

光纤激光相干合成中偏振-相位主动控制技术 (特邀)

周宏冰^{1,2}, 陶汝茂^{1*}, 辛 雄¹, 张昊宇¹, 刘辰旭¹, 王信宇¹, 舒 强¹, 楚秋慧¹,
林宏奕¹, 王建军¹, 颜立新², 景 峰¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;
2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要: 建立了光纤激光相干合成多通道偏振-相位主动控制数理模型, 首次仿真研究了合成路数、初始状态、相位残差、动态噪声等对不同控制方案的性能影响。结果表明, 基于随机并行梯度下降算法的光束同时取样方案的收敛步数随路数增多而增大, 约为路数的 4.5 倍, 而光束独立取样和基于多抖动法的光束同时取样方案的收敛速度均不随路数变化。在光束同时取样方案中, 相位残差会影响偏振控制从而导致合成效率下降, 基于多抖动法的光束同时取样方案可通过增大参考光振幅来改善, 当参考光振幅与合振幅之比大于 10 时, 0.1 rad 相位残差导致的合成效率下降低于 5%, 然而在动态噪声条件下控制效果不佳, 需要开发更好的方法来提升偏振误差信号的可靠性。

关键词: 光纤激光; 偏振控制; 多抖动法; 相干合成

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240380

0 引言

高功率光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑等优势, 在前沿科学、精密加工、国防工业等领域得到广泛应用^[1-3]。随着大模场面积双包层光纤工艺和高亮度泵浦源技术的迅猛发展, 高功率光纤激光输出功率迅速提升, 单模光纤激光输出功率已达到 20 kW^[4-8], 但受到受激拉曼散射、受激布里渊散射、模式不稳定效应等物理因素的限制^[9-12], 高功率单模光纤激光的发展已进入瓶颈期, 十年来并无显著突破^[13]。相干合成 (Coherent Beam Combining, CBC) 技术通过控制各路光束的相位、偏振、光程差、指向等参量, 实现光场的稳定相干相长, 可以在提升亮度的同时保持光束质量, 是突破光纤激光单纤功率限制、获得更高功率输出的有效技术途径之一^[14-22]。相干合成需要高纯度的线偏振激光, 通常采用全保偏光纤激光器, 但保偏光纤激光器的受激布里渊散射、模

式不稳定等效应的阈值相比非保偏光纤激光器低^[23-24], 同等功率需要合成更多路激光, 大大增加了合成系统复杂度和技术难度, 降低了系统可靠性, 而且高功率保偏光纤及器件制备工艺复杂、造价昂贵、集成难度大^[25-28], 增大了系统的研制成本。非保偏光纤激光系统结合主动偏振控制技术, 也可以获得线偏振激光, 单路 kW 级激光控制后的偏振消光比可达 12~18 dB^[29-33]。因此, 研究人员开始采用高功率非保偏光纤激光器进行相干合成, 但需要对相位和偏振进行主动控制^[34]。根据光束取样探测方式, 相干合成的偏振-相位控制可以分为光束独立取样和光束同时取样两类方案。2010 年, 美国诺斯罗普·格鲁曼公司的研究人员利用独立取样方案验证了相位和偏振的主动锁定^[35]。2016 年, 美国空军研究实验室利用独立取样控制的 5 台非保偏光纤激光器, 实现了 5 kW 级相干合成^[36]。由于独立取样方案的光路结构较为复杂, 诺斯罗普·格鲁曼公司提出了同时取样的偏振-相位控

收稿日期: 2024-08-26; 修订日期: 2024-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62205317)

作者简介: 周宏冰, 男, 博士生, 主要从事光纤激光相干合成方面的研究。

导师简介: 颜立新, 男, 副教授, 博士, 主要从事太赫兹辐射源、激光技术等方面的研究。

景峰, 男, 研究员, 博士, 主要从事高功率固体激光、光纤激光方面的研究。

通讯作者: 陶汝茂, 男, 副研究员, 博士, 主要从事高功率光纤激光方面的研究。

制技术, 2012 年实现了 5 路非保偏激光的偏振-相位主动控制^[37], 2014 年实现了 3 路 kW 级非保偏光纤激光的 2.4 kW 相干合成^[38]。然而, 非保偏光纤激光相干合成系统的偏振-相位主动控制理论研究未见公开报道, 不同偏振-相位主动控制方案也缺乏对比分析。

文中构建了相干合成系统偏振-相位主动控制模型, 对基于多抖动法的偏振-相位控制技术进行了理论推导和仿真分析, 验证了算法的收敛性和可行性。对比了独立取样、基于随机并行梯度下降 (Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD) 算法的同时取样、基于多抖动法的同时取样方案的收敛速度及路数可扩展性, 并研究了相位残差对同时取样方案合成效率的影响, 以及不同动态偏振、相位噪声对三种方案合成效率的影响。

1 偏振-相位主动控制技术简介

偏振-相位主动控制技术包含偏振控制和相位控制两个方面, 相位控制通常采用单探测器的方案 (SPGD 算法和多抖动法) 以兼顾系统复杂度和控制效果, 为方便对比研究, 文中在不同系统结构下均采用多抖动法进行相位控制。偏振控制技术最初是针对单路激光开发, 用于多路控制时往往需要对合成前的每一路光束独立取样, 称为光束独立取样方案。此外, 多路偏振控制也可以仅靠单个探测器的反馈信号实现, 称为光束同时取样方案。

1.1 光束独立取样

光束独立取样相干合成系统结构如图 1 所示^[36]。种子激光经放大器 (Amplifier, Amp)、分束器 (Splitter) 后分为 N 路光束, 每一路光束先后经过相位调制器 (Phase Modulator, PM)、偏振控制器 (Polarization Controller, PC)、放大器、准直器 (Collimator, CO), 以激光阵列形式空间准直输出, 所有光束由合束系统 (Combining system) 合为一路激光输出。光束在进入合束系统之前, 均由取样镜 (Sampling mirror, SM) 取出一小部分功率, 经过起偏器 (Polarizer, P) 后入射到光电探测器 (Photodetector, PD) 上作为偏振控制的反馈信号, 输入到控制系统中, 基于 SPGD 算法产生对应偏振控制器的驱动信号, 使各路光束逐渐调整至预期偏振方向, 实现主动偏振控制。此外, 同一 PD 信号

也用于相位控制, 输入多抖动射频电路, 获得相位误差信号、进行反馈控制, 逐步完成相位锁定。

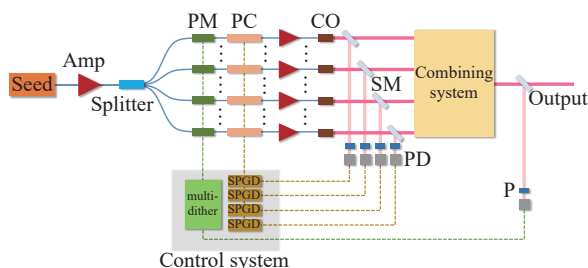


图 1 光束独立取样相干合成系统结构

Fig.1 System structure of CBC system where beams are sampled individually

光束独立取样方案是单路偏振控制向多路偏振控制的直接拓展, 每路光束由单独的伺服电路控制, 从而在路数增多时保持控制带宽。然而, 独立取样控制的逻辑结构大大增加了取样探测光路的复杂度及系统成本。

1.2 光束同时取样

光束同时取样的方案无需对各路光束进行逐一采样, 仅对合成光束进行一次采样, 光路结构大大简化。根据系统结构和控制算法的不同, 光束同时取样方案进一步分为基于 SPGD 算法和基于多抖动法两类。

基于 SPGD 算法的同时取样方案如图 2 所示^[39], 基本结构与图 1 类似, 但只用一个 PD 信号反馈控制所有光束的偏振和相位。该方案中控制变量数目与路数成正比, 应用 SPGD 算法进行控制时存在带宽随路数增多而降低的问题, 但由于其系统结构最为简单, 仍然具有不可替代的优势。

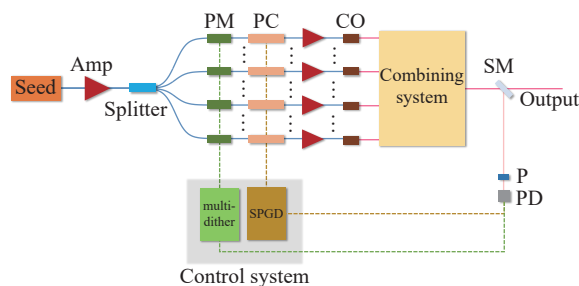


图 2 基于 SPGD 算法的光束同时取样相干合成系统结构

Fig.2 System structure of SPGD-based CBC system where beams are sampled simultaneously

基于多抖动法的同时取样方案如图 3 所示^[37], 种子激光被分为 $N + 1$ 路光束, 一路作为参考光, 另外 N 路经过 PM、PC、放大器后准直输出。合成光束被取样一小部分功率后, 与准直输出的参考光束一同输入到 90° 光学混合器 (Optical Hybrid Mixer, OHM) 中, 该模块的作用是将采样光与参考光进行两组合成, 分别是采样光与无相移参考光的合成、采样光与 90° 相移参考光的合成。OHM 输出的两束合成光在起偏后入射到 PD 上产生强度信号 $I(t)$ 、 $Q(t)$, 输入到控制系统中进行射频电路运算, 获得光束相位、偏振误差信号。其中相位误差信号代表了光束相位偏移的大小和方向, 可直接驱动 PM 进行相位补偿, 逐步实现相位锁定; 而偏振误差信号只反应强度信息、难以定位偏振方向, 不能直接驱动 PC 进行偏振补偿。因此, 偏振控制仍需采用 SPGD 算法, 以偏振误差信号作为评价函数、PC 电压作为控制变量, 调整 PC 电压使偏振误差信号不断优化。这种方案在只对合成光束进行一次取样的条件下, 实现各路偏振信息的提取、分离和反馈控制, 在路数增多时可以保持控制带宽, 而且系统复杂度较低。

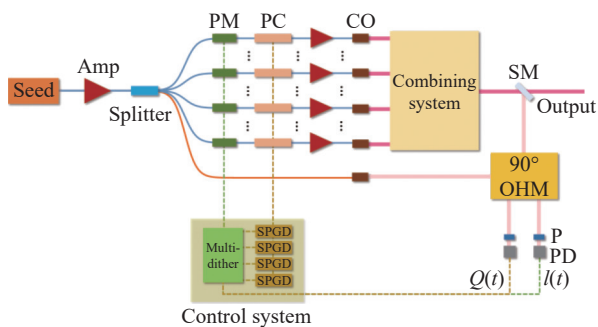


图 3 基于多抖动法的光束同时取样相干合成系统结构

Fig.3 System structure of multi-dithering-based CBC system where beams are sampled simultaneously

2 理论模型

2.1 相干合成模型

在仿真中, 合成系统采用共孔径结构, 使各路光束在近场重叠, 合为一束激光。共孔径合束器可采用分束镜组、衍射光学元件等, 以简单的 N 路合成的分束镜组为例, 理想条件下各路光束振幅相同, 合束器对于不同光束的振幅分光比均为 $1/\sqrt{N}$ 。假设各路光

束的中心波长、位置、指向等均相同, 在合束器上完美重叠, 因而不考虑横向强度分布, 仅有偏振和相位的差异, 定义相干合成效率为^[40]:

$$\eta = \frac{\left| \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} A_k \exp(i\varphi_k) \right|^2}{\left| \sum_{k=1}^N E_k \right|^2} \quad (1)$$

式中: A_k 、 E_k 分别为第 k 路光束在主偏振方向的振幅、合振幅, 由于未考虑其他误差因素, 最大合成效率为 100%, 相位不一致性 ($\varphi_k \neq \varphi_l$)、偏振方向偏离主偏方向 ($A_k \neq E_k$) 均会造成合成效率的损失。

2.2 相位控制模型

相位控制系统根据 PD 信号计算出各路光束的相位误差大小和方向, 据此调整 PM 上的电压以补偿相位差, 逐步完成相位锁定。由于 PM 施加给光束的相位与控制电压成线性关系, 仿真中控制电压被等效为相位 (即相位与电压的转换系数为 1), 电压更新即为相位更新。

多抖动法是一种基于硬件调制解调的锁相控制方法, 通过对各路光束施加不同频率的小幅正弦相位调制, 可以从合成光束强度信号中提取并分离各路光束的相位误差信息, 进行准确的负反馈控制, 几步之内即可完成多路光束的相位锁定。

假设共有 N 路光束参与合成, 并另设一路参考光束 (表示为第 0 路), 所有光束在 PD 上重叠并相干。第 k 路调制角频率为 ω_k , 调制深度为 β_k , 参考光束不调制 ($\beta_0 = 0$), 起偏后的合成光束电场 $E(t)$ 及 PD 探测信号 $V(t)$ 为:

$$\begin{aligned} E(t) &= \sum_{k=0}^N A_k \cos[-\omega_L t + \phi_k + \beta_k \sin(\omega_k t)] \\ V(t) &= \alpha S \varepsilon_0 n c \langle E^2(t) \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A 、 φ 为光束在主偏振方向的振幅、相位; ω_L 为激光中心角频率; α 为 PD 的电压转换系数; S 为 PD 探测面积; ε_0 、 n 、 c 分别为真空介电常数、空气折射率、光速。将 PD 电压信号乘以各路正弦调制信号 $\sin(\omega_k t)$, 并在时间 τ 内积分, 得到各路光束的误差信号为:

$$\begin{aligned} S_k &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \sin(\omega_k t) V(t) dt \approx \\ & 2\alpha \sqrt{P_k} J_1(\beta_k) \sum_{l=0}^N \sqrt{P_l} J_0(\beta_l) \sin(\varphi_l - \varphi_k) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: P 为各路激光照射到探测面上的功率 ($P = \varepsilon_0 n c A^2 S / 2$)。公式 (3) 中的误差信号代表了第 k 路光束与其他光束的平均正弦相位距离, 将其乘以适当大小的反馈系数 K , 作为该路光束的相位更新量 ($\varphi_k = \varphi_k + K S_k$), 通过迭代反馈控制可以使光束之间的相位距离不断减小, 直至误差信号趋近于 0, 实现光束相位同步。

2.3 偏振控制模型

PC 由 4 个压电陶瓷组成^[41], 其放置方向与光学主轴的夹角分别为 0° 、 45° 、 0° 、 45° , 电压信号会驱动压电陶瓷挤压光纤, 通过弹光效应改变光纤双折射, 相当于 4 个延迟可控的双折射波片。根据相位延迟量 δ 、快轴与 x 轴的夹角 θ , 波片的琼斯矩阵可以表示为:

$$J(\delta, \theta) = \cos \frac{\delta}{2} \times \begin{pmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & 1 + i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

包含 4 个波片的 PC 的琼斯矩阵可以表示为:

$$M(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) = J(\delta_4, 45^\circ) J(\delta_3, 0) \times J(\delta_2, 45^\circ) J(\delta_1, 0) \quad (5)$$

实验中可通过控制各个压电陶瓷的电压, 改变对应的相位延迟 δ , 实现偏振态的调控。与 PM 模型类似, 仿真中将压电陶瓷电压直接等效为相位延迟。

2.3.1 SPGD 算法

偏振控制是一个多变量优化问题, 适合采用 SPGD 算法。SPGD 算法以随机并行小幅扰动的方式, 获取扰动前后评价函数的变化、进行梯度估计, 在梯度方向上进行适当大小的变量更新, 经过迭代更新使梯度逐渐趋近于 0, 完成优化控制。应用于偏振控制时, 算法具体执行步骤如下 (以双向扰动 SPGD 为例):

1) 生成一组随机扰动电压 $du = [du_1, du_2, du_3, du_4]$, 为对当前控制电压进行正向扰动, 获得扰动后的评价函数 $J_+ = J(u + du)$ 。

2) 利用 1) 中生成的扰动电压, 对当前控制电压进行负向扰动, 获得扰动后的评价函数 $J_- = J(u - du)$ 。

3) 计算扰动后的评价函数变化量 $\Delta J = (J_+ - J_-) / (J_+ + J_-)$, 更新电压 $u = u + \gamma \Delta J du / \sigma^2$ 。

4) 循环 1) ~ 3) 步骤, 使评价函数不断接近最优值。

其中, γ 为 SPGD 算法的增益系数, σ 为随机扰动电压的标准差。通常, 评价函数为预期方向的偏振光强度, 而在基于多抖动法的多路偏振控制系统中, 评价函数变为由多抖动法解调的偏振误差信号, 当该信号最优时, 对应路的偏振光强达到最大。

SPGD 算法的目标是通过调整光束偏振态, 使评价函数最优化。对于独立取样方案, N 个 SPGD 算法并行工作, 控制变量为各路 PC 的电压, 评价函数为对应的主偏光强 (PD 信号)。对于基于 SPGD 算法的同时取样方案, 控制变量为所有 PC 的电压, 评价函数为合成光束的 PD 信号。对于基于多抖动法的同时取样方案, 各路光束的偏振误差信号 (N 个) 由多抖动射频电路解出, 驱动 N 个 SPGD 算法并行工作; 第 k 个 SPGD 算法评价函数为第 k 个偏振误差信号, 控制变量为第 k 路 PC 的电压。当所有评价函数最优时, 光束偏振方向被调控到主偏振方向, 并且各路相同, 偏振控制完成。

2.3.2 多抖动法

通过设置一路参考光束, 多抖动法可以提取出每一路的振幅信息, 实现各路偏振误差信号分离, 提升偏振控制带宽。通常, 各路激光的调制幅度相等, 均表示为 β , 且 $J_0(0) = 1$, 公式 (5) 误差信号变为:

$$S_k = 2\alpha \sqrt{P_k} J_1(\beta) \times \left[\begin{array}{l} \sqrt{P_0} \sin(\phi_0 - \phi_k) \\ + J_0(\beta) \sum_{l=1}^N \sqrt{P_l} \sin(\phi_l - \phi_k) \end{array} \right] \quad (6)$$

对于偏振控制的输入光束, 参考光束相比相位控制增加了 90° 相移 ($\phi'_0 = \phi_0 + 90^\circ$), 当相位调节同步时, 各路光束相位差约为 0 ($\phi_k - \phi_l \approx 0$), 此时偏振误差信号表示为:

$$S'_k \approx 2\alpha J_1(\beta) \sqrt{P_0} \sqrt{P_k} \quad (7)$$

因此, 每一路光束的幅度信息被单独解出, 利用 SPGD 算法将各路偏振误差信号调整至最大, 即可完成多路偏振控制。

2.4 模型小结

采用共孔径相干合成光学系统, 在不同的偏振-相位主动控制方案中, 均涉及多抖动法和 SPGD 算

法。其中多抖动法对各路光束施加不同频率相位调制,用于解调相位误差信号,并进行负反馈的相位控制;SPGD 算法则是对等效 4 波片的偏振控制器进行随机扰动,根据系统状态变化情况进行主动偏振控制。

偏振-相位主动控制的基本前提为相位控制速度远高于偏振控制速度,从而在调整偏振时光束处于锁相状态、不干扰偏振控制算法。为了更清晰的展示理论模型的实现细节,表 1 给出了基于多抖动法的光束同时取样控制方案的伪代码,其中 T 为偏振控制的执行周期(包含正向扰动、负向扰动、电压更新三小步,每小步的执行周期则为 $T/3$)、 F_s 为信号采样率。光束

相位时刻处于调制状态,并且每个时刻的 PD 信号都被采集和记录。每隔一个积分时间,算法进行一次相位(偏振)误差的解调,并更新光束相位,此即相位控制回路。而在每个偏振周期中,算法依次对波片延迟量进行正向扰动、负向扰动、变量更新,此即偏振控制回路。偏振、相位控制彼此嵌套,但由于执行速率不同,不会影响算法的执行逻辑。对于其他两种控制方案,实现过程基本与表 1 一致,但无需第 7 行的偏振误差解调步骤,同时第 4 行中 PD 信号的获取和第 14、17、19 行中的评价函数需要根据采样方式相应修改(2.3.1 节中有描述)。

表 1 基于多抖动法光束同时取样相干合成的控制过程

Tab.1 Control procedure for simultaneous sampling CBC based on multi-dithering

Require: Parameters $f_k, \beta_k, K, \tau, T, \gamma, \sigma,$ and F_s are defined for given CBC system	
1:	for $step = 1$ to ∞ do
2:	get current time: $t = step/F_s$
3:	apply phase modulation: $\phi_k(t) + \beta_k \sin(2\pi f_k t)$
4:	get and store PD signals $I(t)$ and $Q(t)$ by Eq.(2)
5:	if $t/\tau = \text{integer}$ then
6:	demodulate phase error signal $S_k(t)$ using $I(t)$ by Eq.(3)
7:	demodulate and store polarization error signal $S'_k(t)$ using $Q(t)$ by Eq.(3)
8:	update phase: $\phi_k(t) \leftarrow \phi_k(t) + KS_k(t)$
9:	end if
10:	if $t/(T/3) = \text{integer}(m)$ then
11:	if $(m \text{ modulo } 3) = 1$ then
12:	generate and store random perturbation $(d\delta_1, d\delta_2, d\delta_3, d\delta_4)_k$ with a variance σ^2
13:	apply positive perturbation $(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)_k + (d\delta_1, d\delta_2, d\delta_3, d\delta_4)_k$
14:	get metric function after perturbation $J_{+k} = S'_k(t)$
15:	else if $(m \text{ modulo } 3) = 2$ then
16:	apply negative perturbation $(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)_k - (d\delta_1, d\delta_2, d\delta_3, d\delta_4)_k$
17:	get metric function after perturbation $J_{-k} = S'_k(t)$
18:	else
19:	calculate metric change: $\Delta J_k = (J_{+k} - J_{-k}) / (J_{+k} + J_{-k})$
20:	update PC voltages: $(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)_k \leftarrow (\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)_k + \gamma \Delta J_k (d\delta_1, d\delta_2, d\delta_3, d\delta_4)_k / \sigma^2$
21:	end if
22:	end if
23:	end for

3 数值仿真

3.1 仿真参数

为方便讨论,仿真中以 y 方向为主偏振方向,同

时定义偏振比(Polarization ratio)为 y 方向偏振光强度除以激光总强度。当激光偏振态越趋近于 y 方向线偏振时,偏振比取值越趋近于 1,反之趋近于 0。各路光束波长(1064 nm)、振幅、横向强度分布相同,但初

始相位和偏振比为随机值。

多抖动法的调制频率设置为起始 1 MHz、间隔 1 MHz, 即 N 路光束正好对应为 1~ N MHz, 调制幅度设为 0.1 rad, 积分周期为 1 μ s, 相位控制执行速率为 1 MHz。偏振控制中的 SPGD 算法采用双向扰动的方式, 执行速率为 3.33 kHz (单步 0.3 ms, 包含正向扰动、负向扰动和电压更新三小步)。

为定量评估控制效果, 除了计算公式 (1) 中的合成效率外, 定义收敛步数 (收敛时间) 为系统从初始状态到最大效率 95% 的迭代次数 (迭代时间), 以评估算法的收敛速度。在上述参数条件下, 对几种控制方案

分别进行了 4、8、16 路相干合成的仿真研究, 从而对比不同算法的路数扩展能力。

3.2 光束独立取样

光束独立取样控制时, 各路均采用单独的 SPGD 算法进行控制, 其相关参数 γ 、 σ 分别设为 0.6、0.05 (经过参数扫描优化后的取值)。4、8、16 路的仿真结果如图 4 所示, 蓝色线包含了 100 次不同初始状态下的效率变化曲线, 红色代表 100 次控制的平均曲线。不同路数、不同初始状态下, 算法均能收敛到最大效率, 合成效率大于 99%, 平均收敛时间小于 3 ms (10 步), 收敛速度不随路数变化。

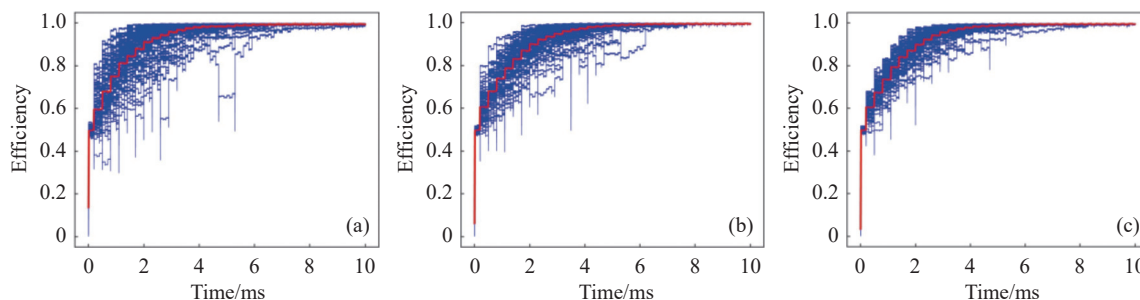


图 4 光束独立取样相干合成的 100 次仿真结果。(a) 4 路; (b) 8 路; (c) 16 路

Fig.4 100 simulation results of CBC where beams are sampled individually. (a) 4 channels; (b) 8 channels; (c) 16 channels

3.3 光束同时取样

基于 SPGD 算法的同时取样控制方案仿真结果如图 5 所示。尽管不同路数条件下均能收敛到最大效率 (> 99%), 但路数增多时收敛步数明显增多。按

照前文定义, 4、8、16 路控制时的收敛时间分别为 5.28、11.00、21.39 ms, 表明收敛时间随合成路数线性增长。

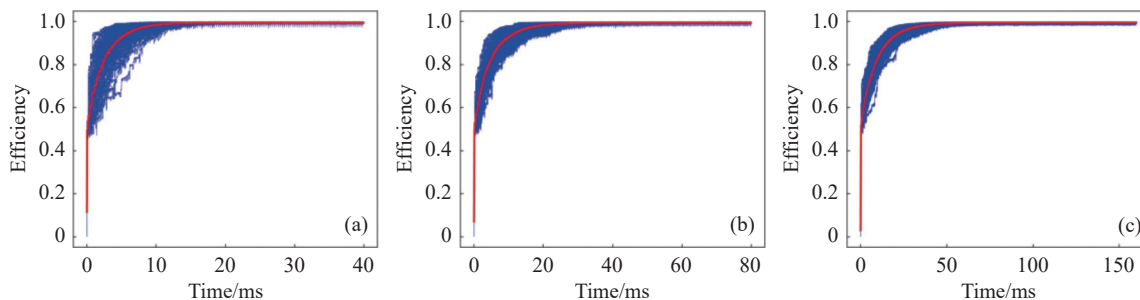


图 5 基于 SPGD 算法的光束同时取样相干合成的 100 次仿真结果。(a) 4 路; (b) 8 路; (c) 16 路

Fig.5 100 simulation results of SPGD-based CBC where beams are sampled simultaneously. (a) 4 channels; (b) 8 channels; (c) 16 channels

基于多抖动法的同时取样控制算法相比 SPGD 更加复杂, 需要解调出偏振误差信号, 然后对误差信号进行优化 (采用 SPGD 算法)。首先, 假设相位已锁定但偏振不一致 (各路光束偏振比在 0~1 之间

随机取值, 并考虑偏振不变化和随时间慢变两种情况), 多抖动法对光束施加了相位调制但不进行反馈控制, 仅根据 PD 信号解调偏振误差。当偏振不随时间变化时, 某一次随机状态下的实际偏振强度与解出

的误差信号如图 6(a)~(b) 所示, 可以看到解调出的误差信号大小与各路光束实际的偏振光强度大小成正比, 并且也不随时间变化。当偏振动态变化时, 偏振噪声由动态噪声模型产生 (详见后文 3.4 节, 此处采用高阶滤波器模型, 幅度 1 rad、频率 50 Hz), 某一次随

机仿真结果如图 6(c)~(d) 所示, 表明误差信号可以跟踪各路光束的偏振变化, 在不同时刻都能反映正确的偏振信息。因此, 解调得到的误差信号可用于偏振控制, 进一步利用 SPGD 算法将每一路的偏振误差信号优化到最大, 即可完成多路偏振控制。

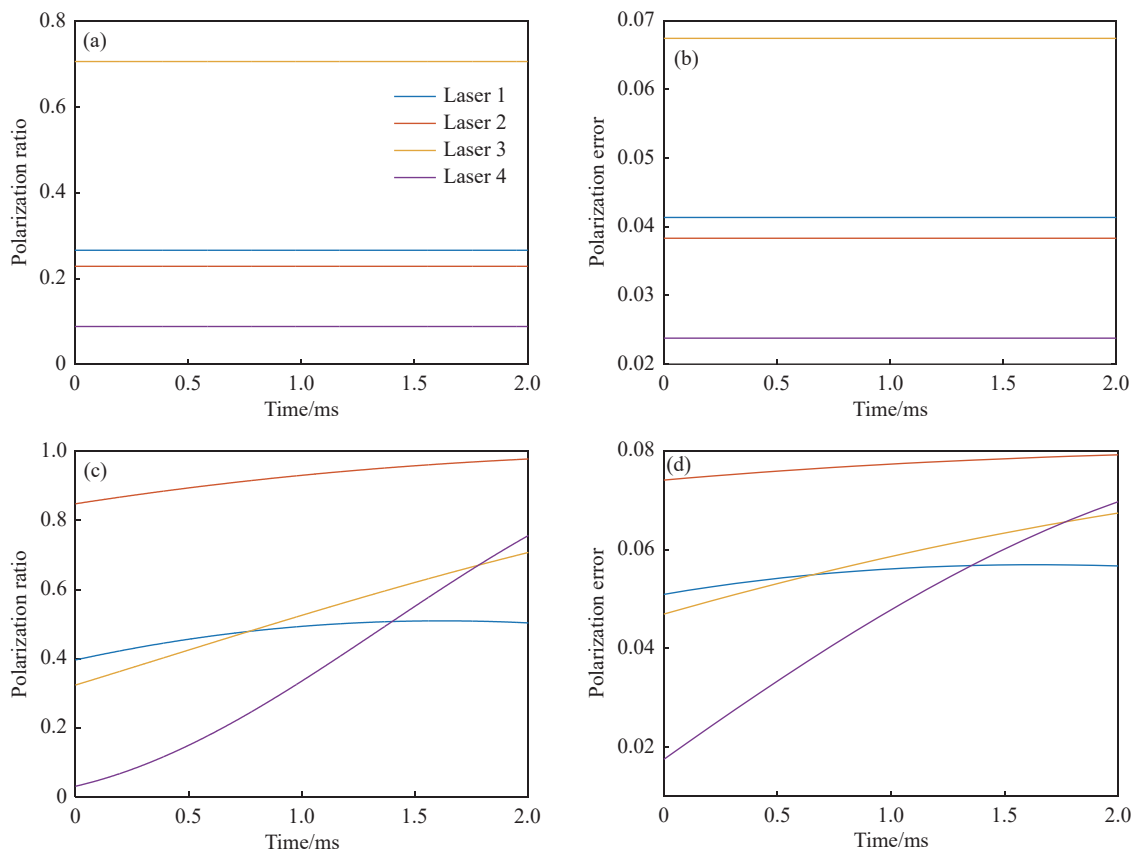


图 6 误差信号与偏振比之间的关系。偏振不变时的 (a) 光束偏振比、(b) 偏振误差信号; 偏振动态变化时的 (c) 光束偏振比、(d) 偏振误差信号
Fig.6 Relationship between error signal and polarization ratio. (a) Polarization ratios of beams and (b) Polarization signals when polarization does not change. (c) Polarization ratios of beams and (d) Polarization signals when polarization changes dynamically

在证实了误差信号正确性的基础上, 对多路偏振控制进行了仿真。在某一次随机初始条件下 4 路控制的结果如图 7(a) 所示, 算法均能快速收敛, 平均效率 99.5%, 收敛时间 2.0 ms。图 7(b) 绘制了光束 1 偏振误差信号的变化情况, 其平均值随着时间逐渐增大, 然后趋于平稳, 但有许多上下振荡的毛刺信号。图 7(c) 是将图 7(b) 的横坐标范围限定至较小尺度后, 得到的某一毛刺内部的信号起伏情况, 持续时长约 5 μ s。从公式 (3)~(4) 中可以看出, 当偏振控制器内部的波片相位延迟变化时, 输出偏振光的相位也会产生变化。因此, 即使在相位锁定状态下, 每当偏振控制

电路进行电压调整动作时, 光束的相位状态会发生改变, 这是由于 PC 的本质作用是改变光束相位, 其电压变化时光束相位会有小幅度的失锁, 导致公式 (7) 的近似条件不成立。例如, 当 $\phi_1 = 0.1$ rad, $\phi_0 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = 0$, 可以计算公式 (6) 中后一项正弦求和约为 0.3, 均方根相位残差仅为 0.04 rad, 光束 1 偏振误差信号却产生了约 30% 的偏差。此时, 相位控制算法会将偏振动作引起的相位变化快速补偿, 经过几个 μ s 后, 再次恢复相位锁定状态, 从而偏振误差信号能反映正确信息。图 7(d) 给出了控制过程中各路光束的偏振误差信号变化情况 (图中相位控制造成的毛刺被滤除

以展示曲线的演化趋势,由于毛刺持续时间很短,通过对原始信号进行下采样即可滤除,实验中也可以通过采样或平均的方式减小毛刺的影响),可以明显看

出 SPGD 算法将多抖动法解出的偏振误差信号逐渐调整至最大,经过多次迭代后合成效率也达到最大值。

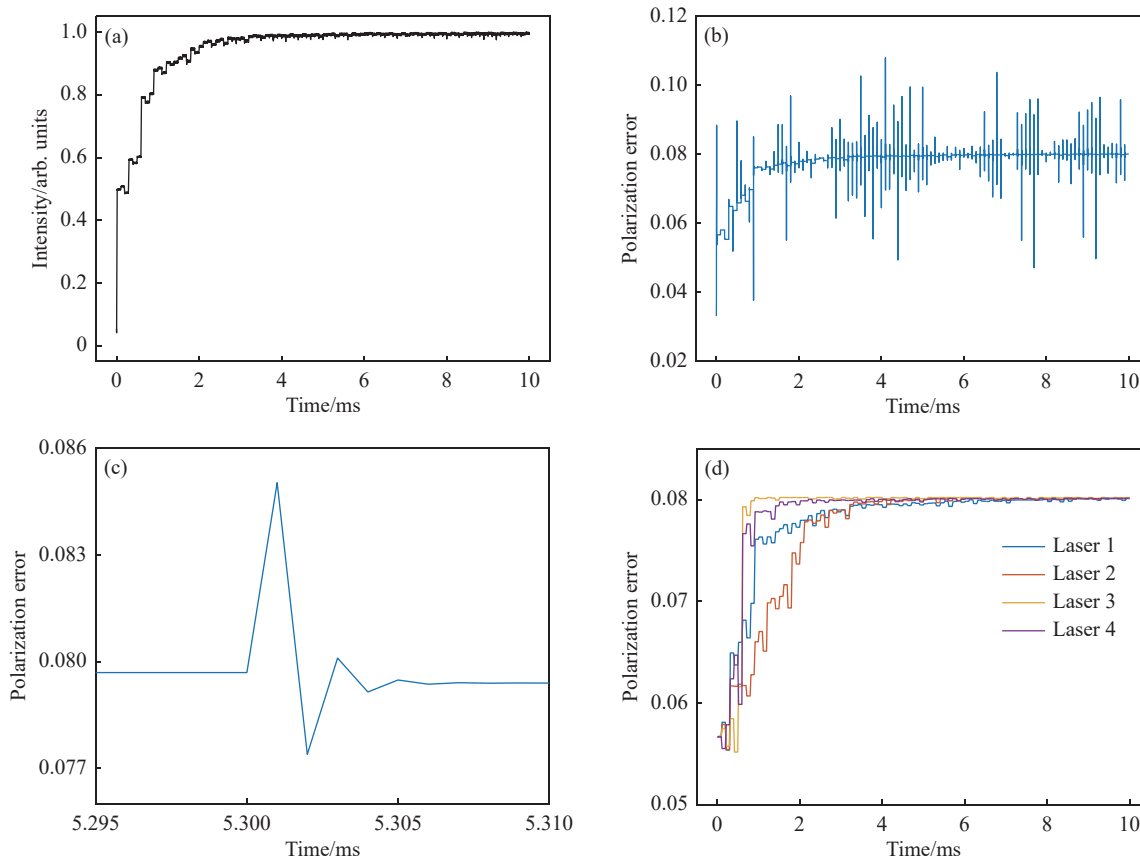


图 7 四路光束合成的单次结果。(a) 合成光束强度;(b) 光束 1 偏振误差信号;(c) 光束 1 偏振误差信号的瞬时起伏;(d) 滤除毛刺后的偏振误差信号

Fig.7 One result of 4-channel CBC. (a) Combined beam intensity; (b) Polarization error signal of beam 1 with time; (c) The instantaneous fluctuation of polarization error signal of beam 1; (d) The polarization error signals after filtering

基于多抖动法,进行了不同路数规模的 100 次随机初始状态仿真,结果如图 8 所示。在不同光束初始状态下,偏振-相位主动控制算法均能快速收敛,并且对于

不同路数的合成系统,达到 95% 效率的平均上升时间约为 2 ms,合成效率大于 99%。因此,多抖动法的控制带宽不随路数变化,具有优异的路数拓展潜力。

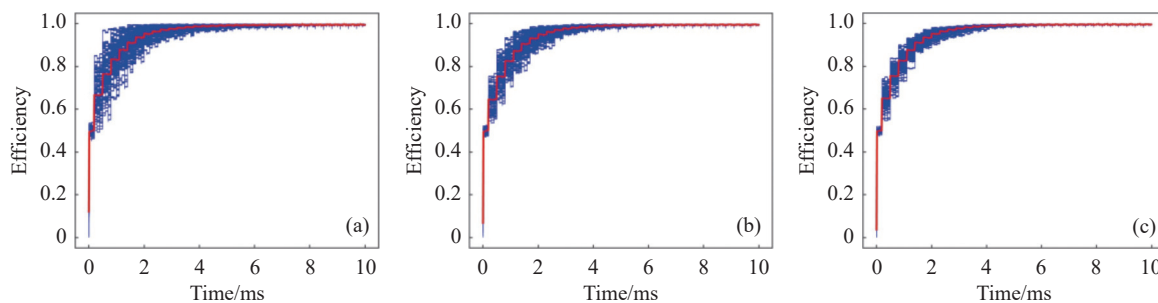


图 8 基于多抖动法的光束同时取样相干合成的 100 次仿真结果。(a) 4 路;(b) 8 路;(c) 16 路

Fig.8 100 simulation results of multi-dithering-based CBC where beams are sampled simultaneously. (a) 4 channels; (b) 8 channels; (c) 16 channels

3.4 控制方法对比

根据前文不同算法的仿真结果,将合成效率、收敛步数列举在表 2 中。从中可以看出,各种方案都能实现偏振-相位一体控制,达到最大合成效率。当采用光束独立取样方案时,收敛速度几乎不随路数变化,大约 9 步即可收敛,但需要对每一路光束都进行采样探测,系统复杂度很高。采用光束同时取样的 SPGD 算法进行偏振相位控制时,收敛步数随着路数增多而增多,约为路数的 4.5 倍,不适用于大规模相干合成。对于光束同时取样的多抖动法偏振-相位控制,收敛速度最快(不到 7 步),在较低系统复杂度的条件下实现优异的控制性能。

表 2 不同控制方案的路数扩展能力对比

Tab.2 Comparison of channel scalability of different control schemes

Scheme	Channels	Efficiency	Steps
Beams sampled individually	4	99.5%	8.0
	8	99.4%	9.3
	16	99.4%	9.0
Beams sampled simultaneously (SPGD)	4	99.5%	17.6
	8	99.4%	36.7
	16	99.4%	71.6
Beams sampled simultaneously (multi-dithering)	4	99.5%	6.3
	8	99.4%	6.6
	16	99.4%	6.6

相位控制与偏振控制是否会相互影响,是偏振-相位主动控制技术的重要问题之一。一方面是偏振对相位的影响:首先,偏振控制本身会改变光束相位,需要相位控制进行及时补偿,但当偏振控制接近收敛之后,偏振调整引起的相位变化就会大大减弱;其次,若偏振控制效果不佳,即各个光束没有达到非常一致的线偏振态,会使合成效率降低,但对相位控制影响较小,因为锁相算法能在不同偏振态下完成主偏方向的相位锁定。另一方面则是相位对偏振的影响,在光束同时取样方案中需要重点关注(对于光束分别取样方案,主偏振光强被分别探测,光束相位波动不会影响偏振控制):偏振控制是在相位锁定的基础上进行,相位波动会造成合成强度变化,导致偏振控制系统的输入也发生变化,影响算法性能。例如在图 7(a)中,

采用同时取样的多抖动法进行偏振-相位控制,合成效率达到最大之后起伏很小,换言之,PC 电压扰动或更新对合成效率影响很小,然而由此引发的偏振误差信号的电压毛刺却很大,如图 7(b) 所示。可以预见,若存在较强的相位噪声干扰,例如相位噪声的变化频率与多抖动法的电压更新频率相当,偏振误差信号将会出现更多更强的起伏,不能准确反应偏振信息,基于此误差信号进行偏振控制,算法更新方向会发生偏差,导致控制效果退化。

为了定量研究算法性能及其限制,可以在仿真中人为引入相位残差,从而模拟动态相位噪声导致的相位不一致。由于调制信号本身就是一个相位扰动因素(不同调制幅度 β 引起的残差不同),难以定制闭环相位残差,选择在多抖动算法每次电压更新之后,额外增加定量的相位扰动,使相位控制精度降低,从而表征算法不能补偿的相位扰动。在基于光束同时取样的多抖动法偏振-相位控制方案中,施加的相位残差与合成效率的关系如图 9(a) 所示,不同曲线代表不同的参考光振幅 (A_0) 与合振幅 ($N:A$) 比值。可以看出,参考光束与合振幅之比不变时,额外相位残差越大,合成效率越低;而当相位残差不变时,参考光束与合振幅之比越大,合成效率越高。在额外相位残差为 0.1 rad 的条件下,合成效率与光束振幅比的关系如图 9(c) 所示:当振幅比较小时,合成效率随振幅比增大迅速上升;而当振幅比较大时,效率变化趋于平缓,改善效果有限。这种现象可以从公式 (5) 解释,参考光束振幅越大时,偏振误差项(式中第一项)的比重增大,相位残差(式中第二项)的影响随之减弱。因此,在光束同时取样的多抖动法控制方案中,增大参考光束振幅可以减小相位残差的影响,改善算法性能。在图 9(c) 中,相位调制及额外残差引起的效率损失约为 2%,为使合成效率高于 95%(偏振控制引起的效率损失低于 3%),参考光振幅与合振幅之比应大于 10。在光束同时取样的 SPGD 算法偏振-相位控制方案中,相位残差对合成效率的影响如图 9(b) 所示,合成效率同样随额外相位残差的增大而降低。尽管效率下降速度相比多抖动法更为缓和,0.1 rad 残差产生的效率损失约为 7%,但无法通过控制参考光束来改善。总之,为了使同时取样方案能够正常运作并发挥优势,需要降低相位残差对偏振控制的影响,即对相位控制

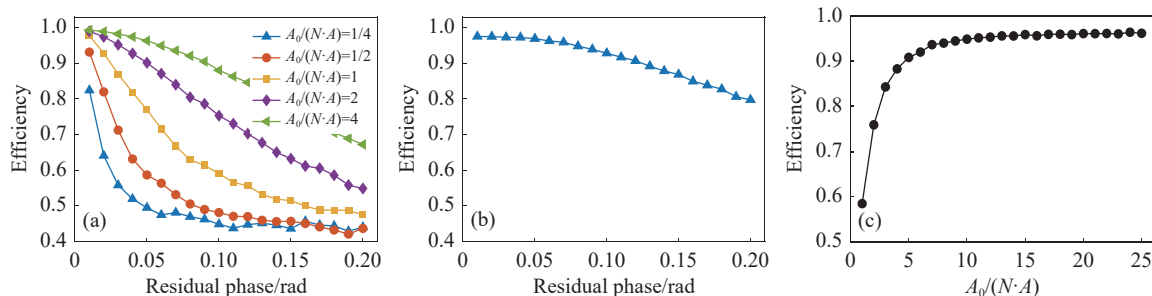


图 9 相位残差对 (a) 基于多抖动法和 (b) 基于 SPGD 算法的光束同时采样系统合成效率的影响; (c) 额外相位残差为 0.1 rad 时, 参考光束振幅与基于多抖动法光束同时采样系统合成效率的关系

Fig.9 Effect of phase residual on combining efficiency of (a) multi-dithering-based and (b) SPGD-based CBC system where beams are sampled simultaneously; (c) Combining efficiency versus reference amplitude in multi-dithering-based CBC system where beams are sampled simultaneously and the extra residual phase is 0.1 rad

带宽及精度有更高要求, 而目前实验验证的大规模相干合成相位残差优于 $\lambda/90$ ^[22], 相位对偏振控制的影响可以忽略。

在实际系统中, 温度变化、机械振动等环境扰动因素不可避免, 需要控制系统实时校正相位、偏振的动态起伏^[42]。为评估不同控制方案的动态性能, 在仿

真中引入了两种动态噪声模型, 分别采用高阶、一阶低通滤波器建模, 通过设定幅度、截止频率可以控制噪声强弱^[43]。图 10 展示了两种模型生成的相位噪声 (均方根幅度 1 rad、截止频率 1 kHz), 可以看到高阶模型滤除了截止频率以上的绝大部分功率, 而一阶模型的频谱则在截止频率处开始下降, 保留了高频残余噪

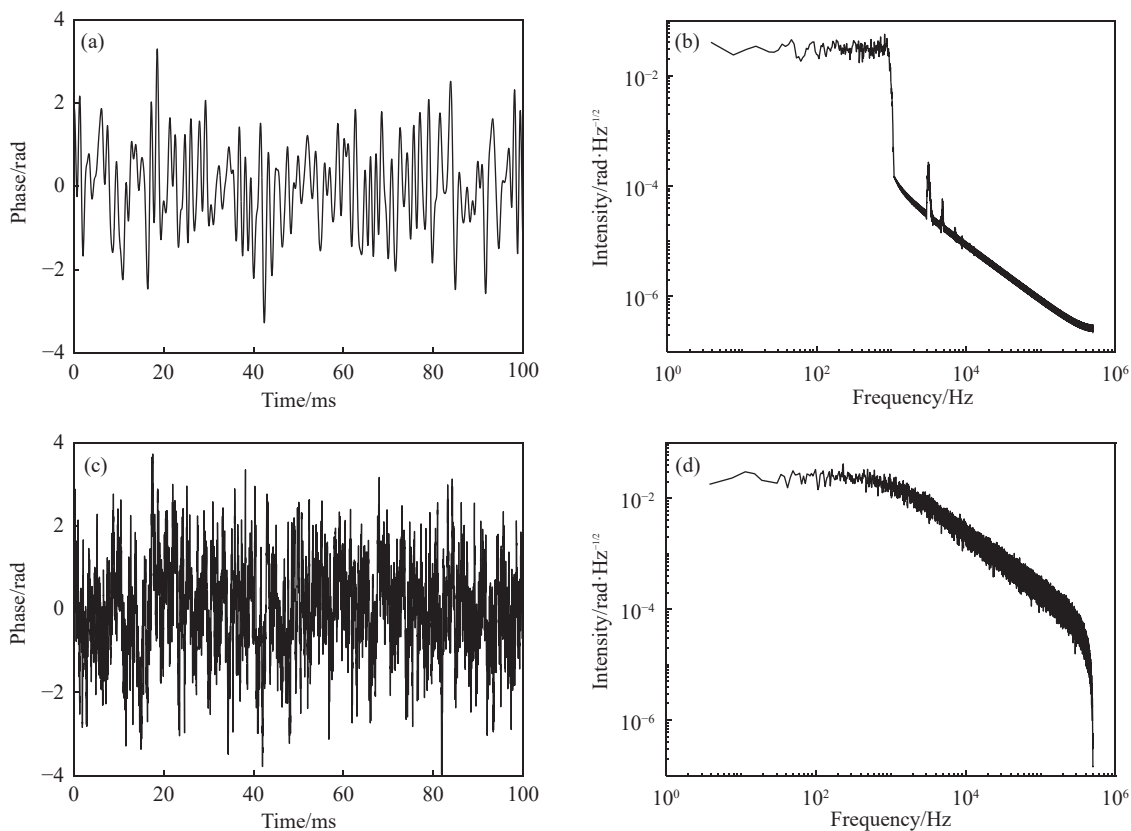


图 10 动态相位噪声及频谱示例。(a)~(b) 高阶滤波器模型; (c)~(d) 一阶滤波器模型

Fig.10 Example of dynamic phase noise and its spectrum. (a)-(b) High-order filter model; (c)-(d) First-order filter model

声的影响。由于偏振比取值在 0~1 之间, 将给定参数的噪声模型取余弦, 定义为偏振噪声, 高阶、一阶滤波

器模型产生的偏振噪声如图 11 所示, 幅度分别为 1、0.1 rad, 截止频率均为 100 Hz。

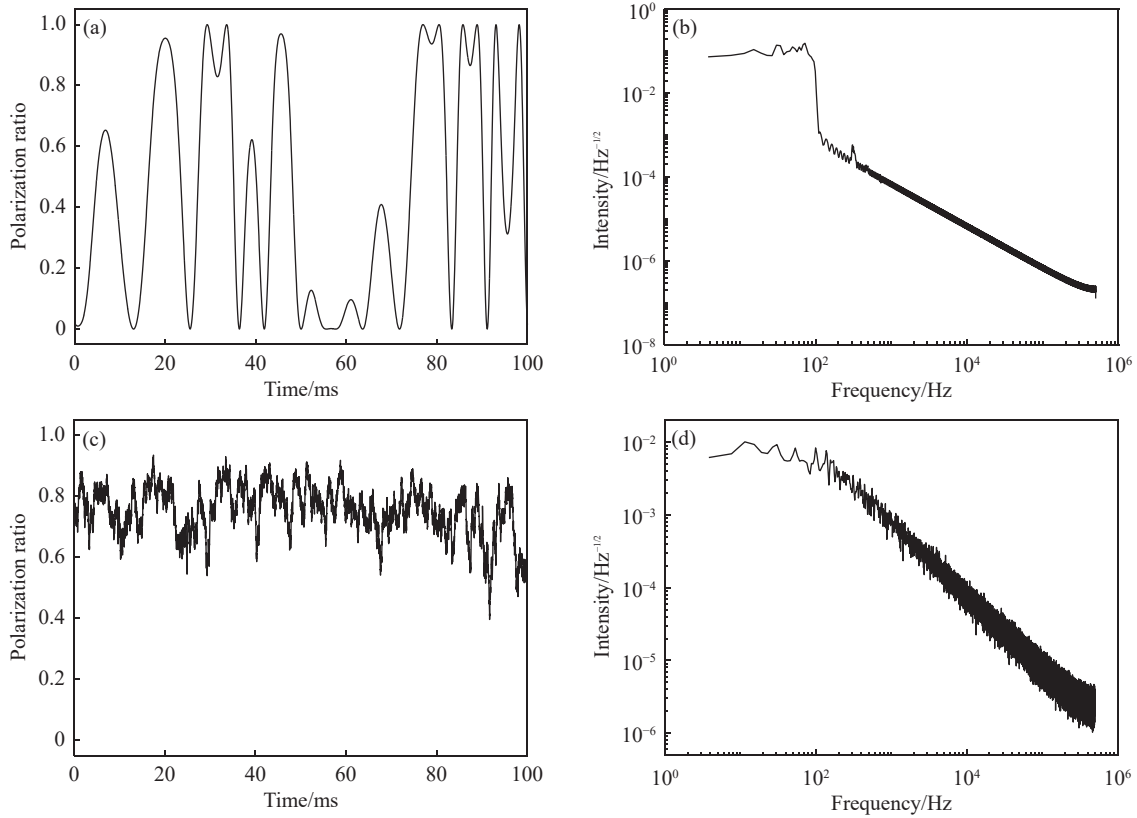


图 11 动态偏振噪声及频谱示例。(a)~(b) 高阶滤波器模型; (c)~(d) 一阶滤波器模型

Fig.11 Example of dynamic polarization noise and its spectrum. (a)~(b) High-order filter model; (c)~(d) First-order filter model

利用上述动态噪声模型, 保持幅度不变, 研究了截止频率对不同控制算法合成效率的影响。高阶、一阶模型偏振噪声的影响如图 12(a)~(b) 所示, 幅度分别为 1、0.1 rad。在高阶偏振噪声模型中, 基于多抖动法的同时取样方案与独立取样方案性能相近, 而基于 SPGD 的同时取样方案效果则相对较差; 而在一阶偏振噪声模型中, 基于多抖动法的同时取样方案却表现最差, 说明高频噪声对控制算法的影响很大。高阶、一阶模型相位噪声的影响如图 12(c)~(d) 所示, 幅度分别为 1、0.63 rad。在高阶相位噪声模型中, 截止频率较低时三种算法控制效果接近, 而当截止频率进一步增大, 基于多抖动法的同时取样方案的效率最先开始下降, 基于 SPGD 的同时取样方案次之, 独立取样方案表现最佳; 在一阶相位噪声模型中, 算法控制带宽均有降低, 其中基于多抖动法的同时取样方案劣化最

明显, 合成效率低于 60%。

不难看出, 独立取样方案在不同噪声条件下均有最优或接近最优的表现, 其余两种方案的表现取决于实际噪声特性。从偏振噪声抑制的角度, 若低频噪声占绝对主导, 基于多抖动法的同时取样控制方案的性能接近最佳; 而当高频噪声不可忽略时, 其控制效果则下滑明显, 表现最差。从相位噪声抑制的角度, 基于多抖动法的同时取样控制方案表现最差, 并且当高频噪声影响较大时效率损失不可接受。需指出仿真中采用的参考光振幅与合振幅之比为 10, 说明增大参考光振幅的方法在动态扰动条件下效果不佳, 需要开发更好的方法来提升残余相位影响下的偏振误差信号的稳定性和可靠性。此外, 基于 SPGD 算法的同时, 取样控制方案路数扩展能力差, 动态噪声条件下的性能随路数增多而发生退化, 将会进一步限制其适

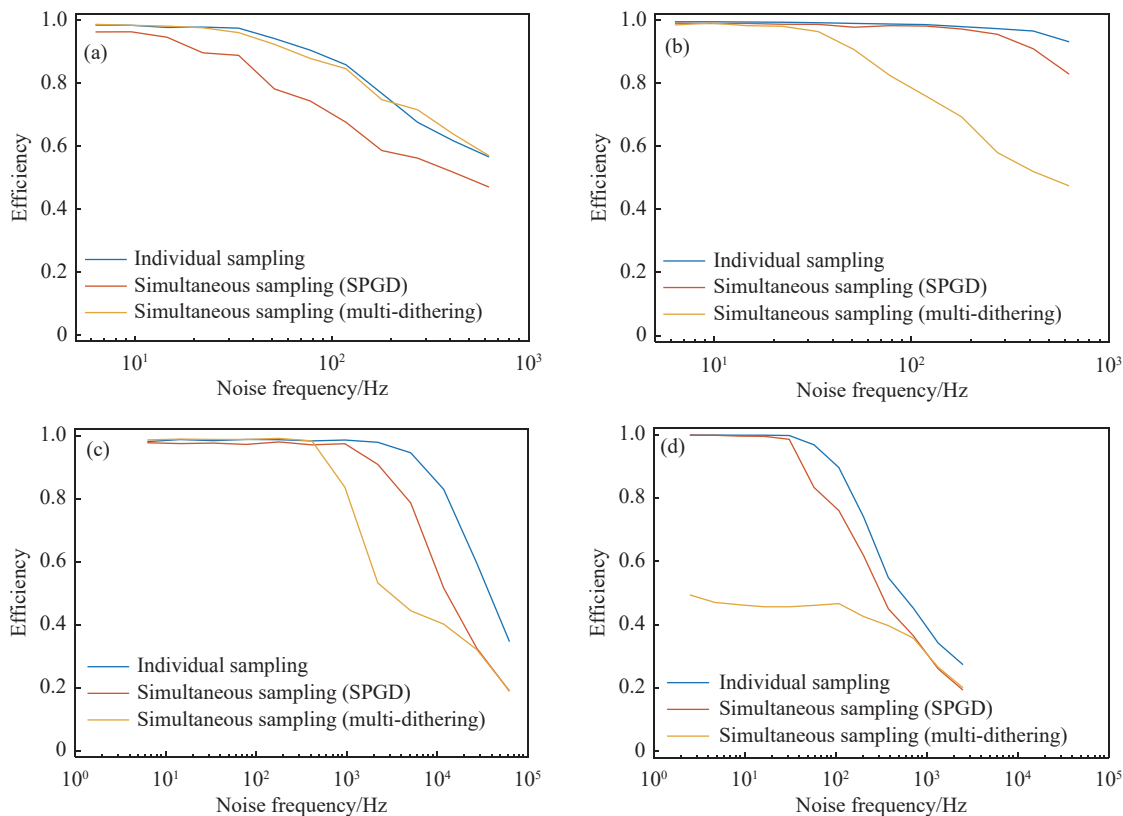


图 12 动态噪声对合成效率的影响。(a) 高阶、(b) 一阶滤波器模型的偏振噪声；(c) 高阶、(d) 一阶滤波器模型的相位噪声

Fig.12 The impact of dynamic noise on combining efficiency. Polarization noise of (a) high-order and (b) first-order filter model. Phase noise of (c) high-order and (d) first-order filter model

用范围。

4 结 论

文中对比研究了不同的多路偏振-相位主动控制技术,对不同方案系统结构、控制原理进行了介绍,并进行了不同路数规模、不同初始状态的仿真分析,并研究了动态噪声的影响。结果表明:

1) 光束独立取样控制的方案具有很好的路数扩展能力,平均 9 步即可收敛,并且偏振控制不受相位残差影响,拥有最佳的动态噪声抑制能力,但控制系统复杂度最高。

2) 基于 SPGD 算法的光束同时取样的偏振-相位控制系统结构最简单,对相位控制残差敏感,0.1 rad 残差产生的效率损失约为 7%,但收敛速度随路数增多而降低,收敛步数约为路数的 4.5 倍,难以满足大规模合成系统的应用需求。

3) 基于多抖动法的光束同时取样的偏振-相位控

制收敛速度最快(小于 7 步),路数扩展能力强,在较小的系统复杂度下,仅对合成光束进行一次取样就能实现偏振-相位控制,具备应用于大规模相干合成系统的潜力。该方法受相位残差影响较大,可以通过增大参考光束振幅来改善,参考光振幅与合振幅之比为 10 时,0.1 rad 残差产生的效率损失约为 5%。然而在动态噪声条件下,方法表现较差,需要进一步提升偏振误差信号的抗干扰能力。

综上所述,在路数规模较小的条件下,系统复杂度不会太高,可以采用光束独立取样的方案,实现优异稳定的合成控制;在偏振带宽要求不高的场合,基于 SPGD 算法的光束同时取样的控制技术优先级更高,从而发挥其结构简单的优势;对于大规模合成系统,独立控制的方案系统过于复杂,基于多抖动法的光束同时取样控制技术可以在复杂度和控制效果上达到更好的权衡,但需要采用一定方法来提升偏振误差信号的准确性,值得进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHOU P, LENG J, XIAO H, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2000001. (in Chinese)
- [2] XIAO Q, TIAN J, LI D, et al. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers: progress and opportunities [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1501004. (in Chinese)
- [3] ZHOU J, HE B, QI Y, et al. High-power fiber laser technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 1101021. (in Chinese)
- [4] JAUREGUI C, LIMPERT J, TÜNNERMANN A. High-power fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [5] ZERVAS M N, CODEMARD C A. High power fiber lasers: a review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 0904123.
- [6] SHI W, SCHULZGEN A, AMEZCUA R, et al. Fiber lasers and their applications: introduction [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): FLA1.
- [7] 任帅, 马鹏飞, 李魏, 等. 近衍射极限 4 kW 级线偏振窄线宽光纤放大器 (简讯) [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 20220032.
- [8] 吴函烁, 宋家鑫, 马鹏飞, 等. 高光束质量 6 kW 级窄线宽光纤激光 (简讯) [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20210859.
- [9] KOBYAKOV A, SAUER M, CHOWDHURY D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2: 1-59.
- [10] TAO R, WANG X, ZHOU P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0903319.
- [11] CHU Q, SHU Q, LI F, et al. Power scaling of high-power linearly polarized fiber lasers with <10 GHz linewidth [J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 11: 1198305.
- [12] ZHANG C, XIE L, CHU Q, et al. Research progress of stimulated Raman scattering effect in high power fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(2): 021002. (in Chinese)
- [13] ZHOU P, MA P, REN S, et al. High-power narrow linewidth fiber laser: progress and prospect [J]. *Information Countermeasure Technology*, 2023, 2(4-5): 16-36. (in Chinese)
- [14] KLENKE A, MÜLLER M, STARK H, et al. Coherent beam combination of ultrafast fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 0902709.
- [15] ZHOU P, SU R, MA Y, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0408003. (in Chinese)
- [16] FATHI H, NÄRHI M, GUMENYUK R. Towards ultimate high-power scaling: coherent beam combining of fiber lasers [J]. *Photonics*, 2021, 8(12): 566.
- [17] SU R, ZHOU P, ZHANG P, 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. (in Chinese)
- [18] 栗荣涛, 马阎星, 奚加超, 等. 60 路大阵列光纤激光高效相干合成 (简讯) [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 331.
- [19] 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 (简讯) [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 20210621.
- [20] 常琦, 侯天悦, 邓宇, 等. 基于二维光场计算的 400 束规模激光相干合成 (简讯) [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 20220276.
- [21] YAN Y, TAO R, LIU Y, et al. Research progress and prospect of high power all-fiber coherent beam combination based on fiber combining devices [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(4): 041005. (in Chinese)
- [22] ZHOU H, ZHANG H, LI M, et al. Progress in active phase control for large-scale coherent laser beam combining [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36(6): 061001. (in Chinese)
- [23] SPRING J B, RUSSELL T H, SHAY T M, et al. Comparison of stimulated Brillouin scattering thresholds and spectra in non-polarization-maintaining and polarization-maintaining passive fibers [C]//Fiber Lasers II: Technology, Systems, and Applications, SPIE, 2005, 5709: 147-156.
- [24] TAO R, MA P, WANG X, et al. Comparison of the threshold of thermal-induced mode instabilities in polarization-maintaining and non-polarization-maintaining active fibers [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6): 065501.
- [25] XIONG Y, SU R, LI X, et al. Coherent beam combining based on adaptive polarization and active phase control technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(1): 5-6. (in Chinese)
- [26] CARTER A, SAMSON B, TANKALA K, et al. The road to kilowatt fiber lasers [C]//Optical Components and Materials, SPIE, 2004, 5350: 172-182.
- [27] LIAO Shibiao, LUO Tiao, XIAO Runheng, et al. Preparation of domestic ytterbium-doped polarization-maintaining fiber and study of its laser properties [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 0501002. (in Chinese)
- [28] DONG S, WANG X, SU R, et al. Adaptive polarization conversion system of the non-polarization maintaining to polarization maintaining laser based on SPGD algorithm [J].

- High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(5): 051011. (in Chinese)
- [29] DONG S, WANG X, SU R, et al. Research on conversion technology from non-polarized to linearly polarized laser based on principle of polarization phase locking [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0202006. (in Chinese)
- [30] WANG Y, FENG Y, WANG X, et al. 6.5 GHz linearly polarized kilowatt fiber amplifier based on active polarization control [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2760-2765.
- [31] SU R, LIU Y, YANG B, et al. Active polarization control of a 1.43 kW narrow linewidth fiber amplifier based on SPGD algorithm [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(4): 045802.
- [32] YOU Y, QI Y, HE B, et al. Principles and development of active polarization control technology for fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 25(10): 100001. (in Chinese)
- [33] REN S, CHANG H, MA P, et al. 3.38 kW all-fiberized narrow linewidth fiber laser based on active polarization control using RMS-Prop algorithm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 166: 109634.
- [34] CUO C, XIE L, TAO R, et al. A novel coherent beam combining system based on active polarization-and-phase control [C]//AOPC 2023: Laser Technology and Applications and Optoelectronic Devices and Integration, SPIE, 2023, 12959: 1295916.
- [35] GOODNO G D, MCNAUGHT S J, ROTHENBERG J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [36] ANGEL F, IYAD D, ROGER H H, et al. Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(9): 096101.
- [37] GOODNO G D, MCNAUGHT S J, WEBER M E, et al. Multichannel polarization stabilization for coherently combined fiber laser arrays [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4272-4274.
- [38] MCNAUGHT S J, THIELEN P A, ADAMS L N, et al. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 0901008.
- [39] 黄智蒙, 唐选, 刘仓理, 等. 一种基于自适应偏振与相位控制的光纤激光阵列组束系统: 中国, CN201410500920. X [P]. 2016-06-29.
- [40] SIIMAN L A, CHANG W, ZHOU T, et al. Coherent femtosecond pulse combining of multiple parallel chirped pulse fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 18097-18116.
- [41] LIU Y, CHI H, ZHANG X, et al. A novel control scheme for four-plate retardation polarization controller [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, 51(1): 124-128.
- [42] ZHOU H, TAO R, ZHANG H, et al. Robust laser phase noise measurement by integration heterodyne for coherent beam combining applications [J]. *Optics Express*, 2024, 32(16): 28868-28880.
- [43] ZHOU H, FENG X, XIE L, et al. Comprehensive investigation of LOCSET and SPGD algorithms in coherent beam combining applications [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111568.

Active polarization-phase control in fiber laser coherent beam combining (*invited*)

ZHOU Hongbing^{1,2}, TAO Rumao^{1*}, XIN Xiong¹, ZHANG Haoyu¹, LIU Chenxu¹, WANG Xinyu¹, SHU Qiang¹, CHU Qiuhui¹, LIN Honghuan¹, WANG Jianjun¹, YAN Lixin², JING Feng¹

(1. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract:

Objective Coherent beam combining (CBC) can improve laser brightness while maintaining beam quality, which is one of the most promising techniques to break through the power limitation of a single fiber laser. CBC requires high-purity linearly-polarized lasers, which are usually obtained from all-polarization-maintained fiber lasers. Unfortunately, nonlinear effect thresholds of all-polarization-maintained fiber lasers are lower than that of non-polarization-maintained ones, and the system cost is higher. Non-polarization-maintained fiber laser system with active polarization control technology is one of the alternatives for achieving linearly-polarized laser sources.

However, there is little research on the theory of active polarization-phase control, and no comprehensive analysis of different control schemes has been reported. In this paper, active polarization-phase control of multi-channel CBC system with different control schemes is modeled. The convergence and feasibility of the control schemes are verified, and the channel scalabilities as well as the effect of extra residual phase and dynamic noise on combining efficiency have been studied.

Methods Based on the structure of filled-aperture CBC, active polarization-phase control model is constructed, where phase control adopts multi-dithering method while the polarization control adopts SPGD algorithm to ensure fair comparison. According to the sampling scheme of laser beams, the polarization-phase control schemes is divided into individual sampling and simultaneous sampling categories. The latter ones are further divided into SPGD-based schemes and multi-dithering-based schemes. CBC performance based on the above three kinds of control schemes has been simulated with their convergence and feasibility being verified. The channel scalabilities of different schemes are compared, and the effect of the extra residual phase on combining efficiency of simultaneous sampling schemes is analyzed. Moreover, dynamic noise is modeled with emphasis on either low-frequency or high-frequency contributions, and the impact of both dynamic polarization and phase noise is simulated and analyzed.

Results and Discussions The control scheme of individual sampling had good channel scalability, and could converge in an average of 9 steps as shown in Fig.4. The control scheme of simultaneous sampling of beams based on SPGD algorithm was relatively insensitive to extra residual phase, where efficiency loss caused by extra residual phase of 0.1 rad was about 7% as illustrated in Fig.9(b), but the number of convergent steps was about 4.5 times of the number of channels as listed in Tab.2. The control scheme of simultaneous sampling of beams based on multi-dithering method had the fastest convergence speed (less than 7 steps for different channel numbers), but its combining performance was greatly affected by residual phase as shown in Fig.9(a). Fortunately, efficiency loss caused by extra residual phase could be reduced by increasing the amplitude of reference laser, and combining efficiency loss of < 5% could be achieved when the amplitude of reference laser was increased to be greater than 10 times of the sampled combined beam as suggested by Fig.9(c). The behaviors in dynamic perturbations were exhibited in Fig.12, indicating that the scheme of individual sampling of beams performed best, while the control scheme of simultaneous sampling of beams based on multi-dithering method showed advantage in the case of slow-varying polarization noise, but it performed worse than others when high frequency perturbations were inevitable.

Conclusions The convergence speed, channel scalability and sensitivity to residual phase of different active polarization-phase control schemes are investigated numerically. When the number of channels is small and the system complexity is low, the control scheme of individual sampling of beams can be adopted. When the requirement of polarization bandwidth is low, the control scheme of simultaneous sampling of beams based on SPGD algorithm is more suitable, which has the simplest structure. For large-scale CBC systems, the control scheme of simultaneous sampling of beams based on multi-dithering method has great potential, but the accuracy of polarization error signal should be improved to be robust with dynamic perturbations, which deserves further research.

Key words: fiber laser; polarization control; multi-dithering; coherent beam combining

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62205317)