

文章编号: 0258-7025(2006)07-0899-04

# 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转

刘伯晗, 张 健

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 提出并设计了一个采用液晶空间光调制器(LCSLM)作为光束动态偏转器件的无机械光束扫描系统,实现了光束的方向和强度的可编程控制,解决了远场任意图形的激光光束动态逼近问题。逼近方法采用纯相位调制技术和傅里叶迭代优化算法结合的衍射图形相位优化设计方法。介绍了点阵图形发生原理并给出实验装置图。实验结果显示,用该方法产生的二维阵列式光束,其光斑强度偏差度小于 8%,图形发生响应时间小于 100 ms,该实验结果能够满足多光束准确动态偏转的要求。该系统具有精确、响应快、无机械惰性等特点,在激光寻的、制导以及多目标威胁预警和反击中有着重要的研究价值。

**关键词** 激光应用;空间光调制器;光束偏转;优化算法;相位调制

**中图分类号** TN 249 **文献标识码** A

## Dynamical Laser Beams Steering with Phase-Only Spatial Light Modulator

LIU Bo-han, ZHANG Jian

(Institute of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** A non-mechanical beam steering system is proposed and designed to resolve the problem of approaching the far-field diffractive pattern with laser beams. A beam steering method based on the phase only modulation with a liquid crystal spatial light modulator (LCSLM) is studied and described to control the light beams programmably. The Fourier iterative optimal algorithm is adopted to design the optimal phases approaching the expected far-field diffractive pattern. The schematic diagram and the experimental set-up are given. Results show that the method can generate 2-D spots arrays with the intensity error rate less than 8%. The response time of generating the dynamical diffractive pattern is less than 100 ms. With the merits of lightness, precision and quick response, this scanning system is of value in the fields of multi-object tracing, laser guiding and multi-object defense.

**Key words** laser application; spatial light modulator; beam steering; optimal algorithm; phase modulation

## 1 引 言

目前,传统的激光雷达因采用万向节等具有机械惯性的扫描装置而使其性能受到限制,迫切需要一种精确、快速响应的无机械惯性的扫描元件来代替<sup>[1]</sup>。基于光学相位阵列技术的液晶空间光调制器,作为具有克服以上诸多缺点潜力的新型可编程衍射光学元器件正在得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>。由于纯相位液晶空间光调制器可以实现相位的连续调制,这一点使其非常适用于空间光束偏转,因而其在激光

相控阵雷达和自由空间光互连等领域有广阔的应用前景<sup>[3,4]</sup>。据现有资料,国内对液晶空间光调制器的研究尚处于起步阶段<sup>[5~8]</sup>。本文设计了一个能够发射任意衍射点阵图形的系统装置。设计中的一个核心部件是液晶空间光调制器(LCSLM),是美国BNS(Boulder Nonlinear Systems)公司的专利产品,是近年发展起来的微电子机械(MEMS)领域的最新研究成果<sup>[9]</sup>。该系统采用液晶空间光调制器,通过对一组激光束的相位进行控制和波束合成,成

收稿日期:2005-10-31;收到修改稿日期:2006-02-24

作者简介:刘伯晗(1977—),男,吉林人,哈尔滨工业大学博士研究生,主要从事光电测试、空间光信息处理方面的研究。

E-mail:hit\_bohanliu@yahoo.com.cn

导师简介:张 健(1944—),男,江苏无锡人,哈尔滨工业大学教授,博士生导师,主要从事光电精密测量及信息处理方面的研究。E-mail:zjlab@hit.edu.cn

功实现快速、准确、无机械动态扫描。

## 2 任意点阵衍射图形的设计原理

如图 1 所示的光学系统中,设平面单色波入射,调制器的透射复振幅函数为

$$t(\xi, \eta) = r(\xi, \eta) \exp[j\varphi(\xi, \eta)], \quad (1)$$

当  $r$  的模值为 1 时,光学元件为纯相位光学元件,只对入射波的相位进行调制。纯相位调制的优点是,通过调制器后出射的光强不损失,与一般的幅度调制相比,其透射光强大大提高,这有利于能量的集中和远距离传输。如果能够将出射光束控制成二维阵列式光束,就可以将一束入射光合成二维阵列式多维光斑(束),这对于实现多目标同时跟踪有着重要意义。为此,本文尝试采用纯相位调制方法,采用纯相位衍射光学元件发射出等强度点阵(光束)图形,并以此来逼近远场(期望)图形。

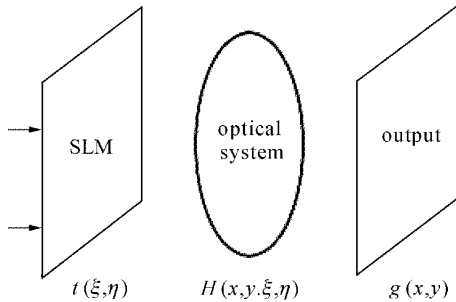


图 1 相位设计光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system for phase design

为了产生规则或不规则等强度二维点阵,假设平面单色波入射到纯相位空间光调制器(SLM)上,其透射复振幅函数可表征为  $t(\xi, \eta) = \exp[j\varphi(\xi, \eta)]$ 。一般情况下,输入函数  $t(\xi, \eta)$  和输出函数  $g(x, y)$  之间的关系可表示为

$$g(x, y) = H(x, y, \xi, \eta) t(\xi, \eta), \quad (2)$$

式中  $H(x, y, \xi, \eta)$  为空间传递函数。二维输出光点阵列对应于该二维空间光调制器的各衍射级。设  $A(m, n)$  是由整数  $(m, n)$  表征的各衍射级的复振幅,其中  $m = -M, \dots, M, n = -N, \dots, N$ ,总衍射级数为  $(2M + 1) \times (2N + 1)$ 。故  $A(m, n)$  可通过傅里叶变换由整数  $(m, n)$  表征为

$$A(m, n) = \iint \exp[j\varphi(\xi, \eta)] \times \exp[-j2\pi(m\xi + n\eta)] d\xi d\eta, \quad (3)$$

其中周期性函数  $\varphi(\xi + T_\xi, \eta + T_\eta) = \varphi(\xi, \eta)$ ,  $T_\xi$  和  $T_\eta$  分别为沿  $\xi$  轴和  $\eta$  轴方向的周期。在每个周期内

的矩形单元  $[\xi_{i+1} - \xi_i, \eta_{k+1} - \eta_k]$  中,相位为常数:  $\varphi(\xi, \eta) = \varphi_{i,k}, \varphi_{i,k} \in [0, 2\pi); \xi \in [\xi_i, \xi_{i+1}], \eta \in [\eta_k, \eta_{k+1}]$ 。这样,  $t(\xi, \eta)$  由点阵化的  $\varphi_{i,k}$  表示成  $t_{i,k}, g(x, y)$  由  $A(m, n)$  表示成  $g_{m,n}$ ,由式(3)可将  $g_{m,n}$  表示成

$$g_{m,n} = \text{DFT}\{\Gamma[\varphi(\xi, \eta)]\}, \quad (4)$$

其中“DFT”表示离散傅里叶变换,  $\Gamma$  为相位在  $[0, 2\pi)$  内的量化函数。这样就可以进行离散点阵优化设计。

由此可见,对于远场强度图形而言,远场的强度  $I(I = |A|^2)$  取决于每一点的相位值  $\varphi_{i,k}$ 。如何选取相位  $\varphi_{i,k}$  的值,使得由该相位值获得的远场衍射图更加逼近所期望的图形,是一个优化逼近过程:即如何使得

$$||\bar{I} - I|| \leq \epsilon \quad (5)$$

表示的误差尽量达到全局最小。其中,正数  $\epsilon$  为一个误差许可阈值,  $\bar{I}$  是  $I$  的估计值。以上过程是一个对强度图形进行相位恢复过程,可采用计算机进行相位优化设计。

## 3 衍射图形发生

流行的优化设计算法有很多,如模拟退火和遗传算法等,但是以上算法计算复杂费时,只适合于离线的精确设计相位。为了满足扫描的动态实时性要求,需要选择一种能够快速收敛的优化算法。G-S 算法(Gerchberg-Saxton)及其改进算法已在诸多领域取得成功,该算法有较好的快速收敛性<sup>[10,11]</sup>。为了进一步提高收敛速度,这里采用将第一次反傅里叶变换后得到的相位值作为初始相位,具体算法流程如图 2 所示。首先,将欲逼近的远场图像进行强度归一化表示,开平方后求出其幅度(实数值  $|F(X)|$ ),然后进行一次反傅里叶变换求出相应相位值作为相位初始值。将相位初始值送到 G-S 算法中,开始傅里叶迭代。迭代算法先将相位值进行逐级次量化而转化成灰度数字图像  $g(x)$ ,对该数字图像进行傅里叶变换得到  $G(X)$ ,对  $G(X)$  的模值进行判断,如果它与期望的强度图像幅度  $F(X)$  满足逼近条件,则程序退出并输出相位灰度图,否则令  $G(X)$  的模值等于  $F(X)$  的模值而保持  $G(X)$  的相位不变,从而得到新的  $G(X)$ ,下一步对其进行反傅里叶变换得到新的物空间图像函数  $g'(x)$ ,接下来将其相位保持不变而将其幅值置 1,再进行相位阶梯量化进入下一次循环,直到得到满意的相位值解。图 3 是利用 G-S 算法对“HIT”点阵源图进行相位恢

复处理的结果对比图。易见,两幅图像((a)和(c))位置严格对应,恢复的图像与期望图像几乎完全一致,除了个别点稍有形变外取得了满意的效果。算法程序运行在配置为2.8 GHz Pentium IV 处理器,1 GB内存的 Window 2000 操作系统下,迭代 20 次,计算耗时小于100 ms。

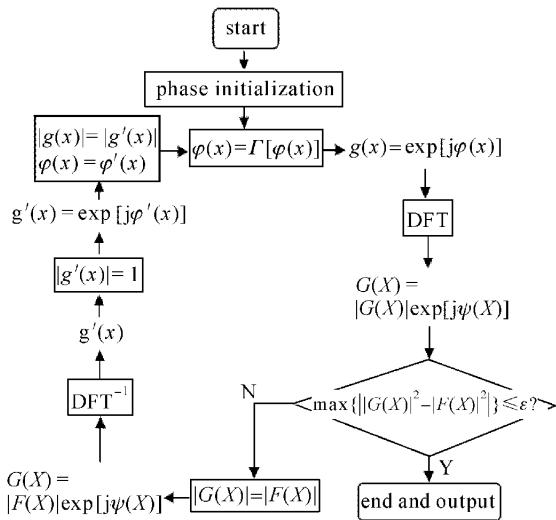


图 2 用于相位恢复的 G-S 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of G-S algorithm for phase retrieval

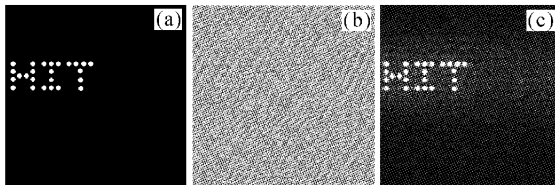


图 3 G-S 算法相位恢复处理结果

(a) 期望图; (b) 求解的相位图; (c) 图(b)的傅里叶变换图像

Fig. 3 Results of phases retrieved by G-S

(a) expected pattern; (b) retrieved phases pattern;

(c) image after the Fourier transformation of (b)

## 4 实验

为了验证点阵图形逼近原理的正确性,以及验证算法的可行性,设计了光束动态偏转系统装置。图 4 是实验装置的原理图以及实物图。一束波长为 633 nm 准直扩束的激光 1 经过光阑 2 (为了消除边缘杂光和得到利于实验的规则光斑) 得到有效光斑直径约为 9 mm 的激光光束,然后经过起偏器 3 成为线偏振光后,经分光棱镜 4 入射到空间光调制器 5 上,被调制器反射并调制的光束通过分光棱镜,接着通过检偏器 6 和透镜 7 (焦距 70 mm),最后被透镜焦面上的 CCD 8 收到远场夫琅禾费衍射图。其中,起偏器和检偏器能够调节光路偏振方向,使其和调

制器液晶的主轴方向一致,以增强纯相位调制效果。加入分光棱镜,作用是为了形成共轴光路。该系统加透镜的目的是将远场衍射图形成像于 CCD 的焦平面上,以简化研究。也可以去掉透镜,在远方用接收屏接收衍射图像,根据夫琅禾费衍射原理两者的效果是一样的。

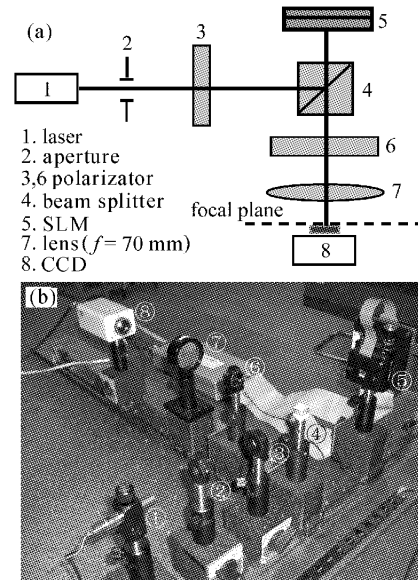


图 4 光束偏转实验装置图

(a) 装置示意图; (b) 装置实物图

Fig. 4 Experimental setup to beam steering

(a) schematic diagram of the setup; (b) image of the setup

具体实验步骤为:对图 3(a)离散的圆点阵组成的图案(该图像为  $256 \times 256$  像素灰度图,它也可以是连续的图形),根据所述计算方法对该图像进行迭代优化,计算出其相位图,如图 3(b)所示(在本实验图中白色灰度对应相位为 0,黑色灰度对应相位值  $2\pi$ );将相位图装载到空间光调制器的控制单元,该控制单元负责将相位灰度转化为对应的电压,并寻址加到对应的调制器液晶像素上;在均匀的单色激光束照射下,被反射并受到调制的光波面在远场形成夫琅禾费衍射图形,其数字图像被置于透镜焦平面的 CCD 接收,图像如图 5 所示。图 5 中心“十字”亮斑为零级衍射光斑。图像为  $256 \times 256$  像素的灰度图。图 5 产生历时 75 ms。该偏转系统适合于连续动态偏转,只需将不同期望图形连续地输入空间光调制器控制器,在离线状态下该空间光调制器的响应时间可以达 20 ms<sup>[9]</sup>。在实时目标追踪过程中光束偏转响应时间大部分都消耗在目标图像的相位恢复上,经实际测试,本偏转系统的光束动态偏转响应时间一般不超过 100 ms,可以满足一般动态偏转响应



图 5 “HIT”点阵图结果  
Fig. 5 Result of spot array

的要求。

在图 5 中, 设  $I_i$  为第  $i$  个亮斑的强度, 所有亮斑的强度的平均值为

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, \quad (6)$$

定义强度偏差度为亮斑相对平均强度的偏差与平均强度的比值, 即

$$\eta = \frac{|I - \bar{I}|}{\bar{I}} \times 100\%. \quad (7)$$

对图 5 的亮点强度均匀性分析如图 6 所示, 亮斑强度偏差度小于 8%, 该组亮斑有很好的均匀性, 有利于光束偏转的准确定位, 其中每个亮斑的序号

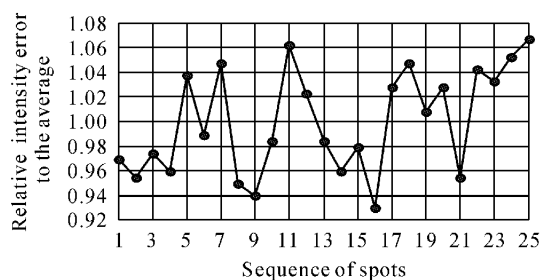


图 6 点阵的相对强度偏差  
Fig. 6 Relative intensity errors rates of the spots

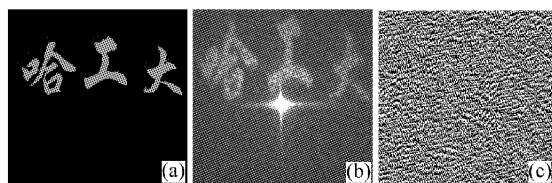


图 7 连续图像实验结果  
(a) 期望图; (b) CCD 远场接收结果; (c) 图(a)的相位恢复图  
Fig. 7 Experimental result of continual image  
(a) expected image; (b) far field diffractive pattern received by CCD; (c) retrieval phases of Fig. (a)

由左上角到右下角递增顺序排列。图 7 是对于连续图像的实验结果图。由图 7 可见, 本实验装置产生的图像形象、逼真, 该实验结果进一步证明算法的有效性, 以及本实验装置进行衍射图形发生的实用性和通用性。

## 5 结 论

提出了点阵图形的相位优化思想, 成功地运用于液晶空间光调制器纯相位调制激光光束; 设计了光束动态偏转系统, 实现空间光束的动态连续偏转, 取得了在 100 ms 内偏转偏差度小于 8% 的二维点阵式光束的满意实验结果。该偏转原理不仅适用于发射离散点阵图形而且对于发射连续图形也一样适用。

## 参 考 文 献

- Paul F. McManamon, Terry A. Dorschner, David L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2):268~298
- Li Ge, Markus Duelli, Robert W. Cohn. Enumeration of illumination and scanning modes from real-time spatial light modulators [J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(12):403~416
- N. Konforti, E. Marom, S. T. Wu. Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(3):251~253
- Ni Shuxin, Li Yifei. Trend of laser radar for military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 111~114  
倪树新, 李一飞. 军用激光雷达的发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(2):111~114
- Yang Liming, Yu Shuhuan. Optimization design of DOE for 2-D diffractive pattern [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(8): 739~743  
杨李茗, 虞淑环. 任意点阵衍射图形的 DOE 优化设计[J]. *光子学报*, 1998, **27**(8):739~743
- Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1682~1686  
刘永军, 宣丽, 胡立发等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12):1682~1686
- Yan Shuhua, Dai Yifan, Lü Haibao *et al.*. Manufacturing system for gray-scale masks based on the spatial light modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):45~47  
颜树华, 戴一帆, 吕海宝等. 基于空间光调制器的灰度掩模制作系统[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):45~47
- Ge Aiming, Sui Zhan, Su Junhong. Research on characteristics of amplitude modulation of a reflective liquid crystal on silicon device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):346~350  
葛爱明, 隋展, 苏俊宏. 反射式液晶器件振幅调制特性的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):346~350
- Jay Stockley, Steve Serati. Advances in liquid crystal beam steering [C]. *SPIE*, 2004, **5550**:32~39
- R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**(2):237~246
- J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms; a comparison [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15):2758~2769