衍射效率为 81.86%;采样数为 512 时,光束衍射效率达到 91.94%;采样数为 1 024 时,光束的衍射效率为 92.10%。采样数为 1 024 时,光束的旁瓣比采样数 512 时有轻微的减小,但是采样数取 1 024 时算法的耗时较长,所以这里不予采用。

在 G-S 算法中,不同的迭代次数下,光束的衍射效率也有所不同。设波束 1 和波束 2 在二维平面的偏转角度取 $(0.66^\circ,-0.78^\circ)$ 和 $(-0.66^\circ,0.78^\circ)$,仿真的最大迭代次数设置为 100 次,迭代过程中的远场幅度在 $x-z$ 面的截面图如图 7 所示。

表 1 不同像素数下的衍射效率

Tab.1 Diffractive efficiency at different pixel numbers

采样数	衍射效率/%
256	81.86
512	91.94
1 024	92.10

图 7 为 G-S 相位迭代算法所求的的双波束远场分布图。图 7(a)~(d)分别表示在迭代过程中不同时刻所产生的波束的远场分布。在迭代初期,光束的旁瓣较高且杂散光较多,光束的衍射效率为 0.831 1。随着迭代次数的增大,光束的衍射效率逐渐升高。当迭代次数为 100 时,光束的衍射效率达到 0.874 9。因此在仿真中我们取算法的迭代次数为 100,采样数为 512,对光束不同偏转角度下远场光强分布进行仿真分析,结果如图 8 所示。

在图 8(a)中远场光束的偏转角度 (θ_x,θ_y) 取 $(0.48^\circ,0.60^\circ)$ 和 $(-0.48^\circ,-0.6^\circ)$,通过仿真可以得到光束的衍射效率为 0.909 9,光束的均方根误

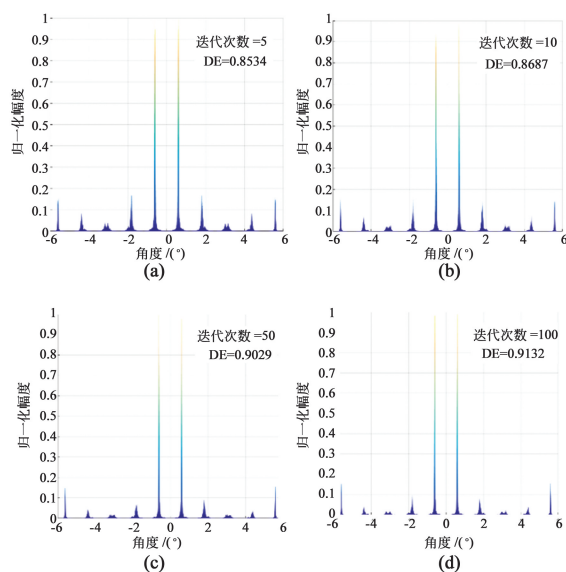


图7 G-S相位迭代仿真结果。(a)迭代次数为5;(b)迭代次数为10;(c)迭代次数为50;(d)迭代次数为100。

Fig.7 Simulation results of the G-S iterative Fourier transform beam-forming method. (a) Formed amplitude pattern with iterations of 5; (b) Formed amplitude pattern with iterations of 10; (c) Formed amplitude pattern with iterations of 50; (d) Formed amplitude pattern with iterations of 100.

差为0.3231。远场光束的衍射光强几乎分布主瓣位置,次极大旁瓣归一化后分别分布在偏转角度为 $(-1.37^\circ, 2.38^\circ)$ 、 $(-0.603^\circ, 5.69^\circ)$ 、 $(0.47^\circ, -5.60^\circ)$ 和 $(-5.69^\circ, 0.59^\circ)$ 等位置附近,其归一化强度在0.1~0.15范围内,主瓣和旁瓣比为20:3。(b)图中远场光束的偏转角度 (θ_x, θ_y) 取 $(1.2^\circ, 1.40^\circ)$ 和 $(-1.2^\circ, -1.40^\circ)$,可以得到光束的衍射效率为0.667,光束的均方根误差为0.53。远场光束的衍射光强一部分分布主瓣位置,其余能量分布在4束旁瓣位置,次极大旁瓣的位置分别为 $(-4.99^\circ, 1.92^\circ)$ 、 $(1.20^\circ, -4.26^\circ)$ 、 $(-1.208^\circ, 4.267^\circ)$ 和 $(1.20^\circ, 4.26^\circ)$,最大旁瓣的归一化强度为0.48,主瓣和旁瓣强度比近似为2:1。图9为G-S算法生成双光束的相位图,各个像素点的相位值在 $[0, 2\pi]$ 之间变化。由上述分析可以得到远场光束在不同的偏转角度下衍射效率不同,偏转角度越大,远场光束的衍射效率越小,均方根误差越大。

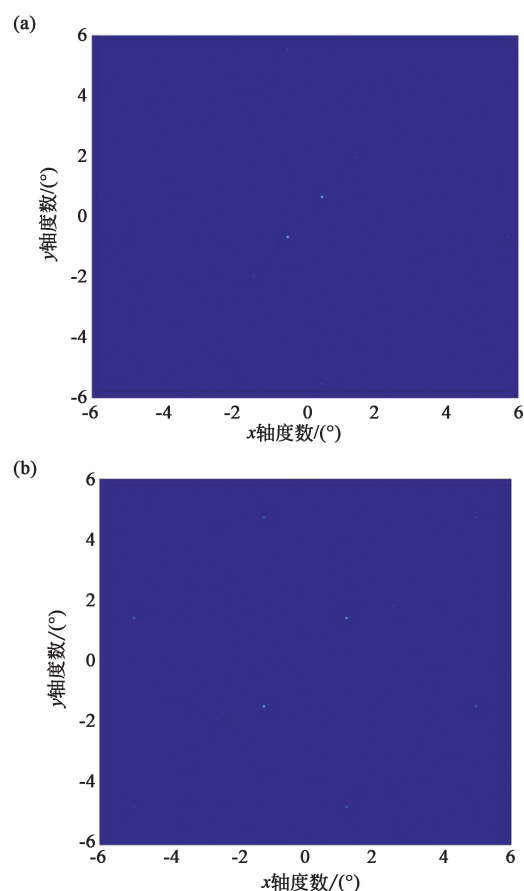


图8 不同偏转角度下,光束的远场分布图。(a)光束的偏转角度 (θ_x, θ_y) 取 $(0.48^\circ, 0.60^\circ)$ 和 $(-0.48^\circ, -0.60^\circ)$;(b)光束的偏转角度 (θ_x, θ_y) 取 $(1.2^\circ, 1.40^\circ)$ 和 $(-1.2^\circ, -1.40^\circ)$ 。

Fig.8 Far field distribution of the beam at different deflection angles. (a) The deflection angle of the beam is $(0.48^\circ, 0.60^\circ)$ and $(-0.48^\circ, -0.60^\circ)$; (b) The deflection angle of the beam is $(1.2^\circ, 1.40^\circ)$ and $(-1.2^\circ, -1.40^\circ)$.

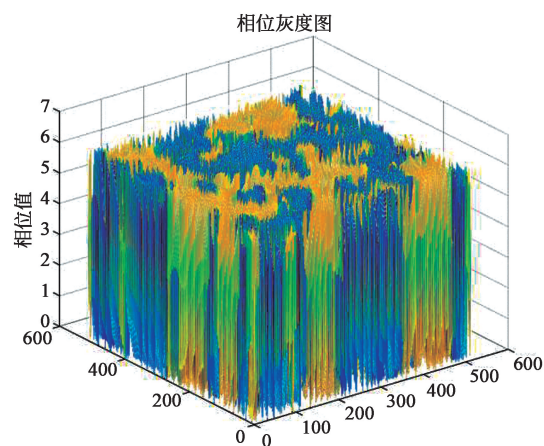


图9 G-S算法生成的双光束的相位图
Fig.9 Phase diagram of the two beams generated by the G-S algorithm

5 改进的 G-S 相位迭代算法

G-S 相位迭代算法相对于模拟退火算法和遗传算法存在收敛性好、运算速度快等优点。但是 G-S 算法是一种局部搜索迭代优化算法,对初始相位不够敏感很容易陷入局部最优值。因此,我们将 G-S 算法与模拟退火算法结合,提出了一种 G-S 算法的优化算法,同时我们将部分孔径法所得的相位作为 G-S 算法的初始相位进行迭代计算。

在算法开始,将部分孔径法所得的相位作为算法的初始相位,通过使用 G-S 算法计算得到相位屏的局部最优值;其次将上述的相位加入随机扰动,具体方法如公式(15)所示, $\epsilon(x,y)$ 为 $[0,2\pi]$ 之间的一个随机相位分布, b 为一个扰动因子,其范围在 $[0,1]$ 之间,这样的方法,相当于模拟退火算法中的升温过程。随后将加入扰动的相位屏加载进输入光场中,计算远场光束的分布。迭代完成后将加入扰动前和扰动后光场的误差评价函数 RMS 和 RMS' 通过预先设定的常数 p 来进行判断,当满足公式(16)时,储存扰动后的相位屏,否则保存原来的相位屏。在算法的计算过程中不断减小 b 和常数 p 的值,这样的过程相当于给系统不断降温。最后当迭代达到一定次数后,停止运算。

$$\varphi'(x,y) = \varphi(x,y) + b * \epsilon(x,y) \quad , \quad (15)$$

$$\frac{RMS' - RMS}{RMS} < p \quad , \quad (16)$$

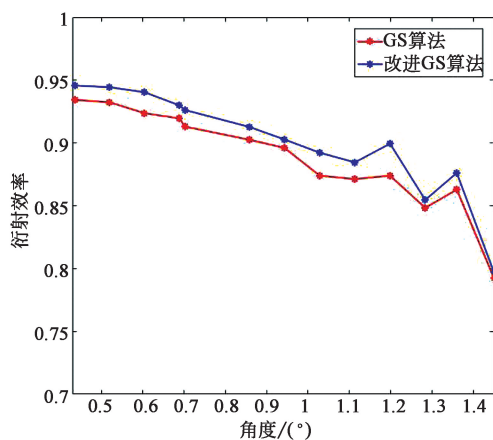


图 10 不同偏转角度下双光束的衍射效率

Fig.10 Diffraction efficiency of double beams at different deflection angles

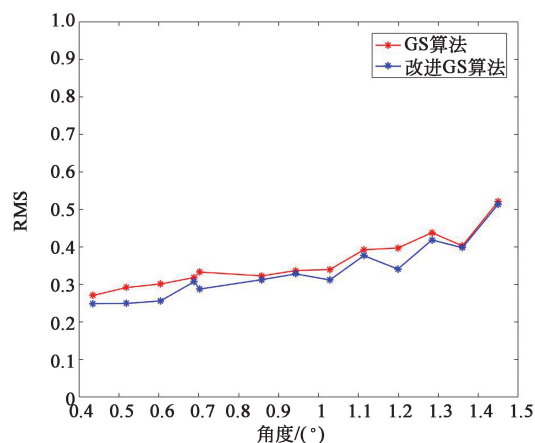


图 11 不同偏转角度下双光束的均方根误差

Fig.11 Root mean square error of double beams at different deflection angles

仿真结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着光束的偏转角度增大,远场的光束的衍射效率逐渐降低,改进后的 G-S 迭代算法所得的衍射效率与原迭代算法相比,光束的衍射效率有明显提高,在偏转角度为 1.2° 时上升的幅度最大,上升幅度为 0.03。图 11 展示了随着偏转角度增大双光束的均方根误差的变化规律,可以看出改进 G-S 迭代算法计算的光束的均方根误差值相比朴素 G-S 迭代算法有了一定的下降,在每个偏转角度处平均下降值为 0.02。由此可以看出,将 G-S 算法进行改进后,算法的性能有了一定的提高,远场光束与目标光束更加接近。

6 结 论

本文使用改进的 G-S 优化迭代算法,以在像面干涉而生成多光束束斑为目标函数,确定了输入面上 DOE 的二维相位分布。该方案的特点在于通过确定 OASLM 上 DOE 面适当的二维相位分布,以高斯平行光束通过 DOE 以后重构波阵面,生成多个强度受控、角度受控的束斑,以此实现平行入射的光束在二维任意角度的分束和偏转。模拟结果表明,改进的 G-S 算法计算得到的远场光束在 $0^\circ \sim 1.4^\circ$ 偏转角度内,衍射效率和均方根误差分别在 $0.8 \sim 0.95$ 和 $0.2 \sim 0.5$ 范围内波动,相比朴素 G-S 算法所得到的结果有了明显提高。

参 考 文 献:

- [1] ZHANG F C, PEDRINI G, OSTEN W. Phase retrieval of arbitrary complex-valued fields through aperture-plane modulation [J]. *Physical Review A*, 2007, 75(4): 043805.
- [2] SUBEDI S, ZHANG Y, AMIN M G, *et al.* Group Sparsity based multi-target tracking in passive multi-static radar systems using Doppler-only measurements [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(14): 3619-3634.
- [3] ENGSTRÖM D, BENGTSSON J, ERIKSSON E, *et al.* Improved beam steering accuracy of a single beam with a 1D phase-only spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18275-18287.
- [4] 汪相如,谭庆贵,黄子强,等.液晶光学相控阵的双波束成形和2维扫描技术[J].激光技术,2013,37(5):631-635.
WANG X R, TAN Q G, HUANG Z Q, *et al.* Dual beam formation and 2-D scan technique of liquid crystal optical phased array [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 631-635. (in Chinese)
- [5] WU L, WANG X R, HE X X, *et al.* Arbitrary multiple beam forming by two cascaded liquid crystal optical phased arrays [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17066-17077.
- [6] 余湛,马浩统,杜少军.基于模拟退火算法的自适应近场光束整形[J].光学学报,2011,31(3):0314003.
YU Z, MA H T, DU S J. Adaptive near-field beam shaping based on simulated annealing algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0314003. (in Chinese)
- [7] 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,2010,39(1):47-50.
CHEN X X, HUANG Z Q, YANG W J. 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)
- [8] XIAO F, KONG L J. Optical multi-beam forming method based on a liquid crystal optical phased array [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(36): 9854-9861.
- [9] PANG H, LIU W J, CAO A X, *et al.* Speckle-reduced holographic beam shaping with modified Gerchberg-Saxton algorithm [J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 44-51.
- [10] 丁磊,赵润昌,李明中,等.反射式液晶光阀用于激光束空间整形可行性研究[J].强激光与粒子束,2005,17(6): 849-852.
DING L, ZHAO R C, LI M Z, *et al.* Feasibility study of liquid crystal light valve on beam-shaping [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(6): 849-852. (in Chinese)
- [11] 石涛.基于BSO的透射式液晶SLM的技术研究[D].成都:电子科技大学,2009.
SHI T. Research on transmissive liquid crystal SLM based on BSO [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [12] 谢敬辉,廖宁放,曹良才.傅里叶光学与现代光学基础[M].北京:北京理工大学出版社,2007.
XIE J H, LIAO N F, CAO L C. *Fundamentals of Fourier Optics and Contemporary Optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. (in Chinese)
- [13] 马百恒.全息光镊及相关技术的理论与实验研究[D].西安:中国科学院大学,2012.
MA B H. Theoretical and experimental studies on holographic optical tweezers and related techniques [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [14] 林贻翔.液晶多波束光学相控阵技术[J].光通信技术,2018,42(9):47-50.
LIN Y X. Multi-beam optical phased array technology based on liquid crystal [J]. *Optical Communication Technology*, 2018, 42(9): 47-50. (in Chinese)
- [15] GERCHBERG R S, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optic*, 1972, 35(2): 237-250.
- [16] GE L, DUELLI M, COHN R W. Enumeration of illumination and scanning modes from real-time spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2000, 7(12): 403-416.
- [17] 刘伯晗,张健,吴丽莹.液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J].光学精密工程,2006,14(2):213-217.

- LIU B H, ZHANG J, WU L Y. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 213-217. (in Chinese)
- [18] 李俊昌. 衍射计算及数字全息 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LI J C. *Diffraction Calculation and Digital Holography* [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)

作者简介:



杨飞跃(1995—),女,陕西渭南人,硕士研究生,2017 年于西安工业大学获得学士学位,主要从事液晶空间光调制方面的研究。E-mail: feiyue_yang11@163.com



黄子强(1956—),男,四川成都人,教授,硕士生导师,1986 年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事液晶显示器、可变视角液晶显示器、激光扫描用的液晶光栅和机载、雷达用液晶显示器等方面的研究。E-mail: zqhuang@188.com