

飞秒光纤激光相干偏振合成系统全光纤光程差自适应控制方法研究

张志新 于海龙 支 冬 马阎星 王小林 周 朴 司 磊

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 提出了一种全光纤光程差自适应控制方法, 并成功应用于飞秒光纤激光相干偏振合成系统。建立的光程差自适应控制系统以现场可编程门阵列(FPGA)控制电路为硬件基础, 基于爬山法设计了有效的控制算法, 成功解决了光程差自适应控制与锁相控制相互干扰的问题。实验结果表明, 系统可以完全补偿 $\pm 60\lambda$ 范围内的光程差漂移, 具有良好的连续工作稳定性, 可以满足飞秒光纤激光相干偏振合成系统中光程差自适应控制的要求。

关键词 光纤光学; 飞秒激光; 光程差控制; 相干偏振合成; 爬山法

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0906003

All Fiber Optical Path Difference Adaptive Control Method in Femtosecond Fiber Laser Coherent Polarization Beam Combination System

Zhang Zhixin Yu Hailong Zhi Dong Ma Yanxing Wang Xiaolin Zhou Pu Si Lei

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract An all-fiber optical path difference adaptive control method is proposed, and it has been successfully applied to the femtosecond fiber laser coherent polarization combination system. Field programmable gate array (FPGA) control circuit is used as the hardware foundation in the establishment of the optical path difference adaptive control system, and an effective control algorithm is designed based on the hill-climbing algorithm, which can successfully solve the disturbance problem between optical path difference adaptive control and phase-locked control. The experimental results show that the system can completely compensate the optical path difference drift in the range of $\pm 60\lambda$ with good continuous working stability, which can meet the requirements of optical path difference adaptive control in the femtosecond fiber laser coherent polarization combination system.

Key words fiber optics; femtosecond laser; optical path difference control; coherent polarization beam combination; hill-climbing algorithm

OCIS codes 060.2310; 140.3298; 030.1640; 320.7090

1 引 言

飞秒光纤激光在工业生产、生物医药工程、惯性约束聚变以及激光粒子加速等领域有着广泛的应用前景^[1-2]。然而, 受限于光纤严重的非线性效应、光学损伤以及模式不稳定性等物理机制, 单路飞秒光纤激光系统性能提升空间有限。近年来, 飞秒光纤激光相干偏振合成技术成为国际上的研究前沿, 有望突破单路飞秒光纤激光的性能局限, 实现高能高功率飞秒激光输出^[3-7]。与窄线宽连续激光和长脉冲激光不同, 飞秒脉冲具有脉宽窄、频谱范围广、相干长度短以及峰值功率高的特点, 其相干合成受光程差(OPD, D_{OPD})、色散以及

收稿日期: 2016-03-22; **收到修改稿日期:** 2016-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61378034, 61405255)

作者简介: 张志新(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光相干合成方面的研究。E-mail: chimwolf@163.com

导师简介: 司 磊(1971—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光传输与控制方面的研究。

E-mail: w_zt@163.com(通信联系人)

非线性相移等因素影响较大,相关研究表明飞秒激光相干合成要求光程差控制精度达到波长量级^[8-9]。目前的光程控制方法可以满足光程控制精度的要求,但是外界环境扰动以及光纤内热效应会引起光程差的缓慢漂移,严重影响了飞秒光纤激光相干偏振合成系统的合成效率以及系统稳定性。因此,在飞秒光纤激光相干偏振合成系统中必须对光程差进行主动反馈控制。

目前报道的光程差主动控制方法主要是一体化控制方案,即同时控制光程差与相位噪声。这种方法有其合理性,因为光程差与相位噪声本质上都是时间同步问题。而从实际系统的角度来看,一体化控制也有一些缺点。德国耶拿弗里德里希·席勒大学的研究人员提出了基于压电陶瓷镜的主动控制方法,实现了平均功率达 530 W 的 4 路飞秒脉冲相干合成^[10],这种方法是空间结构,光路同轴性、系统稳定性难以保证。美国密歇根大学的研究人员提出基于压电陶瓷相位调制器(FS)的光程差与相位噪声一体化控制方法,实现了 4 路百毫瓦级的飞秒脉冲相干合成^[11],这种方法是光纤结构,由于 FS 及其驱动电源的响应带宽有限,高功率合成时难以有效抑制高频的相位噪声。

本文结合不同方法的优势,采用光程差与相位噪声分离控制的方案,提出了一种行之有效的全光纤光程差自适应控制方法。以现场可编程门阵列(FPGA)控制电路为硬件基础,基于爬山法^[12-13]设计实现了光程差自适应控制算法,通过 FS 实现对光程差缓慢漂移的自适应控制,有效减少了光程差控制与单抖动算法高频相位噪声补偿之间的相互干扰。实验表明,系统可对 $\pm 60\lambda$ 范围内的光程差实现完全的自适应补偿,使合成效率保持在最优值,并且具有良好的连续工作稳定性。

2 实验系统与算法设计

2.1 实验系统

飞秒激光相干合成的基本前提是 2 个脉冲必须在时域上“重叠”在一起,即时间同步,其本质就是光程差控制问题。在飞秒光纤激光相干偏振合成系统中,由于色散管理的要求,需要保证各子光路的光纤长度一致,所以光程差控制要求总光程一致、自由空间和光纤传输部分的光程各自一致;系统光程差包括实验操作及设备条件等因素造成的固定偏差以及随环境缓慢变化的慢漂移两部分。基于以上分析,飞秒激光相干偏振合成系统中的光程差控制分为以下几个层级:

1) 调节空间光路,即准直器(CO)到偏振合束器(PBC1)的距离,使自由空间传输部分光程基本一致,通常操作精度可以达到 0.5 cm 以内。

2) 熔接被动光线,使光纤传输部分的光程基本一致,同时起到色散补偿的作用,一般操作精度可达到 1 cm 左右。

3) 调节光学延迟线(ODL)以消除固定光程差。ODL 调节精度高($0.3 \mu\text{m}$)、范围广($0\sim 180 \text{ mm}$),但响应速度慢($3 \mu\text{m/s}$),因此适用于补偿固定光程差,但不足以满足光程慢漂移自适应补偿的应用要求。

4) 通过 FS 实现光程差漂移的自适应补偿。FS 控制精度高($0.035 \mu\text{m/V}$)、响应速度快(1 阶谐振频率约 50 kHz),可以满足光程差慢漂移自适应控制的要求。

基于以上分析,设计并搭建了如图 1 所示的实验系统。其中种子源(oscillator)为一台锁模全光纤飞秒振荡器,直接输出啁啾皮秒脉冲,脉宽为 3.5 ps,重复频率为 80 MHz,输出最高平均功率为 17.7 mW,输出光谱中心波长为 1064.3 nm,3 dB 光谱宽度为 9.1 nm。种子激光经过长度为 182 m 的 $6/125 \mu\text{m}$ 单模保偏光纤(SMF),使激光脉宽展宽至 104 ps,之后进入预放大器(Pre-Amp)进行预放大;放大后的种子激光经过 50:50 分束器(splitter)后分为 2 路,每一路子光束分别经过 1 个铌酸锂(LiNbO_3)相位调制器(PM)、1 个光学延迟线、两个 FS、主放大器(Amp),之后由准直器准直输出到自由空间;旋转 PBC1 前的 2 个半波片,使入射到 PBC1 的 2 路子光束的偏振态正交,从而实现偏振合成;在此基础上,通过计算机控制终端(PC)调节 ODL,使 2 路子光束之间的光程差最小,此时 2 路子光束满足相干合成条件,但是由于相位噪声的存在,偏振合成光束的偏振态随机变化,PBC2 分出的 2 路子光束的激光功率出现起伏;施加锁相控制后,2 路子光束实现相干合成,可以输出稳定的相干偏振合成光。实验中 PBC2 的反射光为目标光,透射光为泄露光。在目标光出射端放置光电探测器(PD),采集目标光的光强作为主动反馈控制相位噪声和光程差的直接评价标准;在泄露光出射端放置 CCD 相机,用以观测光斑形态。

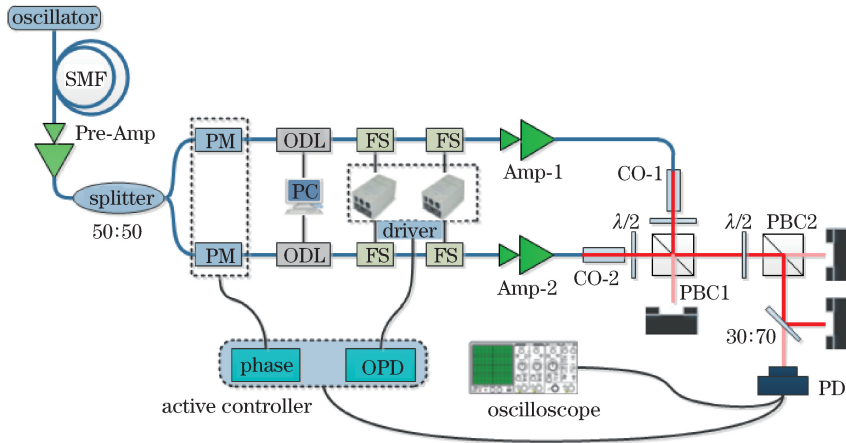


图 1 两路飞秒光纤激光相干偏振合成系统

Fig. 1 Coherent polarization combination system of two femtosecond fiber lasers

系统中包含 2 个独立的控制回路:其一是锁相控制回路,由单抖动法相位控制电路通过处理 PD 采集的光强信号驱动 PM 实现相位噪声补偿^[14-15];其二是光程差自适应控制回路,由光程差控制系统通过处理 PD 反馈信号控制高压驱动源(driver)驱动 FS 实现光程差漂移的自适应调节。需要说明的是,实验系统中每一回路分别采用 2 个串联的 FS,且驱动电压为 ± 450 V,而 FS 本身调节精度为 $0.035 \mu\text{m}/\text{V}$,额定电压为 ± 500 V,因此系统设计中光程差控制模块的调节范围为 $\pm 63 \mu\text{m}$ 。

光程差控制效果通过光束合成效率来反映,其定义为最大合成功率与总功率之比。事先测量 2 路子光束中用于合成的 2 路激光的注入光功率,计算出注入总功率 P_{total} ;在实验过程中观测并记录泄露光功率值,记为 P_{min} ,则光束合成效率可表示为

$$\eta = (P_{\text{total}} - P_{\text{min}}) / P_{\text{total}} \quad (1)$$

2.2 算法流程

在传统爬山算法的基础上,结合图 1 所示飞秒光纤激光相干偏振合成系统的实际情况,设计了用于光程差自适应控制的爬山算法,算法流程如图 2 所示,图中 DAC 为数字模拟转换器。光程差自适应控制与高频相位噪声补偿使用同一个评价函数,为减少相互之间的干扰,通过评价函数的前后比较智能地控制光程差自适应补偿算法的启动与终止:在光程差漂移不影响合成效率时($J_{\text{max}} - J_{\text{now}} \leq J_{\text{std}}$)算法不启动,对相位噪声补偿不会形成干扰;当光程差变化明显时($J_{\text{max}} - J_{\text{now}} > J_{\text{std}}$)启动算法控制,快速实现光程差自适应校正并退出算法。其中 1) J_{now} 、 J_{last} 、 J_{max} 、 J_{std} 分别表示当前评价函数值、上一次评价函数值、最大评价函数值以及评价函数比较判断阈值,通过不同评价函数的比较判断进而控制算法的启动/停止以及控制信号的变化方向等(J_{std} 的设置可以消除评价函数小幅抖动的影响)。2) U 、 dU 、 U_{min} 、 U_{max} 分别表示当前输出控制电压、控制电压扰动幅度以及控制电压输出阈值(最小值和最大值)。3) S_{dU} 和 S 分别用作控制信号变化方向和评价函数是否增大的标记信号; $S_{dU} = 1$ 时控制信号增大, $S_{dU} = 0$ 时控制信号减小, $S = 1$ 时表示评价函数增大,控制信号变化有效。出现评价函数值减小的情况时说明已将控制电压调节到当前最优,故而终止算法控制,反之则表示控制信号变化无效;出现评价函数值减小情况时表明调控方向错误,需要改变调控方向($S_{dU} = !S_{dU}$)继续算法控制。

3 实验结果分析与讨论

实验首先测定了光程差最小时的系统合成效率,并将其作为参考。通过 PC 调节 ODL,减小 2 路光束的光程差,并通过锁相电路进行相位锁定,实现稳定的相干合成。调节光程差到最优后,锁相控制从开环到闭环的归一化光强变化曲线如图 3 所示。

泄露光的光斑变化如图 4 所示。锁相控制开环时,由于高频相位噪声的存在,PBC2 的透射光与反射光均有光强起伏,如图 4(a)~(h);锁相控制闭环后,相位噪声得到实时补偿,形成稳定相干合成,PBC2 反射光

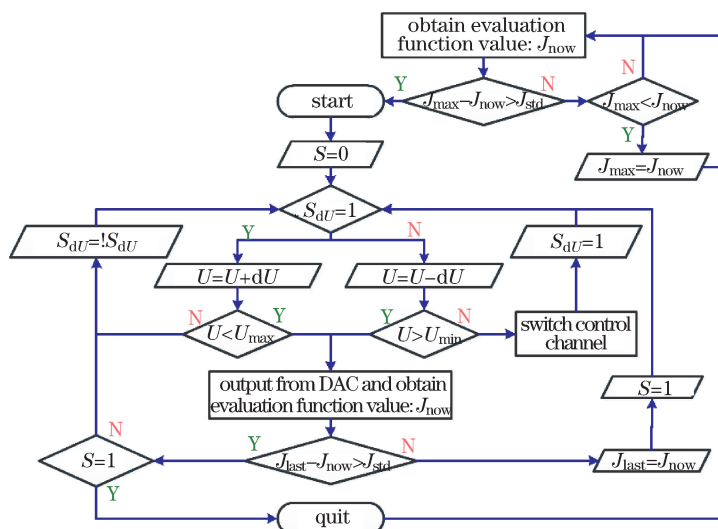


图 2 光程差自适应控制算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the optical path difference adaptive control algorithm

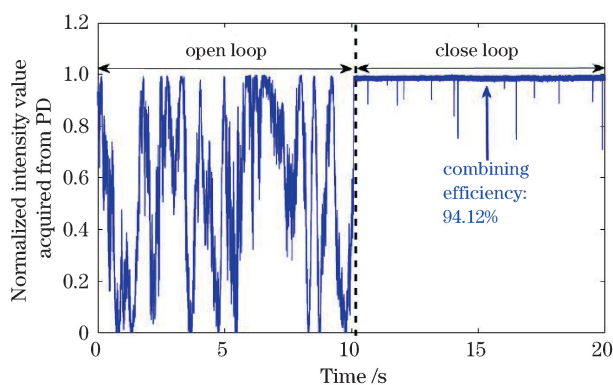


图 3 锁相控制从开环到闭环过程中归一化光强变化曲线

Fig. 3 Normalized intensity changing curves in the process of phase-locked control from open loop to close loop

保持在最强状态,透射光保持在最弱状态,如图 4(i)。

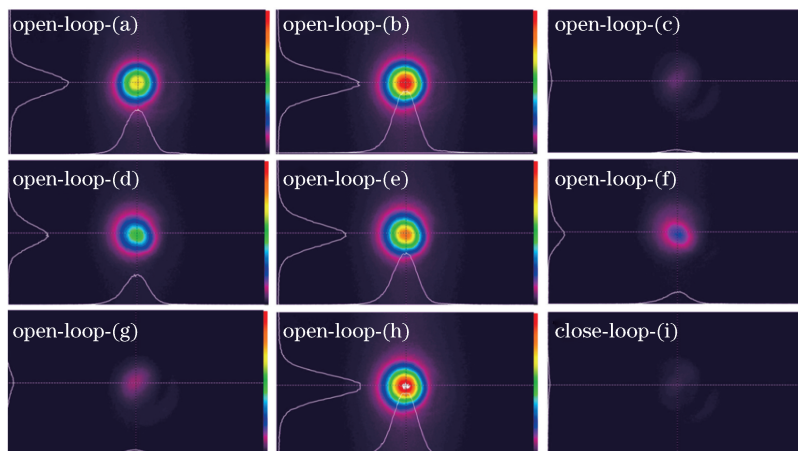


图 4 泄露光光斑形态。(a)~(h) 锁相控制开环;(i) 锁相控制闭环

Fig. 4 Beam profile of the leakage light. (a)-(h) Phase-locked control open loop; (i) phase-locked control close loop

实验中仅开启预放大器,未使用主放大器,测得注入总功率为 $P_{\text{total}} = 8.17 \text{ mW}$,泄露光最小功率值为 $P_{\text{min}} = 0.48 \text{ mW}$,因此最优合成效率约为 $\eta = 94.12\%$ 。实验系统中光纤长度不完全匹配导致存在一定的色散影响,此外相位噪声补偿中存在锁相残差,这些因素导致系统本身的合成效率有所降低。

为测试光程差自适应控制算法的有效性,通过调节 ODL 使 2 路光束产生一定的光程差,并应用 FPGA 控制电路利用光程差控制算法实现光程差自适应校正,在施加光程差自适应校正算法前后归一化光强值时域曲线图对比如图 5 所示。

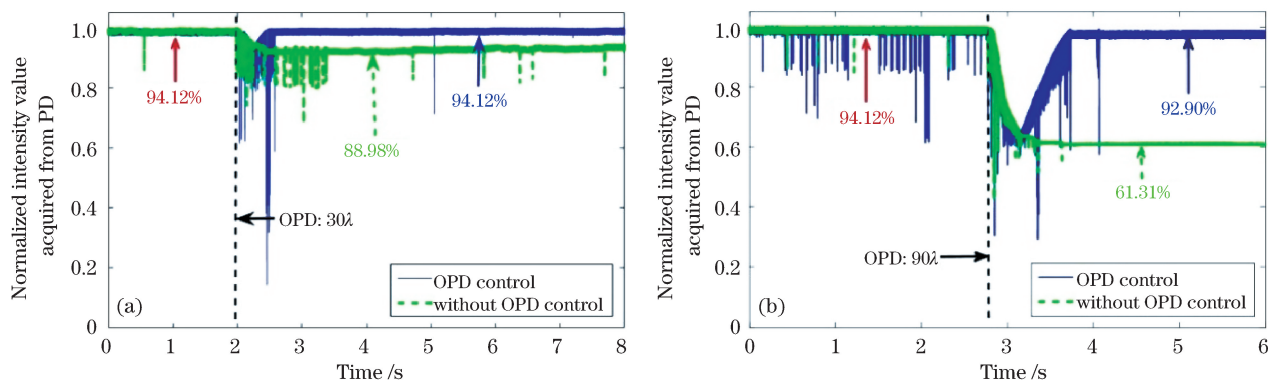


图 5 自适应校正算法施加前后归一化光强值变化曲线。(a)初始光程差为 30λ ; (b)初始光程差为 90λ

Fig. 5 Normalized intensity changing curves before and after adaptive correction algorithm.

(a) Initial OPD is about 30λ ; (b) initial OPD is about 90λ

当初始光程差较小(约 30λ)时,在 OPD 自适应控制算法启动前系统合成效率由 94.12% 下降到 88.98%,OPD 控制启动后系统合成效率逐渐提高至 94.12%,光程差被完全补偿;当初始光程差较大(约 90λ)时,在 OPD 控制算法启动前系统合成效率由 94.12% 下降到 61.31%,OPD 控制启动后系统合成效率提升至 92.90%,有效补偿了初始光程差(无法完全补偿的原因是 FS 调节范围有限,光程差超出器件可调节范围)。

在不同的光程差扰动情况下,对 OPD 自适应控制算法启动前后的系统合成效率进行测试,测试结果如图 6 所示。实验表明系统的光程差调节范围约为 $\pm 60\lambda$,与系统设计指标一致。在此范围内可以对光程差实现完全补偿,保持系统合成效率最优;超过这一范围后系统仍然有效,但不能完全补偿光程差,系统合成效率无法提升到最优值。系统调节范围主要受限于控制器件 FS 的调节范围,而 FS 损耗极小,可以通过多个 FS 串联的方式进一步增大调节范围。

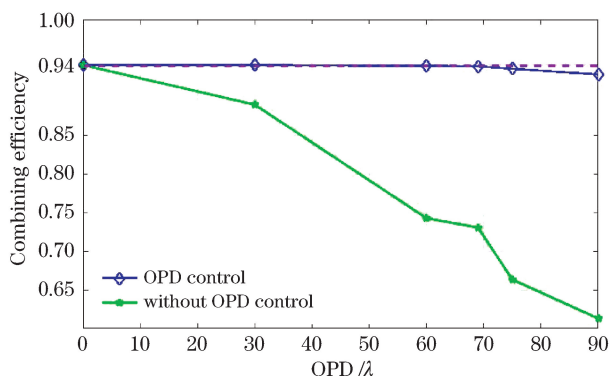
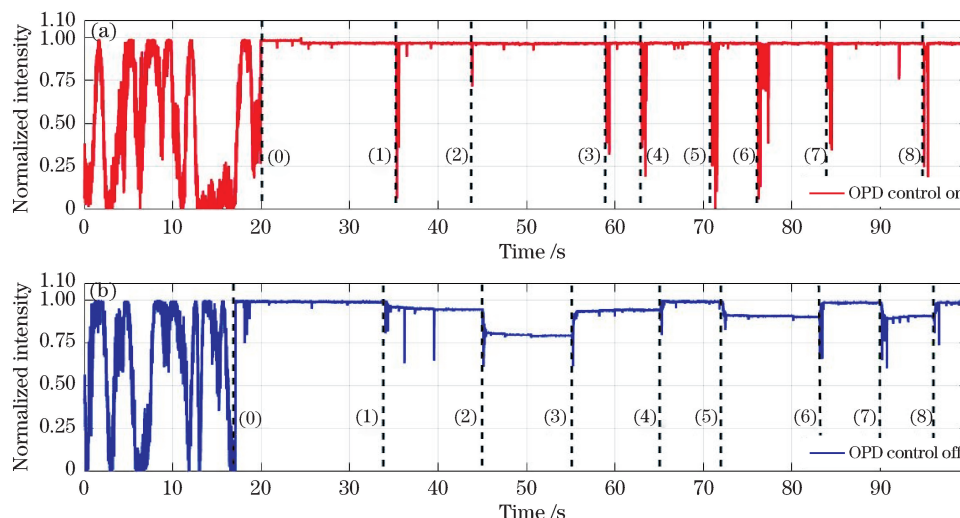


图 6 合成效率随光程差扰动幅度变化曲线

Fig. 6 Combining efficiency changing curves with OPD disturbance amplitude

此外,进行了光程差连续调节实验,以测试光程差自适应控制系统的连续工作稳定性。分别在光程差自适应控制系统启动和停止状态下,通过 ODL 改变 2 路光束的光程差 D_{OPD} ,即(0)锁相, $D_{OPD}=0$,(1) $D_{OPD}=-30\lambda$, (2) $D_{OPD}=-60\lambda$, (3) $D_{OPD}=-30\lambda$, (4) $D_{OPD}=0$, (5) $D_{OPD}=+30\lambda$, (6) $D_{OPD}=0$, (7) $D_{OPD}=+30\lambda$, (8) $D_{OPD}=0$ 。观察 PD 采集到的目标光束光强变化情况,如图 7 所示,每次光程差改变均能实现有效的补偿,保持系统合成效率最优。实验结果表明,光程差自适应控制系统具有较高的稳定性,可长时间保持有效的光程差自适应调节能力。



(0) 锁相, $D_{OPD}=0$; (1) $D_{OPD}=-30\lambda$; (2) $D_{OPD}=-60\lambda$; (3) $D_{OPD}=-30\lambda$; (4) $D_{OPD}=0$; (5) $D_{OPD}=+30\lambda$; (6) $D_{OPD}=0$; (7) $D_{OPD}=+30\lambda$; (8) $D_{OPD}=0$

图 7 光程差不断改变情况下的归一化光强变化曲线。(a) OPD 控制启动; (b) OPD 控制停止
Fig. 7 Normalized intensity changing curves under the condition of changing OPD continually.

(a) OPD control on; (b) OPD control off

4 结 论

采用光程差与相位噪声分离控制的方案,实现了飞秒光纤激光相干偏振合成系统中的全光纤光程差自适应控制。在利用单抖动法控制铌酸锂相位调制器进行高频相位噪声补偿的同时,通过改进的爬山算法控制 FS 进行光程差自适应控制,有效降低了两者之间的相互干扰,实现了对 $\pm 60\lambda$ 范围内光程差的完全补偿,具有较好的连续工作稳定性,能够满足飞秒光纤激光相干偏振合成系统的光程差自适应控制要求。

参 考 文 献

- 1 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: Frontier in laser precision micromachining[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 595-622.
何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 595-622.
- 2 Jia Wei, Wang Qingyue, Fu Xing, *et al.* Progress of femtosecond laser micromachining[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(2): 194-201.
贾 威, 王清月, 傅 星, 等. 飞秒激光在材料微加工中的应用[J]. 量子电子学报, 2004, 21(2): 194-201.
- 3 Arno K, Enrico S, Stefan D, *et al.* Coherently-combined two channel femtosecond fiber CPA system producing 3 mJ pulse energy[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24280-24285.
- 4 Arno K, Steffen H D, Tino E, *et al.* 22 GW peak-power fiber chirped-pulse-amplification system[J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6875-6878.
- 5 Daniault L, Hanna M, Lombard L, *et al.* Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers [J]. Optics Letters, 2011, 36(36): 621-623.
- 6 Enrico S, Arno K, Jens L, *et al.* Coherent addition of fiber-amplified ultrashort laser pulses[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27827-27835.
- 7 Enrico S, Arno K, Sven B, *et al.* Coherently combined fiber laser system delivering 120 μ J femtosecond pulses [J]. Optics Letters, 2011, 36(4): 439-441.
- 8 Arno K, Enrico S, Jens L, *et al.* Basic considerations on coherent combining of ultrashort laser pulses [J]. Optics Express, 2011, 19(25): 25379-25387.
- 9 Yu H L, Ma P F, Wang X L, *et al.* Influence of temporal-spectral effects on ultrafast fiber coherent polarization beam combining system[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(10): 105301.
- 10 Arno K, Sven B, Marco K, *et al.* 530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2283-2285.

- 11 Siiman L A, Chang W Z, Zhou T, *et al.* Coherent femtosecond pulse combining of multiple parallel chirped pulse fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 18097-18116.
- 12 Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubin. Hill-climbing adaptive optics wavefront correction system [J]. *Chinese J Lasers*, 1988, 15(1): 17-21.
姜文汉, 黄树辅, 吴旭斌. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. *中国激光*, 1988, 15(1): 17-21.
- 13 Zhou Lei, Ren Ge, Tan Yi, *et al.* Experiment of closed-loop pointing errors compensated by hill-climbing method in laser pointing system using return photons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1201003.
周 磊, 任 戈, 谭 毅, 等. 回波瞄准系统中基于爬山法的光束闭环瞄准实验 [J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1201003.
- 14 Ma Y X, Zhou P, Wang X L, *et al.* Coherent beam combination with single frequency dithering technique[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(9): 1308-1310.
- 15 Ma Yanxing. Study on coherent beam combination of fiber laser based on dithering phase locking technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 67-74.
马阎星. 光纤激光抖动法相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 67-74.