

光学学报

基于光谱滤波的宽谱激光相干合成光程与相位同步控制研究

常洪祥¹, 靳凯凯¹, 张雨秋¹, 张嘉怡¹, 金坤¹, 李灿¹, 栗荣涛^{1,2,3**}, 冷进勇^{1,2,3}, 周朴^{1*}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;

³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 高精度光程控制是宽谱激光相干合成中的关键技术之一,是在一定光谱宽度条件下保持多路激光相干性的重要手段。为了保持各路激光之间的时间相干性,对于光谱宽度为 10 nm 量级的激光,光程差一般要控制在十几个波长以内。因此,为了实现宽谱激光的相干合成,除了对多束激光进行相位控制,还需要同步地对各路激光之间的光程差进行有效控制。本文研究了基于光谱滤波的相位与光程同步控制技术,利用放大自发辐射光源和中心波长为 1064 nm 的光纤带通滤波器产生光谱宽度为 10 nm 的光纤激光,通过光谱滤波的方式实现相位和光程的同步探测与控制,光程控制范围优于 0.1 ps,相位控制残差 $<\lambda/16$ 。该方法在高平均功率光纤激光相干合成中具有重要的应用价值。

关键词 相干合成; 超短脉冲; 光谱滤波; 光程控制

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231162

1 引言

光纤激光器具有转换效率高、结构紧凑、维护方便等优点,在工业加工、材料处理、雷达探测等领域有着广泛的应用^[1-2]。一些应用领域,对光纤激光器的输出功率要求较高,如:利用高功率飞秒激光成丝原理的光丝激光雷达实现大气多组分检测^[3];利用窄线宽光纤激光器实现远距离多普勒风速测量^[4];利用 532 nm 绿光激光器对铜材料进行处理及三维打印等应用场景^[5-7],通过提高光纤激光器的输出功率可以提高探测距离和加工效率。由于光纤中存在受激布里渊散射等非线性效应以及模式不稳定现象,单根光纤输出功率受到一定限制^[8-10],利用多束激光进行相干合成是获取高平均输出功率光纤激光的有效方式之一^[11-15]。相位控制是实现多束激光相干合成的重要方面,除此之外,在一些情况下光程控制也很关键,如飞秒脉冲或高功率连续宽谱激光的相干合成。在脉冲光纤激光相干合成中,脉冲越短其光谱就越宽^[16],而在高功率连续光纤激光相干合成中,也往往通过施加相位调制对种子线宽适当展宽来抑制光纤放大器中的非线性效应^[17]。光谱宽度的平方和相干长度成反比,更宽的光谱宽度对相干合成系统中各路激光光程控制提出了更高的要求^[18]。各路激光之间的光程差会导致多路脉冲激光时

域重合上存在误差,较大的光程差还会引起群延时,使得谱宽范围内的不同光谱无法同时实现相干相长,从而降低了合成效率^[19-20]。

本文对基于光谱滤波方法实现宽谱激光相干合成进行了研究,利用随机并行梯度下降算法对宽谱激光相干合成相位和光程同步控制进行了数值仿真,搭建了两路光谱宽度为 10 nm 的宽谱激光相干合成系统,实现了超过 0.1 ps 光程差的实时光程控制。该方法能够有效解决光纤激光相干合成系统中的光程实时控制问题。

2 基本原理

2.1 系统结构

系统原理图如图 1 所示,保偏宽谱放大自发辐射光源(输出功率约为 50 mW)经光纤滤波器滤出中心波长为 1064 nm,光谱宽度(3 dB)为 10 nm 的光纤激光,经 50:50 光纤耦合器分成两束,分别经过相位调制器(PM)、延迟线(DL)、光纤拉伸器(FS),由另一个 50:50 的光纤耦合器合成为一束光。合成后的激光经一个 90:10 的光纤耦合器分成两束,使得大部分激光输出到自由空间中,小部分光作为反馈信号进行相位和光程差控制。作为反馈信号的激光分为三个部分,一部分直接由光电探测器 1(PD1)采集并与示

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-07-13; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(62275272)

通信作者: *zhoupu203@163.com; **surongtao@126.com

波器相连接用于观察合成后激光的总的光强变化,另外两个部分经过带通滤波器 1(BPF1)和带通滤波器 2(BPF2)分别滤出中心波长为 1061 nm 和 1066 nm、光谱宽度(3 dB)为 2 nm 的激光。光电探测器 2(PD2)用于探测波长为 1060~1062 nm 的干涉光强,光电探测器 3(PD3)用于探测波长为 1065~1067 nm 的干涉光强。三个光电探测器为硅探测器,波长响应

范围为 320~1100 nm,带宽为 11 MHz。将光电探测器 3 的输出信号作为相位反馈信号,光电探测器 2 的输出信号作为光程反馈信号,分别由数据采集卡(DAQ)采集并由计算机(PC)进行计算。然后再通过数据采集卡对相位调制器、光纤拉伸器和延迟线进行控制,实现两束激光之间的相位和光程的实时控制。

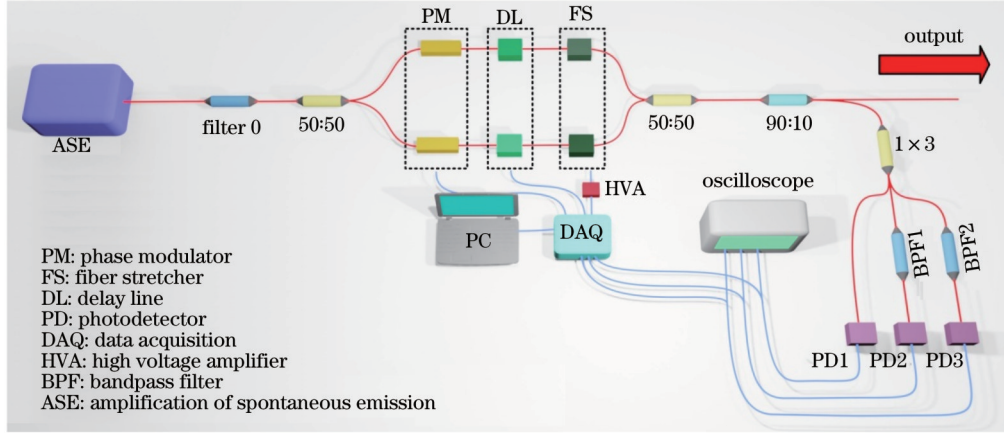


图 1 系统原理图

Fig. 1 System schematic diagram

数据采集卡数模转换位数为 16 位,输出电压范围为 -10~10 V。用于相位控制的输出信号可直接施加到铌酸锂相位调制器上,相位调制器的半波电压约为 2.5 V,因此相位控制范围约为 4λ 。用于光程控制的输出信号还要经过高压放大器(HVA)20 倍的放大然后再对光纤拉伸器进行控制。光程控制范围最高可达 0.16 ps,取决于光纤拉伸器的拉伸量。光纤拉伸器可接受的输入电压范围为 0~150 V,当使用数据采集卡进行光程控制时,需要限制输出幅度为 0~7.5 V。光程控制精度取决于数据采集卡量化位数、拉伸器的控制电压范围、高压放大器放大倍数,以及系统误差等因素,光程的控制精度可优于 0.1 fs。不同于将总的合成光强变化作为评价函数,利用光谱滤波方式可以分别对相位和光程进行探测,能够实现光程和相位的有效解耦^[21]。实现光程控制的本身也是实现相位控制,相位控制方法如随机并行梯度下降算法、抖动法等都可以用于光程和相位的同步控制^[22-24]。

2.2 理论模型

宽谱光源可由积分形式表示为

$$u = \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(\lambda) \exp[2\pi i(z - ct)/\lambda] d\lambda, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; E_0 为振幅; z 为传输距离; t 为时间。

当光谱谱形为中心波长为 1064 nm、宽度为 10 nm 的矩形光谱时, E_0 可以归一化表示为

$$\begin{cases} E_0(\lambda) = 1, \lambda \in (1059 \text{ nm}, 1069 \text{ nm}) \\ E_0(\lambda) = 0, \lambda \notin (1059 \text{ nm}, 1069 \text{ nm}) \end{cases}. \quad (2)$$

当两束宽谱激光进行干涉时,干涉光强 I 可表

示为

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} 2E_0(\lambda)E_0^*(\lambda) + 2E_0(\lambda)E_0^*(\lambda) \cos\left[\phi(\lambda) - \frac{2\pi c\Delta L}{\lambda}\right] d\lambda, \quad (3)$$

式中: ΔL 为两路激光之间的光程差; ϕ 为两路激光之间的相位差。当扩展为 N 束激光时,总的干涉光强可表示为

$$I = \left| \sum_{n=1}^N \int_{-\infty}^{+\infty} E_n(\lambda) \exp[2\pi i(L_n - ct)/\lambda + i\phi_n(\lambda)] d\lambda \right|^2, \quad (4)$$

式中: E_n 为第 n 束光的振幅; L_n 为第 n 束光的光程; ϕ_n 为第 n 束激光的相位。

通过数值仿真计算,可以得到 $\phi=0$ 时不同光程差与干涉光强之间的关系如图 2 所示。随着光程差的增加,两束光之间相干性逐渐下降,合成后的峰值功率逐渐降低。图 2 中的第一个零交叉点对应的横坐标约为 113 μm ,这也与用式(5)计算的相干长度 L_c 是一致的。

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (5)$$

从式(3)可以看出,当存在光程差时,不同波长干涉光强最大值对应的相位值是不同的。利用带通滤波器对干涉光强滤波得到的光强公式与式(3)类似,不同之处在于振幅表达式中光谱取值范围不同,通带为 1060~1062 nm 矩形带通滤波器 1 和通带为 1065~1067 nm 矩形带通滤波器 2 的归一化振幅表达式分别为

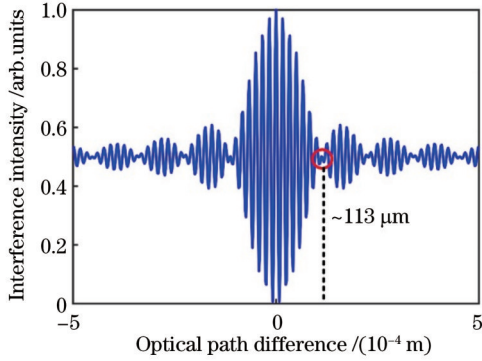


图 2 光程差与干涉光强之间的关系

Fig. 2 Relationship between optical path difference and interference light intensity

$$\begin{cases} E_1(\lambda) = 1, \lambda \in (1060 \text{ nm}, 1062 \text{ nm}) \\ E_1(\lambda) = 0, \lambda \notin (1060 \text{ nm}, 1062 \text{ nm}) \end{cases}, \quad (6)$$

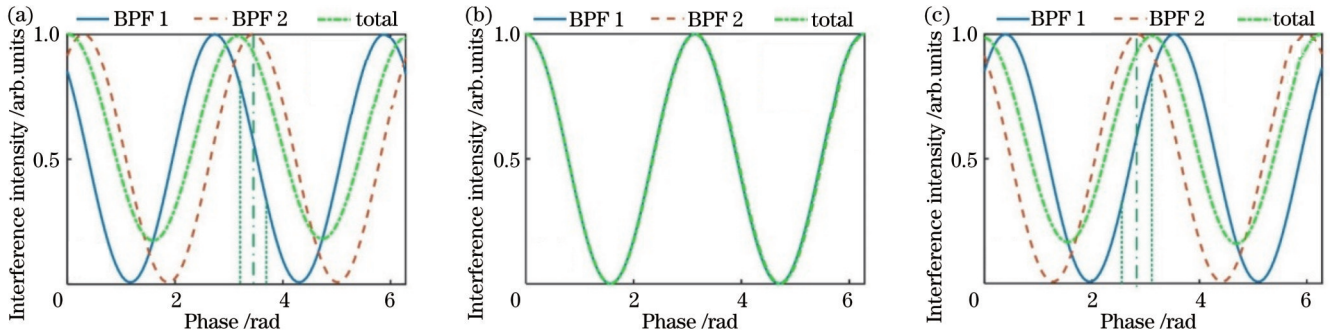


图 3 带通滤波器 1 和带通滤波器 2 输出干涉光强与相位差之间的关系。(a)光程差为 $-50 \mu\text{m}$; (b)光程差为 0 ; (c)光程差为 $50 \mu\text{m}$

Fig. 3 Relationship between interference light intensity and phase difference of the output of BPF 1, BPF 2, and total laser.

(a) Optical path difference of $-50 \mu\text{m}$; (b) optical path difference of 0 ; (c) optical path difference of $50 \mu\text{m}$

2.3 算法流程

图 4 为利用随机并行梯度下降算法对光程和相位控制的流程。对相位和光程进行同步控制的策略为首先在短时间内完成相位控制,然后在相位控制完成的基础上,周期性地对光程进行控制。首先生成随机扰动 du ,然后施加到相位调制器上。通过光电探测器 3 和光电探测器 2 分别获取相位和光程评价函数 J_{pa} 和 J_{pb} 。再输出扰动 $-du$ 到相位调制器上,通过光电探测器 3 和光电探测器 2 分别获取相位和光程评价函数 J_{na} 和 J_{nb} 。根据两次扰动引起评价函数的变化,计算相位控制电压变化量 dU_a 和光程控制电压变化量 dU_b 。随即将相位控制电压变化更新到相位控制输出,而光程控制输出则根据需要进行更新。在本文中,光程控制输出的条件为 1 s 更新一次,可根据系统光程漂移的快慢设定具体的光程控制频率。除此之外,为了避免对相位控制产生干扰,光程控制频率还要小于相位控制频率。

相位控制电压更新方向与梯度方向一致,而光程控制电压更新方向取决于用于相位探测和光程探测激光波长之间的关系。由图 3 可知,当光程差为正时:若

$$\begin{cases} E_2(\lambda) = 1, \lambda \in (1065 \text{ nm}, 1067 \text{ nm}) \\ E_2(\lambda) = 0, \lambda \notin (1065 \text{ nm}, 1067 \text{ nm}) \end{cases}. \quad (7)$$

通过数值仿真计算当存在 $-50 \mu\text{m}$ 、 $0 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$ 光程差时,两个不同中心波长的带通滤波器输出的干涉光强与相位 ϕ 之间的关系分别如图 3(a)~(c) 所示。图 3(b) 中光程差为 0 时,相同的相位差对应不同光谱范围的干涉光强变化趋势是相同的,因此可以在相差为 0 时得到最大的总干涉光强。从图 3(a) 和图 3(c) 可以看出,由于光程差的存在,相同的相位差对应不同光谱范围的干涉光强是不同的,不同波长之间干涉光强最大值无法重叠从而降低了干涉后光强的峰值功率。因此,可以利用这一特点反向分别对这两个光谱范围的光束进行相位控制,使其同时达到干涉光强最大值,实现全光谱范围的干涉峰值对齐,进而消除光程差。

以带通滤波器 2 滤波后的激光光强作为相位控制信号,则当实现相位控制后,带通滤波器 2 的响应曲线极大值附近对应的带通滤波器 1 的一阶导数为正值,利用随机梯度下降算法进行梯度估计时得到的梯度方向也为正值;若使带通滤波器 1 的响应曲线也达到极大值,则光程差补偿值符号应与梯度方向相反为负号;若以带通滤波器 1 滤波后的激光光强作为相位控制信号,则带通滤波器 1 的响应曲线极大值附近对应的带通滤波器 2 的一阶导数为负值,光程差补偿值符号应为正号。当光程差为负时,情况也是类似的。因此,光程控制的更新控制输出的符号取决于所选的用于相位控制的激光中心波长 λ_1 和用于光程控制的激光中心波长 λ_2 ,当 $\lambda_1 > \lambda_2$ 时取正号,反之取负号。

3 结果与分析

3.1 数值仿真

两路相位与光程同时控制数值仿真的结果如图 5 所示,相位误差为随机误差,光程差设为 $50 \mu\text{m}$ 。图 5(a) 为利用波长为 $(1066 \pm 1) \text{ nm}$ 激光作为相位控制信号时的光强变化曲线,图 5(b) 为利用波长为 $(1061 \pm$

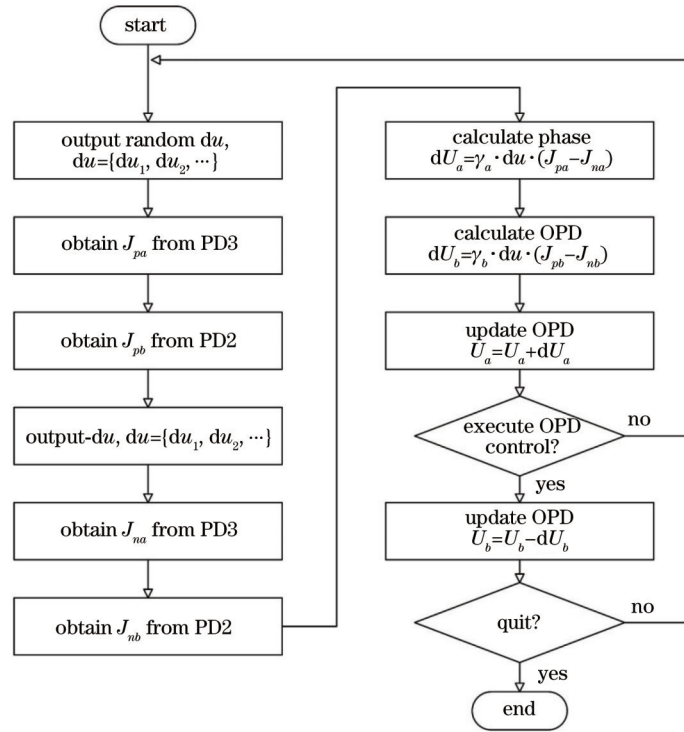


图 4 相位和光程控制流程图

Fig. 4 Flowchart of phase and optical path control

1) nm 激光作为光程控制信号时的光强变化曲线, 图 5 (c)为总的光强变化。在第 2100 次迭代步数之前只执行相位控制未执行光程控制, 在 2100 次迭代步数之后每经过 100 迭代次数就执行一次光程控制进行相位与光程的同时控制。在只执行相位控制时, 图 5(a)中的相位控制光强迅速升高并接近于归一化强度 1。由于存在 50 μm 的光程差, 图 5(b)中的光程控制光强达到干涉极大值的相位条件与图 5(a)不同, 因此稳定在某一低于归一化强度 1 的位置。由于各个波长没有同时达到最大干涉强度, 图 5(c)所示总的光强不能达到极大

值。在第 2100 次迭代之后每隔 100 次迭代就进行一次光程控制, 每经过一次光程控制图 5 中的各光强都得到了提高。经过 5 次左右的光程迭代, 总的光强可以达到接近归一化强度 1。在光程控制迭代最开始的几步中, 由于光程差较大, 两个不同波长干涉光强最大值对应的相位不同, 因此图 5 中开启光程控制后的几次迭代会出现光强的短暂降低。当光程差在控制到较小后, 即第 3000 次迭代步数之后便不再出现光强的显著降低。此时图 5(a)和(b)中的光强也均接近相应的归一化强度 1, 实现了有效的光程控制。

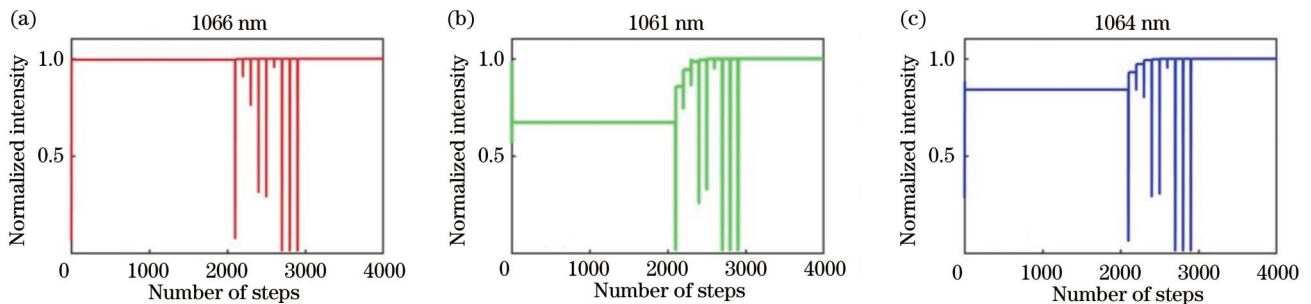


图 5 相位和光程控制数值仿真结果。(a)相位控制光强变化;(b)光程控制光强变化;(c)总光强变化

Fig. 5 Numerical simulation results of phase and optical path control. (a) Light intensity variation of phase control; (b) light intensity variation of optical path control; (c) total light intensity variation

3.2 实验结果

基于以上理论与数值仿真研究, 搭建了如图 1 所示的实验系统进行验证。利用保偏宽谱放大自发辐射光源测得滤波器 2、滤波器 1 和滤波器 0 的光谱响应分

别如图 6(a)~(c)所示。经滤波器 0 滤波获取中心波长为 1064 nm、光谱宽度为 10 nm 的矩形光谱光源。利用滤波器 2 滤出合成后激光中的 (1066 ± 1) nm 的光谱成分作为相位控制反馈信号, 利用滤波器 1 滤出合成

后激光中的(1061±1) nm 的光谱成分作为光程控制 反馈信号,进行相位与光程的同步控制。

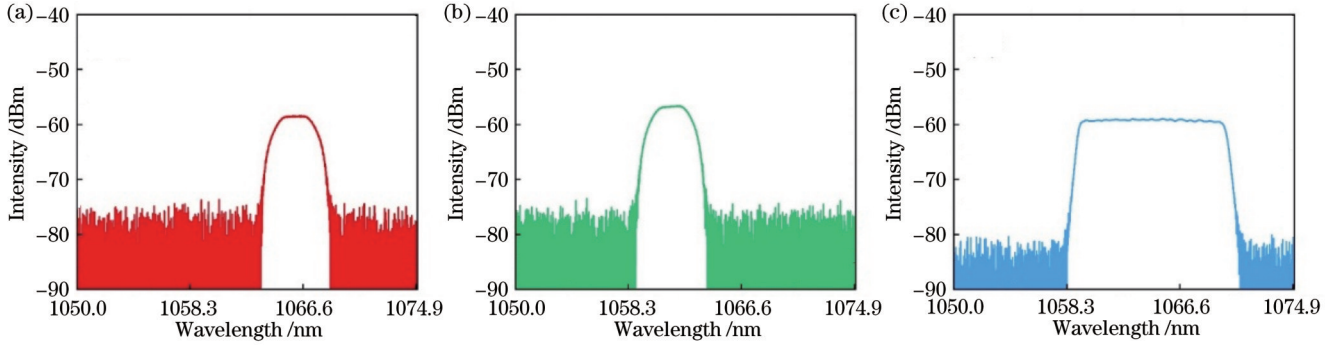


图 6 带通滤波器的光谱响应。(a)(1066±1) nm;(b)(1061±1) nm;(c)(1064±5) nm

Fig. 6 Spectral response of the bandpass filters. (a) (1066±1) nm; (b) (1061±1) nm; (c) (1064±5) nm

首先利用一个皮秒脉冲源对初始系统中的光程差进行粗略测量,将光电探测器 1 替换为带宽为 5 GHz 的高速探测器得到两路皮秒脉冲到达时间如图 7 所示。两路激光之间初始光程差 ΔL 可表示为

$$\Delta L = \frac{\Delta t \cdot c}{n_f}, \quad (8)$$

式中: Δt 为两路皮秒脉冲到达时间间隔; c 为光速; n_f 为光纤纤芯折射率。通过熔接光纤方式对初始光程差进行粗略补偿,将光程差缩短到电动光纤延迟线量程范围 600 ps 内,然后进一步通过电动光纤延迟线将光程差调整到相干长度之内。

分别开启相位和光程控制,得到从开环到闭环的干涉光强曲线,如图 8 所示。图 8(a)为 1066 nm 滤波后干涉光强变化曲线,图 8(b)为 1061 nm 滤波后干涉光强变化曲线,图 8(c)为总的光强变化曲线。从图 8 可以看出,在系统开环时,由于未对相位和光程进行控制,干涉光强在噪声的影响下随机起伏。在进行相位控制后,与图 5 相似,图 8(a)相位控制干涉光强能够达到较高值,光程控制干涉光强和总的干涉光强稳定在某一固定值附近。当启动光程控制后,光程控制周期约为 1 s,各干涉光强均得到了有效提升,说明该系统对光程进行了有效的补偿,相位控制残差 $<\lambda/16$,合成

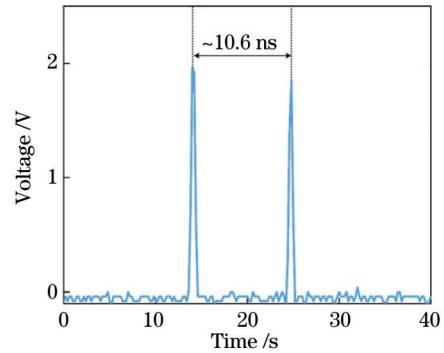


图 7 两路激光初始光程差

Fig. 7 Initial optical path difference between two beams

效率约为 90.3%。

然而在图 8(b)和图 8(c)中,当对相位和光程同时进行控制时,干涉光强存在较大的波动,且图 8(c)中的波动小于图 8(b)。将图 8(c)光程和相位同时进行控制的干涉光强局部放大得到图 9。图 9(a)为局部放大后的时域图,图 9(b)为对应的频域图。从图 9(b)可以看出,在图 8(c)光程和相位同时进行控制的干涉光强信号上叠加了一个强度较大的 50 Hz 工频干扰信号,在图 9(b)中 50 Hz 及其二次谐波 100 Hz 的位置都出现了较强的峰值。从图 9(a)可以看出,该信号是

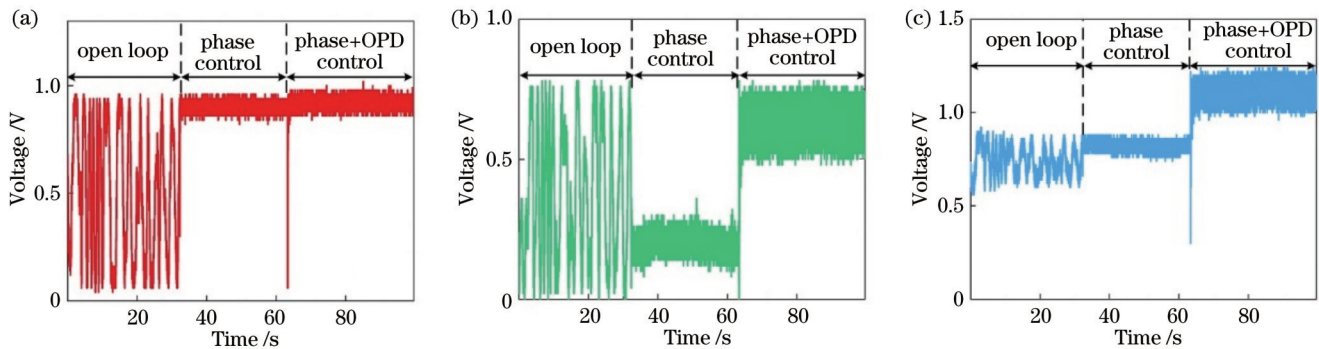


图 8 干涉光强变化曲线。(a)1066 nm 干涉光强变化曲线;(b)1061 nm 干涉光强变化曲线;(c)总光强变化曲线

Fig. 8 Interference light intensity variation curves. (a) 1066 nm interference light intensity variation curve; (b) 1061 nm interference light intensity variation curve; (c) total light intensity variation curve

图 8(b)和图 8(c)中干涉光强存在波动的主要影响因素。由于该信号是在启动了光程控制之后引入的,在光程控制中使用了高压放大器对光纤拉伸器进行驱动,高压放大器对耦合进系统中的 50 Hz 工频信号进

行了放大导致最终的干涉光强存在较大起伏。因此,实际相位控制残差比图 8 中计算的 $\lambda/16$ 小。通过进一步优化控制系统,抑制工频干扰可以提高最终的控制效果。

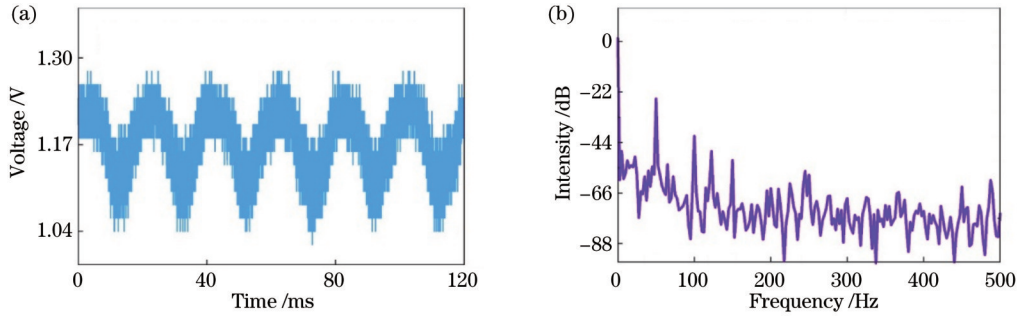


图 9 相位和光程同时控制总干涉光强局部放大图及其频谱图。(a)时域图;(b)频域图

Fig. 9 Partial enlarged detail of total interference light intensity under simultaneous phase and optical path control and its spectral diagram. (a) Time domain diagram; (b) frequency domain diagram

图 8(c)中的总合成光强的波动较图 8(b)中光程控制曲线波动小的原因在于总的激光中心波长相比用于光程控制的激光中心波长,更接近用于相位控制的激光中心波长。如第 2 节中图 3(a)所示,由于相位控制残差在 BPF2 的曲线极值点小范围波动,而总光强曲线的极值点相比于 BPF1 曲线的极值点更接近 BPF2 的极值点,因此具有更小的一阶导数,在时域上表现为更小的波动。这也意味着用于相位控制的激光中心波长与总激光的中心波长越接近,得到的总干涉光强会越平稳,在后续工作中将进一步研究。

度均得到了提升,也说明光程差得到了有效的控制。在相位和光程同时控制后,1066 nm 光谱强度相比于仅有相位控制时有所降低,原因是在开启光程控制后引入的 50 Hz 干扰噪声降低了相位控制精度,可以通过优化控制电路解决这一问题。

除了 50 Hz 工频信号干扰之外,在图 9(b)中还出现了频率约为 122 Hz 的峰值强度,对图 8(c)中开环部分时域进行频谱分析,如图 10 所示。可以看出,系统在无控制介入时开环仍存在 122 Hz 峰值强度,该干扰可能来自 ASE 光源本身强度噪声。

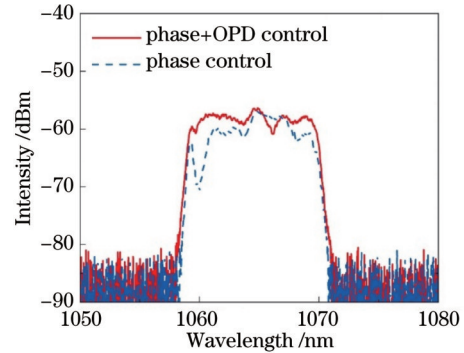


图 11 仅相位控制及相位和光程同时控制时的光谱

Fig. 11 Spectra under phase control only and simultaneous phase and optical path control

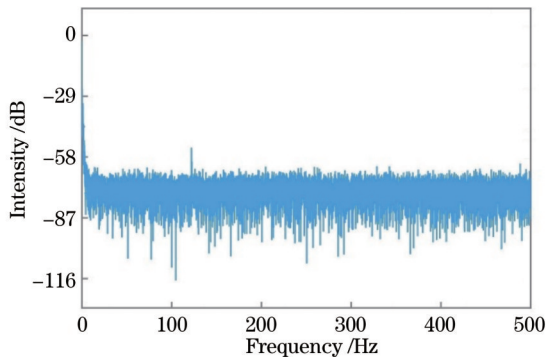


图 10 总干涉光强开环频谱图

Fig. 10 Openloop spectrogram of total interference light intensity

对系统在仅相位控制和相位光程同时控制的光谱中进行测量,得到如图 11 所示的光谱图。当仅有相位控制时,1066 nm 附近光谱强度较高,其余光谱强度相对较低。当相位和光程同时控制时,整个光谱范围强

为了测试光程控制范围,在开启相位控制后通过电动延迟线将光程差调整到 0 ps,即通过电动延迟线将总干涉光调整到最大值,计算此时没有工频干扰下的相位控制残差 $< \lambda/26$,如图 12 所示。7 s 后人为施加额外 -0.1 ps 的光程差,此时图 12 中的干涉光强出现了显著下降。在 12 s 左右时打开光程控制,干涉光强最大值恢复到人为施加光程扰动之前的最大值。图 12 说明了该方法能够对超过 0.1 ps 的光程差进行补偿,在激光波长为 $1 \mu\text{m}$ 时,能够覆盖十几个波长的光程控制,满足宽谱激光相干合成系统对光程控制的要求。

4 结 论

本文对基于光谱滤波方法在宽谱激光相干合成中

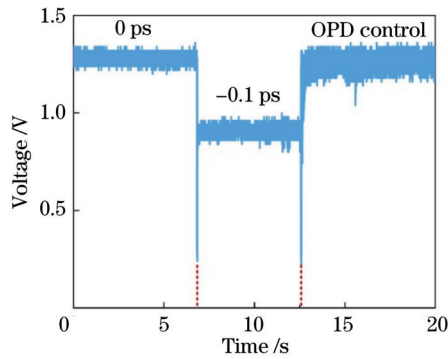


图 12 手动改变光程差后实施光程控制的实验结果

Fig. 12 Experimental results of implementing optical path control after manually changing optical path difference

实现相位与光程同步控制展开了研究。将合成后的激光进行适当滤波得到不同的光谱成分,通过对不同光谱成分分别进行相位控制实现整个光谱范围的相位和光程同步控制。并且,分别从理论和实验上验证了该方法的可行性,给出了详细的控制流程,实验测得光程控制范围优于 0.1 ps,相位控制残差 $<\lambda/16$ 。相比于传统的光程和相位控制方法,本文方法具有理论模型清晰、可靠性高、扩展性好等优点,在飞秒脉冲和高功率连续宽谱激光的相干合成中具有重要的应用价值。后续工作将重点优化控制系统、提升控制精度、利用光纤光栅实现不同带宽滤波以及明确滤波波长对合成效果影响等方面,并将该方法应用于超短脉冲相干合成以及实现不同光谱之间相位与延迟锁定,实现更多路数、更宽谱宽的超短脉冲相干合成。

参 考 文 献

- Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- 周朴,冷进勇,肖虎,等.高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J].*中国激光*, 2021, 48(20): 2000001.
Zhou P, Leng J Y, Xiao H, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2000001.
- 刘伟伟."基于光丝激光雷达的大气污染多组分监测技术研究"项目专题前言[J].*中国激光*, 2023, 50(7): 0700101.
Liu W W. Preface to the project on "research on multicomponent monitoring technology of air pollution based on filament Lidar" [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(7): 0700101.
- Lombard L, Valla M, Planchat C, et al. Eyesafe coherent detection wind lidar based on a beam-combined pulsed laser source[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 1030-1033.
- 马天,李富全,林宏兔.基于光纤激光倍频的高功率绿光源研究进展[J].*强激光与粒子束*, 2023, 35(7): 071005.
Ma T, Li F Q, Lin H H. Recent progress of high power green laser based on frequency doubling technology for fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(7): 071005.
- Želudevičius J, Rutkauskas R, Regelskis K. Coherent beam combining of pulsed fiber amplifiers by noncolinear sum-frequency generation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1813-1816.
- Wetzig A. Flexible fiber laser for rapid material processing[EB/OL]. (2021-07-21) [2023-06-08]. https://www.iws.fraunhofer.de/en/newsandmedia/press_releases/2021/press-release_2021-13_civan.html.
- Kobyakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 2(1): 1-59.
- Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13218-13224.
- Ren S, Lai W C, Wang G J, et al. Experimental study on the impact of signal bandwidth on the transverse mode instability threshold of fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7845-7853.
- 李枫,邹凡,姜佳丽,等.57孔径光纤激光相控阵自适应光学系统实现经 2 km 大气传输的目标在回路相干合成[J].*中国激光*, 2022, 49(6): 0616002.
Li F, Zou F, Jiang J L, et al. 57-aperture fiber laser phased array adaptive optical system realizes the coherent synthesis of targets transmitted through 2 km atmosphere in the loop[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(6): 0616002.
- 周朴,栗荣涛,马阎星,等.激光相干合成的研究进展:2011—2020[J].*中国激光*, 2021, 48(4): 0401003.
Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401003.
- Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16 kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126021.
- 吴坚,马阎星,马鹏飞,等.光纤激光相干合成 20 kW 级高功率输出[J].*红外与激光工程*, 2021, 50(9): 20210621.
Wu J, Ma Y X, Ma P F, et al. Coherent synthesis of 20 kW high power output by fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210621.
- 陈润植,邢宇婷,张瑶,等.超快光纤激光中的非线性脉冲放大技术(特邀)[J].*光子学报*, 2022, 51(7): 0751415.
Chen R Z, Xing Y T, Zhang Y, et al. Nonlinear amplification techniques for ultrafast fiber lasers(invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751415.
- 来文昌,马鹏飞,肖虎,等.高功率窄线宽光纤激光技术[J].*强激光与粒子束*, 2020, 32(12): 121001.
Lai W C, Ma P F, Xiao H, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 121001.
- 黄智蒙,李克洪,张帆,等.4路光纤超短脉冲阵列光程相位自适应控制[J].*强激光与粒子束*, 2022, 34(12): 129902.
Huang Z M, Li K H, Zhang F, et al. Adaptive control of optical path phase of four-channel optical fiber ultrashort pulse array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(12): 129902.
- 栗荣涛,周朴,张鹏飞,等.超短脉冲光纤激光相干合成(特邀)[J].*红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103001.
Su R T, Zhou P, Zhang P F, et al. Review on the progress in coherent beam combining of ultra-short fiber lasers (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103001.
- Weiss S B, Weber M E, Goodno G D. Group delay locking of coherently combined broadband lasers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 455-457.
- 张志新,于海龙,支冬,等.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[J].*光学学报*, 2016, 36(9): 0906003.
Zhang Z X, Yu H L, Zhi D, et al. All fiber optical path difference adaptive control method in femtosecond fiber laser coherent polarization beam combination system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0906003.
- Shay T M, Benham V, Baker J T, et al. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical

- array[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12015-12021.
- [23] Liu R Q, Peng C, Wu W S, et al. Coherent beam combination of multiple beams based on near-field angle modulation[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 2045-2053.
- [24] Tünnermann H, Shirakawa A. Deep reinforcement learning for coherent beam combining applications[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24223-24230.

Research on Optical Path and Phase Simultaneous Control in Coherent Beam Combining of Broadband Laser Based on Spectral Filtering

Chang Hongxiang¹, Jin Kaikai¹, Zhang Yuqiu¹, Zhang Jiayi¹, Jin Kun¹, Li Can¹,
Su Rongtao^{1,2,3**}, Leng Jinyong^{1,2,3}, Zhou Pu^{1*}

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

²Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Objectives Fiber laser has the advantages of high conversion efficiency, compact structure, and easy maintenance, and it has been widely used in industrial processing, material treatment, radar detection, and other fields. In some specific fields, requirements for the output power of fiber lasers have been further proposed, such as using high-power femtosecond laser filament principle to realize atmospheric multi-component detection, using narrow linewidth fiber lasers to achieve long-distance Doppler wind speed measurement, and using 532 nm green laser for copper material processing and 3D printing applications. By increasing the output power of fiber lasers, the detection distance and processing efficiency can be improved. However, due to the presence of nonlinear effects such as stimulated Brillouin scattering and mode instability in fibers, the output power of a single fiber is limited. Coherent beam combining (CBC) with multiple lasers is one of the effective ways to obtain high average output power fiber lasers. In a pulse fiber laser CBC system, a shorter pulse indicates wider spectral width. In a high-power continuous fiber laser CBC system, it is often necessary to apply phase modulation, so as to appropriately broaden the seed linewidth and suppress nonlinear effects in the fiber amplifier. A wider spectral width poses higher requirements on the optical path control of each laser in a CBC system. Meanwhile, there exists a coupling between the phase and the optical path. Therefore, simultaneous control of the optical path and phase in the CBC system is needed.

Methods We investigated CBC of broadband light sources based on spectral filtering. Numerical simulations of phase and optical path simultaneous control in broadband laser interferometry were performed using a stochastic parallel gradient descent algorithm. A rectangular spectral light source with a 3 dB spectral width of 10 nm was obtained by using an amplification of spontaneous emission (ASE) light source and a fiber bandpass filter with a center wavelength of 1064 nm. Phase modulation, static optical path compensation, and real-time optical path control were achieved using phase modulators, fiber delay lines, and fiber stretchers, respectively. Two narrowband bandpass fiber bandpass filters were used to filter out laser light with center wavelengths of 1061 nm and 1066 nm and spectral widths of 2 nm, so as to achieve phase and optical path control across the entire spectrum range.

Results and Discussions The numerical simulation results of phase and optical path simultaneous control are shown in (Fig. 5). The phase error is random, and the optical path difference is set to 50 μm . Figure 5(a) shows the light intensity change when the wavelength of (1066 ± 1) nm laser is used as the phase control signal. Figure 5(b) shows the light intensity change when the wavelength of (1061 ± 1) nm laser is used as the optical path control signal. Figure 5(c) shows the total light intensity variation. Before the 2100th iteration step, only phase control is performed without optical path control. After 2100 iterations, optical path control is performed once every 100 iteration steps to achieve simultaneous control of phase and optical path. After about five optical path iterations, the total light intensity can reach a normalized intensity of 1. At this time, the light intensities in Fig. 5(a) and Fig. 5(b) are also close to the corresponding normalized intensities of 1, realizing effective optical path control. In addition, an experimental system is set up to validate the results, as shown in Fig. 3. By separately enabling phase and optical path control, the interference light intensity curves from the open loop to

the closed loop (Fig. 8) are obtained. Figure 8(a) shows the interference light intensity change after filtering at 1066 nm. Figure 8(b) shows the interference light intensity change after filtering at 1061 nm, and Fig. 8(c) shows the total light intensity change. From Fig. 8, it can be seen that when the system is in an open loop, the interference light intensity fluctuates randomly under the influence of noise due to the lack of phase and optical path control. After phase control is performed, similar to that in Fig. 5, the phase-controlled interference light intensity in Fig. 8(a) can reach a higher value, and the optical path-controlled interference light intensity and the total interference light intensity are stabilized around a fixed value. After optical path control is enabled, the optical path control cycle is about 1 s, and all the interference light intensities are effectively improved, indicating that effective compensation for the optical path has been performed. The conservative estimate of the optical path control range is over 0.1 ps, the phase residue error is less than $\lambda/16$, and the combined efficiency is about 90.3%.

Conclusions We conduct research on the phase and optical path simultaneous control in CBC of broadband light sources based on spectral filtering. The combined laser is appropriately filtered to obtain different spectral components, and simultaneous control of phase and optical path across the entire spectrum range is achieved by separately controlling the phase of different spectral components. The feasibility of this method is verified theoretically and experimentally, and a detailed control process is provided. This method has the advantages of a clear theoretical model, high reliability, and good scalability, and it has important application value in the CBC of femtosecond pulse lasers and high-power continuous broadband lasers. Future work will focus on optimizing the control system, improving the control accuracy, using fiber gratings to achieve different bandwidths filtering, and clarifying the influence of filtering wavelength on the combining effect. This method will also be applied to ultra-short pulse CBC and the realization of phase and delay locking between different spectra, achieving more channels and wider spectral width in ultra-short pulse CBC.

Key words coherent beam combining; ultra-short pulse; spectral filtering; optical path control