

文章编号: 1001-3806(2013)05-0631-05

液晶光学相控阵的双波束成形和 2 维扫描技术

汪相如¹, 谭庆贵², 黄子强¹, 孔令讲³, 杨若夫⁴, 幺周石²

(1. 电子科技大学 电子科学技术研究院, 成都 610054; 2. 空间电子信息技术研究院, 西安 710000; 3. 电子科技大学 电子工程学院, 成都 610054; 4. 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 为了在光学相控阵中实现双波束成形和 2 维扫描, 以玻璃作为基底材料, 以液晶作为移相介质, 利用液晶的电控移相特性, 对入射光束进行双波束成形和相控空间扫描; 采用现场可编程门阵列芯片对液晶驱动芯片进行波控数据发送, 完成对液晶移相阵列的电压驱动, 从而达到电控光束扫描功能, 完成单个透射型液晶光学相控阵组件的研制; 利用该组件的电控光束扫描功能, 采用多个组件级联的方式, 实现基于透射型液晶光学相控阵组件的双波束成形和 2 维扫描技术。结果表明, 该系统能够实现双波束独立偏转控制, 以及高精度的空间 2 维偏转。

关键词: 激光技术; 液晶相控阵; 双波束; 2 维扫描

中图分类号: O734 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.015

Dual beam formation and 2-D scan technique of liquid crystal optical phased array

WANG Xiang-ru¹, TAN Qing-gui², HUANG Zi-qiang¹, KONG Ling-jiang³, YANG Ruo-fu⁴, YAO Zhou-shi²

(1. Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Academy of Space Information System, Xi'an 710000, China; 3. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 4. School of Optoelectronic information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In order to realize dual beam formation and 2-D scan in optical phased array, choosing glass as substrate material and liquid crystal as phase-shifting medium, using the electric control phase-shifting characteristics of liquid crystal, double beam formation and phase control spatial scanning of incident light were gotten. Wave control data were transmitted to LCD driver chip by FPGA chip and the liquid crystal phase shifting array was driven by voltage, and beam scanning function was controlled, so a single transmissive-type liquid crystal optical phased-control array assembly was developed. Therefore, based on beam scanning function of the assembly, a liquid crystal optical phased array was developed by cascading multiple-assembly to realize dual beam formation and 2-D scan. The results show that the cascading system has the ability to achieve double beam independent deflection control and high precision 2-D deflection.

Key words: laser technique; liquid crystal optical phase array; dual beam; 2-D steering

引 言

随着激光应用技术的发展, 在激光空间传输、光通信等领域, 对激光束进行高精度指向控制是一项关键技术。目前, 由于非机械式的激光光束扫描结构具有体积小、无机械惯性、扫描响应速度快、可靠性好等优点, 因此, 非机械式、高分辨率的激光相控

扫描技术成为该领域最为热门和实用性最强的研究方向之一^[1-3]。

激光相控扫描技术是传统微波相控阵的直接功能复制。在实现原理上, 光学相控阵与微波相控阵是相同的。由于两者中心波长有数量级的差别, 在工程实现方法上是有很大不同之处^[4]。目前, 实现光学相控阵的方式主要有: (1) 利用 1 阶非线性电光效应, 采用高电光系数材料(如钽酸锂晶体), 实现电控折射率变化, 从而实现相移^[5]; (2) 利用具备 2 阶非线性电光效应, 采用锆钛酸铅陶瓷材料作为电控双折射率材料, 实现对相移的控制^[6]; (3) 采用半导体材料砷化

作者简介: 汪相如(1983-), 男, 助理研究员, 研究方向为液晶相控器件、激光波前合束技术。

E-mail: XiangruWang@uestc.edu.cn

收稿日期: 2012-11-09; 收到修改稿日期: 2012-11-28

镓(GaAs)和砷化镓铝(AlGaAs)制备光波导结构,从而实现更加精确的制备工艺和控制^[7]; (4) 利用液晶的电控液晶指向矢空间变化,采用向列型液晶材料,实现电控等效折射率控制,以及对激光光束的1维方向的波束扫描,该技术称为液晶光学相控阵(liquid crystal optical phased array, LCOPA)^[4]。

由于向列相液晶具有驱动电压低、相位调制深度大等特点,使得相控器件具有体积小、重量轻、功耗低、易于和微电子控制电路结合等独特优点,这些独特的性能使得液晶成为高性能光学相控阵器件主要工作方式。本文中基于液晶光学相控阵原理和晶体光学理论,实现双光束成型,并且同时实现各自2维空间扫描。系统采用4个完全相同的1维液晶相控阵组件实现扫描,同时采用λ/4波片和λ/2波片进行波束的切换和生成。

1 液晶相控阵波束理论

依据液晶电控双折射理论,在交流电场驱动下,液晶折射率与驱动电压满足非线性单调函数关系,通过调节电压可以实现对等效折射率的调节。根据晶体光学折射率椭球模型,非常光和寻常光的折射率 n_e 和 n_o 可以采用下面的方式来表示^[8]:

$$\begin{cases} \frac{1}{n_e^2} = \frac{\cos^2 \theta}{n_{\perp}^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_{\parallel}^2} \\ n_o = n_{\perp} \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 是光轴方向与光线的夹角, n_{\perp} 和 n_{\parallel} 分别是折射率椭球的短轴和长轴。

液晶盒是液晶相控阵的核心部件,如图1所示,驱动电极周期宽度为 Λ ,单根电极宽度为 a ,电极间隔为 b ,电极长度为 l ,液晶盒厚度为 d ,电极长度为 l ,总驱动电极数目 $N_{\max} \gg 1$,液晶盒进行沿面取向,等效光轴方向和驱动电极的周期方向一致。光线传输方向为 z 方向,光栅电极方向为 x 方向。

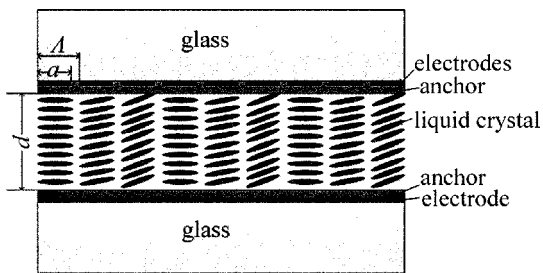


Fig. 1 Schematic diagram of liquid crystal optical phase array
光束通过液晶器件之后,相比寻常光,非常光的

相位延迟量是:

$$\varphi(x) = k_0 \int_0^d (n_e - n_o) dz \quad (2)$$

如果采用1维光栅电极,总驱动电极数目 $N_{\max} \gg 1$,电极周期为 Λ 。在各电极上加上不同电压,使得等效折射率分布满足一定波控条件,对入射光束产生的相位延迟满足波控扫描条件,实现类似于二元光栅对入射偏振光的相位调制。目前常用的常规光学波控算法中有两种方式:周期性闪耀光栅和非周期光栅,这两种方法均能够使得光束的出射方向发生偏转。

(1) 当液晶相控阵采用周期闪耀光栅驱动方式时,驱动相位函数为:

$$\varphi(x) = \left[\sum_{n=1}^N \delta(x - n\Lambda) \exp(-jn\delta_{\varphi}) \right] \otimes \text{rect}(x/\Lambda) \otimes \sum_{m=1}^M \delta(x - mT) \quad (3)$$

式中,自变量 x 是空间坐标位置; N 是单个周期内的电极数; δ_{φ} 是相邻两根电极的相位差、并且相位不产生 2π 跨越;一般情况下,一个周期的总相位延迟量 $N\delta_{\varphi} \leq 2\pi$; M 是相控阵模块的总周期数, $M \cdot N = N_{\max}$;闪耀光栅周期 $T = N\Lambda$; $\text{rect}(x/\Lambda)$ 是宽度为 Λ 的门函数,如图2所示。

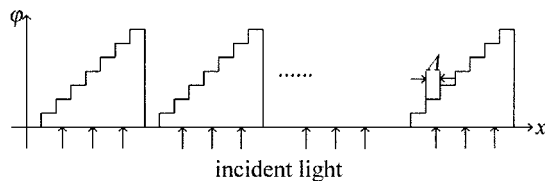


Fig. 2 Schematic diagram of equivalent phase grating formed by periodic voltage

周期闪耀光栅的偏转角度 θ 与波控参量 N 的关系是^[6]:

$$\sin \theta = \frac{\lambda_0}{N\Lambda} \quad (4)$$

(2) 当液晶相控阵采用非周期光栅驱动方式时^[9]:

$$\varphi(x) = \left[\sum_{n=1}^N \delta(x - nd) \exp(-j \cdot \langle n\delta_{\varphi} \rangle) \right] \otimes \text{rect}(x/\Lambda) \quad (5)$$

式中, $\langle n\delta_{\varphi} \rangle$ 是对应相位 $n\delta_{\varphi}$ 与 2π 相除的余数,如图3所示。

非周期光栅波控方案和传统微波相控阵中的常规波控方案完全相同^[6],偏转角度 θ 与波控参量 δ_{φ} 的关系是:

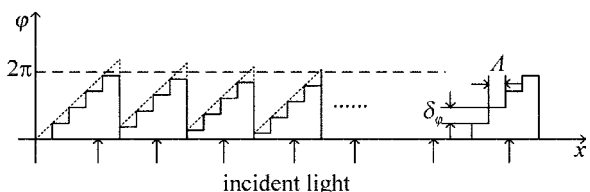


Fig. 3 Schematic diagram of equivalent phase grating formed by non periodic voltage

$$\sin\theta = \frac{\delta_\varphi \lambda_0}{2\pi\Lambda} \quad (6)$$

2 多波束 2 维扫描技术

2.1 多波束成形技术

多波束成型技术是相控阵通信系统中多用户通信最为关键的技术,本文中的方案是依据激光偏振正交无关特性,实现对两个波束的独立控制。将 $\lambda/4$ 波片、第一液晶相控阵、第二液晶光学相控阵 3 个主要组件按照如图 4 所示进行光路布置。以第一液晶光学相控阵光轴方向为 x 方向,以第二液晶光学相控阵光轴方向为 y 方向,建立系统坐标系,作为系统参量的分析。

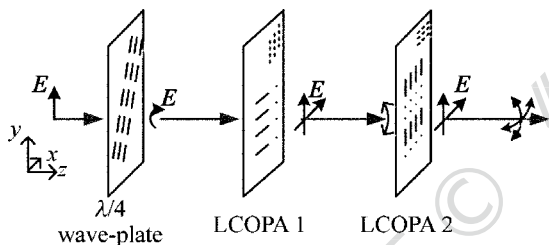


Fig. 4 Schematic diagram of dual beam formation technique

假设入射激光为线偏振光,偏振方向是 y 方向,电场分量为 E_y ,假定归一化幅值为 1,初始相位为 0,即:

$$E_1 = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \cdot \exp(j \cdot 0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于 $\lambda/4$ 波片的光轴方向与 y 方向夹角为 45° ,根据晶体光学的基本原理,透过的激光为圆偏振光(如果入射光束已经圆偏振光,这一步可以忽略):

$$E_2 = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(j \cdot 0) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(j \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

因此形成两个幅度完全相同、相位相差为 $\pi/2$ 的两个独立波束,依据偏振独立特性,为之后的系统集成提供能量相同的两个波束。

采用适当的波控算法,即(3)式或(5)式,分别

对两个液晶相控阵加载波控数据,本文中采用的液晶相控阵参量为:电极周期 $\Lambda = 5 \mu\text{m}$,液晶盒厚度 $d = 11 \mu\text{m}$, $n_\perp = 1.521$, $n_\parallel = 1.746$ 。

当两个相控阵的波控数据均为 0 时,两个波束均不发生偏转,两个偏振方向的光束发生重叠,如图 5a 所示;按照(3)式或(5)式,给予第 1 个相控阵 3° 偏转角的波控数据, y 方向偏振态的波束发生 y 方向偏转,偏转角度为 3° (利用傅里叶透镜远场等价方法将远场偏转角进行焦平面位置等价),如图 5b 所示;按照(3)式或(5)式,给予第 2 个相控阵 1° 偏转角的波控数据, x 方向偏振态的波束发生 x 方向偏转,偏转角度为 1° ,如图 5c 所示;按照(3)式或(5)式,分别给予第 1 个和第 2 个相控阵 3° 和 1° 偏转角的波控数据, y 方向偏振态的波束发生 y 方向偏转,偏转角度为 3° ; x 方向偏振态的波束发生 x 方向偏转,偏转角度为 1° ,如图 5d 所示。通过 4 组波控数据可以发现,系统实现两个波束的成形。

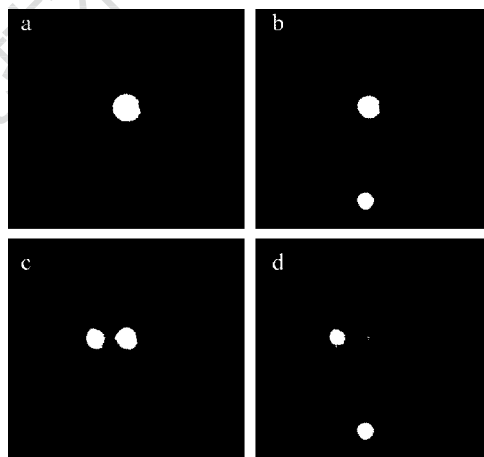


Fig. 5 Experimental images of dual beam formation

2.2 2 维扫描技术

绝大部分相控阵系统都需要具备 2 维扫描能力,受到工艺条件限制,单片透射型相控阵天线一般具备 1 维扫描能力,本文中依据液晶的偏振特性,通过对两个光轴相互垂直放置的相控阵级联,实现对一个线偏振波束进行 2 维偏转。将第一液晶相控阵、 $\lambda/2$ 波片、第二液晶光学相控阵 3 个主要组件按照如图 6 所

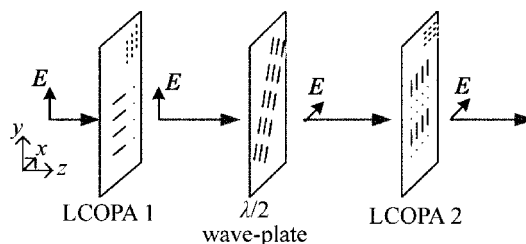


Fig. 6 Schematic diagram of 2-D scan technique

示进行光路布置。以第一液晶光学相控阵光轴方向为 x 方向,以第二液晶光学相控阵光轴方向为 y 方向,建立系统坐标系,作为系统参数的分析。

入射激光为线偏振光,偏振方向是 y 方向,电场分量为 E_y ,假定归一化幅值为 1,初始相位为 0,即:

$$E_1 = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \cdot \exp(-j \cdot 0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

如果将第一液晶相控阵上,采用(3)式或者(5)式的驱动方式进行波控数据加载,则激光束通过第一相控阵之后,激光束的近场电场分量为:

$$E_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \cdot \exp(-j\varphi_1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,第 1 个液晶光学相控阵的双折射相位延迟量分布函数 $\varphi_1 = \varphi_1(y)$,是 y 方向的分布函数,依据偏转角度 θ 与波控参数的关系式(4)式或者(6)式,出射光线发生了 y 方向的偏转,偏转角度为 θ_y 。

随后的 $\lambda/2$ 波片光轴方向是 45° ,如图 5 所示。系统矩阵是:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{2} - i \cos \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} & -i \sin \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} \\ -i \sin \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} + i \cos \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此,通过 $\lambda/2$ 波片激光的电场分量为:

$$E_3 = ME_2 = \begin{bmatrix} -i \cdot \exp(-j\varphi_1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

所以,出射激光束的偏振态发生了 90° 偏转,但是激光束所携带信息没有丢失,并且原本 y 方向偏转分量全部旋转成为 x 方向偏振分量。

系统的第二液晶相控阵,液晶光轴方向是 x 方向,所以出射电场分量为:

$$E_4 = \begin{bmatrix} -i \cdot \exp(-j\varphi_1) \cdot \exp(-j\varphi_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中第 2 个液晶光学相控阵的双折射相位延迟量 $\varphi_2 = \varphi_2(x)$,是 x 方向的分布函数,依据偏转角度 θ 与波控参数的关系式(4)式或者(6)式,出射光线发生了 x 方向的偏转,偏转角度为 θ_x 。

如果忽略“-i”相位常数因子后,整个系统的归

一化透射光场是:

$$E(x,y) = \exp[-j\varphi_1(y)] \cdot \exp[-j\varphi_2(x)] \quad (14)$$

根据傅里叶光学理论,远场激光光束 $E_r(\theta_x, \theta_y)$ 可以通过出射光波光场分布函数 E_4 的空间 2 维傅里叶变换得到,即:

$$E_r(\theta_x, \theta_y) = \mathcal{F}_2\{E_{4x}(x,y)\} = \mathcal{F}_1\{\exp[-j\varphi_2(x)]\} \cdot \mathcal{F}_1\{\exp[-j\varphi_1(y)]\} \quad (15)$$

式中, (θ_x, θ_y) 分别是远场光束与 z 轴在 x 方向和 y 方向在空间的偏转角。根据 2 维傅里叶变换的性质,远场光束的偏转角度 θ_x 仅由 $\varphi_2(x)$ 决定, θ_y 仅由 $\varphi_1(y)$ 来决定。

结合激光束传输和偏转原理,采用两个完全相同的第一液晶相控、第二液晶相控阵,分别进行各自独立的波控数据进行驱动,通过波控参数 N 或者 δ_φ 进行相位控制,产生相位分布分别是 $\varphi_1(y)$ 和 $\varphi_2(x)$,通过中间放置的 $\lambda/2$ 波片对于激光偏振态的旋转变换,通过系统作用后,出射光束能够实现 2 维空间角度 (θ_x, θ_y) 偏转,进行 2 维波束扫描,扫描角度由(4)式或(6)式决定。

当两个相控阵的波控数据均为 0 时,波束不发生偏转,如图 7a 所示;按照(3)式或(5)式,给予第一个相控阵 3° 偏转角的波控数据,波束发生 y 方向偏转,偏转角度为 3° ,如图 7b 所示;按照(3)式或(5)式,给予第 2 个相控阵 1° 偏转角的波控数据,波束发生 x 方向偏转,偏转角度为 1° 如图 7c 所示;按照(3)式或(5)式,分别给予第 1 个和第 2 个相控阵 3° 和 1° 偏转角的波控数据,波束在 x 方向和 y 方向均发生了偏转,偏转角度分别为 1° 和 3° ,如图 7d 所示。通过 4 组波控数据,可以发现系统实现单个波束的 2 维扫描。

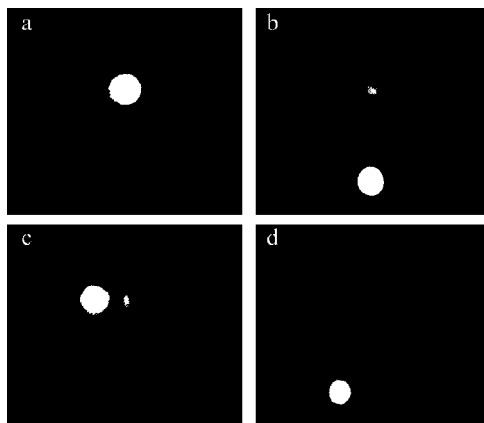


Fig. 7 Experimental images of 2-D scan

2.3 双波束 2 维扫描技术

依据第 2.1 节和第 2.2 节中的双波束成形技术和 2 维扫描技术,将 4 个液晶相控阵、1 个 $\lambda/4$ 波片、1 个 $\lambda/2$ 波片依据如图 8 中的方式进行级联。

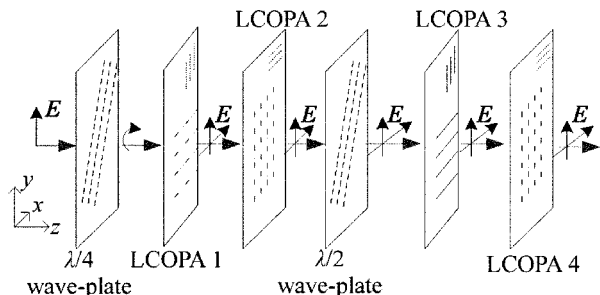


Fig. 8 Schematic diagram of dual beam 2-D scan technique

依据双波束成形技术和 2 维扫描技术的分析结论,经过如图 6 所示的系统之后,系统出射激光的近场电场分量是:

$$E_7 = \begin{bmatrix} \exp[-j\varphi_4(x)] \cdot \exp[-j\varphi_1(y)] \\ \exp[-j\varphi_2(x)] \cdot \exp[-j\varphi_3(y)] \end{bmatrix} \quad (16)$$

在远场区域,电场分量的两个偏振方向分量 $E_7|_{x,y}$,不会发生相互干涉的作用,因此两个波束能够相互独立,形成各自的远场偏转,满足(15)式的远场干涉结论。

3 结论

根据 1 维液晶相控阵对光束偏转的特点,级联多个液晶相控阵组件,并且利用 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波

片分别对光束进行偏振态的变换,实现了双波束成形;采用周期闪耀光栅波控算法或者非周期光栅波控算法进行波位控制,从而实现了双波束、2 维扫描的空间波束控制和扫描系统。

参 考 文 献

- [1] ZHENG Ch Y, YANG R F, LIU Y, *et al.* Study about deflection wavefront measurement approach of liquid-crystal grating phased array [J]. *Laser Technology*, 2012, 36 (5): 645-648 (in Chinese).
- [2] REN G J, ZHAO J L, YAO J Q. Study on birefringence effect of liquid crystal in communication [J]. *Laser Technology*, 2012, 35 (2): 242-244 (in Chinese).
- [3] LI M, AI Y, CAO Y. Research of fine tracking servo system for FSO terminal [J]. *Laser Technology*, 2009, 33 (3): 262-265 (in Chinese).
- [4] McMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, *et al.* Optical phased array technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2):268-298.
- [5] MEYER R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalite crystal [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 613-616.
- [6] THOMAS J, FAINMAN Y. Programmable diffractive optical element using a multichannel lanthanum modified lead zirconate titanate phase modulator [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(13): 1510-1512.
- [7] REINHART V, HOUDRE R. Spatial beam steering with an AlGaAs integrated phased array [J]. *Applied Optics*, 1993, 32 (18): 3220-3232.
- [8] HUANG Z Q. Principle of liquid crystal display [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 39-60 (in Chinese).
- [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): 01230011 (in Chinese).