

基于液晶相控阵列的激光相干合成方法

杨镇铭 孔令讲 肖锋 陈建

电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 611731

摘要 结合相干合成理论与液晶相控阵波束控制技术,提出了一种基于液晶相控阵列的激光相干合成方法,可以获得一维方向上一定角度范围内具有任意波束指向的合成激光。阐明了相干合成理论,并从波束指向、合成光强和波束质量三方面对合成激光进行研究。研究发现,波束指向误差的产生原因是阵列干涉项的极大值非连续,提出了通过增大阵列间距减小波束指向误差的办法,筛选得到了使合成激光的峰值光强与理论值相符的特殊波束指向点,即电极干涉项与阵列干涉项的极大值重合点。仿真表明,这种相干合成方法对激光的波束质量有提高作用。最后通过基于 1×3 、 2×2 液晶相控阵列的相干合成实验得到了波束指向分别为 0° 、 0.17° 、 0.34° 的合成激光,证明了理论分析的正确性和基于液晶相控阵列的激光相干合成方法的可行性。

关键词 激光光学;相干合成;任意波束指向;液晶相控阵;峰值光强;波束质量

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.121402

Coherent Beam Combination Based on Array of Liquid Crystal Optical Phased Arrays

Yang Zhenming Kong Lingjiang Xiao Feng Chen Jian

College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract Combing the theory of coherent beam combination (CBC) and the technology of beam steering by liquid crystal optical phased array (LCOPA), a method of CBC based on array of LCOPA array is proposed in this article. On the basis of explaining this kind of CBC theory, combined beam is researched from three aspects: beam direction, intensity and beam quality. Analysis results indicate that the reason for error of beam direction is the discontinuity of maximum points of array interference factor. Based on the results a measure to induce error by adding array space is adopted. Then some special beam directions at which the peak intensity matches theoretical value are screened, which are the coincident points of maximum values of electrode interference factor and array interference factor. Furthermore, numerical simulation indicates that this CBC method makes a certain contribution on improving beam quality. Finally, experiments of CBC based on 1×3 and 2×2 array of LCOPA are carried on and combined beams with beam directions of 0° 、 0.17° 、 0.34° are obtained. This experiment proves the validity of theory analysis and the feasibility of CBC based on array of LCOPA.

Key words laser optics; coherent beam combination; arbitrary beam direction; liquid crystal optical phased array; peak intensity; beam quality

OCIS codes 140.3298; 010.3310; 230.1950; 140.3295; 140.3300

1 引言

多束相干激光通过相干合成可以获得单光束输出。自1964年首次出现以来,激光合成技术随着激光器的发展不断取得突破,并在军事与民用领域均得到有效的应用。目前激光合成技术的研究热点是相干激光

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-07-18; 网络出版日期: 2014-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(61178068)

作者简介: 杨镇铭(1989—),男,硕士研究生,主要从事液晶相控阵激光雷达和阵列信号处理等方面的研究。

E-mail: herosca@163.com

导师简介: 孔令讲(1974—),男,博士,教授,主要从事新体制雷达系统与雷达信号处理等方面的研究。

E-mail: ljkong@uestc.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的相位锁定,技术手段包括主动锁相(MOPA)^[1-2]与被动锁相(自组织相干、自同步相干、外腔耦合)^[3-4]。主要目的是通过激光的锁相输出在远场的特定位置进行相干合成,其缺陷是合成激光的波束指向固定,不具有灵活性。但是在激光雷达和空间光通信领域,为了进行空域扫描,要求激光不仅要具有高功率,还要有灵活的波束指向。针对此种应用需求,提出了一种基于液晶相控阵阵列的激光相干合成方法,能够在一定范围内获得具有任意波束指向的合成激光。

光学相控阵技术兴起于20世纪90年代^[5],其原理是通过光学器件对激光进行相位调制,实现波束的偏转。在美国政府的资助下,美国的公司和研究机构相继研制出许多基于化学晶体材料的移相器件,其中液晶相控阵由于其低电压、小尺寸和高偏转精度的优势逐渐成为研究热点^[6]。进入21世纪以来国内的大学和研究所开始对液晶相控阵进行研究,并取得了一系列成果,如哈尔滨工业大学在液晶空间光调制的原理及对光束进行方向和强度的快速程序控制方面进行了前期研究^[7];电子科技大学制作出包含1000根电极的液晶相控阵并实现了激光的双波束偏转^[8]等。

本文构建了基于液晶相控阵阵列的激光相干合成方法的原理和结构,并从波束指向、合成光强和波束质量三方面对合成激光进行了研究,最后进行了基于 1×3 和 2×2 液晶相控阵阵列的激光相干合成实验,以验证这种相干合成方法原理的正确性和理论的可行性,研究结果为液晶相控阵在相干合成领域的进一步应用提供了一定的参考。

2 理论基础

液晶相控阵波控技术的原理是液晶的电控双折射效应:对液晶表面加载电压,外加电场改变液晶的双折射率,导致通过液晶的激光的相位发生改变,衍射激光偏离入射方向,从而实现激光的偏转。这种波控技术的核心器件是液晶相控阵,它由液晶盒以及在液晶盒表面平行分布的电极组成。每根电极及其控制的液晶区域组成一个移相单元,相邻移相单元具有的相位延迟差 $\Delta\varphi$ 满足

$$\Delta\varphi = \frac{d \sin \theta_0}{\lambda} \cdot 2\pi, \quad (1)$$

式中 d 为电极宽度, λ 为入射激光的波长, θ_0 为激光经过液晶相控阵后的偏转角度。

基于液晶相控阵阵列的激光相干合成方法利用液晶相控阵阵列作为相干激光的波束控制器件,阵列由多个液晶相控阵在垂直激光入射方向的平面内按矩形排列组成,通常为 $1 \times N$ 或者 $M \times N$ 的形式。每束准直激光对准一个液晶相控阵垂直入射。对液晶相控阵阵列中的所有液晶相控阵加载相同的目标电压 D_n ,使相干激光偏转相同的目标角度 θ_0 ,通过各液晶相控阵的衍射激光在 θ_0 方向相干叠加,从而得到具有 θ_0 波束指向的合成激光。设阵列中第 n 束衍射激光的复振幅分布为 $E_n(\theta_0)$,则合成激光的复振幅分布为

$$E_{co}(\theta_0) = \sum_{n=1}^N E_n(\theta_0), \quad (2)$$

式中 N 为液晶相控阵阵列包含的液晶相控阵数量。改变目标电压 D_n 使液晶相控阵中相邻移相单元实现的相位延迟差 $\Delta\varphi$ 改变,由(1)式可知相干激光的偏转角度 θ_0 发生改变,即可获得不同波束指向的合成激光 $E_{co}(\theta_0)$ 。

基于 $1 \times N$ 液晶相控阵阵列的激光相干合成结构如图1所示,阵列由 N 个液晶相控阵一维排列组成,液晶相控阵沿 x_0 方向依次编号为 $C_1, C_2, \dots, C_n, \dots, C_N$ 。相邻液晶相控阵的中心距离为 h ;每个液晶相控阵包含 M 根平行电极,电极宽度为 d ,孔径宽度 $D = Md$;入射激光依次编号为 $L_1, L_2, \dots, L_n, \dots, L_N$,激光的入射方式为 L_n 垂直入射 C_N 。

设所需合成激光的波束指向为 θ_0 ,则 N 束相干激光经过 $1 \times N$ 液晶相控阵阵列后均偏转 θ_0 角度。根据(1)式得到相邻移相单元的相位延迟差为 $\Delta\varphi$,对于单个液晶相控阵来说,出射激光的调制相位面呈阶梯形分布,经 2π 置位后如图2所示。得到阵列中第一个液晶相控阵 C_1 的出射激光的相位面表达式为

$$R_{C_1}(x_0) = \sum_{k=0}^{M-1} \text{rect}\left(\frac{x_0 - kd - d/2}{d}\right) \cdot \exp(jk\Delta\varphi), \quad (3)$$

式中 $\text{rect}()$ 为矩形函数。

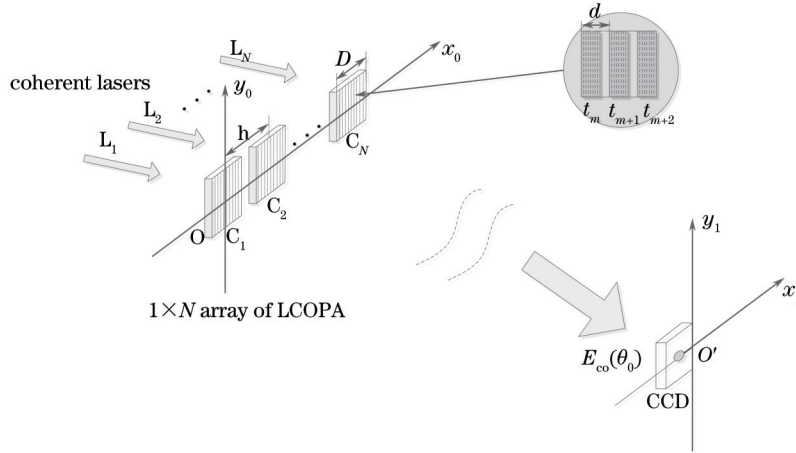


图1 1×N 液晶相控阵列激光相干合成结构
Fig.1 Structure of CBC based on 1×N array of LCOPA

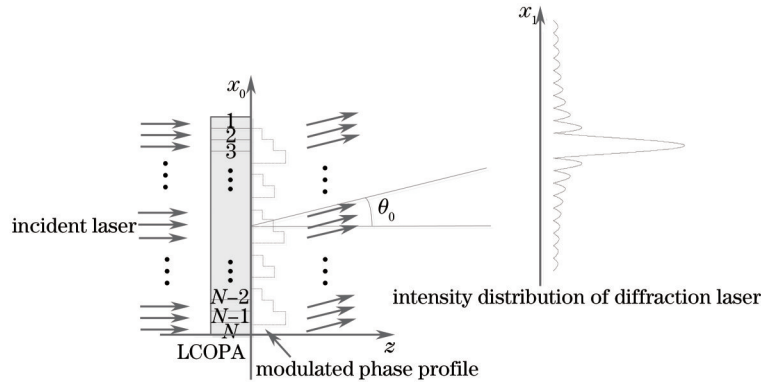


图2 液晶相控阵对激光的偏转过程
Fig.2 Beam steering by LCOPA

激光在空间的传播是一个衍射过程, 一般用夫琅禾费衍射公式描述激光通过液晶相控阵后在空间的传播, 计算时对激光的近场复振幅分布进行傅里叶变换得到远场复振幅分布^[9]。设入射激光具有单位振幅且可看作准直光, 阵列中 C_1 的衍射激光偏转角为 θ_0 , 其复振幅分布表达式

$$\begin{cases} E_{C_1}(\theta_0) = E_{\text{dif}} \cdot E_{\text{int1}}, \\ E_{\text{dif}} = \exp\left(-i\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi \sin \theta}{\lambda}}, \\ E_{\text{int1}} = \exp\left[-i(N-1) \frac{\pi d(\sin \theta - \sin \theta_0)}{\lambda}\right] \cdot \frac{\sin\left[\frac{\pi M d(\sin \theta - \sin \theta_0)}{\lambda}\right]}{\sin\left[\frac{\pi d(\sin \theta - \sin \theta_0)}{\lambda}\right]}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 E_{dif} 为单缝衍射项, 表示激光通过液晶相控阵移相单元后的衍射过程; E_{int1} 为电极干涉项, 表示液晶相控阵各移相单元的出射激光之间的干涉过程。 θ 为远场视角域。

在 $1 \times N$ 阵列平面内, 以 C_1 为参考点, C_n 相对 C_1 只相差位移 $(n-1)h$, 根据空间傅里叶变换的位移-相移定理得到 C_n 的衍射激光的复振幅分布为

$$E_{C_n}(\theta_0) = E_{C_1}(\theta_0) \cdot \exp[-i2\pi u(n-1)h], \quad (5)$$

式中 u 表示空间频率, $u = \frac{\sin \theta}{\lambda}$ 。

将(5)式代入(2)式得到合成激光的复振幅表达式为

$$E_{co}(\theta_0) = E_{c_1}(\theta_0) \cdot \exp[-i(N-1)\pi u d] \cdot \frac{\sin(N\pi u h)}{\sin(\pi u h)}. \quad (6)$$

将(4)式代入(6)式得到基于液晶相控阵阵列的激光相干合成的合成激光的复振幅表达式为

$$E_{co}(\theta_0) = E_{dif} \cdot E_{im1} \cdot E_{im2}, \quad (7)$$

式中 E_{im2} 为阵列干涉项, 表示液晶相控阵阵列中的多个液晶相控阵出射激光之间的干涉过程,

$$E_{im2} = \exp[-i(N-1)\pi u d] \cdot \frac{\sin(N\pi u h)}{\sin(\pi u h)}. \quad (8)$$

$$I = E_{co}(\theta_0) \cdot E_{co}^*(\theta_0).$$

3 数值模拟

3.1 合成激光的波束指向分析

基于光纤阵列的相干合成获得的合成激光具有固定的波束指向, 在阵列平面与激光传播方向垂直的情况下, 合成激光的波束指向与光纤方向一致, 为远场视角域的 0° 方向, 改变合成激光的波束指向只是机械改变光纤朝向。基于液晶相控阵阵列的相干合成方法获得的合成激光, 其波束指向由激光通过液晶相控阵后的偏转角度 θ_0 决定。液晶相控阵的相位延迟 $\Delta\varphi$ 与外加电压的关系由液晶特性曲线描述, 是液晶的固有性质。改变目标电压, 使相干激光偏转不同的角度, 从而得到具有不同波束指向的合成激光。

10束相干激光通过 1×10 液晶相控阵阵列进行相干合成, 得到波束指向 $\theta_0 = -0.02^\circ$ 、 0° 、 0.02° 、 0.03° 的合成激光, 如图3所示。仿真参数设置如表1所示。

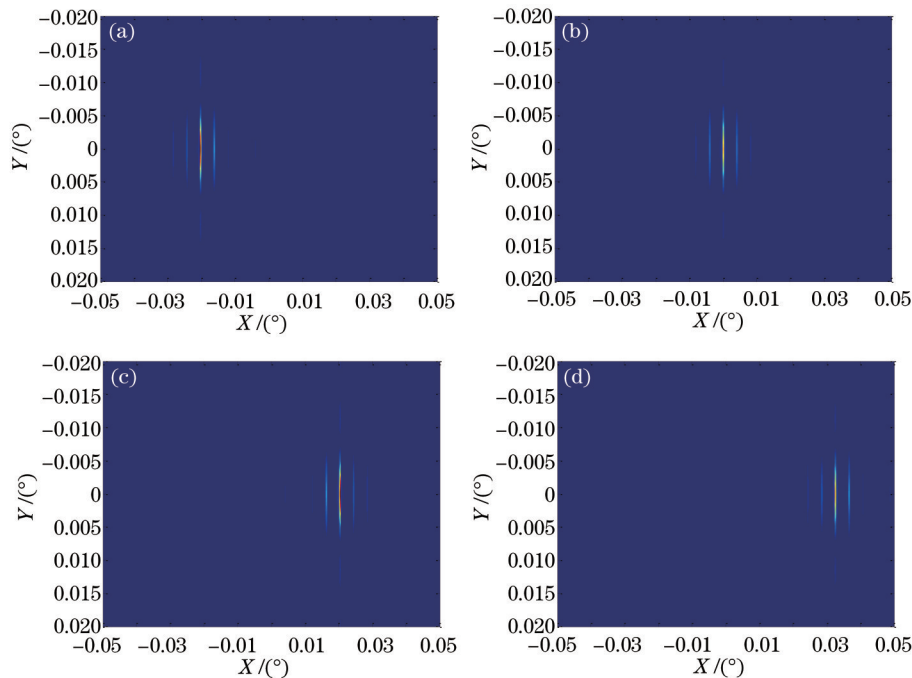


图3 波束指向 $\theta_0 = -0.02^\circ$ 、 0° 、 0.02° 、 0.03° 的合成激光。(a) $\theta_0 = -0.02^\circ$; (b) $\theta_0 = 0$; (c) $\theta_0 = 0.02^\circ$; (d) $\theta_0 = 0.03^\circ$

Fig.3 Combined beam with beam direction of $\theta_0 = -0.02^\circ$ 、 0° 、 0.02° 、 0.03° . (a) $\theta_0 = -0.02^\circ$; (b) $\theta_0 = 0$; (c) $\theta_0 = 0.02^\circ$; (d) $\theta_0 = 0.03^\circ$

3.1.1 波束指向数量

合成激光的波束指向与单束激光的偏转角度一致。为保证合成激光具有较大的峰值光强和避免栅瓣的影响, 相位延迟差满足 $\Delta\varphi \leq \pi$, 代入(1)式得到单束激光的最大偏转角度 $\theta_{max} = 6.108^\circ$, 所以合成激光的波束指向变化范围为 $[-\theta_{max}, \theta_{max}]$ 。在量化位数足够的情况下, 液晶相控阵可以实现 $[0, \pi]$ 范围内的任意 $\Delta\varphi$, 因此合成激光可以取得 $[-\theta_{max}, \theta_{max}]$ 内的任意波束指向。由于相干合成包含单缝衍射过程, E_{dif} 随 θ 的增大而减小, 因此峰值光强随偏转角度增大逐渐降低; 相干合成还包括干涉过程, E_{im2} 随角度呈周期变化, 因此合

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters

Simulation parameters	Value
Laser type	Collimated laser
Wavelength	1.064 μm
Number of electrodes	1920
Electrode spacing	5 μm
Number of LCOPAs	10
LCOPA spacing	1.5 cm

成激光的峰值光强在一定范围内震荡,如图4所示。由于波束指向在正负区间内对称分布,以下讨论只针对 $[0, \theta_{\max}]$, 相关结论均可推广到 $[-\theta_{\max}, 0]$ 。

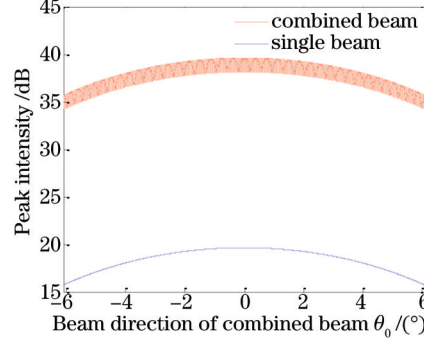


图4 合成激光的波束指向分布及对应的峰值光强分布

Fig.4 Beam direction and corresponding peak intensity distribution of combined beam

3.1.2 波束指向准确度

基于液晶相控阵列的激光相干合成方法可以分解为三个过程:激光通过液晶相控阵移相单元的单缝衍射过程,液晶相控阵移相单元出射激光之间的多缝干涉过程以及液晶相控阵列之间的多缝干涉过程,如(7)式所示。其中 E_{dif} 为 sinc 函数,最大值点为 $\theta_{E_{\text{dif}}-\max} = 0^\circ$, 在 $[-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$ 范围内 E_{dif} 随 $|\theta|$ 增加而减小; E_{int1} 与 E_{int2} 均为周期函数,可以周期性地取得极大值点。其中 E_{int1} 的极大值点 $\theta_{E_{\text{int1}}-\max}$ 满足

$$\sin(\theta_{E_{\text{int1}}-\max}) = m\lambda/d + \sin \theta_0, m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (9)$$

E_{int2} 的极大值点 $\theta_{E_{\text{int2}}-\max}$ 满足

$$\sin(\theta_{E_{\text{int2}}-\max}) = n\lambda/h, n=0, \pm 1, \pm 2, \dots. \quad (10)$$

合成激光的峰值光强点即为实际波束指向 θ_{real} 。当 $\theta_0 = \theta_{E_{\text{int2}}-\max}$ 时, E_{int1} 和 E_{int2} 的极大值点重合,合成激光在 θ_0 处具有峰值光强,此时 $\theta_{\text{real}} = \theta_0$, 波束指向没有误差;当 $\theta_0 \neq \theta_{E_{\text{int2}}-\max}$ 时, E_{int1} 和 E_{int2} 的极大值点不重合,当 $\theta_0 \in [\theta_{E_{\text{int2}}-\max}, \theta_{E_{\text{int2}}-\max} + T_{\text{int2}}]$, 合成激光的峰值光强点 $\theta_{\text{real}} = \theta_{E_{\text{int2}}-\max}$, 此时 $\theta_{\text{real}} \neq \theta_0$, 实际波束指向与目标波束指向之间具有波束指向误差,分布如图4所示。误差以 0° 为对称中心在 $+0.002^\circ$ 与 -0.002° 之间周期摆动,变化周期为 0.004° , 与 $\theta_{E_{\text{int2}}-\max}$ 的变化周期 $\Delta\theta_{E_{\text{int2}}-\max}$ 一致,说明以上关于误差原因的分析是合理的。

为了提高波束指向精确度,从提高 E_{int2} 的极大值点的分布密度出发,增大阵列间距 h 。由(9)式可得 $\Delta\theta_{E_{\text{int2}}-\max}$ 减小,合成激光的波束指向精确度提高。阵列间距 $h=1.5$ cm 时合成激光的波束指向误差如图5所示,误差范围为 $[-0.0006^\circ, 0.0006^\circ]$, 变化周期为 0.001° , 与 $h=5$ cm 时的 $\Delta\theta_{E_{\text{int2}}-\max}$ 相同,如图6所示,波束指向最大误差减小了 66%。

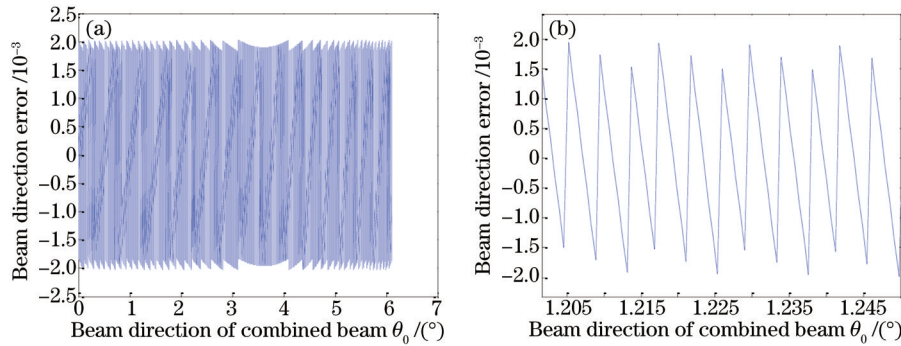


图5 实际波束指向与目标波束指向的误差,阵列间距 $h = 1.5$ cm。(a) $[0, \theta_{\max}]$ 范围的波束指向误差;
(b) $[1.203^\circ, 1.249^\circ]$ 范围的波束指向误差

Fig.5 Error between actual beam direction and ideal beam direction when array spacing $h = 1.5$ cm .

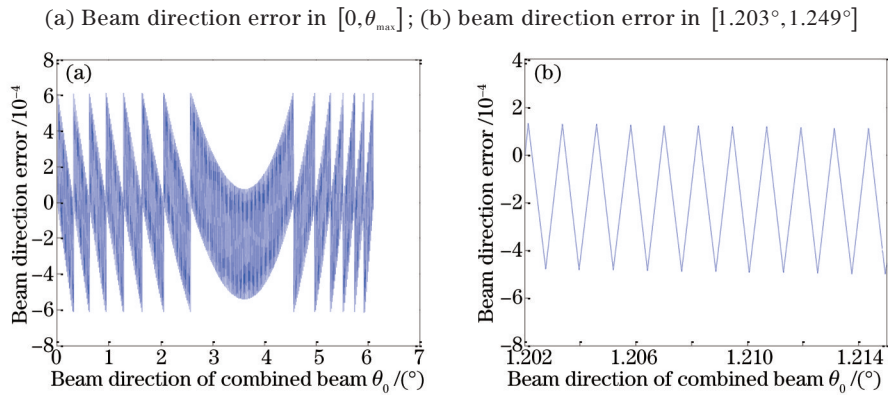


图6 实际波束指向与目标波束指向的误差,阵列间距 $h = 5$ cm。(a) $[0, \theta_{\max}]$ 内的波束指向误差;
(b) $[1.202^\circ, 1.215^\circ]$ 内的波束指向误差

Fig.6 Error between actual beam direction and ideal beam direction when array spacing $h = 5$ cm.

(a) Beam direction error in $[0, \theta_{\max}]$; (b) beam direction error in $[1.202^\circ, 1.215^\circ]$

3.2 合成激光的峰值光强分析

相干合成可以提高激光的光强及功率,由(2)式可知合成激光的峰值光强理论上可达到单束激光的 N^2 倍。合成激光在不同波束指向时峰值光强的理论值与实际值如图7所示,仿真区间在 $[-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$ 内随机选取为 $[3^\circ, 3.02^\circ]$ 。峰值光强以 $\Delta\theta_{E_{\text{int}2-\text{max}}}$ 为周期呈周期性变化,在 $\theta_0 = \theta_{E_{\text{int}2-\text{max}}}$ 处取得最大峰值光强。波束指向 $\theta_0 = 3.001^\circ, 3.005^\circ, 3.009^\circ, 3.013^\circ, 3.017^\circ$ 时,峰值光强满足 $I_{\text{co}} = N^2 I_{\text{single}}$,即当 $\theta_0 = \theta_{E_{\text{int}2-\text{max}}}$ 时, $E_{\text{int}1}$ 与 $E_{\text{int}2}$ 均能取得极大值,峰值光强实际值与理论值相符 I_{single} 为单束激光光强。但是当 $\theta_0 \neq \theta_{E_{\text{int}2-\text{max}}}$ 时, $E_{\text{int}1}$ 与 $E_{\text{int}2}$ 在 θ_0 不能同时取得极大值, $I_{\text{co}} < N^2 I_{\text{single}}$,峰值光强实际值小于理论值。为了使合成激光的峰值光强较高且保持稳定,波束指向 θ_0 应尽量选取 $\theta_{E_{\text{int}2-\text{max}}}$ 。

3.3 合成激光的波束质量分析

作为统一的光束质量标准,光束质量因子 M^2 综合考虑了激光的近场和远场特性^[10]。 M^2 因子定义为

$$M^2 = \frac{D_r \cdot \theta_{wr}}{D_i \cdot \theta_{wi}},$$

式中 D_r 和 θ_{wr} 分别表示实际光束的光腰半径与远场发散角, D_i 和 θ_{wi} 分别表示理想光束的光腰半径与远场发散角。理想光束一般选取基模高斯光束,其 $M^2 = 1$,可得实际光束的 $M^2 = \frac{\pi D_i \theta_{wr}}{4\lambda}$ 。

具有不同偏转角度的激光经过相干合成前后的 M^2 因子分布如图8所示,相干合成后激光的 M^2 因子由 1.571~1.580 减小到 1.513~1.528,说明液晶相控阵的出射激光与合成激光均接近于基模高斯光束。经过相干合成后波束质量略有提高,其原因是相干合成可以减小波束宽度引起远场发散角变窄,变窄的程度超过孔径增大的程度,导致 M^2 因子减小。对于合成激光来说,随着波束指向的增大,波束质量具有降低的趋势,

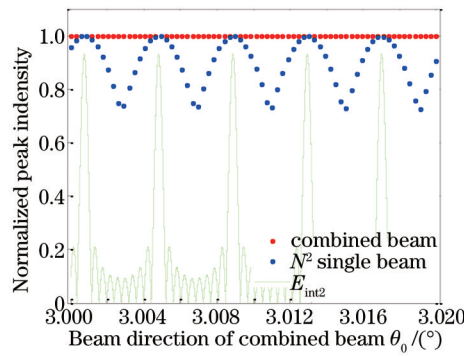


图7 不同角度时单束激光与合成激光的归一化峰值光强,红色代表单束激光峰值光强的 N^2 倍,蓝色代表合成激光的峰值光强,绿色表示阵列干涉项 E_{int2}

Fig.7 Normalized peak intensity of combined beam and single beam with different beam directions, where red represents N^2 times peak intensity of single beam, blue represents peak intensity of combined beam, green represents array interference factor E_{int2}

这是由于随着偏转角度的增大,单个液晶相控阵的出射激光波束质量逐渐降低,继而导致相干合成的效果逐渐变差。

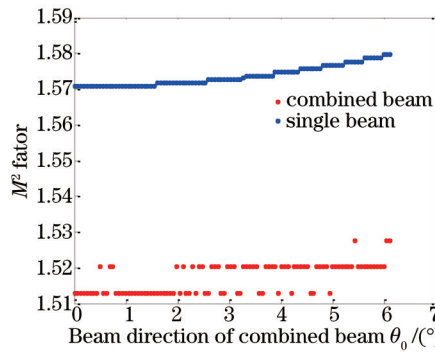


图8 不同波束指向时单束激光与合成激光的 M^2 因子分布

Fig.8 M^2 factor of single beam and combined beam with different beam directions

4 实验分析

在理论分析与数值模拟的基础上,进行了基于 1×3 与 2×2 液晶相控阵阵列的相干合成实验。实验采用的液晶相控阵包含 1920 根电极,电极宽度为 $5 \mu\text{m}$,液晶透过率为 81.43%,阵列中相邻液晶相控阵的间距为 3 cm。对种子激光源分束获得 4 束相干激光,每束激光对准一个液晶相控阵垂直入射,阵列出射激光经

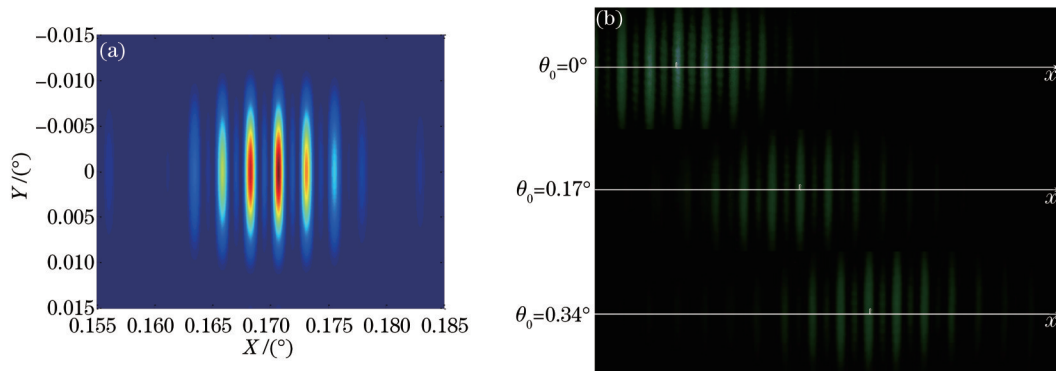


图9 基于 1×3 液晶相控阵阵列的激光相干合成仿真结果和实验结果。(a) 仿真结果, $\theta_0 = 0.17^\circ$;

(b) 实验结果, $\theta_0 = 0^\circ, 0.17^\circ, 0.34^\circ$

Fig.9 Simulation and experimental results of CBC based on 1×3 array of LCOPA. (a) Simulation result, $\theta_0 = 0.17^\circ$;

(b) experimental results, $\theta_0 = 0^\circ, 0.17^\circ, 0.34^\circ$

透镜聚焦后得到合成激光的远场分布,通过电荷耦合器件(CCD)对合成激光进行采样。基于实验条件的仿真与实验结果分别如图9和图10所示。

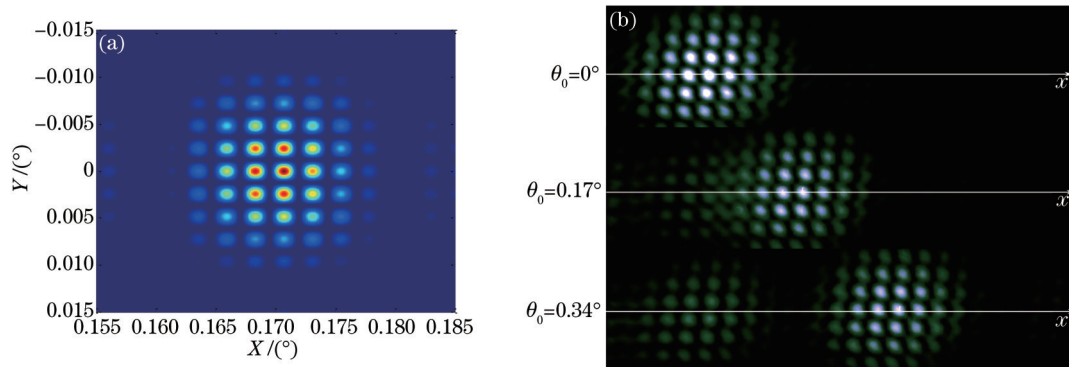


图10 基于 2×2 液晶相控阵列的激光相干合成仿真结果和实验结果。(a) 仿真结果, $\theta_0 = 0.17^\circ$;
(b) 实验结果 $\theta_0 = 0^\circ, 0.17^\circ, 0.34^\circ$

Fig.10 Simulation and experimental results of CBC based on 2×2 array of LCOPA. (a) Simulation result $\theta_0 = 0.17^\circ$;
(b) experimental results $\theta_0 = 0^\circ, 0.17^\circ, 0.34^\circ$

通过实验得到了波束指向 $\theta_0 = 0^\circ, 0.17^\circ, 0.34^\circ$ 的合成激光。激光的出射阵列不同,合成激光呈现不同的光强分布。经过一维液晶相控阵列进行相干合成后,合成激光呈现相干条纹形状,经过二维液晶相控阵列进行相干合成后,合成激光呈现出相干点阵形状,说明合成激光的分布与对应的阵列排布具有相似的特性。当合成激光的波束指向不为零度时,零点位置的激光变暗,偏转点位置的激光变亮。且偏转点 θ_0 位置的激光亮度随偏转角度的增大而变暗,说明合成激光的光强随偏转角度的增大而减小,与图4的仿真结果相符。实验结果与仿真结果的光强分布基本相同,说明基于液晶相控阵列的激光相干合成方法是可行的。由于实验设备的限制,相邻液晶相控阵的间距较大,导致合成激光的栅瓣较多,这一点可以通过改进设备,减小相邻液晶相控阵的尺寸、增大占空比来实现。

5 结 论

结合液晶相控阵波束控制技术和相干合成理论,提出了一种基于液晶相控阵列的激光相干合成方法,可以得到一维方向上 $[-6.108^\circ, 6.108^\circ]$ 范围内具有任意波束指向的合成激光。在构建相干合成原理和结构的基础上,从波束指向、合成光强与光束质量三方面对此种相干合成方法进行了研究。研究表明,波束指向误差是由于阵列干涉项的极大值点不连续引起的,阵列间距从 1.5 cm 增大到 5 cm 时波束指向的最大误差减小了 66% ;当波束指向与阵列干涉项的极大值点重合时合成激光的峰值光强是单束激光的 N^2 倍,与理论值相符,在此角度进行合成后可以获得最大峰值光强,而在其他角度进行相干合成后峰值光强均小于理论值。相干合成略微提高激光的波束质量,合成激光的波束质量随波束指向的增大而降低。最后通过 1×3 和 2×2 液晶相控阵列的激光相干合成实验,得到了波束指向分别为 $0^\circ, 0.17^\circ, 0.34^\circ$ 的合成激光,验证了理论分析的正确性和基于液晶相控阵列的激光相干合成方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- 2 Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, *et al.*. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. Opt Lett, 2010, 35(10): 1542-1544.
- 3 Tsaiwei Wu, Weizung Chang, Almantas Galvanauskas, *et al.*. Model for passive coherent beam combining in fiber laser arrays[J]. Opt Express, 2009, 17(22): 19509-19518.
- 4 Wang Baishi, Erik Mies, Monica Minden, *et al.*. All-fiber 50 W coherently combined passive laser array[J]. Opt Lett, 2009, 34(7): 863-865.
- 5 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.
- 6 Kong Lingjiang, Zhu Ying, Song Yan, *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.
- 7 Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying, *et al.*. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1497-1502.
张健, 徐林, 吴丽莹, 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(8): 1497-1502.
- 8 Pan F, Kong L J, Yang X B, *et al.*. Dual beam deflection of liquid crystal optical phased array[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10 (s2): 20502.
- 9 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 267-276.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 267-276.
- 10 Siegman A E. High-power laser beams: defining, measuring and optimizing transverse beam quality[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1993. 758-765.