



·激光合束技术·

全光纤激光阵列主动相位控制技术研究进展*

常洪祥¹, 粟荣涛^{1,2,3}, 龙金虎¹, 常琦¹, 马鹏飞^{1,2,3}, 马阎星¹, 周朴¹

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 长沙 410073;
3. 国防科技大学 高能激光技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 全光纤激光阵列主动相位控制利用全光纤网络实现阵列激光的活塞相位内部探测与控制, 具有结构紧凑、无需外部反馈光学器件和易于扩展等优点, 是大阵元规模光纤激光相干合成重要发展方向之一。采用全光纤相位探测结构, 介绍了全光纤激光阵列主动相位控制技术的系统原理和利用光纤耦合器实现相位锁定的过程, 总结了全光纤激光阵列主动相位控制关键技术, 通过优化算法实现全光纤激光阵列主动相位控制验证实验。探讨了在全光纤结构主动相位控制中 π 相位模糊问题及解决方法, 给出了利用双波长探测实现消除 π 相位模糊问题的仿真结果。最后梳理了全光纤激光阵列主动相位控制研究现状, 并从路数扩展、功率提升和应用等方面进行了展望。

关键词: 光纤激光; 全光纤激光阵列; 相干合成; 内部相位控制; 光纤传感

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220259

Research progress of active phase-locking technique of an all-fiber coherent laser array

Chang Hongxiang¹, Su Rongtao^{1,2,3}, Long Jinhui¹, Chang Qi¹, Ma Pengfei^{1,2,3}, Ma Yanxing¹, Zhou Pu¹

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

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

Abstract: The all-fiber laser array with active phase control uses an all-fiber network to realize internal detection and control of piston phases, which is one of the important development directions of large-scale fiber laser coherent beam combining. It has the advantages of compact structure, no external feedback optical elements and easy expansion. The phase detection based on an all-fiber structure is employed in this paper. The principles of the active phase control method of an all-fiber laser array and the phase-locking process by fiber couplers are introduced. Then, the key techniques are summarized, and the proof-of-concept experiments are carried out based on optimum algorithms. The issue of π phase ambiguity is discussed and the numerical simulation result is given by double wavelength detection. At last, the research status is introduced, and the prospects are presented from the perspectives of expansion, power enhancement and applications.

Key words: fiber laser, all-fiber laser array, coherent beam combining, internal phase locking, optical fiber sensing

光纤激光具有结构紧凑、热管理方便和光束质量好等优点, 被广泛应用于工业加工、医疗和科研等领域^[1-2]。由于非线性效应和模式不稳定等物理限制因素, 单路光纤激光器的输出功率进一步提升受到限制^[3-9]。为了在保持良好光束质量的前提下获得更高的输出功率, 一条有效的技术途径是对多路光纤激光进行相干合成^[10-15]。随着相干合成技术的发展和应用需求的牵引, 向大阵元规模扩展是光纤激光相干合成发展趋势之一。目前, 研究人员利用随机并行梯度下降 (SPGD) 算法^[16]、多抖动法^[17]、干涉条纹提取法^[18-19]和人工智能^[20-23]等多种相位控制方法^[24-25],

* 收稿日期: 2022-08-23; 修订日期: 2022-10-31

基金项目: 湖南省创新研究群体项目(2019JJ10005); 长沙市杰出创新青年培养计划(KQ2009029); 湖南省研究生创新项目(CX20210017)

联系方式: 常洪祥, changerhx@foxmail.com。

通信作者: 周朴, zhoup203@163.com。

已经实现了数十路、甚至百路级光纤激光的相干合成^[26-34]。要进一步扩展光纤激光相干合成的阵列规模,需要进一步解决高效合束和相位控制等关键技术问题^[26]。首先,在高效合束方面,阵列光束排布占空比对远场能量集中程度有着重要影响^[35],设计紧凑的合束装置是进一步扩大阵列光纤激光相干合成路数规模的关键之一。其次,相位控制是实现阵列光纤激光相干合成的关键技术,也面临着两大问题:一是随着阵元数目的增加,对相位测量和控制的速度要求更高,需要针对更大规模的阵列光纤激光相干合成提出合适的相位控制方法;二是当阵列规模进一步扩展时,阵列口径会随之扩大,在传统的主动相干合成方法中,利用反射镜和透镜采集远场评价函数的方式存在一定的限制,需要对系统结构进行优化设计。为了克服上述困难,研究人员提出了全光纤主动相位控制方法^[36-42],具有结构紧凑、无需外部反馈光学器件和易于扩展等优点。本文对全光纤激光相干阵列主动相位控制进行了详细的介绍。首先介绍了全光纤激光相干阵列主动相位控制的系统原理,然后对其关键技术进行总结,梳理了全光纤激光阵列主动相位控制的发展现状,并对其未来发展方向进行了展望。

1 系统原理

全光纤激光阵列主动相位控制原理图如图1所示。种子激光经过一个1×2光纤分束器分成两束,其中一束经过激光放大器(AMP)放大后,进一步由一个1×N光纤分束器分成N束子激光。每一束子激光分别经过相位调制器(PM)和激光放大器(AMP)后,输入到高分光比的非对称光纤耦合器(分光比为99.9:0.1)的输入端口1。大部分激光从光纤耦合器输出端口1输出到准直器,随后准直输出到自由空间中,这部分光路称之为主光路。主光路为该系统激光的主要能量传输路径,实施相位控制的目的是为了使各子激光主光路之间的相位差稳定。

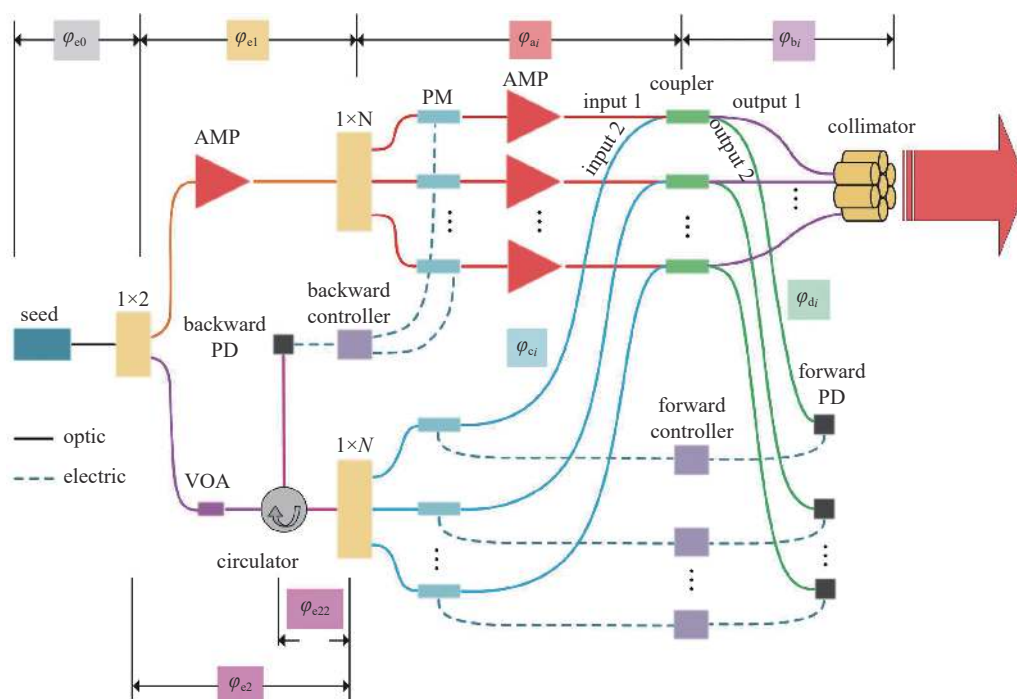


Fig. 1 Schematic diagram of the active phase control for an all-fiber laser array

图1 全光纤激光阵列主动相位控制原理图

1×2光纤分束器的另一束输出激光经过可调光衰减器(VOA)输入到光纤环形器,光纤环形器输出的激光再由另外一个1×N光纤分束器分成N束激光。每一束激光经过相位调制器后,进入到光纤耦合器输入端口2,并在光纤耦合器中与主光路的部分激光共同从光纤耦合器的输出端口2输出并发生干涉,该干涉信号通过前向光电探测器探测,作为前向相位控制信号。这一部分光路称之为测量光路,测量光路为系统中相位信息传输与控制路径。

测量光路将系统中的相位控制分为前向相位控制和后向相位控制。前向相位控制是利用前向相位控制模块分别采集各路前向光电探测器的输出信号,通过执行相位控制算法,然后对各测量光路中的相位调制器施加控制电压。前向相位控制的目的是将第*i*路主光路和探测光路从种子激光到前向光电探测器之间的相位锁定为相同。其中,第*i*路主光路从种子激光到前向光电探测器之间的相位

$$\phi_{mfi} = \varphi_{e0} + \varphi_{e1} + \varphi_{ai} + \varphi_{di} \quad (1)$$

式中： φ_{e0} 为 1×2 光纤分束器前的相位； φ_{e1} 为 1×2 光纤分束器后到主光路 $1 \times N$ 光纤分束器之间的相位； φ_{ai} 为第 i 路主激光主光路 $1 \times N$ 光纤分束器与光纤耦合器之间的相位； φ_{di} 为第 i 路光纤耦合器输出到前向光电探测器之间的相位。第 i 路探测光路从种子激光到前向光电探测器之间的相位为

$$\phi_{bfi} = \varphi_{e0} + \varphi_{e2} + \varphi_{ci} + \varphi_{di} \quad (2)$$

式中： φ_{e2} 为 1×2 光纤分束器后到测量光路 $1 \times N$ 光纤分束器之间的相位； φ_{ci} 为测量光路中 $1 \times N$ 光纤分束器与光纤耦合器之间的相位。通过施加相位控制，使得前向光电探测器探测的干涉光强达到极值，此时第 i 路主光路和探测光路从种子激光到前向光电探测器之间的相位相等，即

$$\phi_{mfi} = \phi_{bfi} \quad (3)$$

因此有

$$\varphi_{e1} + \varphi_{ai} = \varphi_{e2} + \varphi_{ci} \quad (4)$$

在后向相位控制中，当主激光到达准直器时，会在光纤端面发生反射，约4%的激光返回主光路中。各路反射光经光纤耦合器返回到测量光路中，并在 $1 \times N$ 光纤分束器的输入端口发生干涉。干涉光由环形器输出到后向光电探测器中，后向相位控制模块采集干涉信号，通过执行相位控制算法，向各主光路中的相位调制器施加控制电压。后向相位控制的目的是将测量光路中各路回光相位锁定对相同相位。其中，第 i 路激光从种子激光由主光路经光纤端面反射后，并由探测光路到达后向光电探测器的相位为

$$\phi_{bbi} = \varphi_{e0} + \varphi_{e1} + \varphi_{ai} + 2\varphi_{bi} + \varphi_{ci} \quad (5)$$

当各路后向光路之间实现相位锁定，则有

$$\phi_{bbi} = \phi_{bbN} \quad (6)$$

式中： $i=1, 2, \dots, N-1$ 。将式(6)与式(3)联立得出

$$2(\varphi_{ai} + \varphi_{bi}) = 2(\varphi_{aN} + \varphi_{bN}) \quad (7)$$

此时，各路主光路输出激光之间的相位也实现锁定。

2 相位控制技术

2.1 相位控制方法

为了对各路激光的相位进行有效的控制，需要在系统内部对多通道相位进行解调计算。实现内部相位探测与控制方法主要有数字增强外差干涉(DEHI)方法^[43]和优化算法^[41, 44]。

(1) 基于DEHI的相位控制方法

基于DEHI的全光纤激光相干阵列主动内部相位控制的原理图如图2所示。种子激光经 1×2 光纤分束器分成两束：一束为主激光，另一束为参考光。主激光通过声光调制器(AOM)进行频移，该频移后的激光经光纤分束器分成若干束子激光(图2中为3束)，每一束激光经电光相位调制器(EOM)后进入激光放大器后进行功率放大，大

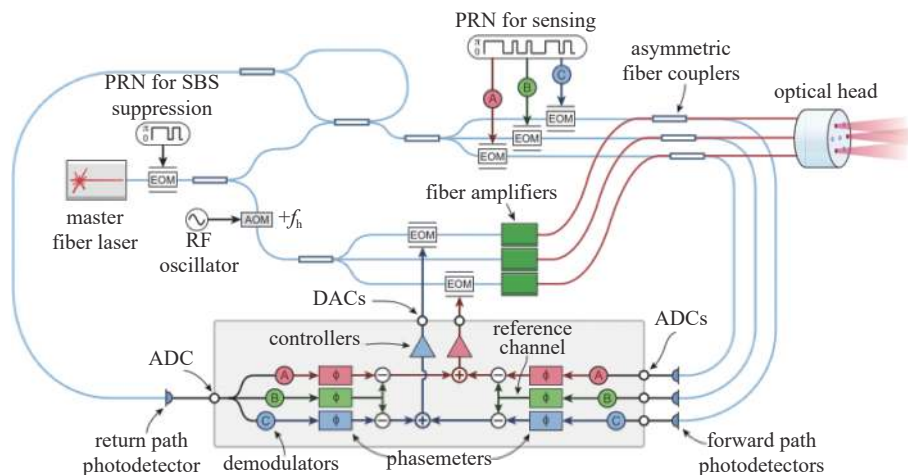


Fig. 2 Schematic diagram of an internal sensing optical phased array based on DEHI^[45]

图2 基于数字增强外差干涉的全光纤激光相干阵列主动内部相位控制的原理图^[45]

部分放大后的激光通过非对称 2×2 光纤耦合器从准直器输出, 另外一小部分通过非对称 2×2 光纤耦合器输出到前向光电探测器。

参考光经过一个 2×2 光纤耦合器再次分成两束参考光: 第一束为前向参考光, 用于前向相位探测; 第二束为后向参考光, 用于后向相位探测。前向参考光经过一个 1×3 光纤分束器后分成三束前向参考光, 每一束前向参考光都经电光相位调制器进行不同序列的伪随机噪声 (PRN) 相位调制。相位调制后的参考光通过非对称 2×2 光纤耦合器与之前产生频移的主激光进行外差干涉。利用三个前向光电探测器采集各路外差拍频信号, 再由控制电路测得频移后的各路激光到非对称 2×2 光纤耦合器之间的相位。后向参考光通过一个 2×1 光纤合束器与 2×2 光纤耦合器输入端口合束。各路放大后的激光在准直器输出时会发生菲涅尔反射, 约 4% 的反射光返回到光纤中, 最终返回到 2×1 光纤合束器并与后向参考光发生外差干涉。后向光电探测器采集这一干涉信号, 并通过控制电路利用 DEHI 技术对各路相位信号进行解算。选取其中一个通道作为参考, 其他各路激光后向相位分别与参考通道的后向相位相减, 再分别加上各路激光前向相位与参考通道前向相位的相位差, 最终得出各路激光输出相位差。通过对各路激光放大器前的电光相位调制器施加对应的控制电压, 实现各路输出激光之间的相位锁定。

在后向外差干涉中, 一路后向参考光与多路主激光进行外差干涉并产生多个拍频信号, 因此需要对多个拍频信号进行分离。DEHI 技术利用 PRN 序列的自相关特性, 实现多个外差拍频信号的分离^[43]。图 3 为 PRN 编码自相关特性示意图, 当调制 PRN 序列与解调 PRN 序列相同时, 可以恢复该 PRN 序列编码的子光路外差拍频信号, 解调后的拍频信号和频谱如图 3(a) 所示。当调制 PRN 序列与解调 PRN 序列不同时, 解调出的信号为如图 3(b) 所示的宽谱噪声。因此, 当调制 PRN 序列与解调 PRN 序列相同时, 输出拍频信号不包含其他子光路的相位信息, 可以实现多通道相位的解调计算。DEHI 技术具有相位探测精确和各通道之间相位差可定制的优点, 但相位控制电路和算法实施较为复杂^[46-47]。

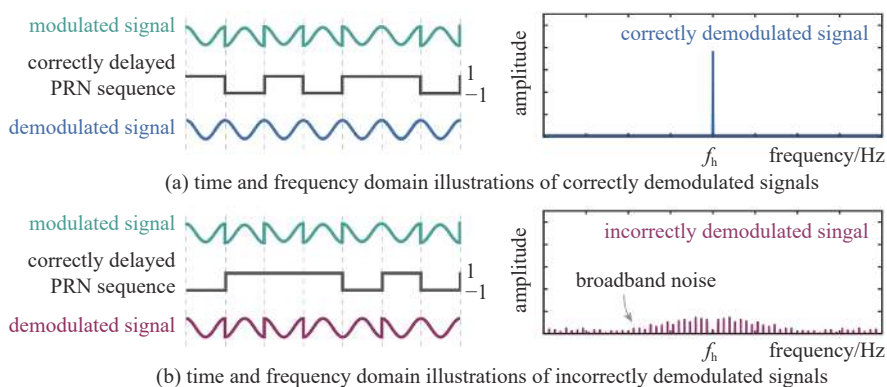


Fig. 3 Autocorrelation of PRN coding^[43]

图 3 PRN 编码的自相关特性^[43]

(2) 基于优化算法的相位控制方法

优化算法是通过对各路光相位进行盲优化使评价函数达到极值, 从而实现输出激光的相位控制, 具有结构简单和便于实施的特点。在全光纤阵列激光内部相位控制中, 优化算法可以通过优化控制实现内部相位信号的解调与控制, 但与以往利用优化算法进行阵列激光相干合成又有不同之处。在以往利用优化算法实现阵列激光相干合成中, 只需要 1 个评价函数即远场桶中功率就可以实现对各路相位的优化控制。在全光纤激光阵列内部相位控制上, 需要引入多个评价函数分别或者整合成综合评价函数进行优化^[41, 44]。在优化算法的控制下, 前向光电探测器接收到的光强达到极值, 实现各子光路前向相位锁定, 使相位条件满足式(3); 后向光电探测器接收到的光强达到最大值, 实现各子光路回光之间的相位锁定, 使相位条件满足式(6)。在前后相位控制的共同作用下, 最终使各路输出激光之间的相位差保持稳定。

2.2 π 相位模糊补偿

以上两种相位控制方法都是利用准直器端面反射回光获取用于相位控制的光反馈信号, 该光反馈信号在光纤往返两次, 使探测相位差是输出相位差的 2 倍。后向相位控制模块无法分辨输出激光之间的相位差是 0 或者 π 弧度, 由此产生了 π 相位模糊的问题, 无法达到理想相干合成的效果^[41, 48]。

为了解决 π 相位模糊问题, 2016 年, 澳大利亚国立大学的 P. G. Sibley 提出了如图 4 所示的结构, 该结构通过输出端将各光纤之间能量重新耦合进“暗”光纤中, 从而实现输出面光相位差的探测。由于耦合进“暗”光纤的光功

率值很低,光电探测器较难探测,需要将“暗”光纤接收光强信号与外差信号进行外差干涉,进一步得到拍频信号的幅度。通过拍频信号的幅度值判断相邻两路之间的输出相位差是 π 还是0,然后进一步通过相位调制器进行补偿。该波导输出头结构紧凑,但“暗”光纤与输出光纤之间要足够近才能进行能量耦合,目前只能输出 mW 量级的激光^[48]。

为了解决 π 相位模糊问题的同时获得高输出功率,本课题组提出了如图5所示的双波长探测方法^[50]。波长为 λ_1 的种子激光经 1×2 光纤分束器分成两束激光:第一束激光经过再次分束和放大,输出到自由空间;第二束激光作为参考光束,用于实现前向相位控制。第一束激光经一个 1×7 光纤分束器分成7束光(以7束光为例),每一束光经过主光路相位调制器(MPM)输入到激光放大器中(AMP)进行功率放大。大部分放大后的激光经过一个非对称 2×2 光纤耦合器从准直器(CO)输出,另一小部分光到达前向光电探测器。第二束参考激光经波分复用器(WDM)后由另一个 1×7 光纤分束器分成7束参考光,每一束光经过测量光路相位调制器(BPM)后输入到非对称 2×2 光纤耦合器的第2输入端口。每一束参考光分别与放大后的激光发生干涉,由前向光电探测器采集干涉信号。前向相位控制模块通过执行控制算法对主光路相位调制器施加控制电压,实现前向相位控制。在后向相位控制中,波长为 λ_2 的探测光通过波分复用器(WDM)输入到测量光路中。探测光在准直器端面发生反射后返回,经环形器导出到后向光电探测器。后向相位控制模块根据探测激光的干涉信号对测量光路相位调制器施加控制电压,从而实现后向相位控制。

当探测波长满足相位变化为主激光相位两倍的条件时,对于波长为 λ_1 的主激光在式(7)中不会再出现公因数2,因此在实现探测波长锁相的同时,使得主激光波长在输出面同相输出。此时有

$$2n_2/\lambda_2 = n_1/\lambda_1 \quad (8)$$

式中: n_2 为波长为 λ_2 的激光在光纤中的折射率; n_1 为波长为 λ_1 的激光在光纤中的折射率。利用该方法还受到各路激光光程差的影响,计算分析了探测波光长的范围及使用条件。当远场归一化桶中功率达到理想值的90%时,探测激光光谱范围与光程差之间的关系如图6所示。由图可知,当各子激光之间的光程差精度能控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内时,探测波长可以覆盖约130 nm光谱范围;当光程差精度能控制在 $100\ \mu\text{m}$ 以内时,探测波长可以覆盖约20 nm光谱范围。在系统搭建过程中,需要根据探测光的波长对准精度选择相应的光程控制精度。

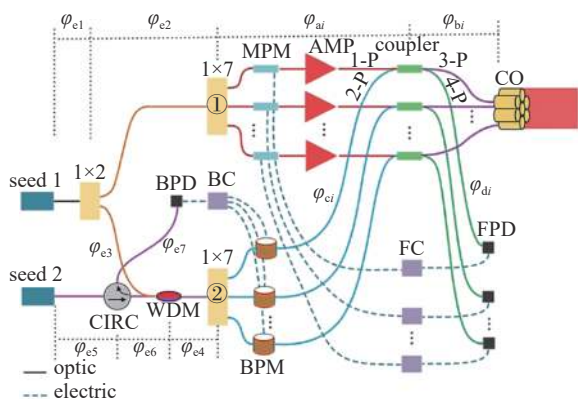


Fig. 5 Schematic diagram of internal phase control for double wavelength detection^[50]

图5 双波长探测内部相位控制原理图^[50]

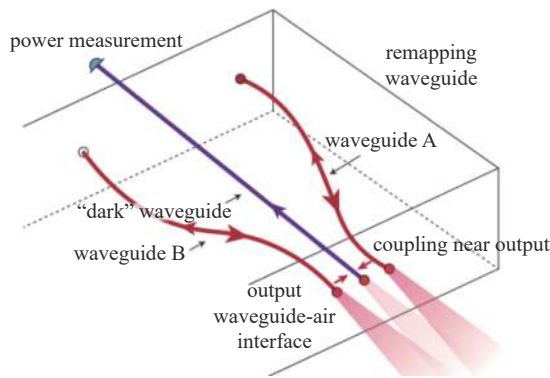


Fig. 4 Schematic diagram of pixel-remapping waveguide optical head^[49]

图4 输出重映射光波导输出头示意图^[49]

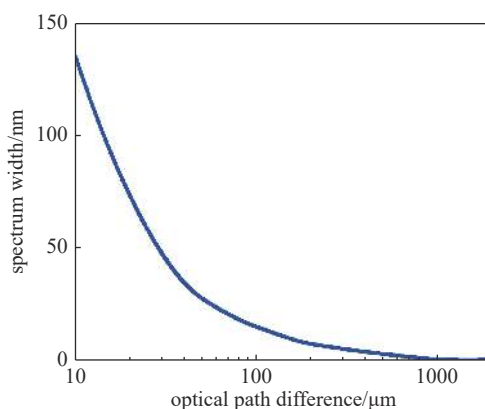


Fig. 6 Relationship of beacon laser spectral range and optical path difference^[50]

图6 探测激光光谱范围与光程差之间的关系^[50]

3 研究现状与展望

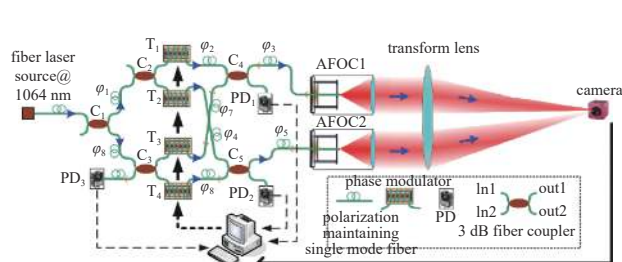
3.1 研究现状

目前,全光纤激光相干阵列主动内部相位控制研究仍处于方案验证阶段,合成路数一般为2路或3路,输出功率大多在 mW 到十 W 量级。主要研究单位有澳大利亚国立大学^[38,51]、中国科学院光电技术研究所^[42,44]和国防科

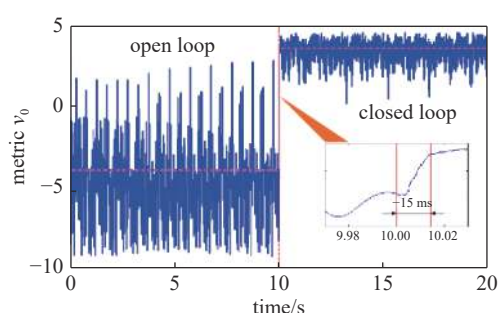
技大学^[41, 52-55]等。

澳大利亚国立大学主要采用 DEHI 相位控制技术。DEHI 技术利用外差探测的原理,对微弱回光信号具有较强的探测能力。2013 年, B. J. David 等提出了内部传感光学相控阵的概念,利用 DEHI 技术首次实现了三束激光的主动内部相位控制,并通过施加相位梯度实现光束偏转^[38]。2016 年, L. E. Roberts 等提出了基于非对称 2×2 光纤耦合器的全光纤激光阵列主动内部相位控制的技术方案,利用可承受高功率的 2×2 光纤耦合器实现了两路 15 W 激光放大器的相位锁定^[45, 56]。

中国科学院光电技术研究所和国防科技大学主要采用 SPGD 算法进行相位控制。2017 年,中国科学院光电技术研究所李枫等利用分光比为 50:50 的 3 dB 光纤耦合器实现了如图 7(a)所示的两路分孔径内部相位控制。该方案将一个后向光电探测器和两个前向光电探测器的光强值相减作为一个综合性能评价指标,通过执行 SPGD 算法将该综合性能评价指标控制到极大值。综合性能评价指标达到极大值可以使采集前向光束之间干涉信号的光电探测器 PD₁ 和 PD₂ 的输出值最小,同时使后向光电探测器 PD₃ 的光强控制到最大,从而实现两路激光输出相位的锁定。其综合性能评价指标开闭环随时间变化曲线如图 7(b)所示^[44]。



(a) experimental scheme of all-fiber-link phase-locking for 2 beams



(b) evaluation function under open loop and closed loop

Fig. 7 Internal phase control of tiled-aperture by using 3 dB coupler and results^[44]

图 7 利用 3 dB 光纤耦合器实现分孔径内部相位控制原理图和实验结果^[44]

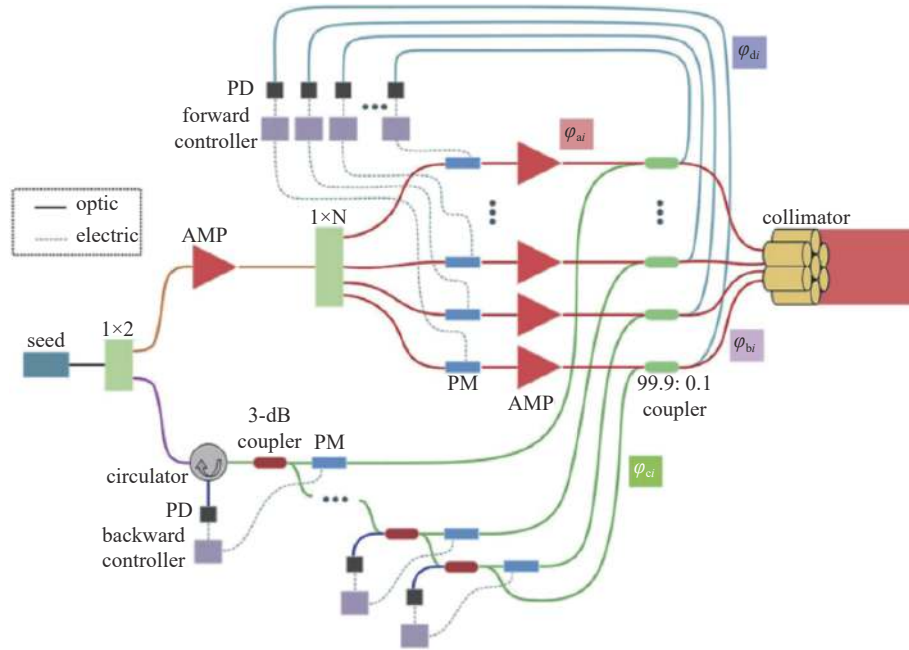
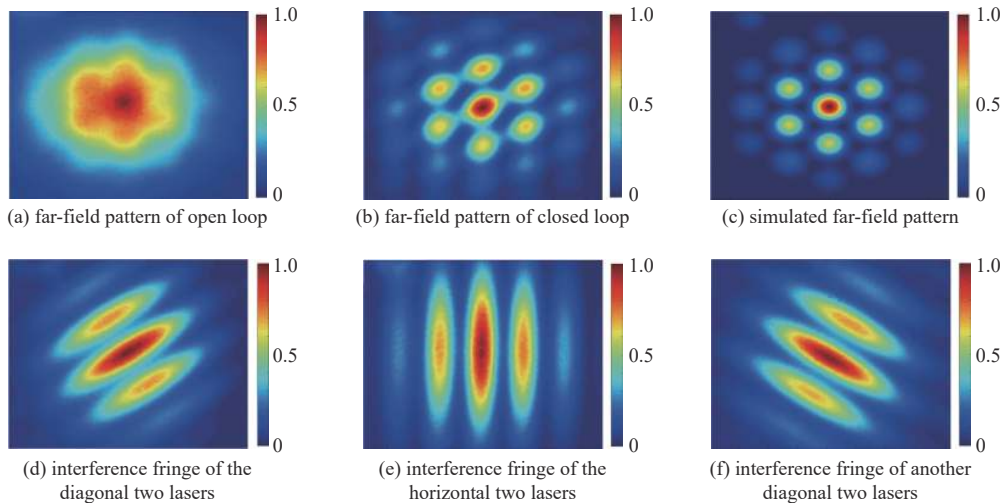
国防科技大学进一步优化系统结构和相位控制算法,提高了系统在弱光条件下的相位探测能力,利用高分光比的光纤耦合器先后实现了 2 路和 3 路全光纤激光阵列的内部相位控制^[41, 57]。2021 年,本课题组成功地利用分光比为 99.9:0.1 的非对称 2×2 光纤耦合器和分布式优化算法,实现了 2 路光纤激光分孔径内部相位控制^[41]。2022 年,本课题组在分布式相位控制研究基础上提出如图 8 所示的级联分布式内部相位控制方案。该方案在测量光路中利用 3 dB 光纤耦合器进一步分解为多个马赫-曾德尔干涉仪结构。通过梯度下降算法对每一路后向回光逐级进行相位控制,实现了 3 路全光纤激光阵列的内部相位控制。其三路合成实验结果如图 9 所示,当系统处于开环状态时,远场光斑长曝光图如图 9(a)所示,远场光斑无明显主瓣。当系统处于闭环状态时中央主瓣能量大幅提升,干涉光斑如图 9(b)所示,可以看出实验结果接近仿真结果图 9(c)。图 9(d)到图 9(f)为三束激光闭环状态时两两干涉远场光斑长曝光图,可以看出输出光束两两之间的相位差在闭环状态时保持稳定。

3.2 研究展望

全光纤激光阵列内部相位控制具有结构紧凑、无需外部反馈光学器件和便于扩展等特点,是大阵元光纤激光相干合成的重要发展方向之一。向着更多合成路数、更高合成功率、实现多参量解耦控制以及目标在回路相干合成是其进一步发展趋势。随着全光纤激光阵列内部相位控制进一步研究,有望实现更大阵列规模和更高输出功率的光学相控阵。

在合成路数扩展方面,2020 年,澳大利亚国立大学 P. G. Sibley 等对 DEHI 技术路数扩展能力进行计算估计,得出了该方法能够实现数百路光纤激光内部相位控制的结论^[58]。2021 年,澳大利亚国立大学 C. P. Bandutunga 等提出了 1×10⁸ 束激光全光纤结构主动相干合成的构想^[39]。本课题组也提出了如图 10 所示的大阵元全光纤网络大阵元数目相干阵列^[52],其基本方案如下:首先将种子激光分为 M 路,再将每一路激光分为 N 路,形成一个包含 M 个子阵列、 $M \times N$ 路激光的“两级光束阵列”。每个子阵列通过一个相位控制模块实现内部相位控制,各子阵列之间通过另一个相位控制模块实现内部锁相,从而实现整个激光阵列的内部相位控制。还可以将系统进一步扩展为 $M \times N \times K$ 路的“三级光束阵列”,或者 $M \times N \times K \times L$ 路的“四级光束阵列”,甚至更多级数、更大数目的激光阵列^[52]。

在功率提升方面,目前非对称耦合器的承受功率可以达到百 W 量级^[45, 59]。同时,单路单频全光纤放大器已实

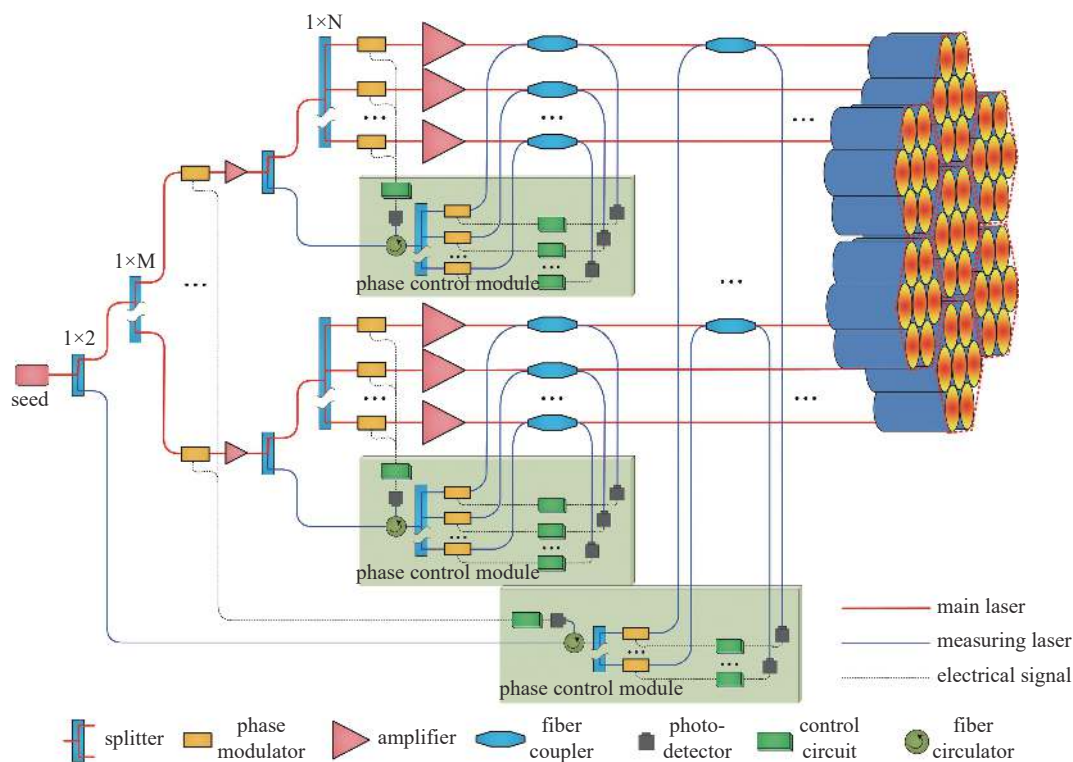
Fig. 8 Schematic diagram of cascade distributed internal phase control^[57]图 8 级联分布式内部相位控制原理图^[57]Fig. 9 Experiment results of cascade distributed internal phase control^[57]图 9 级联分布式内部相位控制实验结果^[57]

现 550 W 输出功率^[60], 借助全光纤结构激光阵列在规模扩展上的优点, 利用承受功率在百 W 级的光纤耦合器可实现成千上万束以上规模的单频光纤放大器的相干合束, 有望实现 MW 以上输出功率。随着高功率光纤器件工艺水平的提升, 全光纤激光相干阵列单路功率可以进一步提高。

在多参量解耦控制方面, 当系统中存在多个可控参量时, 全光纤激光阵列内部相位控制可以与其他参量实现解耦控制。如利用自适应光纤准直器实现相位与倾斜控制的解耦^[61]、利用微波光子技术实现相位与光程的解耦^[62]等, 从而进一步提高阵列光纤激光相干合成远场能量集中度。

在解决大气传输问题方面, 将目标在回路相干合成系统与全光纤内部相位控制相结合, 可以对相干合成系统内部的相位噪声和大气湍流引入的像差分别进行控制, 有望提高目标在回路相干合成的合成效果^[61]。同时, 结合目标在回路系统, 全光纤激光阵列主动内部相位控制中面临的 π 相位模糊问题可以视为固定像差在大气湍流校正环节实现补偿。

由于全光纤内部相位控制无需外部反馈器件, 在组成大规模光学相控阵中更具优势, 在大科学装置可以得到进一步应用。如 Breakthrough Starshot 研究项目^[63], 旨在通过地基高能激光驱动光帆进行宇宙探索, 其概念效果如图 11 所示; 快速飞往火星任务^[64], 通过一个直径 10 m、100 MW 的光学相控阵为航天器提供激光驱动, 在 45 d 内穿

Fig. 10 Schematic diagram of a CBC system for an ultra-large number laser array^[52]图 10 超大数目激光相干合成系统原理图^[52]

越地球轨道与火星轨道之间的距离等。利用全光纤激光阵列主动相位控制组成亿束规模的光学相控阵, 实现 100 GW 总合成功率, 可以为其提供光源^[39]。

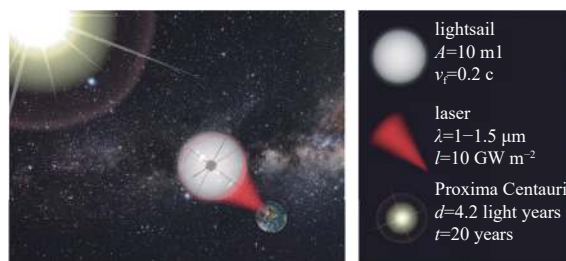
4 结论

全光纤激光阵列主动相干合成具有结构紧凑、无需外部反馈器件、易于扩展等优势, 是大阵列规模光纤激光相干合成重要发展方向之一。本文采用基于全光纤相位探测结构, 将输出端面反射回光作为光反馈信号, 利用光纤耦合器将相位控制过程分为前向和后向两个相位控制过程, 达到输出相位探测与控制的目的。主要的相位控制方法有数字增强外差干涉和优化算法; 为了解决 π 相位模糊问题, 主要有输出重映射光波导输出头和双波长探测的方案。目前, 该方案尚处于方案验证阶段, 已经开展了 2 到 3 路、输出功率在 mW 到十 W 量级的全光纤结构相干合成相位控制实验验证。随着全光纤激光阵列内部相位控制技术的发展, 向着更多路数、更高功率、多参量解耦控制以及目标在回路等方向发展是其发展趋势。最后, 随着全光纤结构主动相位控制的发展, 进一步实现超大规模和高输出功率的光纤激光相控阵成为可能。

主要的相位控制方法有数字增强外差干涉和优化算法; 为了解决 π 相位模糊问题, 主要有输出重映射光波导输出头和双波长探测的方案。目前, 该方案尚处于方案验证阶段, 已经开展了 2 到 3 路、输出功率在 mW 到十 W 量级的全光纤结构相干合成相位控制实验验证。随着全光纤激光阵列内部相位控制技术的发展, 向着更多路数、更高功率、多参量解耦控制以及目标在回路等方向发展是其发展趋势。最后, 随着全光纤结构主动相位控制的发展, 进一步实现超大规模和高输出功率的光纤激光相控阵成为可能。

参考文献:

- [1] 周朴, 黄良金, 冷进勇, 等. 高功率双包层光纤激光器: 30 年的发展历程[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(2): 123-135. (Zhou Pu, Huang Liangjin, Leng Jinyong, et al. High-power double-cladding fiber lasers: a 30-year overview[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(2): 123-135)
- [2] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20: 0904123.
- [3] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [4] Ippen E P, Stolen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(11): 539-541.
- [5] 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.
- [6] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [7] Zervas M N. Transverse mode instability, thermal lensing and power scaling in Yb³⁺-doped high-power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 19019-

Fig. 11 Artist's rendering of Breakthrough Starshot project^[65]图 11 Breakthrough Starshot 概念效果图^[65]

- 19041.
- [8] 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: 121001. (Lai Wenchang, Ma Pengfei, Xiao Hu, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 121001)
- [9] 周朴. 高平均功率光纤激光技术基础: 模式[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 060201. (Zhou Pu. Fundamentals of high-average-power fiber laser technology: Mode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 060201)
- [10] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [11] Liu Zejin, Jin Xiaoxi, Su Rongtao, et al. Development status of high power fiber lasers and their coherent beam combination[J]. Science China Information Sciences, 2019, 62: 41301.
- [12] 周朴, 粟荣涛, 马阎星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020[J]. 中国激光, 2021, 48: 0401003. (Zhou Pu, Su Rongtao, Ma Yanxing, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48: 0401003)
- [13] Ma Pengfei, Chang Hongxiang, Ma Yanxing, et al. 7.1 kW coherent beam combining system based on a seven-channel fiber amplifier array[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107016.
- [14] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [15] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[C]//Proceedings of SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. 2020: 21-26.
- [16] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 907-909.
- [17] Shay T M, Benham V, Baker J T, et al. Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 480-486.
- [18] Chosrowjan H, Furuse H, Fujita M, et al. Interferometric phase shift compensation technique for high-power, tiled-aperture coherent beam combination[J]. Optics Letters, 2013, 38(8): 1277-1279.
- [19] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [20] Hou Tianyue, An Yi, Chang Qi, et al. Deep-learning-based phase control method for tiled aperture coherent beam combining systems[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7: e59.
- [21] Liu Renqi, Peng Chun, Liang Xiaoyan, et al. Coherent beam combination far-field measuring method based on amplitude modulation and deep learning[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18: 041402.
- [22] Tünnermann H, Shirakawa A. Deep reinforcement learning for coherent beam combining applications[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24223-24230.
- [23] Jiang Min, Wu Hanshuo, An Yi, et al. Fiber laser development enabled by machine learning: review and prospect[J]. Photonix, 2022, 3: 16.
- [24] 肖瑞, 侯静, 姜宗福, 等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6464-6469. (Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu, et al. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6464-6469)
- [25] Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jinyong, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 951-953.
- [26] Chang Hongxiang, Chang Qi, Xi Jiachao, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams[J]. Photonics Research, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [27] 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: 0616002. (Li Feng, Zou Fan, Jiang Jiali, et al. Target-in-loop coherent beam combining of a 57-aperture fiber laser array over 2 km in atmosphere based on an adaptive optical system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49: 0616002)
- [28] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [29] Wang Dan, Du Qiang, Zhou Tong, et al. Stabilization of the 81-channel coherent beam combination using machine learning[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5694-5709.
- [30] Shpakovych M, Maulion G, Kermene V, et al. Experimental phase control of a 100 laser beam array with quasi-reinforcement learning of a neural network in an error reduction loop[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 12307-12318.
- [31] Yu C X, Kinsky J E, Shaw S E J, et al. Coherent beam combining of large number of PM fibres in 2-D fibre array[J]. Electronics Letters, 2006, 42(18): 1024-1025.
- [32] Du Qiang, Wang Dan, Zhou Tong, et al. 81-beam coherent combination using a programmable array generator[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5407-5418.
- [33] 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[J]. 红外与激光工程, 2022, 51: 20220276. (Chang Qi, Hou Tianyue, Deng Yu, et al. Coherent beam combining of 400 beams via 2D light-field processing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51: 20220276)
- [34] 粟荣涛, 周朴, 王小林, 等. 32路光纤激光相干阵列的相位锁定[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 110101. (Su Rongtao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, et al. Phase locking of a coherent array of 32 fiber lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 110101)
- [35] 黄智蒙, 唐选, 李晓峰, 等. 光纤激光阵列占空比对相干合成效果影响分析[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(6): 946-950. (Huang Zhimeng, Tang Xuan, Li Xiaofeng, et al. Analysis of influence of filling ratio on coherent beam combination of fiber laser arrays[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(6): 946-950)
- [36] Kolosov V V, Levitskii M E, Petukhov T D, et al. Formation of the feedback loop for phase control of a fiber laser array[J]. Atmospheric and Oceanic Optics,

- 2019, 32(6): 716-723.
- [37] Vorontsov M A, Lachinova S L, Beresnev L A, et al. Obscuration-free pupil-plane phase locking of a coherent array of fiber collimators[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(11): A106-A121.
- [38] Bowman D J, King M J, Sutton A J, et al. Internally sensed optical phased array[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1137-1139.
- [39] Bandutunga C P, Sibley P G, Ireland M J, et al. Photonic solution to phase sensing and control for light-based interstellar propulsion[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(5): 1477-1486.
- [40] Long Jinhu, Chang Hongxiang, Zhang Yuqiu, et al. Compact internal sensing phase locking system for coherent combining of fiber laser array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107775.
- [41] Chang Hongxiang, Su Rongtao, Long Jinhu, et al. Distributed active phase-locking of an all-fiber structured laser array by a stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1089-1098.
- [42] Yang Yan, Geng Chao, Li Feng, et al. Multi-aperture all-fiber active coherent beam combining for free-space optical communication receivers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27519-27532.
- [43] Shaddock D A. Digitally enhanced heterodyne interferometry[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(22): 3355-3357.
- [44] 李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于光纤耦合器的全光纤链路锁相控制[J]. *光电工程*, 2017, 44(6): 602-609. (Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(6): 602-609)
- [45] Roberts L E, Ward R L, Francis S P, et al. High power compatible internally sensed optical phased array[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13467-13479.
- [46] Gozzard D R, Roberts L E, Spollard J T, et al. Fast beam steering with an optical phased array[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3793-3796.
- [47] Gozzard D R, Spollard J T, Sibley P G, et al. Optical vortex beams with controllable orbital angular momentum using an optical phased array[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(12): 3399-3406.
- [48] Sibley P G, Ward R L, Roberts L E, et al. Pixel-remapping waveguide addition to an internally sensed optical phased array[C]//2016 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2016: 117.
- [49] Sibley P G. Scaling optical phased arrays[D]. Canberra: The Australian National University, 2021.
- [50] Chang Hongxiang, Su Rongtao, Qi Chang, et al. Internal phase control of coherent fiber laser array without ambiguous phase based on double wavelength detection[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(12): 3429-3434.
- [51] Roberts L E, Ward R L, Sutton A J, et al. Coherent beam combining using a 2D internally sensed optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(22): 4881-4885.
- [52] 粟荣涛, 常洪祥, 陈思雨, 等. 全光纤网络大阵元数目相干阵列及其相位控制方法: 202210230427.5[P]. 2022-06-14. (Su Rongtao, Chang Hongxiang, Chen Siyu, et al. All-fiber network for a large number coherent array and its phase control methods: 202210230427.5[P]. 2022-06-14)
- [53] 粟荣涛, 常洪祥, 龙金虎, 等. 全光纤激光相控阵系统的精确相位控制方法: 202111663407.9[P]. 2022-04-12. (Su Rongtao, Chang Hongxiang, Long Jinhu, et al. Precise phase control methods for an all-fiber laser phased array system: 202111663407.9[P]. 2022-04-12)
- [54] 粟荣涛, 常洪祥, 龙金虎, 等. 全光纤激光相控阵系统及其相位控制方法: 202111159505.9[P]. 2022-01-07. (Su Rongtao, Chang Hongxiang, Long Jinhu, et al. All-fiber laser phased array system and its phase control methods: 202111159505.9[P]. 2022-01-07)
- [55] 粟荣涛, 常洪祥, 龙金虎, 等. 分布式全光纤激光相控阵系统及其相位控制方法: 202111163656.1[P]. 2022-01-04. (Su Rongtao, Chang Hongxiang, Long Jinhu, et al. Distributed all-fiber laser phased array and its phase control methods: 202111163656.1[P]. 2022-01-04)
- [56] Roberts L E, Ward R L, Smith C, et al. Coherent beam combining using an internally sensed optical phased array of frequency-offset phase locked lasers[J]. *Photonics*, 2020, 7: 118.
- [57] Chang Hongxiang, Su Rongtao, Zhang Yuqiu, et al. Cascaded internal phase control of all-fiber coherent fiber laser array[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 913195.
- [58] Sibley P G, Ward R L, Roberts L E, et al. Crosstalk reduction for multi-channel optical phase metrology[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10400-10424.
- [59] Jeong H, Lee J, Lee K H, et al. 740-watt level optical tap coupler using side-polished large-mode-area double clad fibers for a high power fiber laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 19525-19530.
- [60] 来文昌, 马鹏飞, 刘伟, 等. 全光纤单频光纤放大器实现550 W近衍射极限输出[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0415001. (Lai Wenchang, Ma Pengfei, Liu Wei, et al. 550-W single-frequency all-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 0415001)
- [61] Geng Chao, Li Feng, Zuo Jing, et al. Fiber laser transceiving and wavefront aberration mitigation with adaptive distributed aperture array for free-space optical communications[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1906-1909.
- [62] Li Shupeng, Wang Xiangchuan, Qing Ting, et al. Optical fiber transfer delay measurement based on phase-derived ranging[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(16): 1351-1354.
- [63] Worden S P, Green W A, Schalkwyk J, et al. Progress on the Starshot laser propulsion system[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(31): H20-H23.
- [64] Duplay E, Bao Zhuofan, Rodriguez Rosero S, et al. Design of a rapid transit to Mars mission using laser-thermal propulsion[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 192: 143-156.
- [65] Atwater H A, Davoyan A R, Ilıc O, et al. Materials challenges for the Starshot lightsail[J]. *Nature Materials*, 2018, 17(10): 861-867.