

# 光纤激光主动偏振控制技术的原理与进展

尤阳<sup>1,2</sup>, 漆云凤<sup>1\*</sup>, 何兵<sup>1</sup>, 沈辉<sup>1</sup>, 邹星星<sup>1</sup>, 刘美忠<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 光纤激光的主动偏振控制技术,可以在非保偏光纤中输出高消光比的激光。与保偏光纤激光器产生保偏激光相比,这种方法具有工艺简单、价格低廉的特点。本文主要介绍了主动偏振控制技术的基本原理,系统地阐述了近年来光纤激光主动偏振控制技术在国内外的发展情况,归纳了主动偏振控制技术发展的趋势。对主动偏振控制和偏振相干合成的锁相算法进行了简单的整理,最后对其发展方向进行了展望。

**关键词** 激光技术; 光纤激光器; 主动偏振控制; 锁相; 相干合成; 优化算法

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.100001

## Principles and Development of Active Polarization Control Technology for Fiber Lasers

You Yang<sup>1,2</sup>, Qi Yunfeng<sup>1\*</sup>, He Bing<sup>1</sup>, Shen Hui<sup>1</sup>, Zou Xingxing<sup>1</sup>, Liu Meizhong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract** High extinction ratio laser can be obtained in non-polarization-maintaining fiber by the active polarization control technology. Compared with the polarization-maintaining laser generated by the polarization-maintaining fiber laser, this method has the characteristics of simple process and low price. This paper mainly introduces the basic principle of active polarization control technology, systematically expounds the development of fiber laser active polarization control technology at home and abroad in recent years, and summarizes the general trend of active polarization control technology development. The algorithm of active polarization control and the phase-locked of polarization coherent beam combining is simply sorted out. Finally, the development direction of active polarization control and the phase-locked of polarization coherent beam combining is prospected.

**Key words** laser technique; fiber laser; active polarization control; phase-locking; coherent beam combining; optimization algorithm

**OCIS codes** 140.3510; 260.5430; 140.3298; 170.1650

## 1 引言

在光纤激光相干合成中,为了得到较好的合成效果,比较理想的方法是利用全保偏器件组成的保偏放大器进行相干合成。但是,大功率的保偏器件

价格比较昂贵,工艺较为复杂,如果对系统实施全保偏器件搭建,构造系统的成本将会成倍地提高。因此,如果能够将低功率的前级保偏器件与高功率的后级非保偏器件结合,通过偏振控制方法在输出端实现高消光比的激光输出,就可以有效降低系统的

收稿日期: 2018-10-19; 修回日期: 2018-10-22; 录用日期: 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(61405202, 61705243, 61735007)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)、上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800)、上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200)、王宽诚教育基金会(K.C.Wang Education Foundation)

\* E-mail: dreamer\_7@mail.siom.ac.cn

成本。

在非保偏光纤中,造成偏振态变化的因素有很多,可分为光纤内部因素和外部因素两方面。内部因素包括由材料缺陷导致的残余应力双折射,由制作工艺缺陷导致的波导形状双折射;外部因素主要包括如受压、扭绞、震动、弯曲等机械应力,其导致的不规则双折射将会对光纤链路引入很大的偏振噪声。在大模场光纤中,不同模式的偏振特性不同,此时,增益光纤的光增益同样会对光纤中光的偏振态造成较大的影响<sup>[1]</sup>。上述原因引起的偏振态变化或退化,会导致相干合成效率下降。而运用偏振控制技术,消除光纤链路中的偏振噪声,稳定光纤中光的偏振态,是获得成本低廉、高消光比输出的有效途径之一<sup>[2]</sup>。

主动偏振控制的基本原理是利用光电探测器对激光输出的偏振误差进行探测,再将这些误差信号转换为电信号,并送入如数字信号处理器(DSP)或现场可编程门阵列(FPGA)等算法控制器中,利用一些优化算法产生误差补偿信号,反馈至偏振控制器中。偏振控制器通过控制光纤中激光的方位角或延迟量实现消除偏振态误差的目的。近年来,主动偏振控制技术得到了较为高速的发展,完成了从低功率低消光比向较高功率较高消光比的转变,并且保持了较好的光束质量。制约输出功率继续提高的因素主要是器件的损伤阈值比较低;而制约偏振度继续提高的因素主要是控制算法没有得到完善。因此,研究主动偏振控制技术可以从这些方面着手。

实现偏振态控制后,可以运用相位控制技术,对其进行锁相,用于相干合成,以进一步提高激光的输出功率。

## 2 主动偏振控制技术的发展现状

关于主动偏振控制技术的初始研究,是基于光纤通信的需要。20世纪70年代以来,光纤通信的相关研究和应用不断地推进。但是,随着光纤通信和光纤传感技术的快速发展,光纤通信中的各种问题也逐渐显露出来,其中关于光纤中的偏振效应的研究,已成为光纤通信的主要研究方向之一。

在光纤激光的相干合成中,主动偏振控制的研究也占据着非常重要的地位。将合成之前各个链路光纤中的光,进行偏振控制以及相位调制,那么合束输出的光仍然是偏振光,这样就可以实现合成路数的扩展<sup>[3]</sup>。用于非保偏光纤偏振态控制的方案主要有两种:偏振预补偿技术和偏振末端补偿技术<sup>[4]</sup>。

### 2.1 偏振预补偿方案

偏振预补偿技术是通过改变种子光的偏振态影响主激光输出偏振态的控制技术,偏振预补偿示意图如图1所示,其中AD conversion circuit为模拟数字转换电路,用于实现模数转换。种子光经过非保偏光纤的传导,以及非保偏放大器的放大之后,由偏振器件如偏振分光棱镜(PBS)等,将光的偏振态分为两束,功率较小的一束通过衰减后,由光电探测器(PD)转变为电信号,为控制回路提供电反馈,进而控制种子光的偏振态。

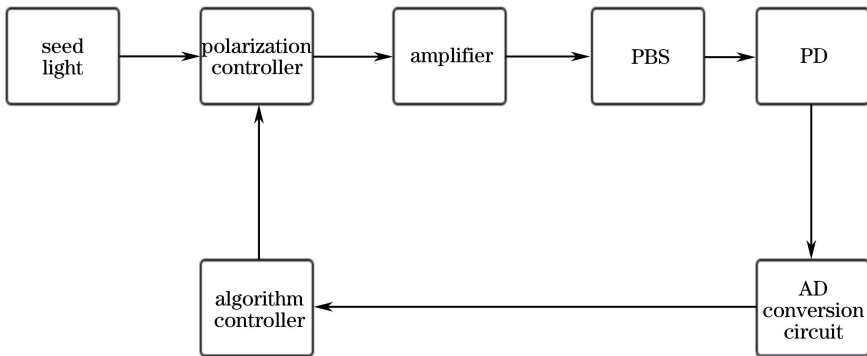


图1 偏振预补偿示意图

Fig. 1 Schematic of polarization pre-compensation

2010年,Goodno等<sup>[5]</sup>基于偏振和相位主动控制进行了相干光束合成(CBC)实验,总功率为1.43 kW,实验示意图如图2所示。种子光在经过电光调制器(EOM)之后,被放大到100 mW,接着被分成3束,其中EOM的作用是对种子光进行

相位调制,以抑制受激布里渊散射(SBS)的产生。被分成的3束光中,一束通过55 MHz的声光调制器进行频移,作为外差参考光;第二束通过电光调制,采用保偏放大器将功率放大至1 W;第三束光通过电光调制器和放大器之后输出1.4 kW的激光,

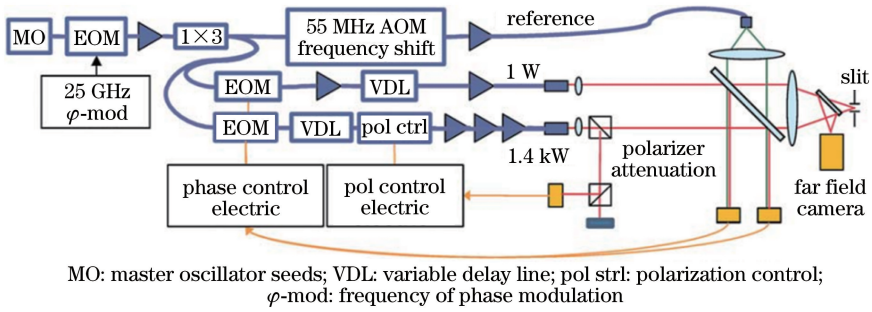


图 2 1.43 kW 光纤相干光束合成实验示意图

Fig. 2 Schematic of 1.43 kW fiber coherent beam combination experiment

在输出端采用 PBS,分出毫瓦级光作为反馈光耦合进偏振控制器,其余大部分光经过衰减片衰减为 1 W,与第二路光进行相干合成。CBC 远场图像如图 3 所示,给出了两束输出光进行相干合成后,平铺孔径和填充孔径的远场图像。

从图 3 可以得出,通过基于主动偏振控制和锁相的相干合成的远场条纹对比度超过 90%。这一结果充分地说明了通过主动相位和主动偏振控制得到的相干合成效果比较理想,稳定性很好,而且主动偏振控制对种子光偏振态中的噪声起到了较好的补偿效果。

2012 年,Goodno 等<sup>[6]</sup>在 CBC 的相关研究上又取得了新的进展,5 路非保偏光纤的相干合成和孔径的填充实验取得了较好的合成效果。实验系统的相干合成

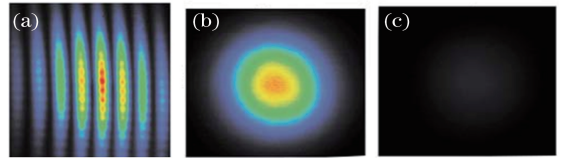


图 3 CBC 远场图像。(a)分孔径远场图像;(b)相位控制开启时填充孔径远场图像;(c)相位控制关闭时填充孔径的远场图像

Fig. 3 Far-field images of CBC. (a) Far-field image of tiled-aperture configuration; (b) far-field image of filled-aperture configuration under in-phase control; (c) far-field image of filled-aperture configuration under out-of-phase control

的效率高达 99%,取得输出光的偏振消光比大于 29 dB,5 路非保偏光的 CBC 系统结构如图 4 所示。

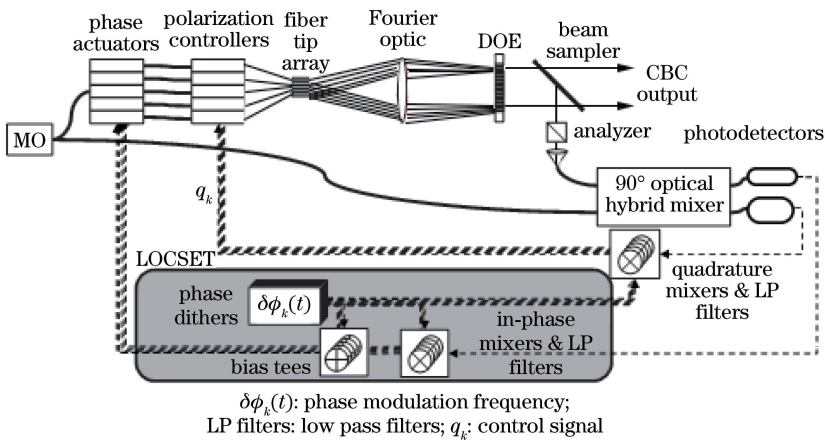


图 4 5 路非保偏光的 CBC 系统结构图

Fig. 4 Structural diagram of 5-channel non-polarization-maintaining CBC system

2014 年,McNaught 等<sup>[7]</sup>利用 3 台镱(Yb)掺杂的非保偏光纤放大器,每台光纤放大器的功率约为 1 kW,通过将 3 台放大器与衍射光学元件(DOE)组合进行光束相干合成,产生了功率为 2.4 kW 的输出光束,光束质量因子为 1.2,系统的合成效率为 80%,没有出现明显的热效应和非线性效应。这意

味着该系统可以合成得到更高的功率。

2016 年,美国空军研究实验室的 Angel 等<sup>[8]</sup>使用 5 台基于偏振控制的窄线宽放大器(单路输出功率约为 1.2 kW),实现了 5 kW 级相干合成输出。系统基于主振荡功率放大器(MOPA)配置,放大器基于伪随机相位调制技术,从每个激光器的输出

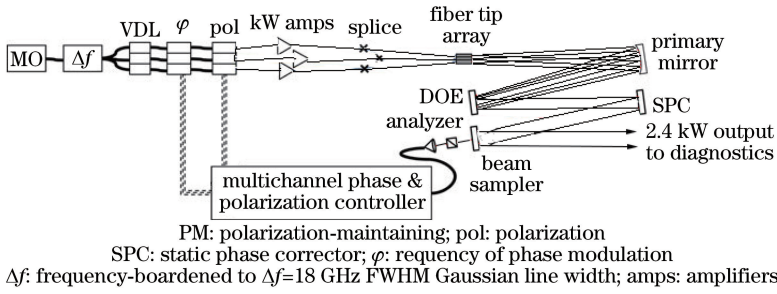


图5 三维衍射 CBC 系统的实验布局

Fig. 5 Experimental layout of three-dimensional diffractive CBC system

中采集低功率样本,并将该样本通过 General Photonics 偏振控制器进行偏振控制。用于有源锁相的误差信号由 DOE 之后的组合光束的低功率采样光提供,通过单探测器电子频率标签锁定光学相干控制板(LOCSET)对其进行相位锁定。在相位被锁定之后,通过1×5 DOE将光束相干组合得到总

功率为 4.9 kW 的相干合成光,相干合成效率达到了 82%,光束质量因子  $M^2$  小于 1.1,内在 DOE 分离器损失为 5%。这是运用伪随机调制光纤放大器的第一个多千瓦级光束组合的实验。单路的 MOPA 链路图如图 6 所示,1×5 DOE 光束组合设置的示意图如图 7 所示。

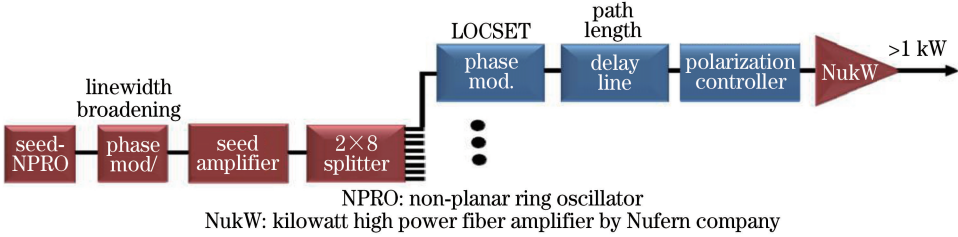


图6 单路的 MOPA 链路图

Fig. 6 Block diagram of one channel MOPA

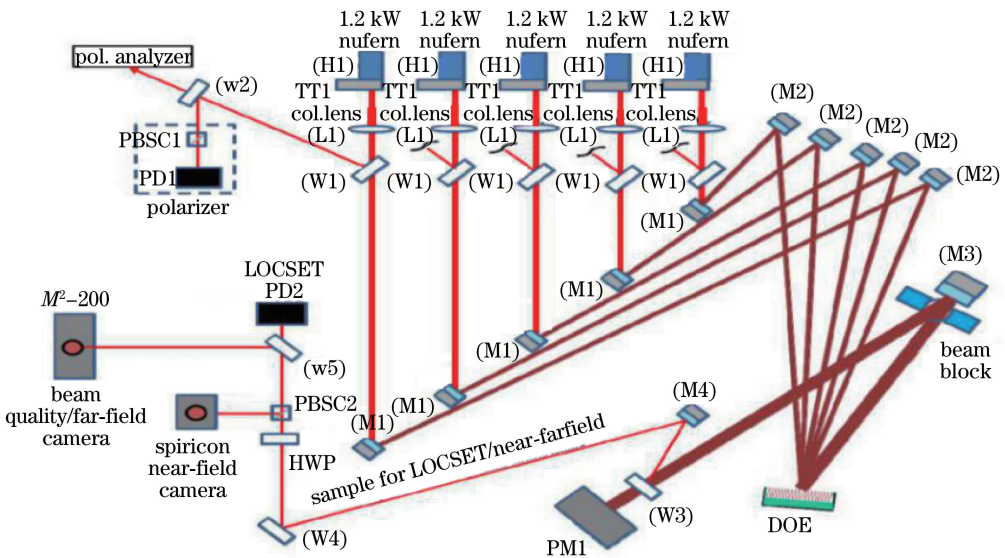


图7 1×5 DOE 光束组合设置的示意图

Fig. 7 Schematic of 1×5 DOE beam combining setup

2017年,刘泽金等<sup>[9]</sup>在单路窄线宽、线偏振光纤激光技术方面取得突破,得到的输出激光功率高达 5.02 kW,而且是近衍射极限的合成激光。这个

实验的合成激光总路数为 4 路,4 路光放大后的功率分别是 1.29,1.14,1.12,1.8 kW,合成效率达到了 93.8%。合成系统实验装置示意图如图 8 所示。



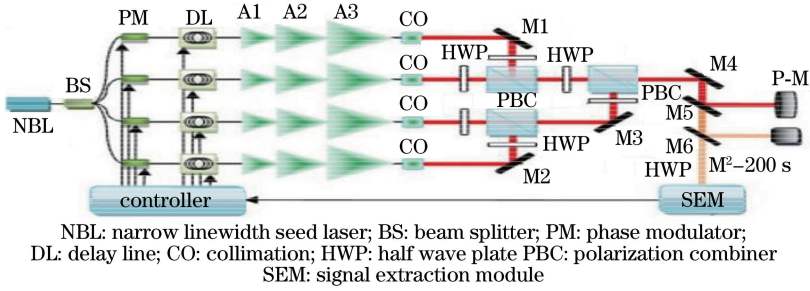


图 8 实验装置示意图

Fig. 8 Schematic of experimental device

王岩山等<sup>[10]</sup>基于主动偏振控制的原理,实现了最大输出功率为 964 W 的线偏振光,偏振合成系统示意图如图 9 所示。其中,最大功率输出时的 3 dB 线宽约为 0.07 nm,偏振消光比达到了 14.5 dB,放

大过程中没有明显的光谱展宽,光束质量因子为 1.2,能量转换效率约为 85%。当激光的输出功率大于 1 kW 时,激光器出现了自脉冲现象,如果这个问题得到解决,那么就可以得到功率更高的激光输出。

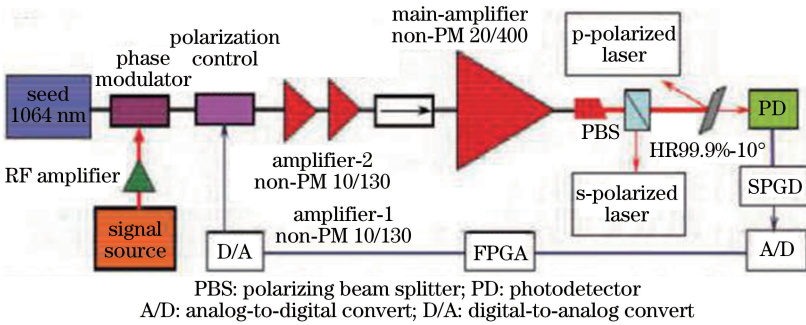


图 9 偏振合成系统示意图

Fig. 9 Schematic of polarization synthesis system

### 2.2 偏振末端补偿方案

在非保偏放大器中,对输出主激光的那一端进行偏振补偿的方案就是偏振末端补偿方案,如图 10 所示。该方案通过直接控制主激光来提高偏振消光

比,因此,在进行高功率非保偏放大器的偏振控制时,所需检测器件的损伤阈值比较高。另外,偏振控制器的控制速度相对缓慢,控制带宽较窄,因此不太适用于对偏振态变化较快的光进行控制。

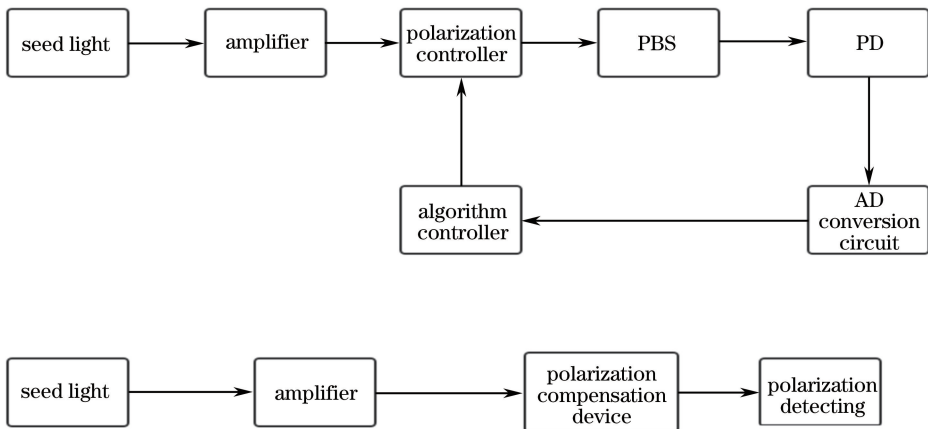


图 10 两种偏振末端补偿示意图

Fig. 10 Schematic of two kinds of polarization end compensation schemes

偏振末端补偿技术有两个主要的缺点:1) 偏振控制器件的损伤阈值要足够高,以承受来自放大器

输出主激光的能量冲击,这给偏振光功率的提升造成了一定困难;2) 偏振控制器的控制速度比较低,

控制带宽较窄,在偏振态变换较快的情况下,控制效果可能不是很完美。但是,这种方法也有其自身的优点,通过主激光直接采样,更能反映出主激光的偏振态变化情况,从而可以对主激光的偏振态、光束质量等进行更优的控制。

2010年,Taylor等<sup>[11]</sup>进行了3路拉曼光纤放

大器的合成实验,3路拉曼光纤放大器光束合成系统如图11所示,3路分别为20,22,40W的激光经过准直器输出后经过四分之一波片变成线偏光,接着通过半波片改变其偏振态,经过隔离器输出后通过空间光路耦合,产生了50W的589nm的钠黄光,这是当时钠黄光的输出功率的最大值。

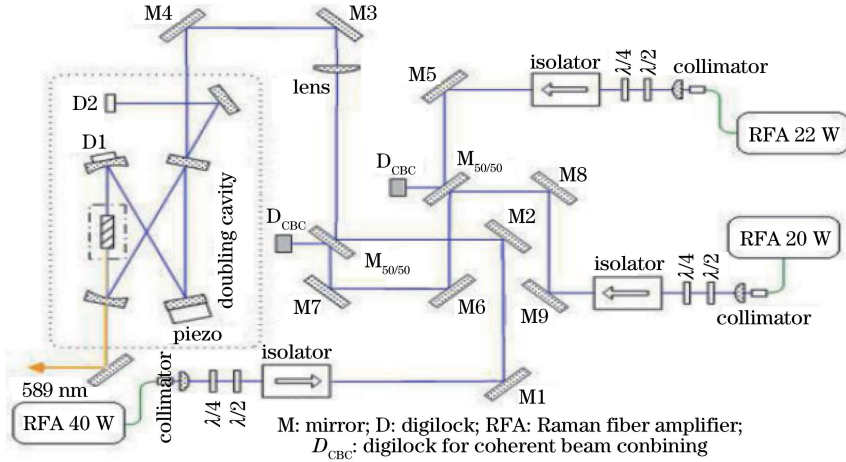


图 11 3路拉曼光纤放大器光束合成系统

Fig. 11 Schematic of three-way Raman fiber amplifier beam combiner

2015年,王鹏等<sup>[12]</sup>提出了一种基于锥棱镜和波片组合的偏振转换系统,运用末端偏振补偿技术,能

较好地地将自然偏振光转换为线偏振光,锥棱镜偏振转换系统示意图如图12所示。

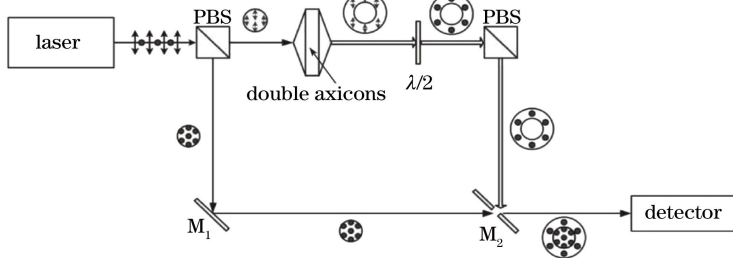


图 12 锥棱镜偏振转换系统示意图

Fig. 12 Schematic of polarization converting system using axicon

一束自然偏振光经过 PBS 后分为偏振态相互垂直的两束线偏振光,其中黑色圆点表示偏振方向与纸面垂直,黑色箭头表示偏振方向与纸面平行。与偏振态纸面平行的光经过一对共轴的锥棱镜,产生一束环形光,接着经过半波片和 PBS 分光后,得到一束偏振态与之前相互垂直的环形光,并且传播方向也和先前光束垂直。偏振态与纸面垂直的高斯光经过全反镜  $M_1$  反射,与环形光在合束镜  $M_2$  处合成一束线偏振光。系统的能量转换效率达到了 97.3%,转换之后的消光比为 99%,与入射的高斯光束相比,线偏光的远场发散角保持较好,但光束质量因子偏大。

2017年,Yang等<sup>[13]</sup>基于偏振控制提出的一种

新颖的、可扩展的相干偏振光束组合(CPBC)方法,该方法可以有效地组合具有任意功率比的不平衡光束,并且光束的数量不一定是偶数,对各光束的功率也没有统一的要求,具有较大的应用潜力。具有两个输入光束的 CPBC 的实验设置示意图如图 13 所示。

将线性极化单模光纤激光器的输出分成两个 1064 nm 的输入光束,在一个输入路径中采用可变光衰减器(VOA),用于光束衰减,以调节输入光束的功率比。先通过使用基于光纤的偏振合束器(PBC)组合两个输入光束,再将组合光束耦合到偏振控制器(DPC)中控制偏振态(SOP)。使用两个 PD 稳定组合输出光束的 SOP 并评估组合的性能。

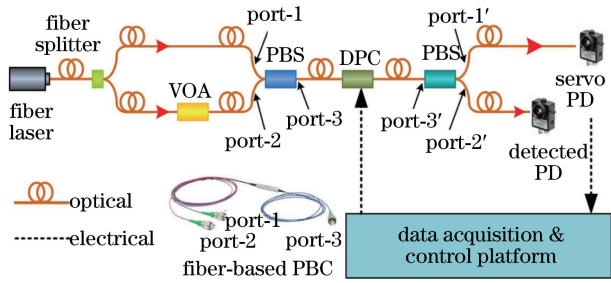


图 13 具有两个输入光束的 CPBC 的实验设置

Fig. 13 Experimental setup for testing proposed CPBC with two input beams

从 Port-1 输出的光功率被发送到伺服 PD, 以提供控制信号作为用于偏振控制的成本函数  $J$ 。为了最大化成本函数  $J$ , 采用随机并行梯度下降 (SPGD) 算法<sup>[14-16]</sup>, 生成相应的模拟电压信号, 通过控制 DPC 来改变组合光束的 SOP。平均组合效率从开环中的 62.13% 增加到闭环中的 99.61%, 并且均方误差 (MSE) 从开环中的 0.057 减小到闭环中的 0.0028。在 SPGD 算法优化的大约 20 次迭代 (相当于 3.3 ms) 之后实现闭环的极化控制。这种 CPBC 方法只需要在两路输入的基础上增加多个 PBC 和 DPC 就可以推广到多路偏振光的相干合成, 但是输入光束数量增加时, 系统损耗也会增加。当输入光束的数量大于 20 束时, 组合输出功率近似趋于稳定。具有 3 个输入光束的 CPBC 的实验系统如图 14 所示。

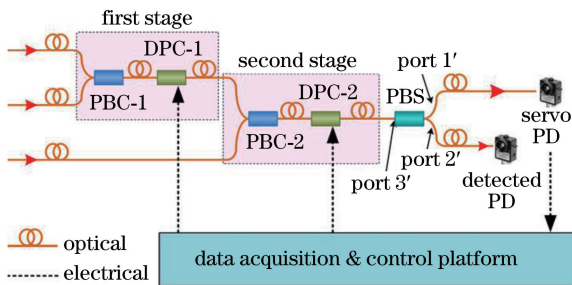


图 14 具有 3 个输入光束的 CPBC 的实验系统

Fig. 14 CPBC test system with three input beams

### 2.3 主动偏振控制在算法方面的进展

进入 21 世纪, 控制算法的研究也是学术界的热点研究之一。人工智能技术给社会带来重大的变革, 也带来了科学研究方法的革命。近些年来, 研究者通过将控制算法用于非保偏光的偏振控制中, 取得了偏振消光比较高的偏振光输出, 进而可以用于激光通信、相干合成等领域。在主动偏振控制中运用的主要算法包括模拟退火 (SA) 算法、粒子群优化 (PSO) 算法、快速搜索算法和 SPGD 算法等。

2005 年, 李伟文等<sup>[17]</sup>通过 SA 算法进行主动偏振控制的研究, 通过驱动 4 个相移范围在  $0 \sim 2\pi$  的由电光晶体玻片组成的偏振控制器, 对系统进行了仿真, 实验结果表明: 在较优的控制参量下, 其输出的偏振态是稳定的, 光强波动可以达到小于 1% 的水平。对模拟退火算法的研究结果是: 为得到最佳的控制效果, 可以把内外循环次数都设置为 3 次, 初温  $T_0$  局限在 0.1 附近, 温度更改常数  $p = 0.2$ ; 对输出稳定性影响最大的是状态产生常数  $s$ , 应将其设置在 0.005 ~ 0.1 之间。模拟退火算法有其自身的局限性, 存在搜索方向上没有方向性的问题, 因此收敛速度不是特别快, 但是具有较高的控制效率。

2008 年, 王铁城等<sup>[18]</sup>采用了一种基于 PSO 算法实现偏振复用系统中的偏振控制。该研究直接采用偏振度近似等于 1 的偏振光进行实验, 重点解释了偏振复用系统的解复用和偏振态的控制调整。该实验的结果可以表明, 基于局部 PSO 算法的偏振控制器能够将任意输入的偏振态转换为目标线偏振态, 误差控制在 0.5% 以内。但当时对于 PSO 算法的研究尚在初始阶段, 算法的计算量还比较大, 还需进一步优化。

2009 年, Liu 等<sup>[19]</sup>提出了一种快速搜索控制算法, 这种算法结合了模拟退火算法和梯度算法, 集中了两个算法各自的优点。主要的测量方法是分振幅偏振测量, 可以比较准确地检测出偏振态, 并且可以在庞加莱球上快速标定输入光的偏振态。

近些年, SPGD 算法凭借其收敛速率快、参数设置简单、扩展性较强的优点逐渐成为最热门的算法, 对偏振态起到了较好的控制效果。

2013 年, 熊玉朋等<sup>[20]</sup>进行了 1.2 W 保偏光放大器和 1.3 W 非保偏光放大器的对照实验, 并将这两束光进行相干合成。这个实验包括偏振自适应控制和相位控制两个系统, CBC 系统结构图如图 15 所示。其中第一路光采用保偏光纤和保偏放大器, 第二路为主动偏振控制的光纤光路, 通过 SPGD 算法, 采用预补偿控制方案对种子光的偏振噪声进行补偿, 得到的输出光和第一路光具有相同偏振态和相等功率, 接着对第一路光进行锁相控制, 将这两束光进行相干合成, 合成的输出功率为 2.4 W, 能量转换效率达到 93.4%, 输出光的偏振消光比达到了 11.5 dB。实验的结果表明, 控制系统处于开环状态时条纹对比度为 41.1%, 处于相位控制状态时为 80.1%, 处于偏振相位同时控制状态时为 87.2%。这一实验说明, SPGD 算法能够有效地实现偏振自适应控制。



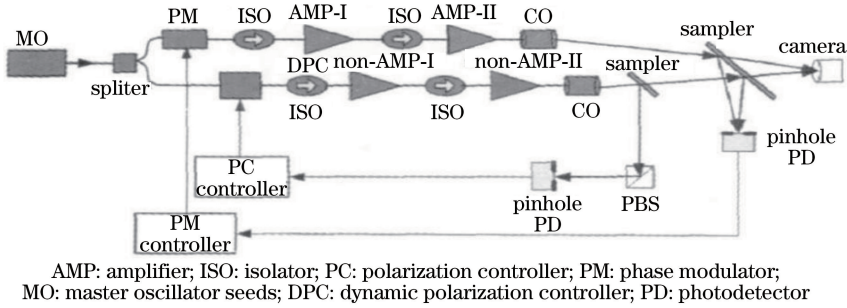


图 15 CBC 系统结构图

Fig. 15 Structural diagram of CBC system

2015 年,董苏惠等<sup>[21]</sup>提出一种基于 SPGD 算法的具有高消光比的非保偏-保偏光自适应偏振转换系统,如图 16 所示。该系统实现了非保偏-保偏光的自适应偏振转换,获得了 14.1 dB 的线偏振光

输出,并且在此基础上,这套系统可以将任意偏振方向的光转换状态,转变为另一偏振态的光,并且保持较高的偏振消光比,输出线偏光的平均消光比约为 12 dB。

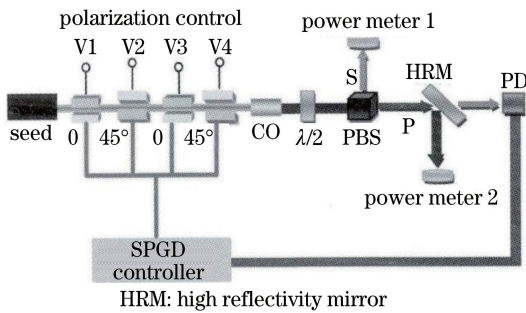


图 16 基于 SPGD 算法的非保偏-保偏光自适应偏振转换系统

Fig. 16 Non-polarization-maintaining adaptive polarization conversion system based on SPGD algorithm

2017 年, Su 等<sup>[22]</sup>进行了基于 SPGD 算法的 1.43 kW 窄线宽光纤放大器的有源偏振控制实验,系统示意图如图 17 所示。MOPA 系统由窄线宽激光器种子和三级 Yb 光纤放大器组成。通过使用白噪声源对单频光纤激光器进行相位调制产生窄线宽激光种子。受到可用抽运功率的限制,从主放大器可获得的最大功率为 1437 W。利用基于 SPGD 算法的偏振控制器主动控制窄线宽(约为 0.17 nm)激光器的偏振态,在最大输出功率下激光束的偏振消光比大于 11.1 dB,线性偏振激光为总功率的 92.8%,可获得的最大线性偏振激光功率为 1334 W。

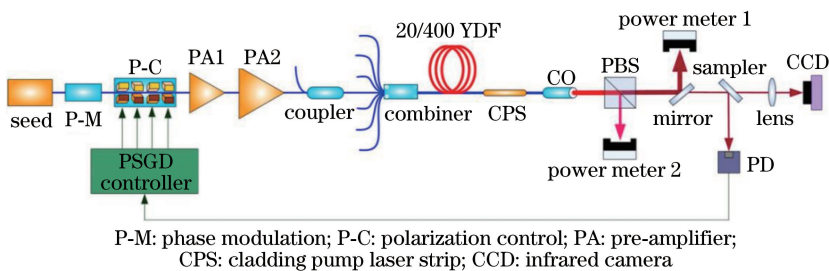


图 17 基于 SPGD 算法的 1.43 kW 窄线宽光纤放大器有源偏振控制实验系统示意图

Fig. 17 Schematic of experimental active polarization control system for 1.43 kW narrow linewidth fiber amplifier based on SPGD algorithm

2018 年,尹明等<sup>[23]</sup>对基于 SPGD 算法的偏振控制进行了理论仿真,重点分析了算法性能评价函数、扰动电压分布类型、增益步进、扰动幅度等参数对偏振控制效果的影响,通过自适应优化算法可以极大地提高系统的控制效果。接着利用 FPGA 执行 SPGD 算法,控制输出光的偏振态,获得了消光比大于 11 dB 的激光输出,偏振控制系统示意图如

图 18 所示。

在主动偏振控制技术中,使用较多的算法分别是: SA 算法、PSO 算法和 SPGD 算法,其中, SPGD 算法按照梯度计算的方法不同,又可以分为单向扰动 SPGD 和双向扰动 SPGD。不同算法的各种特性与其算法内部参数的选取相关。在大量的仿真的结果下,可以找到每种算法在不同场合



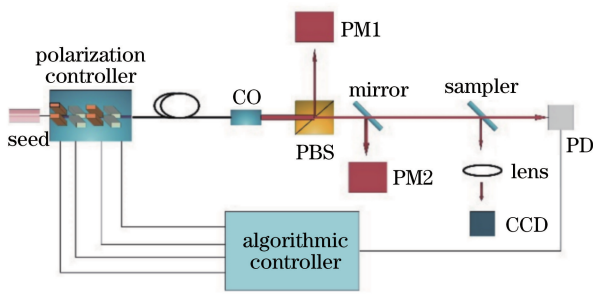


图 18 偏振控制系统示意图

Fig. 18 Schematic of polarization control system

下的最优参数。在参数最优的情况下,可以得到SA算法具有最快的收敛速度,最不易陷入局部极值;SPGD算法的收敛速度相对较慢,较易陷入局部极值,但有最好的校正结果;PSO算法的收敛速度最慢,容易陷入局部极值,而且校正结果也不如前两种算法。因此,SA算法和SPGD算法是在光学领域中比较具有应用前景的控制算法。另外,通过结合几种不同的算法,也可以产生新的算法,例如快速搜索算法,这些算法有可能会得到优于单独的算法的控制结果,因此,在光纤激光的主动偏振控制中,改进旧算法和研发新算法是提高输出激光偏振度的有效途径。

### 3 偏振相干合成及锁相算法简析

偏振相干合成就是通过PBC将两个相位差 $\Delta\varphi = m\pi$  ( $m$ 取整数),偏振态相互正交的线偏振光合成一束。在理论上,如果两束光的相位差严格等于 $m\pi$ ,那么偏振合成后得到的依然是线偏振光,由此可以实现无限路数的扩展。若要实现扩展,需要对合成前的光进行严格的锁相控制。近些年来,国内外对于锁相研究的文献有很多,关于锁相的控制算法也是层出不穷,最常见的锁相算法有外差法、抖动法和其他一些优化算法。

相干合成时,将其中一束光作为参考光和其他光束作为主激光输出,由取样镜取样打在探测器阵列上,将光信号转化成电信号,输出的电信号中包含了相位差信号,可以解调出各路光的相位误差,再将误差施加到相位调制器上,实现闭环控制,就可以逐渐消除相位误差,实现锁相。2006年,Anderegg等<sup>[24]</sup>通过光外差法将4路光合成一束,实现了470 W的功率输出。同年,国防科技大学在国内首次实现了3路瓦量级激光的外差法相干合成<sup>[25]</sup>。2010年,Fan等<sup>[26]</sup>在此基础上实现了7路瓦量级光纤激光的相干合成。2018年,沈辉等<sup>[27]</sup>采用比例积

分微分(PID)控制器进行了基于光学零差偏振探测和锁相的合束激光偏振控制的研究,得到了输出功率为279 mW的线偏振态激光,合束激光的偏振消光比为19.3 dB,控制带宽为39.6 kHz。

但是,外差法也有其局限性。由于光外差法要求参考光和信号光的光轴要严格平行,并且与探测器的平面严格垂直,因此对光路的要求极为苛刻。如果相干合成的路数增多,那么光轴平行的难度就会增加,而且相位误差检测的精确度也会下降,因此,这种锁相方法不适合用于多路光束的相干合成。

抖动法与外差法类似,其实验系统结构大致相同,不同之处在于抖动法是利用不同频率的高频振荡信号对相位调制器进行相位调制,这个调制信号就是相位噪声的载波,再通过带通滤波器就可以得到相位的噪声,并反馈到相位调制器,实现对多路激光相位的补偿。因此,在这里,相位调制器具有施加高频载波信号和相位校正信号两个作用。由于采用了高频振荡波进行相位调制,抖动法不用像外差法那样,要求光轴严格平行且光轴与探测器平面严格垂直。在进行多路光束的相干合成中,抖动法对锁相控制的精度要高于外差法。

根据施加高频振荡信号的种类划分,抖动法可以分为单抖动、多抖动和单频正交抖动3种。2004年,Shay等<sup>[28]</sup>采用一种新颖的多抖动技术,提高了调制频率和控制带宽;2006年,进行了9路激光的相干合成,总输出功率达到百瓦级<sup>[29]</sup>;2009年,实现了16路光纤激光相干合成,总输出功率为1.4 kW<sup>[30]</sup>。2014年,McNaughty等<sup>[31]</sup>进行了3路光纤激光器的相干合成,输出总功率达到2.4 kW。2017年,Jiang等<sup>[32]</sup>基于时分多址(TDMA)的单频抖动技术的电信概念和CBC系统结构,提出了一种基于码分多址(CDMA)的新型正交单频抖动技术,基于CDMA的5路光束的CBC如图19所示。通过使用具有相同频率的一组正交信号对CBC中的激光进行相位调制和解调,同时补偿不同信道的相位误差,并且实现了具有4个信号光束的5路光纤激光器的相干合成。之后又比较了基于CDMA和基于TDMA的单频抖动技术在相同调制频率200 kHz下的性能,通过10次测量,得到基于TDMA和基于CDMA的单频抖动技术的平均上升时间,分别为6.44 ms和0.59 ms。该结果证明基于CDMA的单频抖动技术可将相位控制速度提高近11倍。

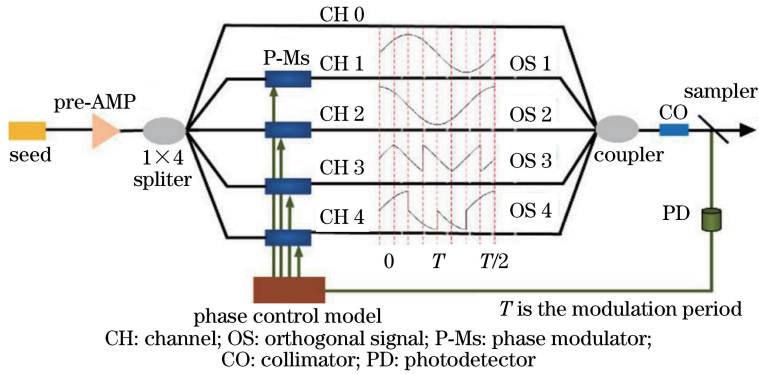


图 19 基于 CDMA 的 5 路光束的 CBC

Fig. 19 CBC of five-way laser based on CDMA

对于多路激光的锁相控制,同样可以使用多种控制算法实现。将多路激光的相位作为控制变量,对控制算法进行迭代优化,最终可使相干合成的性能评价函数达到最优值。

2006 年,国防科技大学侯静等<sup>[33]</sup>在 MOPA 系统中,分别用爬山法和外差法对其进行相干合成,其中爬山法的控制精度为  $\lambda/10$ ,外差法的控制精度为  $\lambda/20$ ,输出功率均为 0~1 W。2009 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所武敬力等<sup>[34]</sup>将爬山法和光外差法分别用于控制 10 W 的光纤放大器,最终控制精度均达到了  $\lambda/10$ ,斯特列尔比达到 0.9 以上。2010 年,哈尔滨工业大学范馨燕等<sup>[35]</sup>运用爬山算法对七阵元六角形光阵列进行相干合成,620 mW 的输出功率下斯特列尔比为 0.70,合成效率为 89%。同年,周朴等<sup>[36]</sup>采用模拟退火算法对两路瓦量级光束进行相干合成,经观察,实施闭环控制后比开环时圆孔内的能量提高了 8 倍。

2009 年,Zhou 等<sup>[37]</sup>采用 SPGD 算法进行了 3 路双波长光纤放大器的相干合成实验,每个激光器的输出功率均大于 1 W。进行闭环控制后的远场条

纹对比度大于 85%,主瓣中包含的能量占总能量的 90%以上。同年,该课题组进行了两路高功率光纤放大器的相干合成实验<sup>[38]</sup>,该实验使用 DSP 作为控制器实现 SPGD 算法,得到 60.1 W 的输出功率,  $M^2$  小于 1.4,条纹对比度为 93%。2011 年, Bourderionnet 等<sup>[39]</sup>基于自参考四波剪切干涉仪和具有电光陶瓷调制器阵列的主动控制,实现了 64 个光纤放大器的相干合成,合成光束的相位误差小于  $\lambda/10$ ,斯特列尔比小于 2 dB。

2015 年,Ahn 等<sup>[40]</sup>采用级联的多抖动技术进行了 16 路光的相干合成,每个锁相系统都是通过 LOCSET 技术,最终获得了  $\lambda/31$  的残余相位差。2016 年,Su 等<sup>[41]</sup>提出了一种 SPGD 算法和单抖动相结合的控制技术,完成了 16 路激光的相干合成实验,基于级联相位控制的 16 路光纤激光的 CBC 如图 20 所示。在实验中,用 SPGD 算法将每个子阵列中的光束进行相干组合,相位误差为  $\lambda/28$ ;然后将两个子阵列相干合成的光进行单抖动法相位锁定,相位误差为  $\lambda/24$ 。这种方法有效地提高了控制系统的控制带宽。

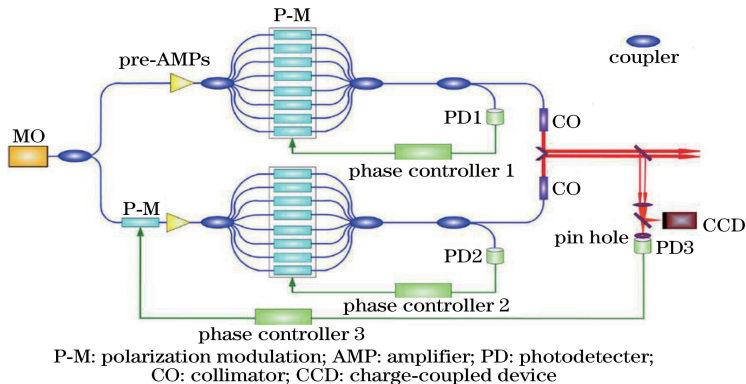


图 20 基于级联相位控制的 16 路光纤激光的 CBC

Fig. 20 CBC of 16 fiber lasers based on cascading phase control

## 4 结 论

外部和内部因素均会对非保偏光纤的偏振态产生巨大影响,而大功率保偏器件制作工艺复杂,价格昂贵,将会导致系统成本提高,集成难度增加,因此主动偏振控制的研究对于相干合成的重要性不言而喻。

在功率较高的单路偏振光输出以及多路光的相干合成中,大多采用偏振预补偿控制技术,原因是这种技术是通过改变种子光的偏振态进而改变主激光偏振态,从主激光中获得少量样本便可以提取出其所有的偏振态信息作为反馈信号,但缺点是转化之后的偏振光的消光比不高,根据目前的报道,可得到的消光比最高不超过 20 dB。由于偏振末端补偿技术是对主激光直接进行偏振控制,因此不适合用于功率较高的场合,只能通过研制高损伤阈值的实验器材以提高其功率,这种补偿技术得到的激光消光比通常较高,具有偏振预补偿技术不可替代的优点。

在单路偏振态控制系统的算法方面,大多采用 SA 算法、PSO 算法和 SPGD 算法等,每种算法都有其各自的优缺点。SA 算法是一种以概率 1 收敛于全局最优解的全局优化算法,具有并行性,不容易陷入局部极值。但是,其在迭代的过程中缺少方向性,算法的性能与初始值有关,并且对参数比较敏感。PSO 算法可以对系统的参数进行一定程度的优化,但是计算量比较大,容易陷入局部极值,并且收敛的速度较慢。SPGD 算法具有很好的优化系统参数的能力,不易陷入局部极值,但是收敛的速度不是特别快,总体来说,SA 算法和 SPGD 算法的控制效果较好。

在相干合成之中,需要对待合成的偏振光进行锁相,使合成前的两束光的相位差为  $\pi$  的整数倍,以进行多路合成的扩展。锁相的主要方法有外差法、抖动法和优化算法等。外差法需要测得  $N$  路信号光与参考光之间的相位差,因此需要用到透镜阵列和  $N$  个光电探测器,而且信号光和参考光之间需要良好的波前匹配,随着合成路数的增多,信号探测的准确度将会不断下降,因此不适合路数较多的合成系统。抖动法可以从一个光电探测其中解调出每一路的相位误差信号,不需要信号光和参考光的波前匹配,因此实现较为简单。根据高频信号振荡的种类可以分为单抖动和多抖动法。最近对基于 TDMA 和 CDMA 的抖动锁相技术的研究也在逐渐兴起,对基于优化算法和抖动技术的研究也取得了

很多的成果。关于锁相的优化算法和偏振控制的优化算法比较类似,主要有爬山法、模拟退火算法、遗传算法以及 SPGD 算法等。爬山法可以用于频率较低功率较小的相干合成系统中,但是控制的精度相对较低。模拟退火算法的收敛速度和校正效果都比较好,是一种以概率 1 收敛于全局最优解的优化算法。遗传算法的控制带宽随着控制变量的增加会出现明显的下降。SPGD 算法是一种比较好的控制算法,可以用于控制多个变量,并且在大多数情况下,收敛速度较快。

对于偏振预补偿技术,不仅要追求更高的偏振消光比,还要追求更高功率的单路线偏光输出,其用途之一就是作为相干合成的信号光,以提高相干合成的功率;对于偏振末端补偿技术,应该积极地开发高损伤阈值的器件,同时要注重对光路的调试与优化,得到更高消光比的输出;对于单路偏振控制的算法,要积极地对算法进行改进,比较、总结各种算法的优缺点,以便保留优点,改进缺点;对于相干合成的锁相算法,不仅要注重改进算法,更要注重不同算法之间的结合,以提高控制带宽和相位误差的精度,也可以引入如电信等其他研究领域的概念,以更加完善相干合成理论,为研究服务。

## 参 考 文 献

- [1] Hu L T. The study on the instability of polarization in optical fibers[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003: 20-21.  
扈路坦. 光纤中偏振不稳定性的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003: 20-21.
- [2] Liu Z J, Zhou P, Xu X J. Coherent beam combining of high average power fiber laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 172-173.  
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高功率光纤激光相干合成 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 172-173.
- [3] Liao Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003.  
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [4] Xiong Y P. Study on adaptive polarization control technology of fiber amplifier[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 2-3.  
熊玉朋. 光纤放大器的偏振自适应控制技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2012: 2-3.
- [5] 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.



- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Angel F, Thomas E, Roger H, *et al.* Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 97281Y.
- [9] Liu Z J, Zhou P, Ma P F, *et al.* 4-channel high power narrow linewidth, linearly polarized fiber amplifier coherent polarization beaming for 5 kW high brightness laser output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0415004.  
刘泽金, 周朴, 马鹏飞, 等. 4路高功率窄线宽线偏振光纤放大器相干偏振合成实现 5 kW 级高亮度激光输出 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0415004.
- [10] Wang Y S, Yan H, Peng W J, *et al.* 1 kW narrow linewidth linear polarization fiber laser based on active polarization control [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0519001.  
王岩山, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于主动偏振控制的 1 kW 窄线宽线偏振光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0519001.
- [11] Taylor L R, Feng Y, Calia D B. 50 W CW visible laser source at 589nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.
- [12] Wang P, Shang Y P, Li X, *et al.* High efficient polarization-converting system based on combination of axicon and wave plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(s1): s116002.  
王鹏, 尚亚萍, 李霄, 等. 基于锥棱镜和波片组合实现的高效偏振转换系统 [J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s116002.
- [13] Yang Y, Geng C, Li F, *et al.* Coherent polarization beam combining approach based on polarization controlling in fiber devices [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(12): 945-948.
- [14] Yang Y, Geng C, Li F, *et al.* Combining module based on coherent polarization beam combining [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(7): 2020-2028.
- [15] Geng C, Zhao B Y, Zhang E T, *et al.* 1.5 kW incoherent beam combining of four fiber lasers using adaptive fiber-optics collimators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(13): 1286-1289.
- [16] Li F, Geng C, Li X Y, *et al.* Co-aperture transeiving of two combined beams based on adaptive fiber coupling control [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(17): 1787-1790.
- [17] Li W W, Zhang X M, Chen K S, *et al.* Application of simulated annealing algorithm on endless polarization controller [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(6): 820-824.  
李伟文, 章献民, 陈抗生, 等. 模拟退火算法在无端偏振控制器中的应用 [J]. *光子学报*, 2005, 34(6): 820-824.
- [18] Wang T C, Liu T G, Wan M S, *et al.* Polarization controlment for polarization division multiplexing system [J]. *Optics&Optoelectronic Technology*, 2008, 6(6): 9-12.  
王铁城, 刘铁根, 万木森, 等. 偏振复用系统中解复用端的偏振控制算法 [J]. *光子与光电技术*, 2008, 6(6): 9-12.
- [19] Liu Y, Chi H, Zhang X M, *et al.* A novel control scheme for four-plate retardation polarization controller [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, 51(1): 124-128.
- [20] Xiong Y P, Su R T, 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.  
熊玉朋, 粟荣涛, 李霄, 等. 基于偏振自适应和主动相位控制的相干合成的实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(1): 5-6.
- [21] Dong S H, Wang X L, Su R T, *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.  
董苏惠, 王小林, 粟荣涛, 等. 基于 SPGD 算法的非保偏-保偏光自适应偏振转换 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(5): 051011.
- [22] Su R T, Liu Y K, Yang B L, *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.
- [23] Yin M, Su R T, Wang X L, *et al.* Theoretical and experimental research on polarization control of fiber laser based on SPGD algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 090602.



- 尹明, 粟荣涛, 王小林, 等. 基于 SPGD 算法的光纤激光偏振控制理论与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090602.
- [24] Anderegg J, Brosnan S J, Cheung E, *et al.* Coherently coupled high power fiber arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6102: 6102U.
- [25] Hou J, Xiao R, Jiang Z F, *et al.* Coherent beam combination of three ytterbium fiber amplifiers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1585-1588.
- 侯静, 肖瑞, 姜宗福, 等. 三路掺镱光纤放大器的相干合成实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1585-1588.
- [26] Fan X Y, Liu J, Liu J S, *et al.* Coherent combining of a seven-element hexagonal fiber array [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(2): 274-279.
- [27] Shen H, Quan Z, Yang Y F, *et al.* Polarization control of combined laser beams based on optical homodyne polarization detection and phase locking [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 0103007.
- 沈辉, 全昭, 杨依枫, 等. 基于光学零差偏振探测和锁相的合束激光偏振控制 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0103007.
- [28] Shay T M, Benham V. First experimental demonstration of phase locking of optical fiber arrays by RF phase modulation [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5550: 313-319.
- [29] 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.
- [30] Shay T M, Baker J T, Sanchez A D, *et al.* High-power phase locking of a fiber amplifier array [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 71951M.
- [31] McNaughty 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): 174-181.
- [32] Jiang M, Su R T, Zhang Z X, *et al.* Coherent beam combining of fiber lasers using a CDMA-based single-frequency dithering technique [J]. Applied Optics, 2017, 56(15): 4255-4260.
- [33] Hou J, Xiao R, Liu Z J, *et al.* Two methods to realize phase controlling of ytterbium fiber amplifiers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(11): 1779-1782.
- 侯静, 肖瑞, 刘泽金, 等. 两种方法实现对掺镱光纤放大器的相位校正 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(11): 1779-1782.
- [34] Wu J L, Liu J J, Xing Z B, *et al.* Phase controlling methods and experiment of fiber laser coherent combination [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(6): 584-587.
- 武敬力, 刘京郊, 邢忠宝, 等. 光纤激光相干合成中的相位控制方法与实验 [J]. 激光与红外, 2009, 39(6): 584-587.
- [35] Fan X Y, Liu J J, Liu J S, *et al.* Theoretical and experimental study of multi-element coherent fiber array [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2462-2470.
- 范馨燕, 刘京郊, 刘金生, 等. 多阵元光纤相干阵列的理论及实验研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2462-2470.
- [36] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, *et al.* Coherent beam combining of fiber amplifiers based on stimulated annealing algorithm [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 973-977.
- 周朴, 马阎星, 王小林, 等. 模拟退火算法光纤放大器相干合成 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 973-977.
- [37] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, *et al.* Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2939-2941.
- [38] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, *et al.* Coherent beam combination of two-dimensional high power fiber amplifier array using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. Applied Physics Letters, 2009: 231106.
- [39] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, *et al.* Collective coherent phase combining of 64 fibers [J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [40] Ahn H K, Kong H J. Cascaded multi-dithering theory for coherent beam combining of multiplexed beam elements [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12407-12413.
- [41] Su R T, Zhang Z X, Zhou P, *et al.* Coherent beam combining of a fiber lasers array based on cascaded phase control [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2585-2588.