

基于液晶相控阵和体全息光栅的激光多目标指示技术

闫宗群^{1*}, 国涛², 吴健³, 王顺^{1**}, 贾高坡⁴, 杨建昌¹

¹陆军装甲兵学院兵器与控制系, 北京 100072;

²中国人民解放军 32256 部队, 广东 广州 510500;

³中国人民解放军 31675 部队, 河北 张家口 075000;

⁴中国人民解放军 31638 部队, 云南 昆明 650500

摘要 为解决现今激光制导武器指示器指示效率低下、单次指示集群目标能力差等问题,从光束偏转控制和光束角度放大技术的原理出发,以液晶相控阵和多路复用体全息光栅为控件,设计了可用于多目标指示的大角度激光光束偏转控制系统;分析了影响液晶相控阵光束偏转特性的参数的选取规则,确定了大角度光束偏转系统的设计方法,模拟了激光多目标指示系统的指示过程,并对系统误差来源和误差修正方法进行了理论分析和仿真。结果表明:该系统可以快速地对光束实现最大偏转角度为 15.63° 的二维准连续、可编程控制的偏转;误差修正方法可有效提高激光光束的指示精度,使误差角度下降 50% 左右。所提出的激光多目标指示系统的设想,可实现对二维平面内多目标的准连续、准同时的精确指示,可为激光多目标指示器的设计提供参考。

关键词 光学器件; 光束偏转; 液晶相控阵; 体全息光栅; 连续扫描; 多目标指示

中图分类号 O436; TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0323001

Laser Multi-Target Indication Technique Based on Liquid Crystal Optical Phased Array and Volume Holographic Grating

Yan Zongqun^{1*}, Guo Tao², Wu Jian³, Wang Shun^{1**}, Jia Gaopo⁴, Yang Jianchang¹

¹Department of Weapon and Control, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;

²Army 32256 of PLA, Guangzhou, Guangdong 510500, China;

³Army 31675 of PLA, Zhangjiakou, Hebei 075000, China;

⁴Army 31638 of PLA, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract To address the problems of low efficiency and lack of ability of single indicating cluster target of a laser-guided weapon indicator, a large-angle laser deflection control system used for multi-target indication is designed based on the beam deflection control and beam-angle amplification techniques, and a liquid crystal-phased array and multiplex volume holographic grating are used as controls. The selection rules of the parameters affecting the deflection characteristics of the liquid crystal optical phased array and the design method of the large angle beam deflection system are analyzed in this study. Additionally, the indication process of the laser multi-target indication system is simulated and the error source and correction method are simulated and theoretically analyzed. Results indicate that the proposed system can rapidly achieve quasi-continuum and programmable deflection control of the laser beam in two-dimensional space with a maximum light beam deflection angle of 15.63°. Furthermore, the proposed error correction method can effectively improve the indicated precision of the laser and reduce the error angle by about 50%. Overall, the proposed laser multi-target indication system can be used to realize quasi-continuum and the precise quasi-instantaneous indication of multiple targets in two-dimensional space, thus offering theoretical support for the design of a laser multi-target indicator.

Key words optical devices; light beam deflection; liquid crystal optical phased array; volume holographic grating; continuous scanning; multi-target indication

OCIS codes 230.3720; 050.1970

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-08-19; 录用日期: 2019-09-29

基金项目: 院校创新基金(2018CJ57)

* E-mail: yanzongqun@163.com; ** E-mail: zgwangshun@163.com

1 引 言

在现代战场中,以激光半主动制导为主的制导武器系统已得到了广泛运用和快速发展。当前,激光目标指示器的目标指示数量较少,已在一定程度上制约了激光半主动制导武器的打击效率,导致对敌方集群目标的打击效果并不理想。若要利用制导激光束实现对不同位置处的多个目标的快速、准确和准连续指示,必须利用光束偏转技术实现对制导激光束快速、精确的偏转控制。

采用机械式光束偏转技术的器件存在体积大、响应时间长、存在过冲等缺点,在激光光束精确偏转控制领域上的运用并不多;而采用非机械式光束偏转技术的器件因具有小体积、低功耗、高精度、指向随机等优点,成为光束偏转应用全新的发展方向。当前,非机械式光束偏转技术主要包括液晶光束偏转技术、声光偏转技术和电光偏转技术^[1-3]等。采用声光偏转器件实现激光光束偏转控制时,光束的衍射效率太低,会造成巨大的能量浪费,而且不适合用于高速扫描;而采用电光晶体实现光束偏转控制时,需要较高的驱动电压,功耗很大,不适合用于激光多目标指示器的设计。目前,基于液晶光学相控阵(LCOPA)的光束偏转技术已经被应用于目标跟踪、激光通信、激光武器等领域^[4-6]。Raytheon 公司单纯利用 LCOPA 在 2007 年实现了误差为 1.54 μrad 、范围为 $-120\sim 120$ mrad 的光束扫描;在国内,哈尔滨工业大学的研究团队在 2008 年实现了范围可达 2° 的准连续光束偏转。虽然 LCOPA 可以实现激光光束的准连续、高精度偏转控制,但单片 LCOPA 的光束偏转范围却很有限。

光学相控阵大角度光束偏转技术^[7-9]将 LCOPA 与其他角度放大技术相结合,实现了光束的大角度、准连续、精确偏转控制。Raytheon 公司于 2007 年申请了 LCOPA + 复用体布拉格光栅(MVBG) + LCOPA 形式的大角度偏转控制技术专利^[10-12],该技术可实现角度范围为 $-45^\circ\sim 45^\circ$ 的光束连续偏转;但该专利仅解决了一维方向上光束的大角度偏转问题,而且进一步的研究成果未见报道。国防科学技术大学的邹永超等^[7]采用同样的方法实现了最大角为 11.82° 的光束一维准连续偏转,但该大角度光束偏转控制技术所能实现的最大角度主要取决于 MVBG 的复用路数。

本文利用 LCOPA 与两片正交多路 MVBG 组成二维大角度光束偏转系统,实现了光束角度在二

维空间的连续偏转控制,解决了单光束对二维空间内多方向指示的快速、精确控制难题,进而实现了单激光目标指示器对多打击目标的快速、准同时、精确指示,可大大提高激光末制导武器系统的打击效率。

2 液晶相控阵光束偏转

2.1 LCOPA 偏转的基本原理

LCOPA 通过改变激光光波的波前相位使波前产生特定倾斜,从而改变光束的传输方向。假设光波为正弦波,若相位改变 2π 或其整数倍时,并不会改变光束的传输方向。理想情况下,若对 LCOPA 施加的倾斜线性相位进行 2π 的求余操作,便可以得到如图 1 所示的阶梯型相位分布曲线。

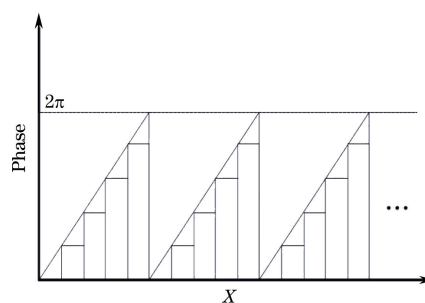


图 1 液晶相控阵相位的调制分布

Fig. 1 Phase modulation distribution of LCOPA

理想状态的 LCOPA 相位调制可与阶梯状闪耀光栅产生的相位等效。LCOPA 可被当作是相位型和振幅型光栅的组合,其对相位的调制来自移相器阵列,而对振幅的调制则来自其像素化的结构分布。理想状态的 LCOPA 远场光强分布^[9]可表示为

$$I(fx) = \left(\frac{a}{\lambda \cdot f}\right)^2 \cdot \text{sinc}^2(a \cdot fx) \times \frac{\sin^2\left[\pi M\left(d \cdot fx + \frac{1}{M}\right)\right]}{\sin^2\left[\pi\left(d \cdot fx + \frac{1}{M}\right)\right]} \times \frac{\sin^2(\pi N M d \cdot fx)}{\sin^2(\pi M d \cdot fx)}, \quad (1)$$

式中: a 为 LCOPA 的电极大小; d 为 LCOPA 的电极中心距; M 为 LCOPA 上单周期内的相移器数量; f 为傅里叶透镜的焦距,其中 $fx = \frac{x}{f}d$;因子 $\text{sinc}^2(a \cdot fx)$ 由宽度为 a 的矩孔衍射产生;因子 $\frac{\sin^2\left[\pi M\left(d \cdot fx + \frac{1}{M}\right)\right]}{\sin^2\left[\pi\left(d \cdot fx + \frac{1}{M}\right)\right]}$ 由带相位调制的多矩孔干涉产生;因子 $\frac{\sin^2(\pi N M d \cdot fx)}{\sin^2(\pi M d \cdot fx)}$ 由 LCOPA 周期

结构的调制作用产生。由此可见,LCOPA 进行光束偏转的物理过程是受单孔衍射调制的多孔干涉过程。

为深入研究 LCOPA 各参数对偏转光束远场光强和偏转角度的影响,以更好地选择适用于激光多

目标指示器的 LCOPA,特利用 MATLAB 软件就相关参数对远场光强分布的影响进行仿真分析,结果如图 2 所示,进而得出以 LCOPA 器件作为激光偏转控制器件时相关参数的选取规则。

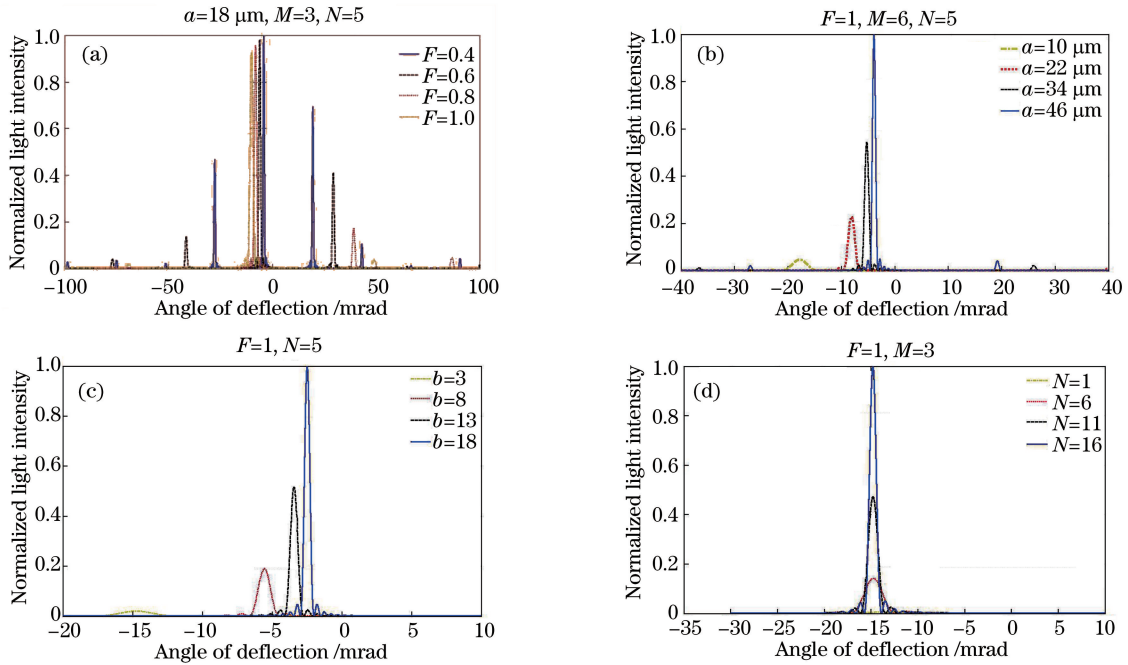


图 2 液晶相控阵各参数对其远场光束的影响。(a)填充比 F ; (b)电极大小 a ; (c)周期内台阶数 M ; (d)周期数 N

Fig. 2 Effects of parameters of LCOPA on far field light beam. (a) Packing ratio F ; (b) electrode size a ; (c) step number M in a period; (d) periodic number N

1) 填充比越高越好。填充比越高,衍射次级大光强与主极大光强相比就越弱,从而能够尽可能地避免其对主极大指示的干扰,而且偏转角度逐渐变大。

2) 为实现某角度偏转,可适当牺牲光强,选择电极稍小的 LCOPA。随着电极的大小 a 增大,偏转角变小,归一化光强明显增强,且主极大线宽更小,次级大的抑制效果良好。

3) 为实现某角度偏转,可适当选取相对较少的台阶数,但为了保证光强的大小,台阶数不能过少,应综合考虑出射激光光强和偏转角度来确定单周期内移相器的个数。

4) 周期数越多越好。随着周期数增加,在偏转角基本保持不变的同时,归一化光强明显增强,同时主极大的聚集程度增大。

综上所述,在设计 LCOPA 时应权衡光强大小和偏转角度对各参数进行设置,在光强达标的前提下实现偏转角度的最大化。LCOPA 的角度偏转主要通过设置周期内的台阶数来实现,但由于周期内的台阶数是离散的,故所得角度值也是离散的。

2.2 LCOPA 偏转角度的连续控制

根据 LCOPA 相位调制过程的物理本质,由单

孔衍射和多孔干涉的原理可知^[13-14];若要实现角度为 θ 的偏转,LCOPA 的相位调制应为

$$\varphi'(n) = -(n-1) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sin \theta \text{ mod}(2\pi), \quad (2)$$

式中: θ 为设定的光束偏转角; $\text{mod}(2\pi)$ 表示对该相位进行 2π 相位回卷。利用(2)式解算的 θ 角度的相位调制如图 3 所示(固定偏转角为 17.7 mrad)。将上述相位图进行纵向扩展,可以得到一维光束偏转的 LCOPA 相位偏转锯齿图,如图 4 所示。

若要实现激光光束角度的二维偏转,只需在一维偏转的 LCOPA 相位图中加入相位图偏转角即可。在参数输入时,多采用横向和纵向偏转角度的形式来确定其对应的一维偏转角^[15]。一维偏转角、相位图旋转角与横、纵向偏转角之间的转换公式为

$$\tan \theta = \sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta}, \quad (3)$$

$$\tan \gamma = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}, \quad (4)$$

式中: θ 为一维偏转角; α 为横向偏转转角; β 为纵向偏转角; γ 为相位图旋转角。图 5 所示为给定一维偏转角下的相位图旋转角的示例。

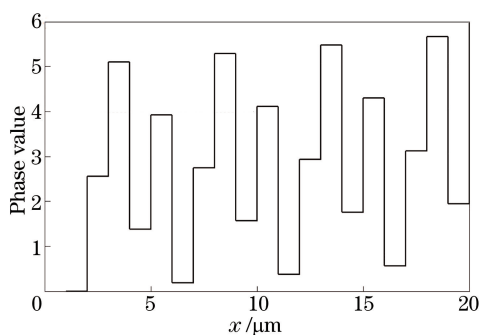


图 3 相位调制图

Fig. 3 Phase modulation pattern

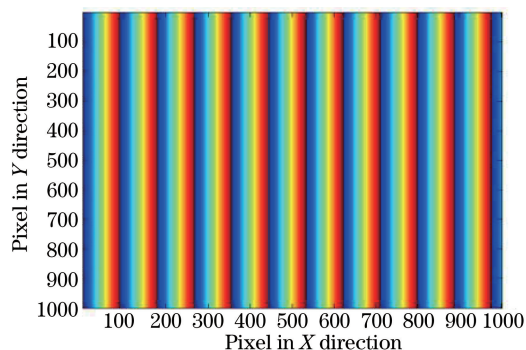


图 4 一定偏转角度下 LCOPA 相位偏转锯齿图

Fig. 4 Phase deflection map of LCOPA under some deflection angle

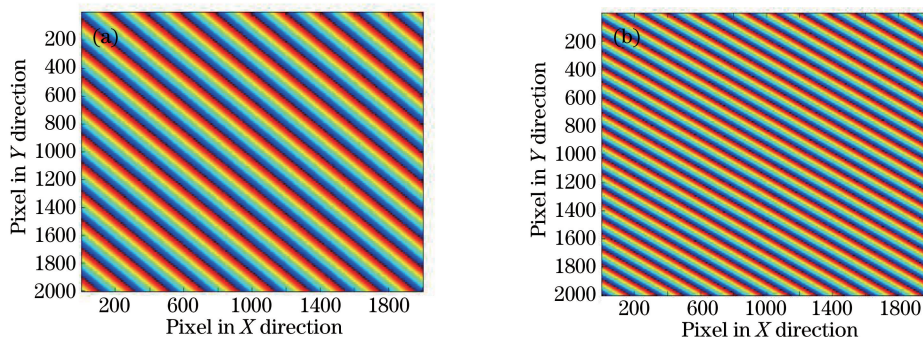


图 5 不同一维偏转角及相位图旋转角下的相位控制图谱。(a)一维偏转角为 0.0175° , 旋转角为 45° ;

(b)一维偏转角为 0.084° , 旋转角为 56.3133°

Fig. 5 Local diagrams of phase control maps with different one-dimensional deflection angles and rotation angles of phase map. (a) One-dimensional angle is 0.0175° , and rotation angle is 45° ; (b) one-dimension angle is 0.084° , and rotation angle is 56.3133°

3 体全息光栅角度放大

LCOPA 虽然可以实现可编程控制和准连续的激光光束偏转,但在当前工艺下,LCOPA 所能实现的光束偏转范围有限,很难满足实际应用中激光多目标指示装备对激光偏转角度的需求。针对此问题,利用体布拉格光栅(VBG)扫描角度范围大、光束偏转效率高、制作工艺成熟的优点来进一步增大激光光束的偏转角度^[16]。但单 VBG 只能对一个特定角度的光束进行放大,很难满足多目标指示的要求。利用多次光刻技术,在单路 VBG 的基础上使用多路复用技术,在单个基底中复用多路角度放大器,就可以实现对多角度光束的高效率放大,扩大光束的扫描范围。

4 二维大角度光束偏转控制系统

综合利用 LCOPA 在小角度范围内对角度的高精度、准连续控制,以及 MVBG 对多人射角高效率放大的优点,设计二维大角度偏转控制系统。

MVBG 可对多人射角度的光束进行放大,但对入射角的精度要求极高,入射光束必须符合布拉格条件(因为光栅只能对满足布拉格角条件的入射光束产生衍射放大作用,而对其他角度的入射光束则几乎完全透射^[17]),这样便可以利用两个正交放置的 MVBG 对倾斜入射光束在 X 方向和 Y 方向上进行指定角度的放大。由于放大后的光束的偏转角是离散的,不能实现光束的连续偏转控制,因此,对于二维大角度光束偏转控制系统,在两块正交 MVBG 前后分别放置一块 LCOPA,以实现入射光对布拉格角的寻址以及对 MVBG 出射光偏转角度的精确调制,从而实现对激光光束的准连续、高效偏转控制。二维大角度光束偏转控制系统的原理如图 6 所示。该系统的工作流程概述如下:

1) 根据指示目标的二维最终偏转角度分别确定 MVBG(X) 和 MVBG(Y) 的复用路数(放大倍数),从而确定所需的二维入射匹配角;

2) LCOPA1 对入射光束的偏转角度进行精确控制,使得从 LCOPA1 出射的光束角度满足

MVBG(X)和 MVBG(Y)的匹配入射角;

3) MVBG(X)和 MVBG(Y)分别对入射光束在 X 方向和 Y 方向的角度进行对应倍率的放大,实现对入射光束的大倍率二维放大;

4) LCOPA2 对 MVBG 模块输出的角度放大后的光束进行角度上的精调,最终可获得指示目标所需的最终偏转角。

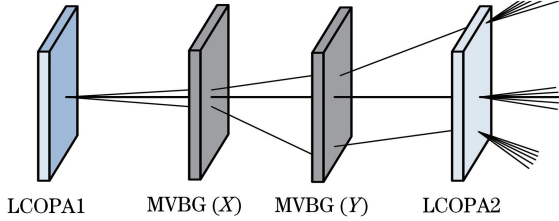


图 6 二维大角度光束偏转控制系统示意图

Fig. 6 Schematic of two-dimensional large angle beam deflection control system

4.1 第一模块 LCOPA1 角度选址

第一模块由可编程 LCOPA 构成角度精偏转系统,其主要目的是根据确定的 MVBG(X)和 MVBG(Y)的复用路数对入射光束进行二维角度精偏转,以分别满足 MVBG(X)和 MVBG(Y)对应复用路数的匹配角度要求。在已知偏转出射角时,通过(2)式可以得出经过 2π 回卷的一维液晶偏转的理论相位控制图,通过(5)式可得出液晶相控阵量化为 M_n 的一维液晶偏转的实际相位控制图。

$$\varphi_{\text{realized}}(n) = \text{round}\left[\varphi'(n) \frac{M_n}{2\pi}\right] \frac{2\pi}{M_n} \quad (5)$$

式中: $\varphi_{\text{realized}}(n)$ 为液晶相控阵第 n 个像素的实际相位值; $\varphi'(n)$ 为液晶相控阵第 n 个像素的理想相位值。

根据横向、纵向偏转角度,利用(3)式和(4)式可以得出进行二维角度偏转时液晶相控阵的一维偏转角和相位图旋转角,进而可以得出液晶相控阵的二维偏转相位控制图,使得 LCOPA1 利用该相位控制图来对入射光束进行二维角度精确偏转。

4.2 第二模块 MVBG 组的角度放大

该系统的第二模块为 MVBG 组角度放大模块,主要由两块呈正交关系放置的 MVBG 组成,其主要作用是接收 LCOPA1 的精调光束,对小角度偏转激光的角度进行二维放大。该模块分别利用 MVBG(X)和 MVBG(Y)对横向和纵向多路入射光的角度进行放大,进而实现对光束偏转角度的二维放大。MVBG 的设计步骤可以归纳如下。

1) 根据需要的入射角和出射角计算 VBG 光栅倾斜角,公式为

$$\theta_d = \sin^{-1}\left\{n_0 \sin\left[\sin^{-1}\left(\frac{1}{n_0} \cdot \sin \theta_i\right) - 2\varphi\right]\right\}, \quad (6)$$

式中: θ_i 为入射角; θ_d 为衍射光束的出射角; n_0 为介质的平均折射率; φ 为光栅倾斜角。

2) 设 θ_B 为光栅内布拉格角, λ 为入射光束的波长,根据

$$\cos(\varphi - \theta_B) = \lambda / (2n_0\Lambda), \quad (7)$$

计算光栅周期 Λ 。

3) 根据

$$d = \frac{(1/2 + m)\lambda}{\Delta n} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2n_0\Lambda}\right)^2}, m = 0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

计算光栅厚度 d 和最佳折射率调制深度 Δn 。

4) 依次设计其他各路 VBG 参数,根据设计的参数制作 MVBG。

4.3 第三模块 LCOPA2 角度的分选

该系统的第三模块由 LCOPA2 构成角度分选系统,其作用是对经 MVBG 组放大后的激光光束进行最终的角度精调,使输出光束的偏转角度与指示目标所需的最终偏转角度一致。该模块的原理与第一模块的原理相同,不同之处在输入角的计算上,LCOPA2 模块相位图计算的输入角为指示目标最终二维偏转角度与 MVBG 组二维放大角度之差。分解得出横向与纵向输入角后,即可计算出 LCOPA2 二维角度偏转的相位控制图,从而实现 LCOPA2 对光束角度最终的精确控制。

4.4 二维大角度偏转控制系统设计和误差分析

假设第一模块选址 LCOPA1 的角度分辨率小于 0.25 mrad ,角度扫描范围为 $-2^\circ \sim 2^\circ$;第二模块两正交三路复用 VBG 的三路入射角与出射角均相同,分别为 $(0^\circ, 3^\circ)$ 、 $(-1^\circ, 5^\circ)$ 和 $(-2^\circ, 8^\circ)$,利用 LCOPA1 可分别实现对 MVBG(X)和 MVBG(Y)三路入射角 $(0^\circ, -1^\circ, -2^\circ)$ 的匹配;第三模块角度分选 LCOPA2 的角度分辨率约为 0.3 mrad ,扫描范围为 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 。由于系统偏转角度的角度分辨率是由 LCOPA2 的角度分辨率决定的,故系统的角度分辨率为 0.3 mrad ,但由于该值小于光束的远场发散角 (1 mrad) ,因此可以认为系统的光束扫描是准连续的。

以 MVBG(X)为例,图 7 给出了 LCOPA1 角度选址和 MVBG(X)的角度放大示意图。MVBG(Y)的角度放大方式与 MVBG(X)一致。图 7 中 MVBG(X)的法线与参考光轴(图 7 中实线所示)的夹角为 1° ,实际系统设计中 MVBG(X)和 MVBG(Y)

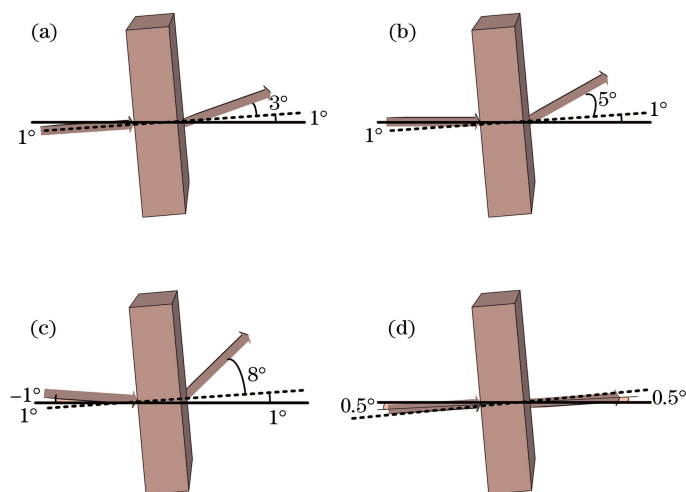


图7 LCOPA1 选址和 MVBG(X) 角度放大示意图。(a) 选通 VBG1; (b) 选通 VBG2; (c) 选通 VBG3; (d) 选通 MVBG(X) 透射
Fig. 7 Angle magnification schematics of MVBG(X) and LCOPA1 address. (a) Gating VBG1; (b) gating VBG2;
(c) gating VBG3; (d) transmission of gating MVBG (X)

的法线分别与系统参考光轴呈 1° 夹角。系统的角度分配如表 1 所示, 表 1 中所述角度值为入射光线或出

射光线与参考光轴的夹角。参考光轴逆时针旋转至光束时, 角度符号为正, 反之为负。

表 1 二维大角度光束偏转系统角度分配表

Table 1 Angle distribution sheet of two-dimensional large angle beam deflection system ($^\circ$)

LCOPA1(X,Y)	MVBG(X)	MVBG(Y)	MVBG module	LCOPA2	Scan range
(1,1)	4	4	5.65	-2.85 to 0.35	2.8 to 6
(0,1)	6	4	7.20	-1.2 to 0.8	6 to 8
(0,0)	6	6	8.45	-0.45 to 0.55	8 to 9
(1,-1)	4	9	9.82	-0.82 to 0.48	9 to 10.3
(-1,0)	9	6	10.76	-0.46 to 1.24	10.3 to 12
(-1,-1)	9	9	12.63	-0.63 to 3	12 to 15.63
(0.5,0.5)	0.5	0.5	0.72	-0.72 to 2.28	0 to 3

如图 7(a) 所示, MVBG(X) 倾斜了 1° , 当 LCOPA1 控制光束偏转 1° 时, 选中 MVBG(X) 的 $(0^\circ, 3^\circ)$ 工作状态, 此时光束经过 MVBG(X) 后的偏转角为 $3^\circ + 1^\circ = 4^\circ$; 如图 7(b) 所示, 当 LCOPA1 控制光束偏转 0° 时, 选择 MVBG(X) 的 $(-1^\circ, 5^\circ)$ 工作状态, 此时光束经过 MVBG(X) 后的偏转角为 $5^\circ + 1^\circ = 6^\circ$; 如图 7(c) 所示, 当 LCOPA1 控制光束偏转 -1° 时, 选择 MVBG(X) 的 $(-2^\circ, 8^\circ)$ 工作状态, 此时光束经过 MVBG(X) 后偏转角为 $8^\circ + 1^\circ = 9^\circ$; 如图 7(d) 所示, 当 LCOPA1 控制光束偏转 0.5° 时, 因为入射角度不匹配 MVBG(X) 的入射角, 衍射效率较低, 透射光束能量占比很高, 因此选择 MVBG(X) 的透射光束作为指示光束, 此时光束经过 MVBG(X) 后偏转角度不变, 为 0.5° 。MVBG(Y) 在 LCOPA1 的角度选址控制下同样可以实现与 MVBG(X) 相同的角度放大功能。在 MVBG(X) 和 MVBG(Y) 偏转角度的基础上, 利用 LCOPA2 进行角度填充, 就可以实现

光束准连续的二维扫描。

表 1 给出了二维大角度光束偏转控制系统 LCOPA1 进行 X 和 Y 方向的二维角度选址、MVBG(X) 和 MVBG(Y) 的角度二维放大, 以及 LCOPA2 在角度放大基础上的角度精确偏转填充, 通过该过程可以实现 $0^\circ \sim 15.63^\circ$ 的光束准连续二维偏转扫描。

由于 LCOPA1 的相位调制精度取决于相控阵的量化数, 而实际量化数有限, 因此必然存在由量化数引起的角度偏转误差。该角度偏转误差将引起 MVBG 的实际入射角与预设入射角产生误差, 且实际入射角与理论入射角的差值越大, 实际放大角与理论放大角的差值也就越大。因此, 减小入射角误差可有效地减小放大角度的误差。由于第一模块 LCOPA1 的横、纵角度偏转是有限的几组固定角度, 第二模块 MVBG 组的入射角误差来源于第一模块 LCOPA1 的量化数, 因此在确定量化数的前提下

对第一模块 LCOPA1 的误差进行修正,可以有效抑制第二模块误差的产生。具体的方法如下:1)确定第一模块器件包括量化数在内的具体参数;2)按照设计的第一模块偏转角度计算出实际的第一模块偏转角;3)将得出的第一模块实际偏转角作为第二模块的修正入射角;4)以修正入射角和预设放大角为

依据设计 MVBG 组的参数。

5 二维大角度偏转控制系统的数值仿真

将系统的三个模块进行整合,形成大角度偏转系统,对系统的运行流程和误差影响进行数值仿真,图 8 是系统的工作流程图。

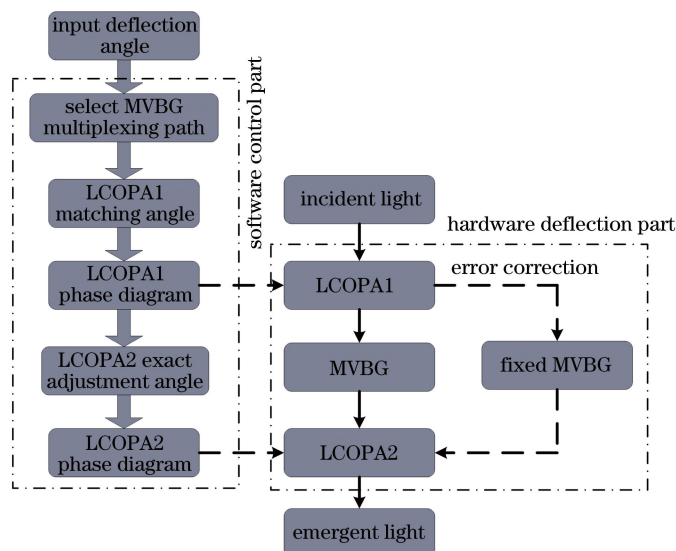


图 8 二维大角度光束偏转系统工作流程图

Fig. 8 Working process diagram of two-dimensional large angle beam deflection system

假设载体无人机飞行高度为 2000 m,设定三个不同的偏转角度,分别对两块 LCOPA 相位控制图进行仿真,并对修正前后的角度进行对比:1)横向偏转角为 8° ,纵向偏转角为 12° ,MVBG(X)选择第三路,MVBG(Y)选择第三路复用;2)横向偏转角为

2° ,纵向偏转角为 5° ,MVBG(X)选择第一路,MVBG(Y)选择第一路复用;3)横向偏转角为 8° ,纵向偏转角为 3° ,MVBG(X)选择第二路,MVBG(Y)选择第二路复用。不同情况下,LCOPA1 和 LCOPA2 相位控制图谱的局部图如图 9 所示。

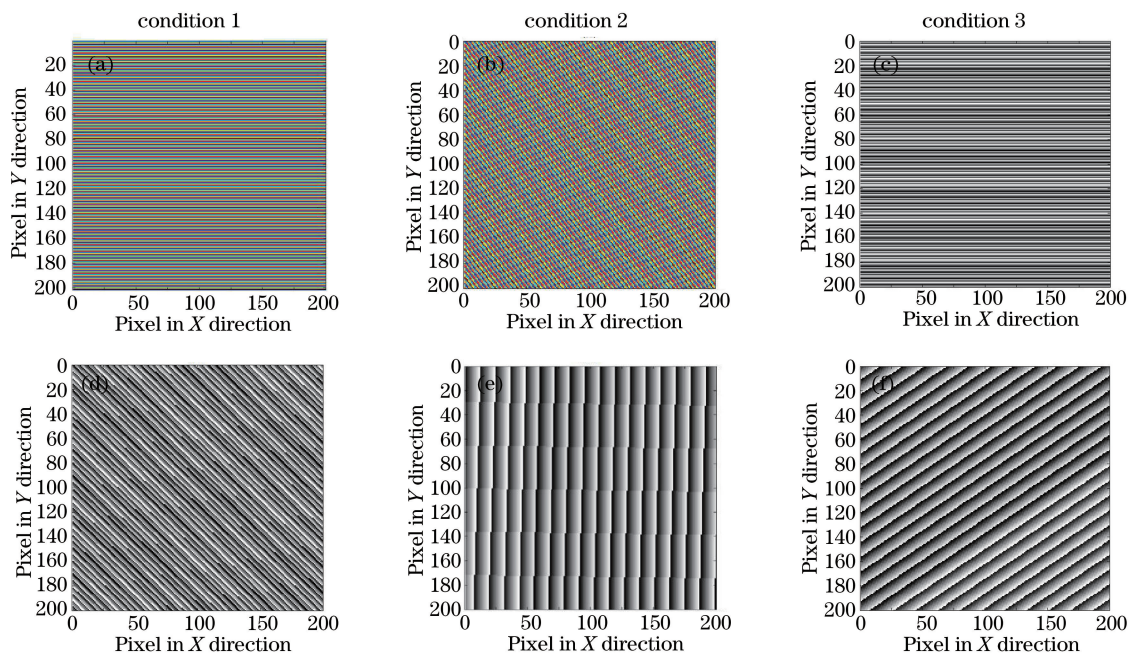


图 9 LCOPA1 和 LCOPA2 的相位控制图谱局部图。(a)(b)(c) LCOPA1;(d)(e)(f) LCOPA2

Fig. 9 Local diagrams of phase control maps of LCOPA1 and LCOPA2. (a)(b)(c) LCOPA1; (d)(e)(f) LCOPA2

表 2 修正前后实际偏转角与误差角的统计结果

Table 2 Statistical results of error angle and real deflection angle before and after correction

Item	Condition 1	Condition 2	Condition 3
Real deflection angle (uncorrected) / (°)	14.2512	8.5049	5.3476
Real deflection angle (correction) / (°)	14.2767	8.5195	5.3720
Target angle / (°)	14.2957	8.5304	5.3814
Error angle (uncorrected) / (°)	0.0445	0.0255	0.3380
Error angle (correction) / (°)	0.019	0.0109	0.0094

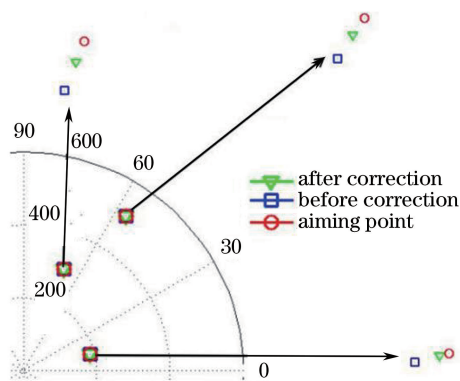


图 10 修正前后偏转点与瞄准点的对比

Fig. 10 Comparison of deflection point and aiming point before and after correction

由表 2 可知, 未经过误差修正的误差角最高可达 0.0445° , 而修正误差后, 误差角可以控制在 0.02° 以内, 对比结果见图 10, 说明误差修正起到了减小误差的效果。当指示平台高度为 2000 m 时, 指示误差可以控制在 $0 \sim 0.66$ m 范围, 在指示装甲目标时并不会使武器终端偏离目标。

6 结 论

对以液晶相控阵和多路复用体布拉格光栅为控件的二维大角度光束偏转系统的设计和误差进行了理论研究, 模拟了激光多目标指示系统的指示过程, 并用 MATLAB 软件对设计系统进行数值仿真。该系统可对最大偏转角为 15.63° 的光束实现二维准连续、可编程控制的偏转, 即当指示平台高度为 2000 m 时, 可对地面上在对角线长度为 600 m 的正方形内的多目标进行准连续、准同时照射指示。在指示响应时间方面, 目前新型的快响应型液晶材料的研发, 使得液晶相控阵的相位输入响应时间可压缩到百微秒级, 即在不考虑运算时间的情况下同时指示 7 个目标的速率可达到 1000 frame/s 以上, 因

此在硬件方面完全可以满足要求。通过对系统中误差产生原因进行分析, 设计了系统误差的修正方案, 通过计算证明了误差修正方案可以提高指示精度, 使误差角度减小一半。所提出的激光多目标指示系统的设想, 可为下一步激光多目标指示器的设计提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Zhang C Y, Huang Z Q. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1231-1235.
张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析 [J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1231-1235.
- [2] 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.
刘伯哈, 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.
- [3] Shi Y B, Ma H T, Ma Y X, et al. Numerical simulation of high accuracy and high efficiency beam steering based on liquid crystal optical phase array [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0202002.
师宇斌, 马浩统, 马阎星, 等. 基于液晶相控阵高精度高效率光束偏转数值仿真 [J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0202002.
- [4] Schmitz C H J, Spatz J P, Curtis J E. High-precision steering of multiple holographic optical traps [J]. Optics Express, 2005, 13(21): 8678-8685.
- [5] Hällstig E J, Öhgren J, Allard L, et al. Retrocommunication utilizing electroabsorption modulators and nonmechanical beam steering [J]. Optical Engineering, 2005, 44(4): 045001.
- [6] Kong L J, Zhu Y, Song Y, et al. Beam steering approach for high-precision spatial light modulators [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(11): 1085-1089.
- [7] Zou Y C, Si L, Tao R M, et al. Research progress of liquid crystal based light beam steering technique [J]. Laser Technology, 2011, 35(3): 293-298, 304.
邹永超, 司磊, 陶汝茂, 等. 基于液晶材料的光束偏转技术研究进展 [J]. 激光技术, 2011, 35(3): 293-298, 304.
- [8] Zhao X J, Liu C L, Zhang D Y, et al. Optimized analysis of diffraction efficiency for liquid crystal optical phased array [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123002.
赵祥杰, 刘仓理, 张大勇, 等. 液晶相控阵衍射效率

- 的优化分析[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123002.
- [9] Kong L J, Zhu Y, Song Y, et al. A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0123001.
孔令讲, 朱颖, 宋艳, 等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0123001.
- [10] Smith I W, Holz M K O. Wide-angle beam steering system: US7428100 [P/OL]. 2008-09-23 [2019-05-19]. <https://patents.glgoo.top/patent/US7428100B2/en>.
- [11] McManamon P. An overview of optical phased array technology and status [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5947: 59470I.
- [12] Ciapurin I V, Glebov L B, Smirnov V I. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5742: 183-194.
- [13] Shi Y L. Research on driving technology of liquid crystal optical phased array for beam steering [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 35-47.
石永亮. 用于光束偏转的液晶光学相阵列驱动技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 35-47.
- [14] Chen L, Du P, Yan H, et al. Progress and applied analysis of the optical phased array in beam steering [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(4): 351-355.
陈黎, 杜鹏, 颜宏, 等. 光学相控阵在光束偏转中的应用分析及进展 [J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 351-355.
- [15] Sun L. The study of light-beam scanning based on optical phased array [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008: 45-55.
孙亮. 基于光学相控阵的光束扫描研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 45-55.
- [16] Wang L. The control research of liquid crystal phase grating [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006: 60-68.
王丽. 液晶电控光栅的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006: 60-68.
- [17] Duan J Z. Research of optical phased arrays amplifier stage based on volume holographic grating [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014: 3-5.
段佳著. 基于体全息光栅的光学相控阵放大级研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014: 3-5.