

线阵光纤激光相干合成角度扫描控制方法研究

夏润秋, 陈青山, 刘 洋, 肖立亮

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘 要: 基于光的干涉理论, 对多芯线阵光纤激光通过相干合成进行角度扫描的原理进行了研究。利用相干合成模型, 用 MATLAB 分别对信号无噪声与含有随机相位噪声时的合成效果进行了数值仿真计算, 分析了通过主动相位控制对合成光进行角度扫描的可行性; 基于 MOPA 结构光纤激光阵列搭建了相干合成角度扫描控制系统。通过实验验证了在多路光纤激光完成锁相后, 若依次等比改变各芯激光的相位可以实现主极大条纹连续的角度扫描, 扫描范围与模型中计算所得结果基本一致, 实验结果与理论计算相符。该方法的探索研究对线阵光纤激光的相干合成应用拓展有一定的指导意义。

关键词: 激光; 相干合成; 角度扫描; 线阵光纤

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0906006

Control method of coherent beam combining angle scanning based on linear fiber array

Xia Runqiu, Chen Qingshan, Liu Yang, Xiao Liliang

(College of Instrumentation Science & Photoelectric Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Laser beam combining technique allows increasing the power of laser radiance far beyond what is obtained from a single conventional laser. Moreover, this technique is also able to control the far-field laser combining intensity distribution. Based on the theory, the principle of coherent combining of lasers from multi-core linear fiber array was studied. By using the coherent synthesis model, the coherent combining effect of multi-core linear fiber array was numerically simulated by MATLAB when wavefront of the lasers with and without random phase noise respectively, and the feasibility of angle scanning using actively phase-controlling was analyzed. The coherent combining angle scanning control system was built based on MOPA laser linear array fibers. The experiment shows that active phase-controlling of the laser linear array is able to realize the angle scanning of the main maximal stripe, and the scanning range is between two secondary large stripes. The experimental results are consistent with the theoretical calculation, and that has a guiding significance to the application of coherent combining of linear fiber array lasers.

Key words: laser; coherent combining; angle scanning; linear fiber array

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-07

基金项目: “十三五”装备预研共用技术和领域基金(41414050205)

作者简介: 夏润秋(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事红外成像、光电对抗等方面的研究。Email: xrq@bistu.edu.cn

0 引言

光纤激光器结构较为紧凑,便于设计装配成阵列结构,与之相关的相干及非相干合成技术也成为了激光领域研究的热点^[1-3]。其中,激光相干合成技术中一般要求多路光纤激光光源满足同频率、恒定相位差、偏振方向相同等条件,激光频率和偏振态可以通过主振荡功率放大器(MOPA)以及保偏光纤实现同频同偏振态输出^[4]。激光各光束相位差可以考虑通过光纤长度补偿,但即使经过精确校准,各光纤的长度也不可能做到完全一致,此外由于外界环境温度等因素的影响,光纤激光阵列中各光束还可能产生随机蠕动,难以获得恒定相位,从而无法得到理想的合成效果^[5]。

目前对于光纤激光阵列合成的研究主要集中在高相干性激光光源^[5],提高合成光束质量方面,国内对激光相干阵列发射端相位误差等参数对相干效果的影响已经开展了较为广泛的研究,如一维离轴高斯光束相干和非相干合成机理及其数值计算仿真方法,光纤激光相干阵列中各单元的相位、振幅及偏振方向对远场光强分布影响的数值仿真,阵列排列紧密程度以及相位均方差对相干合成光强的影响数值模型,系统偏差(如偏振误差、相位误差等)对高斯激光相干合成效果的影响等等^[6-8]。研究表明,在多光纤阵列相干合成中,若期望合成光束的质量较高,需要阵列各光束波前误差控制在较小范围内。但由于光纤对温度变化、外界环境引起的轻微振动等因素的影响非常敏感,所以光纤激光阵列相干合成技术中相位锁定是必不可少的一部分。

根据相干合成原理,光纤阵列光束合成时理论上可以通过调整阵列中各单元出射光束相位,实现主极大光束在不同偏转角度的连续扫描,使其具备应用在诸如光学相控阵技术、激光通信以及光电对抗等需要连续调整光束指向的场景环境中。文中基于一维线性 MOPA 光纤激光阵列研究了基于主动相位控制合成光束连续扫描控制技术,根据相干合成原理建立并分析了该类型系统的相干合成数值模型;并通过试验验证了通过主动相位控制实现合成光束扫描的可行性。

1 一维光纤阵列相干合成扫描原理

光纤激光相干合成实际是光束的相干叠加。光

纤本身的非线性效应、光学损伤、热损伤等物理变化及外界干扰(如机械振动、温度等)会导致光纤中光程的随机变化,即随机相位噪声。若线阵中各激光光束相互平行,均沿 z 方向传播,则相干光束远场含随机相位噪声 $\Delta\varphi_j$ 的光纤激光阵列相干合成的光场分布 $E(x, y, z)$ 可表示为^[9]:

$$E(x, y, z) = \iint \sum_{j=1}^n E_j(x, y, z) dx dy \quad (1)$$

其中,

$$E_j(x, y, z) = C_j \cdot A_j(x, y) \cdot \varphi_j(x, y, \Delta\varphi_j),$$

$$C_j = A_j \frac{w_{j0}}{w_j(z)},$$

$$A_j(x, y) = \exp\left(-\frac{r_j^2}{w_j^2(z)}\right),$$

$$\varphi_j(x, y, \Delta\varphi_j) = \exp\left[-ik\left(\frac{r_j^2}{2R_j(z)}\right)\right] \cdot \exp\left[i\arctan\left(\frac{z}{Z_0}\right)ikz\right] \cdot \exp(i\Delta\varphi_j)$$

式中: x, y 分别表示与传输方向 z 垂直的水平方向和竖直方向; n 为系统光纤阵列的通道数; A_j 为第 j 束激光的出射光振幅; w_{j0} 为出射光斑束宽(光纤芯径); $w_j(z)$ 为传输距离 z 后的束宽,近似可认为 $w_j(z) \approx w_{j0} + z \cdot \theta$, θ 为远场光纤发散角;干涉平面上任一点到激光光轴的距离 $r_j = ((x-x_j)^2 + (y-y_j)^2)^{0.5}$, x_j, y_j 为第 j 束激光在 XOY 平面上的投影坐标; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长; $R_j(z) = Z_0(z/Z_0 + Z_0/z)$, 瑞利长度 $Z_0 = \pi w_{j0}^2/\lambda$; $\Delta\varphi_j$ 为当前激光束的相位偏置。

若各出射光相位稳定,根据公式(1)可知在干涉面可以获得稳定的干涉条纹。如图 1 所示,机械上为了实现合成光束扫描,可以一端光纤为起始点,旋转光纤阵列至角度 θ ,使得在初始干涉位置各相干激光光源的光程依次增加 $\theta \cdot d, \theta \cdot 2d, \theta \cdot 3d, \dots, \theta \cdot nd$,从而实现合成光在干涉平面的运动扫描。偏转角度 θ 角较小时,由于机械旋转产生的光程差可以通过各出射激光的相位差异产生类似的结果:通过在激光阵列控制端依次使各路光纤依次等比增加或减少一定相位,则可使干涉主极大条纹在一定范围内向两侧移动,移动的范围由相位调制器的电压范围决定。若将各光束的最大相位差恒定为 2π 或其整数倍,则循环等比依次增减各光束相位偏置即可使相干亮条纹在指定的范围内来回移动实现扫描。

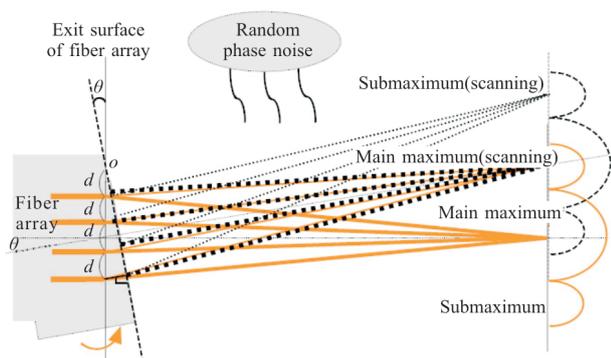
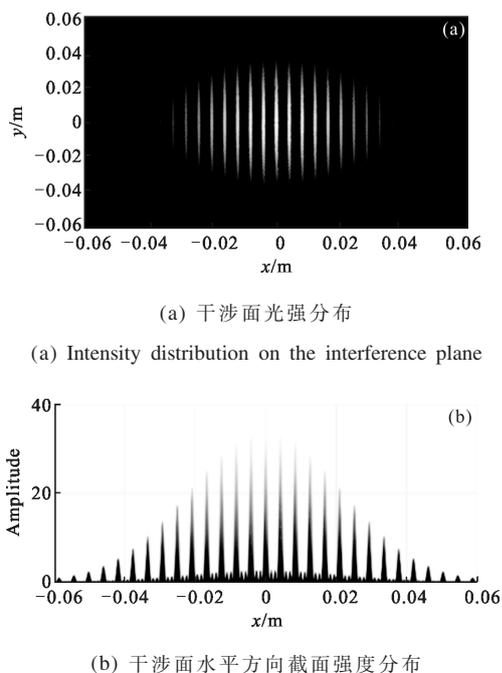


图 1 相干合成扫描原理图

Fig.1 Schematic diagram of coherent combining scanning

杨氏双孔干涉产生清晰的干涉条纹的条纹间距为 $\varepsilon=D\lambda/d^{[10]}$, 其中 D 为光源到干涉平面的距离。若采用保偏线列光纤, 令其波长 $\lambda=1\ 064\ \text{nm}$, 光纤芯距 $d=127\ \mu\text{m}$ 。由于光纤芯径为 μm 量级, 可将线列光纤中两两光纤的干涉近似等效为杨氏双孔干涉进行特性分析。令传输距离为 $D=0.5\ \text{m}$, 四芯线列光纤相干合成, 在光纤发散角内, 由于两两相干会生成 3 种间距 ($\varepsilon_1=0.004\ 19\ \text{m}$, $\varepsilon_2=0.002\ 09\ \text{m}$, $\varepsilon_3=0.001\ 40\ \text{m}$) 明暗条纹, 四芯线列激光相干结果近似于 6 种两两相干情况的相干场叠加。利用 Matlab 软件仿真的相干合成相对强度效果如图 2 所示。根据图 2 所示仿真结



(a) Intensity distribution on the interference plane

(b) Intensity distribution on horizontal section of the interference plane

图 2 线列光纤相干合成仿真图

果可知, 相干合成条纹主周期(图 2(a)中较亮条纹间隔) 与上文中计算所得的相邻光纤杨氏相干条纹周期计算值相同。线列光纤激光光束远场相干光场中的主条纹强度近似高斯分布, 干涉条纹间具有稳定清晰的空间间隔。

基于相干合成理论模型公式(1), 令 $\Delta\varphi_j=j\cdot d\alpha$ 。其中, $d\alpha=\alpha/n$ 为相邻光纤出射激光相位差, α 为所有光纤出射激光间的相位差最大值, j 为对应光纤通道序号。仿真中, 依然采用了 4 芯线列激光, 其他条件也与图 2 所采用的条件相同, α 从 0° 逐步调整至 360° , 扫描条纹的仿真计算结果如图 3 所示。图 3

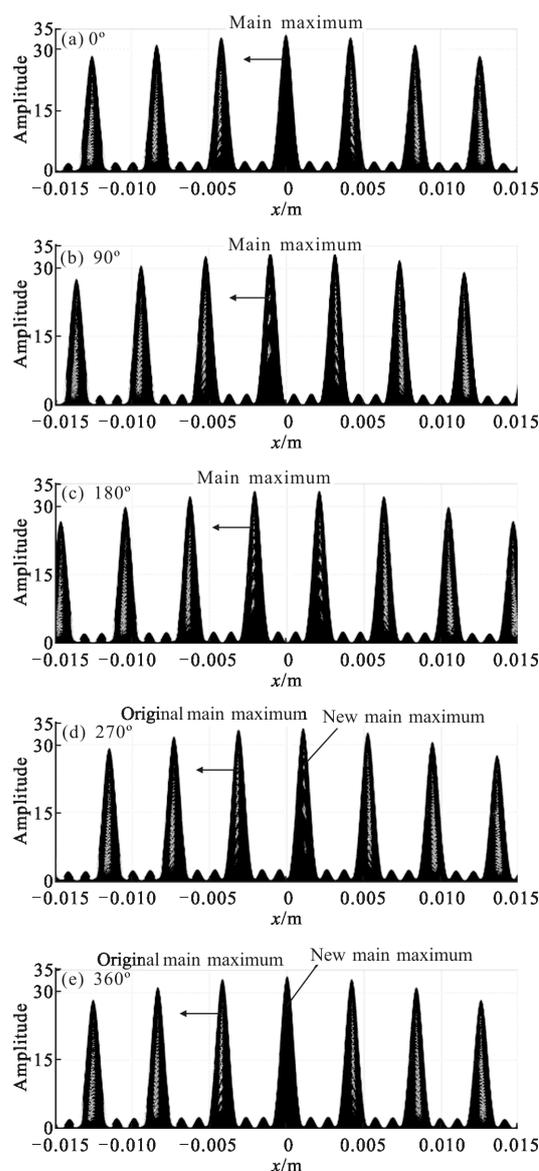


图 3 相干合成条纹随相位差变化情况

Fig.3 Variation of coherent combining stripes with the changing of phase difference

中央峰即为相干亮条纹灰度值波形，横轴为干涉面观察屏处光斑水平区间坐标，纵轴为条纹光强振幅计算值。计算结果表明，当光纤间的最大相位差从 0° 向 90° 增加时，主极大亮条纹从 0° 位置向左移动了四分之一主周期间隔；从 90° 增加到 180° 时，主极大亮条纹继续向左移动了四分之一亮条纹间距，同时在相位差最大值 180° 时，位于原干涉中心主极大位置左右各二分之一主周期间隔处的主干涉条纹亮度相同；当相位差超过 180° 时，原先主极大干涉条纹右侧的干涉条纹亮度最高成为新的主极大，且从 180° 增加到 360° 时，该主极大亮条纹从右边第一栅瓣处移动二分之一主周期间隔，回到原中心位置，而原先的主极大条纹移动至原其左侧第一栅瓣处。上述过程中，图像中的干涉条纹通过调整相互之间的相位差，理论上可以实现相干合成条纹在干涉面观察屏的连续扫描过程。

然而当受随机相位噪声的影响时，相干合成光的条纹区分度可能会受到很大影响从而直接影响扫描效果。图 4 所示是采用图 2 所采用的仿真条件，同时在各路光纤的相位中加入随机噪声后根据上文模型仿真所得干涉面光强分布。从图中可以看出，存在相位噪声时，相干合成光束质量下降，条纹之间的区分度变差，且若相位噪声不停变化，干涉强度也会随之变化。干涉光强波动，干涉条纹区分度差，这种干涉效果显然不适用于扫描等应用，因此为了实现较好的连续扫描效果，需要确保各路光纤的出射相干激光能够保持稳定可控的相位差，这需要在系统中采用锁相技术实现。

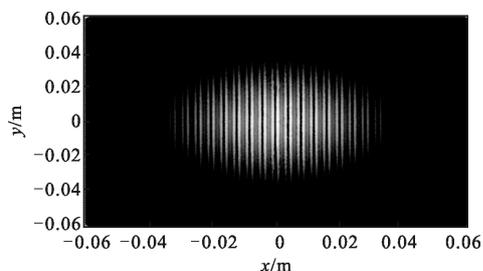


图 4 存在随机相位扰动时线性光纤相干合成仿真图

Fig.4 Simulation of linear fiber array combining with random disturbances of phase

2 相干合成扫描系统设计

文中基于 MOPA 结构光纤激光阵列设计了光

纤相干合束扫描实验系统，结构如图 5 所示。合束系统为 V 形槽一维光纤阵列。系统采用 1064 nm 激光器作为种子激光光源，其发出的激光光束经 $1/8$ 分束器分束后接入相位调制器，各分路激光经过相位调制器调制后经激光放大器后接入光纤阵列输出；相干激光经光纤阵列出射后被分束镜分为传播方向相互垂直的两束非等比例光束，其中与初始传输方向垂直的低功率光束先经连续衰减片衰减，再经吸收性衰减片（固定衰减值）衰减后被光电探测器接收，形成光电反馈回路，转化后的电信号发送到相位控制板；相位控制板处理反馈信号，对各路信号光的相位进行控制，实现各阵元间相位的锁定，使系统获得理想的相干光；与初始方向相同的较强光束投射到远场的观察屏上；条纹观测相机观测观察屏上条纹分布情况，并将图像信号传输至 PC 机显示；PC 机完成通道选择，功能选择，并发送相关指令给主控制板，控制板依据指令运行优化算法，实现各通道的锁相功能。

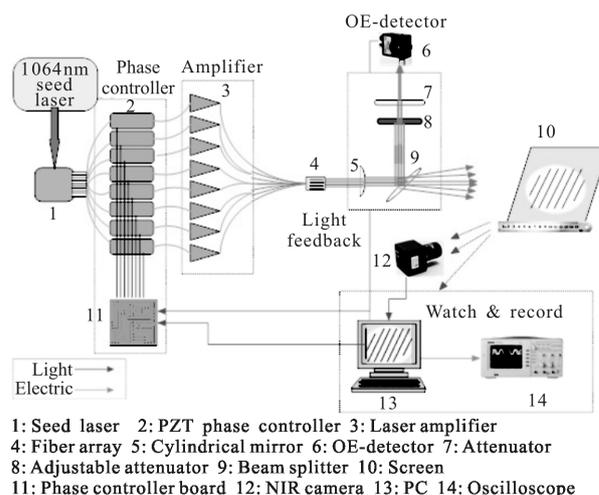


图 5 线性光纤激光相干合束扫描控制实验系统原理图

Fig.5 Diagram of combining beam scanning control system based on linear fiber array

3 实验与结果分析

实验系统如图 6 所示，按照图 5 所示原理图搭建。采用 Basler1300-60 近红外相机，焦距为 50 mm 的 NIKON 镜头记录观察屏上的相干合成光强图像；相机与观察屏的距离为 0.5 m 。主控制板采集光电探测器探测反馈的输出信号电压，运行随机并行梯度

下降算法 (SPGD) 锁相程序, 控制相位调制器; 锁相完成后, 再执行相干合成扫描程序。

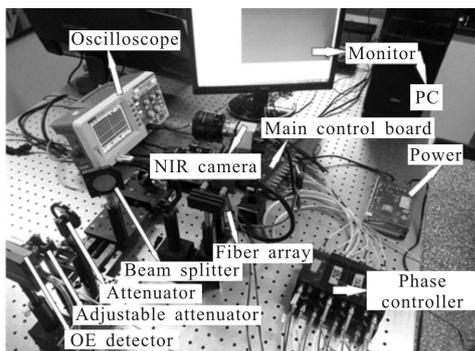


图 6 实验系统构成
Fig.6 Experiment system

其中, SPGD 的算法流程为:

首先设置相位调制器初始控制电压 $u=u_0$, 一般令 $u_0=(0,0,\dots,0)$, 可根据实际应用情况的不同而设置值;

产生随机扰动电压 $\sigma_u=(\sigma_{u1},\sigma_{u2},\dots,\sigma_{un})$, 其中 σ_{ui} 服从伯努利分布;

将随机扰动电压 σ_u 叠加到每一路控制量 $u=(u_1,u_2,\dots,u_n)$ 上并且输出 $(u+\sigma_u)$;

获取正向扰动电压后系统的性能指标 $J_+=J(u+\sigma_u)$;

将随机扰动电压反向叠加到每一路控制变量 u 上并输出 $(u-\sigma_u)$;

获取反向扰动电压后系统的性能指标 $J_-=J(u-\sigma_u)$;

评价计算 $u(n+1)=u(n)+\xi \times (J_+-J_-) \times \sigma_u$, 更新控制变量 u 。(其中 ξ 为增益系数, σ_u 为扰动量);

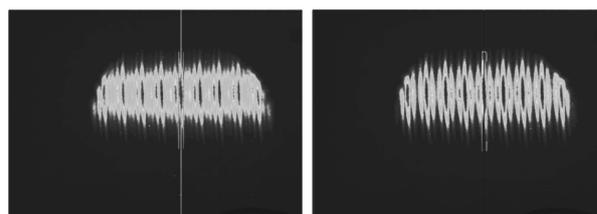
输出控制变量 u ;

判断是否达到收敛条件, 没有达到则继续迭代, 直到满足收敛条件或终止迭代则跳出循环。

扫描系统的工作流程为: 首先初始化各路光纤输出, 设定各路初始相位控制电压为 0; 启动锁相控制, 直至光电探测器的反馈信号最强; 之后启动扫描, 依次等比增加各路光纤输出相位进行扫描(扫描实验中使用了四路光纤输出); 扫描器件继续测量光电探测器反馈, 若反馈信号的峰峰值过低限于锁相收敛速度约 40 ms 还不足以实现实时锁相, 因此需要暂停扫描重新执行锁相程序, 至光电探测器光强最强后重新执行扫描程序。上文中通过对模型的仿真已知, 在总相位差 $\alpha > 180^\circ$ 时, 相干合成光的主极

大会发生跳变, 因此为了便于通过图像处理手段提取主极大位置, 实验中最大相位差 α 值设置为 180° , 即当通过等比增加 α 达到 180° 时再逐步等比减小相位差值, 实现往返扫描。

图 7 所示为锁相前后的观察屏光强分布, 可以看出锁相后主极大干涉条纹的亮度明显提升区分度更强。扫描程序中先锁相后扫描和扫描偏差过大后再锁相的光电探测器输出信号波形见图 8。在初始化时, 首先完成锁相如图 8(a), 之后的一段时间内系统能够较为稳定的进行扫描, 主瓣光强变化比较稳定; 但在工作一段时间之后, 各路光纤间的相位误差增大, 相干合成效果变差, 同时受限于锁相收敛速度无法进行实时锁相, 因此在扫描中设定当检测到周期主瓣光强均值下降至最大值的 80% 时, 系统重新进入锁相收敛过程, 见图 8(b), 完成锁相后再继续扫描。



(a) 锁相前 (b) 锁相后
(a) Before phase locking (b) After phase locking

图 7 锁相前后相干合成光光强分布

Fig.7 Distribution of light intensity of coherent combining result before and after phase locking

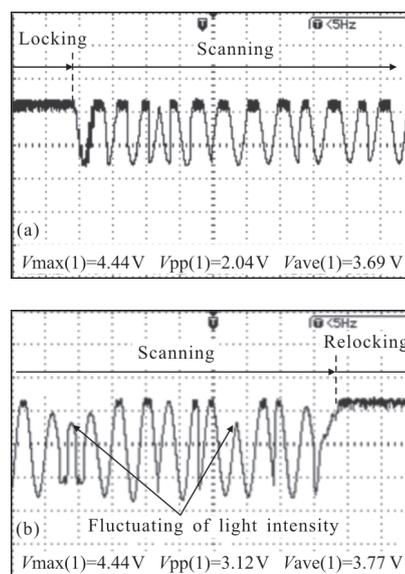


图 8 扫描过程中探测器信号变化过程
Fig.8 Change of detector signal during scanning

图 9 所示为截取的 7 s 时间内扫描过程中主极大光斑位置的变化情况。图中, x 轴为时间轴; y 轴为通过图像处理方法获得的主极大光斑质心位置相对视场光轴的夹角。从图中实线可看出, 相位角差值在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间来回变化时, 相干合成主极大光斑的移动范围约为 0.27° 摆角, 约对应 $1/2$ 个主干涉条纹间隔(主条纹间隔约为 83.75 个像素), 偏角变化实测值(实线)与理论模型计算值(虚线)的误差最大值在 $\pm 0.03^\circ$ 左右。实测数据与上文理论模型计算结果基本吻合, 表明该方法能够实现相干合成主极大光斑在一定摆角范围内的连续往返扫描。

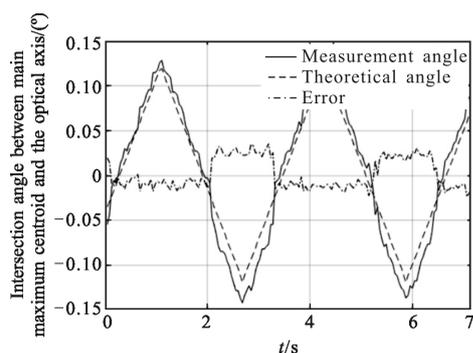


图 9 相干合成扫描主极大位置变化过程

Fig.9 Change of the position of maximal coherent-combining stripe during scanning

4 结 论

文中在含随机相位噪声的相干模型上对多芯线列光纤相干光扫描控制进行了数值仿真计算, 搭建了四路线列光纤相干角度扫描系统, 实现了角度扫描功能, 并验证了数值模型计算结果。实验结果表明在扫描过程中, 相干合成主极大光斑的质心位置与理论计算位置仍存在一定误差, 且存在一定波动, 后续将进一步探索提高锁相速度与稳定性的算法。总体上, 实验结果与理论模型具有较好的一致性, 说明该方法具备在实践用于相干合成扫描的领域的应用潜力, 具有重要的理论与实际应用价值。

参 考 文 献:

[1] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Haotong, et al. Synchronization and coherent combining of two pulsed fiber ring lasers based on direct phase modulation [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(5): 129-132.

[2] Cheng Xue, Wang Jianli, Liu Changhua. Beam combining of high energy fibre lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103011. (in Chinese)
程雪, 王建立, 刘昌华. 高能光纤激光器光束合成技术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103011.

[3] Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin, New technology and new configuration for high energy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(1): 37-42. (in Chinese)
周朴, 许晓军, 刘泽金, 等. 高能激光系统的新技术与新结构[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(1): 37-42.

[4] Mcnaught S J, Komine H, Weiss S B, et al. 100 kW coherently combined slab MOPAs [C]//Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference. CLEO/QELS 2009. Conference on IEEE, 2009: 1-2.

[5] Du Yuning, Chen Chao, Qin Li, et al. Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip[J]. *Chinese Optics*, 2018. (in Chinese)
杜悦宁, 陈超, 秦莉, 等. 硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器[J]. *中国光学*, 2018.

[6] Xia Lei. Research on technology in high precision laser beam combining and optical axis pointing control [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, 2017. (in Chinese)
夏蕾. 高精度激光合束及光轴指向控制技术[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.

[7] Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 276-280. (in Chinese)
周朴, 刘泽金, 许晓军. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 276-280.

[8] Geng Chao, Li Feng, Huang Guan, et al. Research progress of laser phased array technique based on fiber adaptive manipulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103003. (in Chinese)
耿超, 李枫, 黄冠, 等. 基于光纤自适应操控的激光相控阵技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103003.

[9] Xiao Liliang, Chen Qingshan, Lv Yong, et al. Far field power distribution of coherent beam synthesized with linear fiber array[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 792-796. (in Chinese)
肖立亮, 陈青山, 吕勇, 等. 线阵光纤阵列相干合成光束的远场光功率分布[J]. *激光与红外*, 2016, 46(7): 792-796.

[10] Li Jingzhen. Handbook of Optics [M]. Xi'an: Shaanxi Publishing Group, 2010: 131-133. (in Chinese)
李景镇. 光学手册 [M]. 西安: 陕西出版集团, 2010: 131-133.