

## 一维光纤相控阵多光束快速扫描

王晓斌<sup>1</sup>, 刘春波<sup>2</sup>, 刘如愿<sup>1</sup>, 张霖<sup>2</sup>, 曹阳<sup>2</sup>, 韩香娥<sup>2\*</sup><sup>1</sup>西安电子科技大学通信工程学院, 陕西 西安 710071;<sup>2</sup>西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

**摘要** 针对激光束快速扫描需求,研究基于光纤相控阵的多光束扫描。采用“先校正后扫描”方式,利用高速铌酸锂相位调制器,基于随机并行梯度下降算法,研制了相位控制电路系统,构建了  $1 \times 16$  路光纤相控阵原理实验系统,进行了光束相干合成与多光束扫描实验。测试结果表明,算法单次迭代时间不超过  $10 \mu\text{s}$ ,相干合成光束主瓣光强峰值旁瓣比达  $24.7 \text{ dB}$ (理论极限  $26.4 \text{ dB}$ ),扫描范围与理论值吻合。该  $16$  路光纤相控阵系统在实现高质量相干合成的同时,还可实现  $500 \text{ kHz}$  相干合成光束扫描。

**关键词** 激光光学; 光纤相控阵; 光纤激光; 光束扫描; 相干光束合成; 相位调制器

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1705001

## 1 引言

对光束进行快速和精准扫描是自由空间激光应用中的关键技术。基于电光或者热光式的光学相控阵克服机械式扫描<sup>[1]</sup>的局限,可实现无惯性光束扫描和灵活的波束指向。目前常用的光学相控材料有液晶、半导体波导(如 Si、InP 等)、锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)和铌酸锂晶体(LiNbO<sub>3</sub>)等,可实现数 Hz 至 GHz 的扫描速度(扫描速度定义为光束在任意两个角度之间的切换速度)。目前,液晶型光学相控阵的相控单元多,扫描分辨率高,但响应速度慢<sup>[2]</sup>。基于微电子工艺的半导体波导具有较高的电光调制速度和大视场的光束扫描优势,但目前还处于器件研发阶段,并且输出功率有限<sup>[3-7]</sup>。LiNbO<sub>3</sub> 和 PZT 多应用于分立单元光学相控阵中,文献[8]将 PZT 应用于相干合成光束扫描,但系统响应速度有限,扫描速度较慢。LiNbO<sub>3</sub> 具有 GHz 的响应速度<sup>[9]</sup>,并且其制作工艺成熟,在高功率光纤激光相干合成<sup>[10-12]</sup>中得到广泛应用,其应用还可拓展到光束扫描领域。

基于 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器的光纤相控阵(OFPA)在实现高功率激光合成输出的同时还可实现光束定向扫描,激光功率放大器噪声、系统噪声及

外界环境等影响因素,使各光束相位起伏较大,不仅严重影响输出光束质量,其扫描角精度也得不到保障。相比于高功率光纤激光相干合成,光纤相控阵的光束快速扫描不仅涉及相位调控补偿,同时需保证光束扫描角度的准确性和较高扫描速度,因此其相位控制难度明显提高。目前已有的光纤相控阵多光束快速扫描的相关研究主要为理论分析<sup>[13-14]</sup>。实验研究方面,林肯实验室<sup>[9]</sup>采用 LiNbO<sub>3</sub> 实现了一维 6 单元的光纤相控阵光束优化及扫描,但由于阵元数较少,扫描角度分辨率较低。

本文开展了光纤相控阵相位噪声补偿及多光束快速扫描研究,基于 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器和随机并行梯度下降(SPGD)算法,研制了相位控制电路系统,对 16 路光纤相控阵的相位噪声进行补偿,并采用先校正后扫描的方式实现了多光束快速扫描。

## 2 光纤相控阵多光束扫描原理

## 2.1 光纤相控阵

光纤相控阵是以光纤作为光传输介质,相位调制器以电光调制为主,基于相控阵原理,通过改变阵元之间的相位差,可实现合成光束的扫描。图 1 为光纤相控阵的光束扫描原理结构图,系统主要器件

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2020-12-28; 录用日期: 2021-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(61401341, 61905185)、高等学校学科创新引智计划资助(B17035)

通信作者: \*xehan@mail.xidian.edu.cn

包括激光器、光纤分束器、电光相位调制器、光纤功率放大器、光纤阵列、相位控制电路系统、光电探测器和短波近红外相机等。为了保持各路输出子光束的偏振态,用保偏光纤将激光器、光纤分束器、电光相位调制器、光纤功率放大器和光纤阵列相连。激光器出射的激光光束经光纤分束器后分为多个子光束,经电光相位调制器的调制和光纤放大器

的功率放大后,多个子光束由单模裸纤排列组合而成的光纤阵列输出,在空间形成相干合成光场,通过对各个电光相位调制器加载扫描电压,即可实现光束扫描,短波近红外相机用于对光场进行观测。考虑各路光纤光束存在随机相位噪声,对输出合成光束进行相位噪声补偿。图 1 为光纤相控阵光束扫描原理框图。

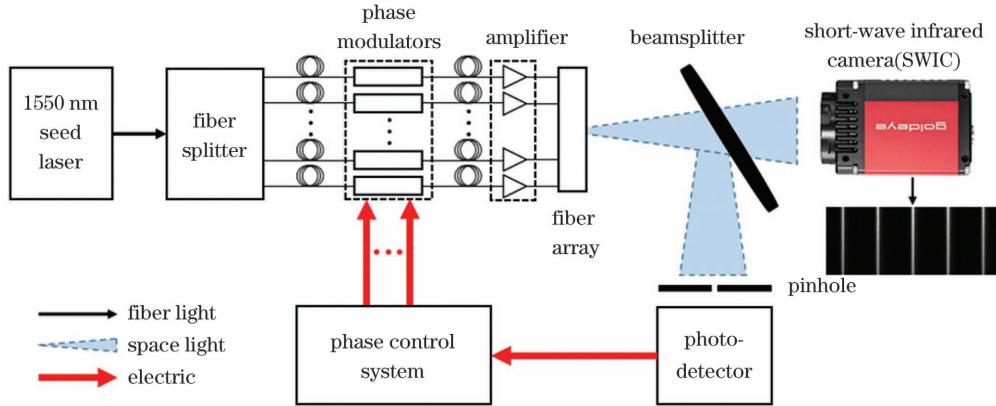


图 1 光纤相控阵光束扫描原理框图

Fig. 1 Schematic of OFPA beam steering system

### 2.2 相控阵光场理论

当光纤阵列为一维线性排列,光纤相控阵多光束传输扫描示意图如图 2 所示。

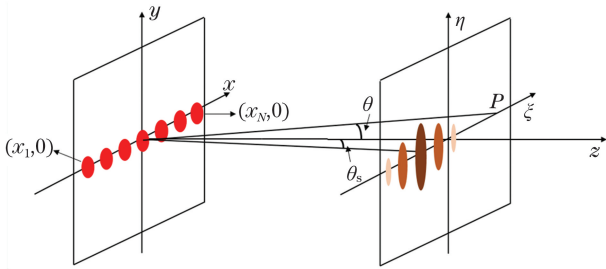


图 2 光纤相控阵多光束传输示意图

Fig. 2 Schematic of multi-beam steering of OFPA

$N$  束高斯子光束在  $x$ - $y$  平面内呈线性等间距排列,阵元间距为  $d$ ,子光束束腰直径均为  $\omega_0$ ,第  $n$  个子光束的出射光振幅为  $A_n$ ,位置为  $(x_n, 0)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $x$ - $y$  平面中的总光场表示为

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^N \left\{ A_n \exp \left[ -\frac{(x-x_n)^2 + y^2}{\omega_0^2} \right] \exp(j\phi_n) \right\}, \quad (1)$$

式中:  $\phi_n$  为第  $n$  个阵元相位,  $\phi_n = \phi_{n_0} + \phi_n$ , 其中  $\phi_{n_0}$  为阵元的初始相位, 当各个阵元的  $\phi_{n_0}$  相等时, 若要实现光束  $\theta_s$  角度的扫描, 需对第  $n$  个阵元加载相位  $\varphi_n = (n-1)kd \sin \theta_s$ , 其中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为真空中的激光波长。通常由于各光纤阵元之间

存在随机相位噪声, 各个阵元的  $\phi_{n_0}$  不为零且不相等, 考虑理想情况下各个阵元的  $\phi_{n_0}$  相等, 此时远场衍射光场可视为相干合成光场, 在满足夫琅禾费衍射条件下, 且在不失一般性条件下, 取  $A_n = 1$ , 当光束扫描角度为  $\theta_s$  时,  $\xi$ - $\eta$  面上相干光强分布是衍射角  $\theta$  的函数<sup>[15]</sup>:

$$I(\theta) = \exp \left( -\frac{k^2 \omega_0^2 \theta^2}{2} \right) \left\{ \frac{\sin \left[ \frac{Nkd(\sin \theta - \sin \theta_s)}{2} \right]}{\sin \left[ \frac{kd(\sin \theta - \sin \theta_s)}{2} \right]} \right\}^2. \quad (2)$$

图 3(a) 为相干合成光场分布, 仿真条件为: 阵元数目  $N = 16$ ,  $d = 125 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,  $\omega_0 = 6.2 \mu\text{m}$ ,  $\theta_s = 0$ 。在该仿真条件下, 远场光场强度分布表现为多光束分布, 扫描范围为  $-0.71^\circ \sim 0.71^\circ$ 。

实际情况下, 光纤相控阵系统各个阵元的初始相位附加了相位噪声, 导致相干光束合成质量变差, 远场光场强度分布如图 3(b) 所示。由于相位噪声的影响, 主副瓣条纹强度降低, 条纹之间产生杂散条纹, 这表明随机相位噪声的影响不可忽略, 必须予以补偿。

### 2.3 相位调控

光纤相控阵系统通过电光相位调制器改变各个子光路的相位, 本文采用  $\text{LiNbO}_3$  相位调制器, 若电

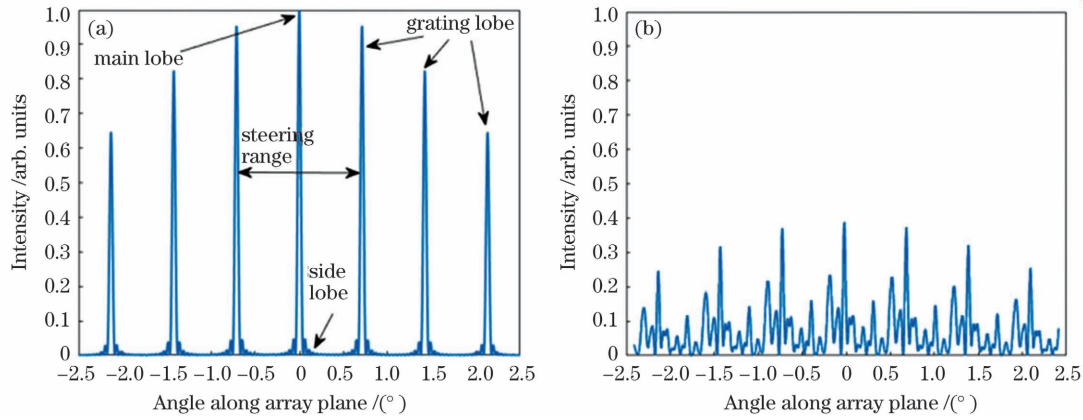


图 3 相干合成光场分布。(a)不存在相位噪声;(b)存在相位噪声

Fig. 3 Intensity distributions of coherently combined beams. (a) Without phase noise; (b) with phase noise

压和相位具有较好的线性关系,其电压  $u$  和相位  $\varphi$  之间的关系可表示为

$$\varphi = u\pi/u_{\pi}, \quad (3)$$

式中: $u_{\pi}$  是 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器的半波电压,即相位变化  $\pi$  时,需要加载的电压值。

针对随机相位噪声补偿,本文采用随机并行梯度下降 (SPGD) 算法<sup>[16]</sup>,SPGD 通过改变施加到 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器的电压来改变各个子光束的相位,补偿相位噪声,使系统的性能评价函数值  $J$  达到最优,其原理表达式为

$$\mathbf{u}^{(m+1)} = \mathbf{u}^{(m)} + \gamma \delta \mathbf{u}^{(m)} \Delta J^{(m)}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}^{(m)} = (u_1, \dots, u_n, \dots, u_N)$  是加载到 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器的电压信号; $\delta \mathbf{u}^{(m)} = \{\delta u_1, \dots, \delta u_n, \dots, \delta u_N\}^{(m)}$  为随机扰动信号; $\Delta J^{(m)} = (J_+^{(m)} - J_-^{(m)})/2$  是性能评价函数的变化量; $\gamma$  为增益系数; $m$  为 SPGD 算法的迭代次数。

SPGD 算法的性能评价函数一般基于像平面或接收孔径上的光强而定义,性能评价函数有多种形式,本文采用常用的环能量,其表达形式为

$$J = \iint F(\xi, \eta) I(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (5)$$

式中: $F(\xi, \eta)$  为光阑的透过率函数; $I(\xi, \eta)$  为远场光强分布。

SPGD 算法的具体实施步骤如下:1)生成均值为 0、方差相等的随机扰动电压  $\delta \mathbf{u}^{(m)} = \{\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_N\}^{(m)}$ ;2)对 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器分别施加  $\delta \mathbf{u}^{(m)}$  和  $-\delta \mathbf{u}^{(m)}$  的随机扰动,得到两次的性能评价函数值  $J_+^{(m)}$  和  $J_-^{(m)}$ ;3)计算目标函数的变化量  $\Delta J^{(m)} = (J_+^{(m)} - J_-^{(m)})/2$ ;4)根据(4)式更新电压并加载至 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器;5)重复步骤 1)~4),直至性能评价函数处于极大值。

如图 1 所示,基于 SPGD 算法的相位补偿的具

体执行过程为:光电探测器将采样得到的相干合成光束光强信号作为 SPGD 算法的性能评价函数,相位控制系统执行 SPGD 算法运行过程,对 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器进行实时反馈,改变各子光束的相位,直至性能评价函数达到极大值,此时输出光束质量处于最优。

## 2.4 多光束扫描

在理想情况下,当光束扫描角度为  $\theta_s$ ,根据(3)式,第  $n$  个 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器的电压为

$$u_n(\theta_s) = \frac{2(n-1)du_{\pi}}{\lambda} \sin \theta_s, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

实际情况下, LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器的半波电压  $u_{\pi}$  存在差异,需对其进行独立测试;其次,需对系统噪声进行补偿。采用“先校正后扫描”的方式,当光束扫描角度为  $\theta_s$  时,第  $n$  个 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器的电压为

$$u_n(\theta_s) = u_n^{(M)} + \frac{2(n-1)du_{\pi n}}{\lambda} \sin \theta_s, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

式中: $u_n^{(M)}$  为 SPGD 算法进行  $M$  次迭代收敛后,第  $n$  个 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器加载的补偿电压; $u_{\pi n}$  为第  $n$  个 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器的半波电压。

图 4 所示为光束扫描过程,实线为 0 级主极大子光束在 0° 的一维光场分布,虚线为根据(7)式加载不同扫描角度  $\theta_s$  后,利用 0 级主极大子光束实现光束扫描后的一维光场分布,利用 0 级主极大子光束在 0.71° 的视场范围内进行光束扫描,其余子光束跟随扫描,可实现光场全视场内的快速覆盖,对于  $1 \times 16$  光纤阵列,若取 16 个相干子光束,其光场全视场为 10.65°。

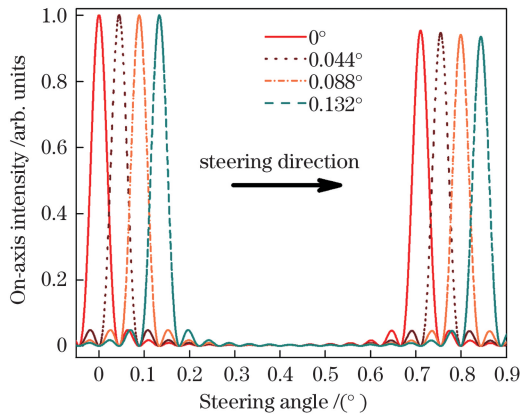


图 4 子光束扫描示意图

Fig. 4 Schematic of sub-beam steering

### 3 实验系统及结果分析

#### 3.1 实验系统

本文依据图 1 的原理框图,设计并实现 16 路光纤相控阵多光束快速扫描实验系统,如图 5 所示。激光器采用 1550 nm 窄线宽光纤激光器,最大输出功率为 200 mW; LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器带宽为 300 MHz,半波电压为 3.8 V; 光纤阵列裸纤纤芯间距为 125 μm; InGaAs-APD 探测器的带宽为 20 MHz; 利用短波近红外相机观察合成光束光强分布; 相位控制电路系统选择 TI 公司的 TMS320C6678 处理芯片执行 SPGD 算法,数模转换器(ADC)采用亚德 ADI 公司生产的 12 位数字转换芯片 AD7298,模数转换器(DAC)采用 ADI 公司的双通道 12 位单极性电流输出、四象限乘法数模转换器 AD5405,在 16 路光纤相控阵系统下,进行了 10000 次基于双边扰动的 SPGD 算法测试,总耗时均值小于 100 ms,即算法单次迭代扰动延时小于 10 μs。本系统各个模块参数如表 1 所示。

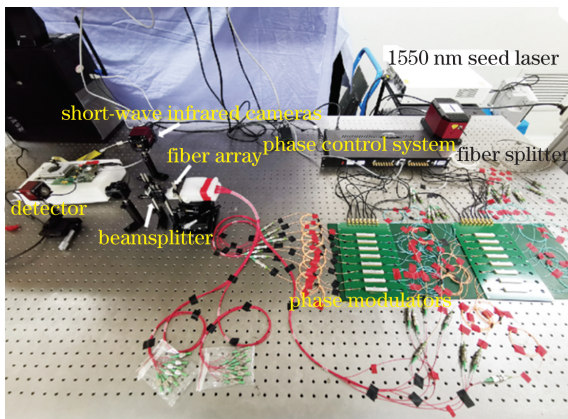


图 5 光纤相控阵多光束快速扫描实验系统

Fig. 5 Experimental setup of OFPA for high-speed multi-beam steering

表 1 实验系统参数

Table 1 Parameters for experimental system

Name	Parameter
Fiber array	Element spacing: 125 μm Number: 16
1550 nm seed laser	Maximum output power: 200 mW Line width: <200 kHz
Phase modulator	Half-wave voltage: 3.8 V Bandwidth: 300 MHz (DC)
InGaAs-APD detector	Bandwidth: 20 MHz

#### 3.2 实验结果分析

首先测量光纤相控阵多光束优化合成的相关参数,包括 SPGD 算法收敛时间、优化后光束退化时间、峰值旁瓣比等,在此基础上进行光束扫描角度范围和扫描速度参数的测量。

##### 3.2.1 相位噪声补偿

图 6 给出了合成光束相位噪声补偿前后的强度分布,其中图 6(a)为关闭 SPGD 运算模块时的相干合成光场强度分布,可以看出,由于相位噪声的存在,合成光束峰值不明显,光束质量较差,且处于不稳定状态。图 6(b)为合成光束相位噪声补偿后的光强分布,光束质量明显得到提高。

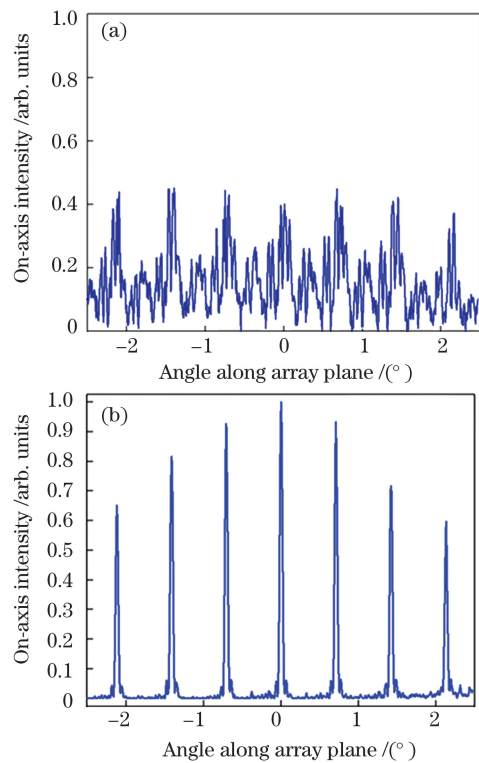


图 6 相位校正前后光束合成效果对比。(a)优化前;  
(b)优化后

Fig. 6 Comparison of beam combination effect before and after phase calibration. (a) Before calibration;  
(b) after calibration

首先对系统优化时间进行测试,图 7(a)为关闭和开启 SPGD 运算模块得到的 InGaAs-APD 探测器信号变化曲线。开启 SPGD 运算模块后,归一化光强值由 0.43 增大到 0.94 左右。根据本文应用需

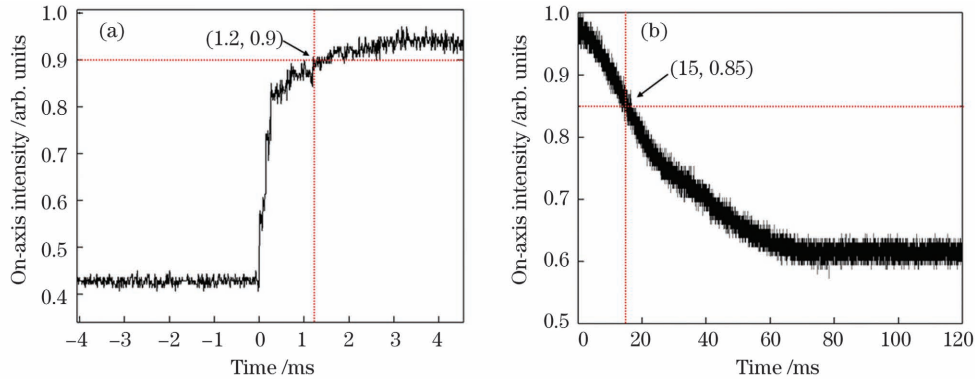


图 7 探测器光强信号性能(性能评价函数)。(a)SPGD 开启和关闭后的光场强度分布变化;(b)优化后光束质量退化曲线  
Fig. 7 Signal properties of APD (performance evaluation function). (a) Change of intensity distribution for on and off states of SPGD; (b) degradation curve of beam quality after calibration

由于动态相位噪声的存在,关闭 SPGD 运算模块后,光束质量将会变差,图 7(b)为优化后关闭 SPGD 运算模块得到的 InGaAs-APD 探测器输出信号变化曲线,可以看出该信号退化过程较为缓慢,以信号值为 0.85 作为一个界定点,将信号值从 0.94 退化到 0.85 的时间作为每次光束扫描的限制时间,时间为 15 s 左右,即光束进入扫描阶段 15 s 后,需重新进入锁相周期,以保证扫描光束处于高光束质量输出状态。

### 3.2.2 光束质量分析

为了表征系统相位噪声补偿效果,本文采用峰值旁瓣比(PSLR)作为评价指标。PSLR 定义为主瓣峰值强度与最强旁瓣的峰值强度之比,表达式为

$$P_{\text{PSLR}} = 10 \lg_{10} \frac{P_s}{P_m} = 20 \lg_{10} \frac{I_s}{I_m}, \quad (8)$$

式中: $P_s$  和  $P_m$  分别是旁瓣和主瓣的电功率; $I_s$  和  $I_m$  分别是旁瓣和主瓣的光场强度。图 8(a)为相位噪声补偿后的三维光场分布图,图 8(b)是相位噪声补偿后经实验得到的多组光强平均值分布,图 8(c)为理论值。光束扫描过程中,定义主瓣(0 级主极大)与 1 级主极大之间的角度范围为相控阵光束的扫描范围  $\Delta\theta$ 。由图 8(b)所示的实验结果可得, $\Delta\theta = 0.70^\circ$ , 峰值旁瓣比  $P_{\text{PSLR}} = 24.7 \text{ dB}$ 。如图 8(c)所示,理论上  $\Delta\theta = 0.71^\circ$ , 峰值旁瓣比  $P_{\text{PSLR}} = 26.4 \text{ dB}$ , 各项指标接近。这说明本实验系统能有效地补偿外界及系统自身带来的干扰,实现光纤激光的高质量相干合成。

求,当归一化光强值为 0.9 时,可认为算法收敛,由图 7(a)可得算法收敛时间约为 1.2 ms,之后信号处于稳定振荡,算法达到收敛状态,这说明本系统可实现对相位噪声的实时补偿。

### 3.2.3 光束扫描

#### 1) 扫描角度及范围

利用短波近红外相机获得光强分布,并通过几何关系计算得到实际光束扫描角度,实验中相机与光纤阵列发射端的距离为 10.5 cm,扫描角度偏转量可通过主瓣峰值在相机的偏移像素数确定。本次实验进行了  $-0.30^\circ$ 、 $-0.20^\circ$ 、 $-0.10^\circ$ 、 $0.10^\circ$ 、 $0.20^\circ$ 、 $0.30^\circ$  下的光束扫描。图 9 是不同扫描角度下的相干光束分布。可以看出,相干合成光束质量较好。主瓣峰值在相机的偏移像素数分别为 38, 24, 14, 15, 27, 36, 换算为扫描角度分别是  $-0.31^\circ$ ,  $-0.20^\circ$ ,  $-0.11^\circ$ ,  $0.12^\circ$ ,  $0.22^\circ$ ,  $0.29^\circ$ , 这与设置扫描角度存在一定偏差,其原因有三个:1)各路的铌酸锂相位调制器的半波电压与理论值存在差异;2)相位控制电路系统的实际输出电压与理论值存在误差;3)因存在加工误差,光纤阵列相邻裸纤的间距参数不准确。本文使用的短波近红外相机像素尺寸为  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ , 单个像素的视场为  $0.008^\circ$ , 实验结果的最大误差为  $0.02^\circ$ , 这说明短波近红外相机的分辨率造成的系统误差不可忽略。

#### 2) 扫描速度

扫描速度测试方法同样基于图 1 所示的原理,测试之前,先进行相位噪声补偿,然后加载任意一个角度的扫描电压后,光束偏转出单点探测器,单点探测器的输出信号由大变小。根据扫描速度定义光束在任意两个角度之间的切换速度,如图 10 所示,根据示波器的输出信号结果,可得到光束在两个角度

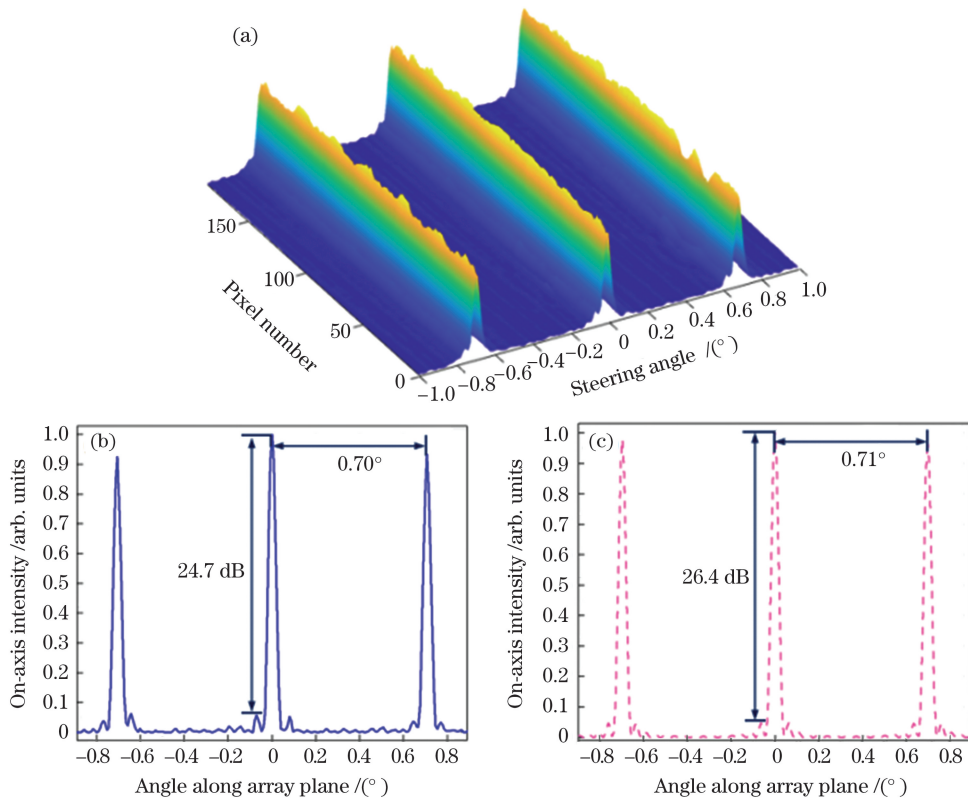


图 8 相干合成光束光场分布曲线。(a)三维光场分布;(b)实验结果(平均值);(c)仿真结果

Fig. 8 Intensity distributions of coherently combined light field. (a) Three-dimensional light field distribution; (b) experimental result (average value); (c) simulation result

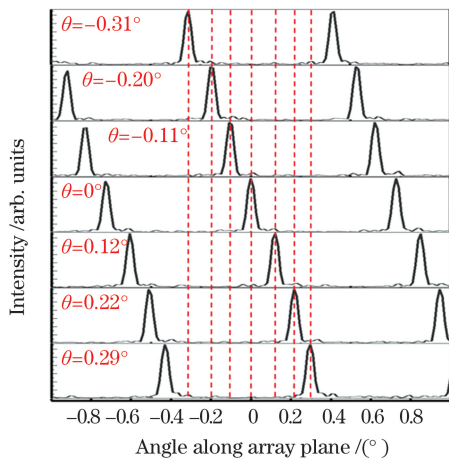


图 9 不同扫描角度下的光强分布

Fig. 9 Intensity distributions for different steering angles

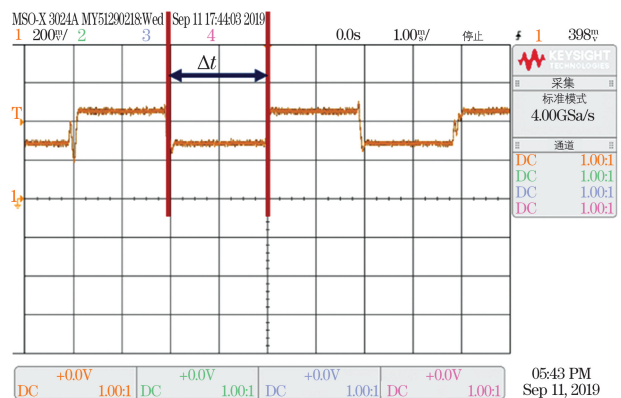


图 10 扫描速度测试

Fig. 10 Test of beam steering speed

之间的切换时间  $\Delta t = 2 \mu s$ , 扫描速度  $v = 1/\Delta t = 500 \text{ kHz}$ 。

本文所用的调制器材料为  $\text{LiNbO}_3$ , 其响应速度可达 GHz 量级, 但由于光纤相控阵光束相干合成受相位噪声影响, 为保持光束质量, 必须进行相位补偿, 受限于硬件性能限制, 本文实现的扫描速度为 500 kHz, 理论上, 基于快速  $\text{LiNbO}_3$  的光纤相控阵多光束扫描速度还有较大的提升空间。

## 4 结 论

设计了基于  $\text{LiNbO}_3$  相位调制器的 16 路光纤相控阵多光束快速扫描实验系统, 利用相位控制电路系统, 基于 SPGD 相位校正算法实现了光束的快速相位校正, 算法单次迭代时间为  $10 \mu s$ 。采用“先校正后扫描”的方式, 实现了快速且高质量的合成光束输出, 合成光束光强峰值旁瓣比达 24.7 dB, 主瓣

角宽度和扫描范围与理论结果吻合。光束扫描速度可达 500 kHz,扫描角度范围为 $-0.70^{\circ}\sim 0.70^{\circ}$ ,该研究验证了 $1\times 16$ 路光纤相控阵多光束快速扫描的可行性。后续将进一步提高相位控制电路系统的带宽,以实现更快速、高精度的光束扫描,为实现激光探测与成像等应用提供基础。

### 参 考 文 献

- [1] Hu S X, Zhang A W, Liu H Y, et al. Designing and developing a  $360^{\circ}$  continuous scanning portable 3D LIDAR system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(s1): 168-171.  
胡少兴, 张爱武, 刘海云, 等.  $360^{\circ}$  连续扫描的便携式三维激光雷达设计与开发 [J]. *光学学报*, 2008, 28(s1): 168-171.
- [2] Hu J, Du S P, Guo H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110002.  
胡婕, 杜升平, 郭弘扬. 基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110002.
- [3] Heck M J R. Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(1): 93-107.
- [4] van Acoleyen K, Bogaerts W, Jägerová J, et al. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1477-1479.
- [5] Rabinovich W S, Goetz P G, Pruessner M W, et al. Two-dimensional beam steering using a thermo-optic silicon photonic optical phased array [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(11): 111603.
- [6] Wu C, Liu C B, Han X E. Design of waveguide optical phased array lidar receiving system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1030003.  
吴超, 刘春波, 韩香娥. 光波导相控阵激光雷达接收系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1030003.
- [7] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195-199.
- [8] Xia R Q, Chen Q S, Liu Y, et al. Control method of coherent beam combining angle scanning based on linear fiber array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0906006.  
夏润秋, 陈青山, 刘洋, 等. 线阵光纤激光相干合成角度扫描控制方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0906006.
- [9] Huang W R, Montoya J, Kansky J E, et al. High speed, high power one-dimensional beam steering from a 6-element optical phased array [J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17311-17318.
- [10] Ma Y X, Wang X L, Zhou P, et al. Coherent beam combination of 137 W fiber amplifier array using single frequency dithering technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(8): 1089-1092.
- [11] Chang H X, Xi J C, Su R T, et al. Efficient phase-locking of 60 fiber lasers by stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(10): 101403.
- [12] Chang H X, Chang Q, Xi J C, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [13] Fan X Y. Research of active phase-locking fiber laser coherent combining technique [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 103-110.  
范馨燕. 主动锁相光纤激光相干合成技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 103-110.
- [14] Ren Y Z, Chai J H. Scanning characteristics of fiber-optic interferometric phased array based on phase modulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 152502.  
任远中, 柴金华. 基于相位调制的光纤干涉型光学相控阵扫描特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 152502.
- [15] Jones D C, Scott A M, Clark S, et al. Beam steering of a fiber-bundle laser output using phased array techniques [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5335: 125-131.
- [16] Vorontsov M A, Sivokon V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wavefront phase-distortion correction [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(10): 2745-2758.

# High-Speed Multibeam Steering of One-Dimensional Optical Fiber Phased Array

Wang Xiaobin<sup>1</sup>, Liu Chunbo<sup>2</sup>, Liu Ruyuan<sup>1</sup>, Zhang Lin<sup>2</sup>, Cao Yang<sup>2</sup>, Han Xiang'e<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;*

<sup>2</sup>*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*

**Objective** Fast and accurate beam scanning is the key technology in free space laser application. An optical phased array (OPA) based on electro-optics or thermo-optics overcomes the limitation of mechanical steering and can achieve noninertial beam steering with flexible beam pointing. It has demonstrated applications in free-space laser, such as light detection and ranging (LIDAR), free-space optical (FSO) communication, and optical imaging. The spatial light modulator (SLM) and microelectromechanical mirror array (MEMS) have realized tens of kHz and 1-MHz beam steering, respectively. Chip-scale OPA can achieve ultrawide beam steering and it has been demonstrated at kHz to GHz. However, chip-scale OPA suffers serious loss and cannot be used in remote detection. The optical fiber phased array (OFPA) based on a lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) phase modulator can achieve beam directional and fast steering at GHz while realizing high power laser synthesis output, but the phase noises make each beam phase fluctuate strongly, which seriously affects the output beam quality and cannot guarantee its steering angle accuracy. Compared with the coherent combination of high power fiber lasers, the fast beam steering of OFPA not only involves phase control compensation but also ensures the accuracy of beam steering angle and higher steering speed, which improves the difficulty of phase control.

**Methods** Based on  $\text{LiNbO}_3$  phase modulators and the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm, the phase noises of  $1 \times 16$  channel OFPAs are compensated, and the multibeam fast steering is achieved by the “steering after correction” method. First, a narrow-linewidth ( $<200$  kHz at 1550 nm) laser is divided into several sub-beams through the polarization-maintaining (PM) fiber splitters. After the modulation by the electro-optic phase modulators and power amplification by the fiber amplifiers, these sub-beams are outputted by the fiber array, which is arranged and combined by PM single-mode bare fiber. Second, pinhole samples of the on-axis far-field intensity with a silicon photodetector are used as the performance metric of the SPGD algorithm. The phase compensation voltage is obtained using the phase control system and loaded on each phase modulator to realize the beam optimization. Third, according to Eq. (7), the steering voltages are calculated and loaded onto each phase modulator to realize beam steering. Finally, the multibeam steering refers to that the main lobe of coherent combined beam is steering in the field of view (FOV) between its adjacent sub-beams, and other sub-beams follow it to steer to rapidly increase and cover the full FOV. For  $1 \times 16$  channel OFPA, the total FOV is  $10.65^\circ$ , when sixteen coherent sub-beams are taken.

**Results and Discussions** The phase control system developed in this study effectively achieves phase noise compensation, the performance metric (on-axis intensity) increases from 0.43 to 0.94, the quality of coherent combined beams is improved (Fig. 6), and the convergence time of the SPGD algorithm is 1.2 ms [Fig. 7(a)]. Using peak-to-side lobe ratio (PSLR) as the quality evaluation index of beam optimization, the PSLR is 24.7 dB after phase noise compensation, which is close to the theoretical limit of 26.4 dB (Fig. 8). In this paper, the beam steering angle is set to be  $-0.30^\circ$ ,  $-0.20^\circ$ ,  $-0.10^\circ$ ,  $0.10^\circ$ ,  $0.20^\circ$ , and  $0.30^\circ$ . The quality of the coherent combined beam after steering maintains a good intensity distribution state (Fig. 9). The results show that the actual steering angles are  $-0.31^\circ$ ,  $-0.20^\circ$ ,  $-0.11^\circ$ ,  $0.12^\circ$ ,  $0.22^\circ$ , and  $0.29^\circ$ . Three factors lead to errors: 1) the half-wave voltage of each  $\text{LiNbO}_3$  is different from the theoretical value; 2) the actual output voltage of the phase control system has errors compared with the theory values; 3) owing to the processing error, the spacing parameters of adjacent bare fibers in the fiber array are inaccurate. The pixel size of the short-wave infrared camera (SWIC) is  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ , and its FOV is  $0.008^\circ$ ; the maximum error of the experimental results is  $0.02^\circ$ , which shows that the systematic error caused by the resolution of the SWIC cannot be ignored. The beam steering speed of the system (defined by the switching speed of the beam between any two angles) measured by a single point detector is 500 kHz.

**Conclusions** An experimental system containing an OFPA of  $1 \times 16$  channels is built, and the experiments for coherent beam combining and multibeam steering are conducted. Experimental results show that the algorithm is of high efficiency, taking only  $10 \mu\text{s}$  in a single iteration. Besides, the PSLR reaches 24.7 dB, with the theoretical limit



being 26.4 dB. The steering range is in good consistency with the theoretical prediction range. The OFPA developed in this study permits high-quality coherent beam combining and allows high-speed (500 kHz) beam steering, and the scan angle range is  $-0.70^{\circ}$ – $0.70^{\circ}$ . Finally, the feasibility of fast multibeam steering of  $1 \times 16$  channel OFPA is verified. In the future, the bandwidth of the phase control circuit system will be further improved, and higher precision beam steering will be achieved, which will lay a foundation for the applications of laser detection and imaging.

**Key words** laser optics; optical fiber phased array; fiber laser; beam steering; coherent beam combining; phase modulator

**OCIS codes** 140.3290; 140.3510; 140.3298