



DOI: 10.12086/oe.2018.170692

光纤激光相干合成研究进展

耿超^{1,2}, 杨燕^{1,2,3}, 李枫^{1,2}, 黄冠^{1,2,3}, 李新阳^{1,2*}¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要:近年来,以激光大气传输为应用背景的光束相干合成技术被广泛研究,而关于该项技术在空间光通信中的应用研究却不多。事实上,基于光束相干合成的多孔径接收天线结构可有效缓解大气湍流影响,提高空间激光通信系统的性能。本论文简要介绍了中国科学院自适应光学重点实验室面向激光大气传输应用的激光组束传输与湍流校正技术研究近况;重点介绍关于多孔径接收空间光通信系统中的光纤相干合成研究进展,主要包括基于3 dB 光纤耦合器的相干合成和基于光纤偏振合束器的相干偏振合成两种方法,在空间光通信系统中具有极大的潜在应用。

关键词:空间光通信;多孔径接收天线;相干合成;目标在回路

中图分类号: TN24

文献标志码: A

引用格式:耿超,杨燕,李枫,等. 光纤激光相干合成研究进展[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170692

Research progress of fiber laser coherent combining

Geng Chao^{1,2}, Yang Yan^{1,2,3}, Li Feng^{1,2}, Huang Guan^{1,2,3}, Li Xinyang^{1,2*}¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In recent years, the coherent beam combining technique for laser transmission in atmosphere has been widely investigated, while the study of this technique's application in space optical communications is few. In fact, the structure of multi-aperture receiving antenna based on coherent beam combining could be employed to correct the atmospheric turbulence effect and to enhance the performance of the space optical communication system. In the paper, the recent development of coherent beam transmission and control technique for laser transmission application in atmosphere is reviewed. Then, the research progress of fiber-based coherent beam combining in multi-aperture receiving space optical communication system is reported in detail, including the coherent combining based on 3-dB fiber coupler and the coherent polarization combining based on fiber polarization beam combiner, which might have great potential in space optical communication system.

Keywords: space optical communications; multi-aperture receiving antenna; coherent beam combining; target in the loop

Citation: Geng C, Yang Y, Li F, et al. Research progress of fiber laser coherent combining[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170692

收稿日期: 2017-12-15; 收到修改稿日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61675205); 中国科学院西部青年学者项目

作者简介: 耿超(1984-), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事光纤激光相控阵技术的研究。E-mail: blast_4006@126.com

通信作者: 李新阳(1971-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学技术的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

1 引言

近年来，以光纤激光阵列和相干合成为基本特征的空间激光组束技术被广泛地研究，并有望在激光大气传输等领域获得实际应用^[1-3]。

该项技术以获取高亮度、高光束质量的激光束为目标，研制难度大，技术门槛高。事实上，在空间激光通信领域同样面临着大气湍流的影响，而空间激光组束技术中的相控阵解决方案也应适用于空间激光通信应用；并且，空间激光通信采用的是低功率激光，更有利于相控阵关键单元技术的验证。

空间激光通信是指利用激光束作为载波在空间进行语音、数据、图像信息双向传送的一种技术。随着空间及传感技术的发展，卫星及各种航天器所需的信息传输量呈指数增长，目前卫星通信所采用的微波通信为主的通信手段已难以满足通信容量需求。空间激光通信技术应运而生，与微波通信相比，具有传输容量大、抗电磁干扰能力强、安全保密性高等优势^[4-5]。空间激光通信体制主要分为直接探测(intensity modulation/direct detection IM/DD)和相干探测。与IM/DD方式相比，相干探测灵敏度更高、调制方式更灵活、信道选择性更高^[6]。目前，基于光纤终端的相干光通信^[7-8]引起了研究者的重视，其特点是在发射端和接收端都采用光纤连接的方式，所有对光信号的处理均在光纤中进行。其主要优势有：可减少不必要的电光、光电转换，降低成本；光学系统较为简单，光纤出射的光束一般不需要整形，简化了光学系统，减小了体积，易于安装；易于升级及维护，当用户的带宽增加时，只需要对放置在室内的系统进行升级即可，免去了复杂繁琐的对准过程；能够很好地与光纤通信网络

结合，利用现有的较为成熟的光纤通信系统中的器件和模块。

基于光纤终端的相干光通信系统中，如何实现空间信号光到光纤的高效耦合，获得高接收信噪比十分重要。然而，由于大气湍流的影响，空间光到光纤的耦合困难^[9]，且随着湍流增强、接收望远镜口径增大，耦合效率大大降低，极大程度地限制了通信系统的性能。为了克服这一影响，较为有效的方法之一是利用自适应光学系统抑制湍流影响^[10-11]。但是，自适应光学系统技术复杂，造价高，且该方案仅适用于整体望远镜接收，有一定的局限性。实际上，在基于光纤终端的相干光通信系统中可以利用多孔径接收技术^[8, 12]缓解湍流影响。多孔径接收方案利用多个小口径望远镜接收信号光束，以增大总接收口径，相对于大口径+自适应光学技术方案而言，望远镜性能要求、造价低，维护成本低，系统升级容易，通信中断概率低，整体失效风险小。

多孔径接收方案中，如何高效地将多路接收信号合为一至关重要。目前国内外多采用数字信号合成的方法来实现接收信号的合成^[13-14]。如图 1(a)所示，基于数字信号合成的多孔径接收天线中，首先利用多个探测器将各个支路的光信号分别转换为电信号，再对多路电信号进行数字相干合成产生，最终对合成的电信号进行进一步解调得到通信信号^[15]。在此接收天线中，用多个探测器来接收光信号，势必会使每个探测器上的入射光功率减小，同时，每个探测器都会引入探测器噪声，使每个探测器输出信号的信噪比都比较低。实际上，在多孔径接收方案中，可以采用光束相干合成^[16-17]的方法直接对接收的多路信号光束进行合成，再对此合成光束进行相干探测及解调，其结构

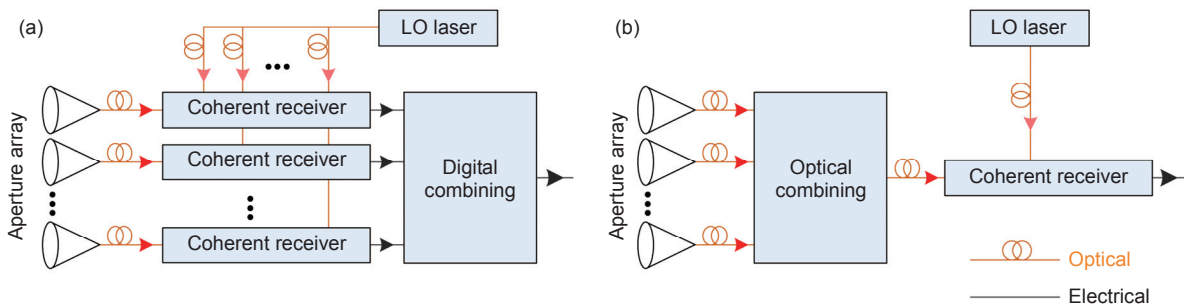


图 1 多孔径接收方案原理图。(a) 基于数字信号合成；(b) 基于光束相干合成

Fig. 1 Multi-aperture receiver. (a) Digital combining architecture; (b) Optical combining architecture. LO: local oscillator

示意图如图 1(b)所示。与基于数字信号合成的多孔径接收天线相比,基于光束相干合成的多孔径接收天线只需要一个相干探测器,探测器上的入射光功率较大,信噪比较高。

基于光束相干合成的多孔径接收天线中的一项关键技术是如何利用光纤器件实现高效的相干合成。本论文中,简要介绍了中国科学院自适应光学重点实验室面向激光大气传输应用的激光组束传输与湍流校正技术研究近况,以区别于后文所介绍的光纤相干合成;着重介绍关于多孔径接收空间光通信系统中的光纤相干合成研究进展,主要包括基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成和基于光纤偏振合束器的相干偏振合成这两种方法的理论分析及实验验证结果。

2 基于目标在回路的激光组束传输与湍流校正

近年来,中国科学院自适应光学重点实验室以光纤自适应操控和激光相控阵为核心,以自主研发的新型光纤像差校正器(如自适应光纤准直器(adaptive fiber-optics collimator, AFOC)和压电光纤相位补偿器(piezoelectric ceramics-phase compensator, PZT-PC))为基本单元,开展了光纤激光组束传输与湍流校正技术研究。通过主动操控阵列激光的倾斜和活塞相位,与湍流像差、系统固有像差等实现波前共轭,从而在目标处实现激光相干合成;采用以随机并行梯度下降(stochastic parallel gradient descent, SPGD)算法为代表的优化迭代算法,实现基于无波前传感的闭环控制。

当前,可见报道的基于目标在回路(target in loop, TIL)的光纤激光组束传输与湍流效应校正,其目标多为合作目标(如猫眼结构、角锥阵列),反射率很高,目标回光接收能量很强,这与实际非合作目标情况有很大不符。为此,搭建了基于 TIL 的 7 单元 AFOC 阵列激光传输 200 m 的湍流校正实验平台,目标为玻璃微珠片,其散射特性与实际目标更为接近,同时采用制冷型光电探测器接收目标处反射的微弱回光,以此为性能指标,对 AFOC 阵列的活塞相位和倾斜相位进行迭代以实现目标处的相干合成。

实验方案框图如图 2 所示,采用主控振荡器的功率放大器(master oscillator power-amplifier, MOPA)结构,11 mW 的 1064 nm 种子光源,经预放大至 100 mW 后分成 7 束,各子光束经 PZT-PC 传输后被放大至 1 W。经各 AFOC 准直后的 7 路光束以共形聚焦的方式经 200 m 传输后重叠在玻璃微珠片上,其中部分合成光束透过高反镜被光斑分析仪检测到。玻璃微珠的反射回光沿原光路返回至接收望远镜,经光电探测器转换成电压信号后作为硬件处理板 SPGD 迭代算法的性能指标,对 PZT-PC 和 AFOC 上的施加电压进行迭代运算。锁相控制的迭代速率为 12 kHz,倾斜控制的迭代速率为 1 kHz。图 3 为 7 单元阵列激光传输控制实验中激光发射端和回光接收端的实物照片,图 4 为实验中所采用的光纤像差校正器实物照片。

图 5 为控制开闭环 30 s 时间内,光斑分析仪采集到的长曝光图像。可以看出,控制开环时,图像模糊,能量分散,闭环后,出现了对比度非常明显的干涉条

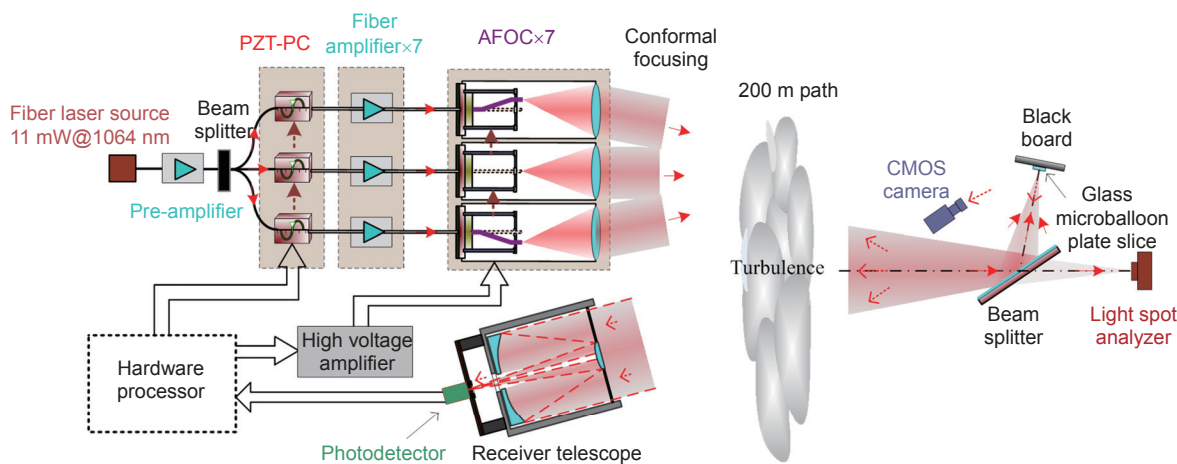


图 2 7 单元光纤激光阵列 200 m 传输及相干合成实验框图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup used for coherent beam combining of 7-channel fiber laser array over 200 m atmospheric path

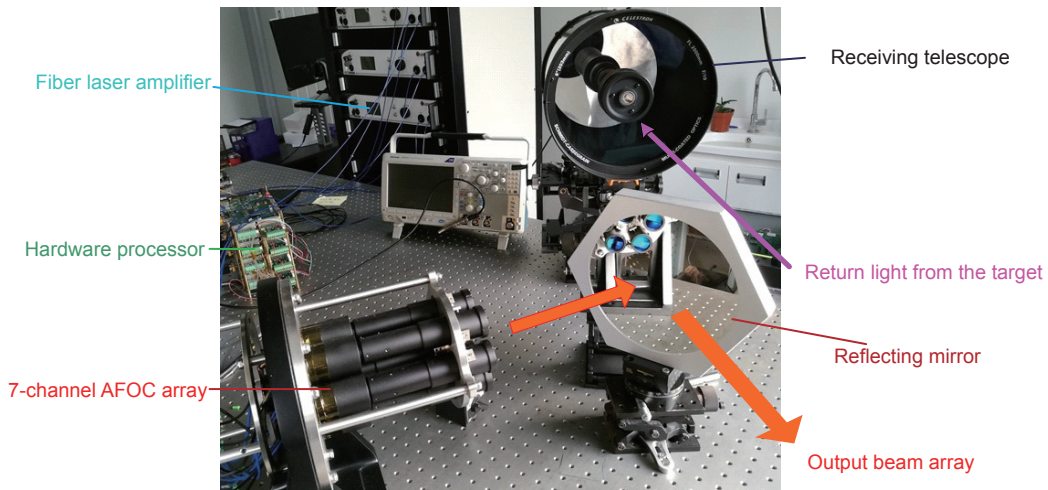


图 3 7 单元阵列激光传输控制实验中激光发射端和回光接收端的实物照片

Fig. 3 The real photo of laser beam transmitter and receiver in the 7-channel laser-array transmission and control experiment

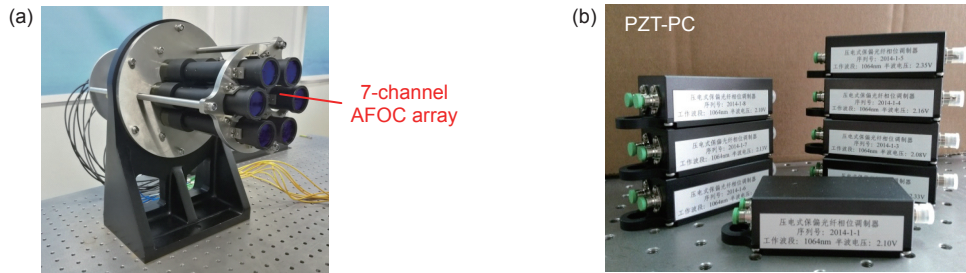


图 4 光纤像差校正器实物照片

Fig. 4 The real photos of the fiber-based aberration correctors

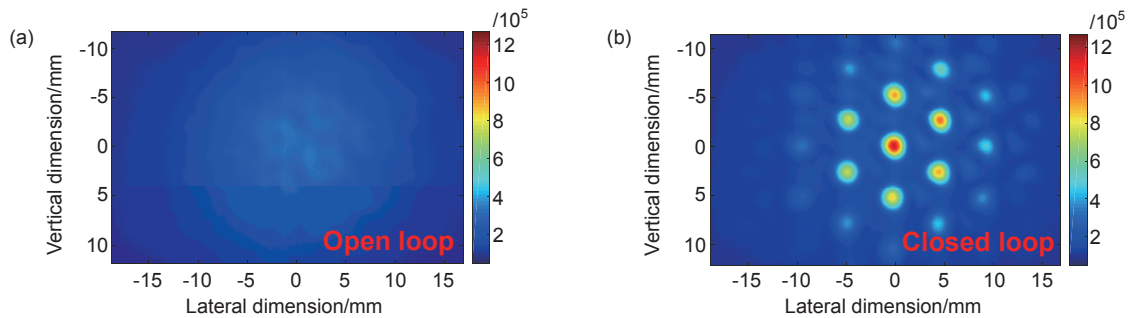


图 5 光斑分析仪采集到的开闭环条件下 30 s 长曝光图

Fig. 5 Long-exposure intensity distribution of 30 s acquired by the light spot analyzer during open and closed loop

纹，图像与理想相干合成图像十分相近。实验结果表明，采用 TIL 方法结合优化控制算法，即使是在目标回光十分微弱的情况下，也能够很好地抑制湍流效应，获得很好的相干合成效果。

3 基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成

3.1 原理

目前，用于全光纤相干合成方法的合成器件主要

有两种：光纤合束器^[18]和光纤耦合器^[19]。光纤合束器可处理千瓦量级的光能量，但是输出光纤为多模光纤，光束质量难以保证，不适用于相干光通信系统。光纤耦合器输入输出均可为保偏光纤，然而目前基于光纤耦合器的相干合成均采用被动锁相的方式，无法应用于多孔径接收天线中的相干合成模块。本章节介绍了本课题组提出的基于 3 dB 光纤耦合器的全光纤主动式相干合成方法，该方法利用主动锁相方式对输入光

束之间的相位进行补偿,从而实现多路光束之间的高效相干合成。

3 dB 光纤耦合器是分光比为 50:50 的 2×2 光纤耦合器。理论上,两束激光分别从两输入端口输入时,光强从两输出端口输出,且其输出光强之间的分配与输入光束的相位差和光强比紧密相关。当两束输入光束光强分别为 I_{in1} 、 I_{in2} , 相位分别为 φ_1 、 φ_2 时,两束输出光束的光强值分别为^[20]

$$I_{out1} = \frac{1}{2} \left[I_{in1} + I_{in2} - 2\sqrt{I_{in1}I_{in2}} \cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (1)$$

$$I_{out2} = \frac{1}{2} \left[I_{in1} + I_{in2} + 2\sqrt{I_{in1}I_{in2}} \cos\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (2)$$

其中: $\Delta\varphi$ 表示两输入光束之间的相位差, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。

由式(1)和式(2)可知两束输出光束的光强相互互补。特别地,当输入光束相位差 $\Delta\varphi = \pi/2 + k \cdot 2\pi$ (k 为整数)且输入光束光强相等时,所有光强均从输出端口 1 输出。基于此特性,3 dB 光纤耦合器可用于将多束光纤激光合为一束,且其合成效率与输入光束之间的相位差和光强比有关。

3.2 实验验证

根据上述原理及相关分析,开展了基于 3 dB 光纤耦合器的两路激光相干合成实验研究,实验方案如图 6 所示。实验采用全保偏光路。激光源产生的线偏振光经光纤分束器分为两路,第一路光经光纤可调衰减器(variable optical attenuator, VOA)对其光强进行调节后注入到 3 dB 光纤耦合器的输入端口 1,第二路经光纤相位补偿器(phase compensation, PC)传输后注入到 3 dB 光纤耦合器的输入端口 2。两束光在 3 dB 光纤耦

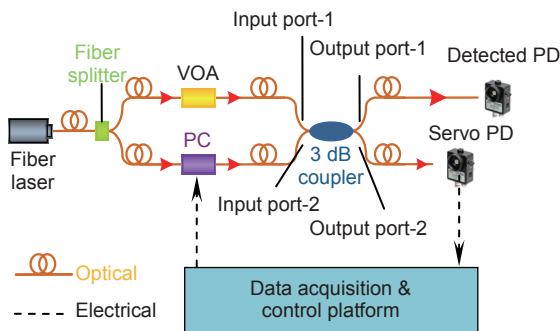


图 6 基于 3 dB 光纤耦合器的两路激光相干合成实验方案图

Fig. 6 Experimental setup of CBC based on 3 dB coupler with two laser beams

合器处会合并相互耦合,然后分别从输出端口 1 和输出端口 2 输出。此处定义输出端口 1 为光强合成端,输出端口 2 为光强泄露端。两个光电探测器 (photodetector, PD) 分别位于光强合成端和光强泄露末端,用于探测输出的光能量。实验中将 PD 探测到的光强泄露端的光强信号作为性能指标输送至控制器,控制器采用 SPGD 算法^[21-22]产生控制信号,驱动 PC 对两束输入光之间的相位差进行补偿。控制系统闭环工作,使得性能指标最小,则此时光强合成端输出的光能量将达到最大。

下文中所提及的实验采用激光器为丹麦 NKT 公司生产,型号 Koheras Adjustik, 波长 1064 nm, 线宽 20 kHz, 最大输出功率 11 mW。3 dB 光纤耦合器为光库公司生产,不考虑接头损耗时,其在 1064 nm 波段的附加损耗不高于 0.6 dB。PC 为本课题组自主研发^[23], 其半波电压约为 1.3 V, 一阶谐振频率约为 32 kHz。PD 为硅靶面且带有内置放大功能的光电探测器(美国 Thorlabs 公司),其工作波长为 350 nm 至 1100 nm, 响应带宽为 12.5 MHz。

该实验中利用相干合成效率评价合成效果,其定义为

$$\eta_{CBC-2} = \frac{I_1}{I_1 + I_2}, \quad (3)$$

其中: I_1 、 I_2 分别为 PD 探测到的光强合成端和光强泄露端的输出光强值。

首先将两束光束的光强值调节为一致,进行了动态相位扰动的校正实验。SPGD 迭代速率约为 10 kHz, 开闭环各持续 6 s。实验结果如图 7 所示,开环时,由于输入光束之间相位差的影响,合成效果较差,相干

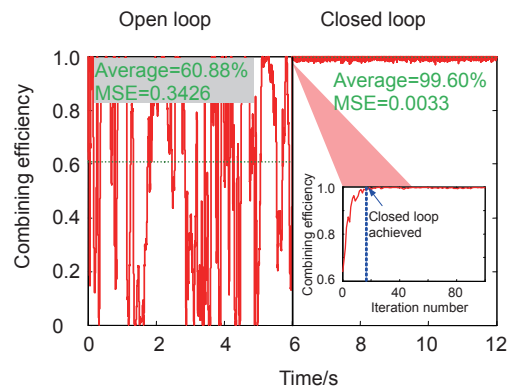


图 7 基于 3 dB 光纤耦合器的两单元相干合成实验结果图

Fig. 7 The experimental results of CBC based on 3 dB coupler with two laser beams

合成效率的均值为 60.88% ,抖动均方根误差(root mean square error ,MSE)值为 0.3426。闭环时,利用 PC 对输入光束之间的相位差进行实时补偿,经过大约 18 次迭代(约 1.8 ms),相干合成效率增大至 99.60% ,MSE 值降低至 0.0033。实验结果表明,基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成方法可实现高效的相干合成,验证了该方法的可行性。

其次,通过调节 VOA 改变第一路输入光束的光强值逐步增大输入光束之间的光强不匹配,验证输入光束光强比对合成效果的影响,实验结果如图 8 所示。图中蓝线为理论值曲线,利用式(1)和式(2)计算所得。红线为实验测得的关系曲线,其中每一个点均由十次实验结果取平均。两条曲线的规律一致,基本吻合,验证了基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成方法中光强失配会造成合成效果下降的结论。

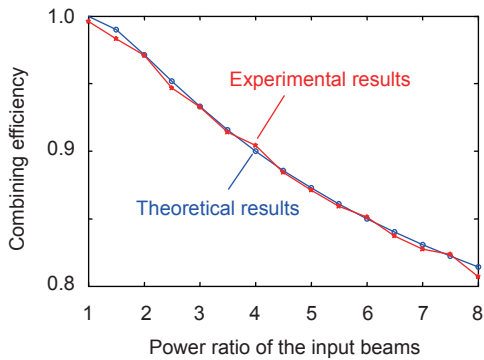


图 8 相干合成效率与输入光强比之间的关系曲线
Fig. 8 Curves of combining efficiency as the function of the power ratio of the input beams

3.3 级联结构

基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成方法具有可拓展性,可以利用级联结构实现多路光束的相干合成。

根据 3 dB 光纤耦合器两输出端口输出的光能量相互互补的特性,提出两种级联结构,分别为一体式级联结构和分布式级联结构^[17]。一体式级联结构的特点是以合成结构中最后一级 3 dB 光纤耦合器的光强合成端输出的光能量作为性能指标,驱动多个 PC 实现输入光束之间的相位补偿。在实际应用中,合成光束需再次利用分束器分为两束,其中一小部分光强作为性能指标完成闭环控制,另一部分输出作为通信信号光进行后续解调。分布式级联结构的特点是多个性能指标与 PC 一一对应,闭环时收敛速度较快,且合成光束无需二次分光,可直接用于后续解调。

为了验证基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成方法的可拓展性及两种级联结构的可行性,开展了四单元相干合成实验。实验方案如图 9 所示。实验采用全保偏光路。激光源产生的线偏振光经光纤分束器分为四路,分别利用 VOA 对四路输入光束的光强进行调节,使四路输入光束的光强一致。实验中利用三个级联的 3 dB 光纤耦合器对输入光束进行合成。如图 9(a)所示,一体式级联结构中,将置于最后一级 3 dB 光纤耦合器的光强合成端末端的 PD 探测到的光强值(P_4)作为性能指标输送至控制器,控制器采用 SPGD 优化控制算法产生控制信号,驱动 PC 对输入光之间的相位差进行补偿。控制系统闭环工作,使得性能指标最大。为了评价四单元相干合成的效果,三个额外的 PD 被放置于三个 3 dB 光纤耦合器的光强泄露末端,探测其输出光强值 P_1 、 P_2 、 P_3 。如图 9(b)所示,分布式级联结构中,三个 PD 分别置于三个 3 dB 光纤耦合器的光强泄露末端,并将其探测到的光强值 P_1 、 P_2 、 P_3 分别作为性能指标输送至控制器,控制器采用 SPGD 优化控制算法产生控制信号,每一个性能指标分别驱动

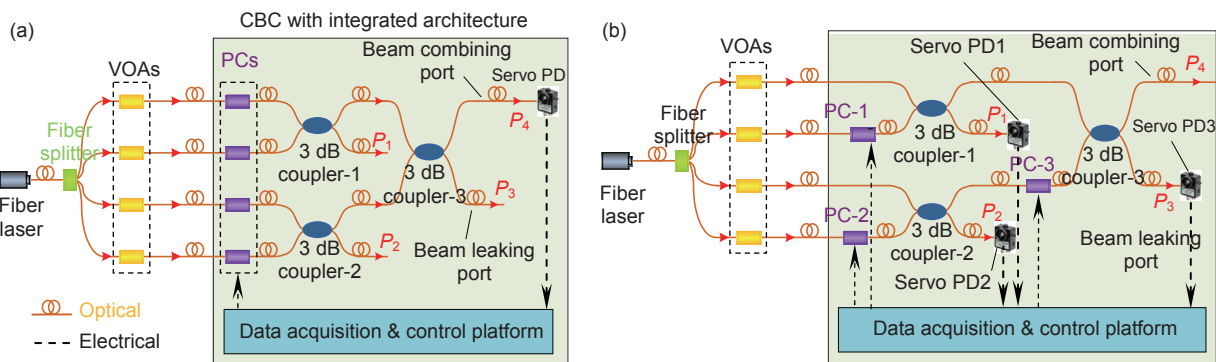


图 9 基于 3 dB 光纤耦合器的四路相干合成实验方案图。(a) 一体式级联结构; (b) 分布式级联结构
Fig. 9 Experimental setup of the CBC of four laser beams with (a) integrated architecture and (b) distributed architecture

对应的 PC 对输入光之间的相位差进行补偿。控制系统闭环工作,使得性能指标最小。同样地,为了评价四单元相干合成的效果,一个额外的 PD 被放置于最后一级 3 dB 光纤耦合器的光强合成端末端,探测其输出光强值 P_4 。

该实验中利用相干合成效率评价合成效果,其定义为

$$\eta_{\text{CBC-4}} = \frac{P_4}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4} \quad (4)$$

基于两种级联结构,分别完成了四单元相干合成实验,SPGD 迭代速率约为 5 kHz,开闭环各持续 12 s。采用一体式级联结构时,实验结果如图 10(a)所示,开环时,相干合成效率的均值为 22.04%,MSE 值为 0.2028。闭环时,经过大约 27 次迭代(约 5.4 ms),相干合成效率增大至 97.83%,MSE 值降低至 0.0017。采用分布式级联结构时,实验结果如图 10(b)所示,开环时,相干合成效率的均值为 27.30%,MSE 值为 0.1790。

闭环时,经过大约 14 次迭代(约 2.8 ms),相干合成效率增大至 96.48%,MSE 值降低至 0.0088。实验结果验证了基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成方法的可拓展性,两种级联结构均能实现多路光束的高效相干合成,且相比于一体式级联结构,分布式级联结构具有更高的收敛速率。

4 基于光纤偏振合束器的相干偏振合成

4.1 相位控制和偏振控制

光纤偏振合束器(polarization beam combiner, PBC)^[16]是基于光纤器件的相干偏振合成的主要器件,可将两束偏振态互相垂直的线偏振光耦合入一根光纤中,其原理图如图 11 所示。方解石棱镜的一侧具有两根保偏光纤分支,而另一侧为一根保偏光纤。端口 1 和端口 2 的光纤慢轴方向分别沿 Y 轴和 X 轴,端口 3 的光纤慢轴方向沿 1 端口的光纤慢轴方向顺时针旋转

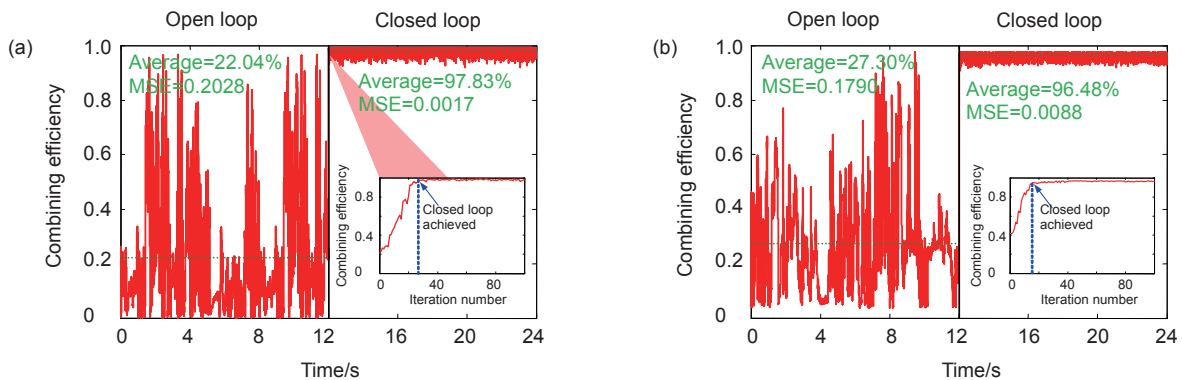


图 10 基于 3 dB 光纤耦合器的四路相干合成实验结果图。(a) 一体式级联结构; (b) 分布式级联结构
Fig. 10 Experimental results of the CBC of four laser beams with (a) integrated architecture and (b) distributed architecture

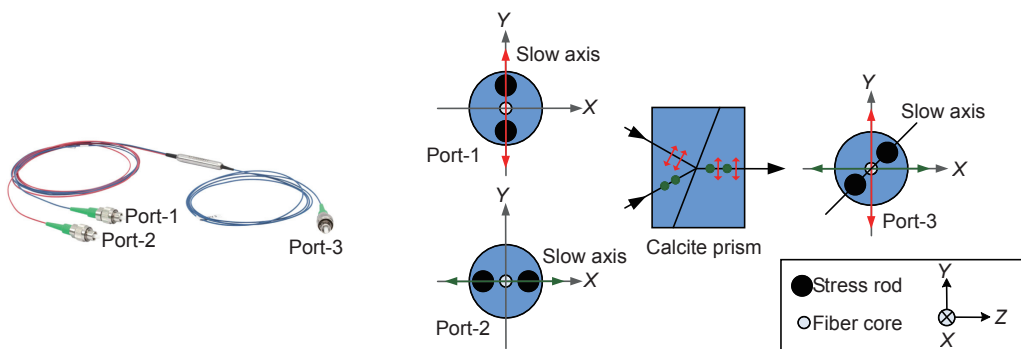


图 11 光纤偏振合束器的原理图
Fig. 11 Structural schematic diagram of the fiber-based PBC

45°。

基于光纤偏振合束器的相干偏振合成方法基本原理如图 12 所示。光纤偏振合束器可将两束偏振态互相垂直的线偏振光耦合入一根光纤中。理论上,当两输入光束之间相位差随机变化时,合成光束是非偏振光(如图 12(a)所示),无法进行下一步相干偏振合成或用于相干光通信系统的下一步解调。

本课题组提出了两种控制方法使合成光束为线偏振光。

如图 12(b)所示,基于相位控制的相干偏振合成方法^[16]利用 PC 补偿输入光束之间的相位差,当相位差锁定($\Delta\varphi=k\pi$, k 为整数)时,合成光束为线偏振光,且其偏振方向与输入光束光强比有关。由于光纤偏振合束器中端口 3 的光纤慢轴方向沿端口 1 的光纤慢轴方向顺时针旋转 45°,在相位锁定的条件下,仅当输入光束光强一致时,合成线偏振光的偏振方向与光纤慢轴方向一致;否则,其偏振方向将偏离光纤慢轴方向,合成效率随之降低。相位锁定时,合成效率与输入光束光强比之间的关系为

$$\eta_{PL} = \frac{1}{2} \times \frac{(1 + \sqrt{I_R})^2}{1 + I_R}, \quad (5)$$

其中 I_R 为输入光束之间的光强比。

如图 12(c)所示,基于偏振控制的相干偏振合成方法^[24]利用动态偏振控制器(dynamic polarization controller, DPC)直接对合成光束的偏振态进行转换。由于偏振控制器可以实现任意偏振态的转换,偏振控制闭环时,无论输入光束光强比、相位差为多少,合成光束均可转换为沿光纤慢轴方向的线偏振光,实现高效相干偏振合成。

基于上述分析,开展了两单元相干偏振合成实验,实验方案如图 13 所示。激光源产生的线偏振光经光纤分束器分为两路,且其中一路利用 VOA 对其光强进行衰减,以调整输入光束光强比。两输入光束利用基于光纤器件的相干偏振合成模块进行合成,合成后的光束经由光纤偏振分束器进行偏振分解。光纤偏振分束器的作用是检测合成光的偏振态并对合成效率进行评估,其结构与光纤偏振合束器类似,唯一的区别在于光纤偏振合束器中端口 3' 的光纤慢轴方向和端口 1'

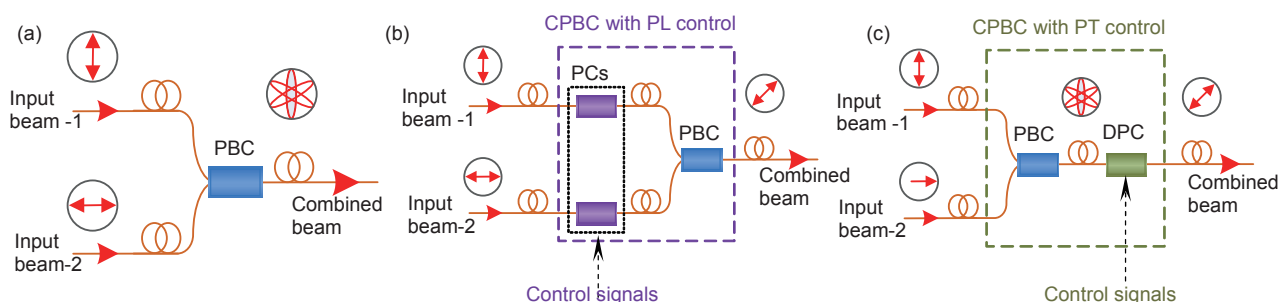


图 12 基于光纤偏振合束器的相干偏振合成方法基本原理图。(a) 不加控制; (b) 相位控制; (c) 偏振控制

Fig. 12 Basic principle of the fiber-based CPBC. (a) Without control; (b) PL controlled; (c) PT controlled

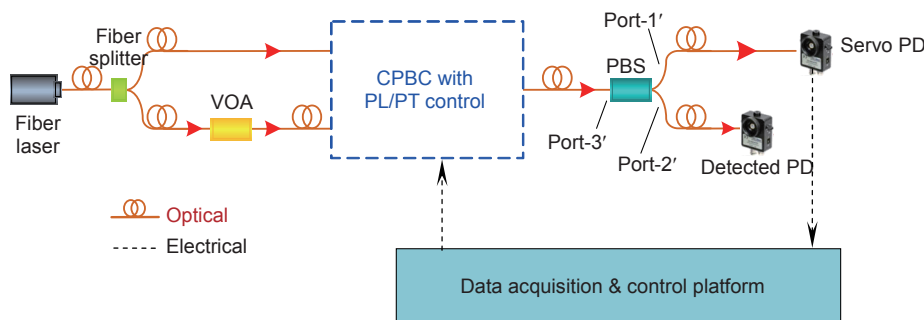


图 13 两单元相干偏振合成实验方案图

Fig. 13 Experimental setup of the fiber-based CPBC with two input beams

的光纤慢轴方向一致。两个 PD 分别置于光纤偏振合束器的端口 1'和端口 2'末端,用于探测其输出的线偏振光能量。实验中以端口 1'输出的光强值(P'_1)作为性能指标,利用 SPGD 优化控制算法驱动控制器件,使性能指标最大化,从而实现高效的相干偏振合成。端口 2'输出的光强值(P'_2)为对比值,用于评估合成效果。该实验中利用相干偏振合成效率(coherent polarization beam combining efficiency, CPCE)评价合成效果,其定义为

$$\eta = \frac{P'_1}{P'_1 + P'_2} \quad (6)$$

本文所提及的实验中所用的光纤偏振合束器和光纤偏振分束器均为光库公司生产,不考虑接头损耗时,其在 1064 nm 波段的附加损耗不高于 0.8 dB。DPC 是基于光纤挤压原理的相位延迟型偏振控制器,不考虑接头损耗时其插入损耗不高于 0.05 dB。

第一步,将两路输入光束的光强调为一致,对两种控制方法的可行性进行了验证。

首先,对相位控制的方法进行验证。实验中采用基于相位控制的相干偏振合成模块,利用 SPGD 优化控制算法产生两路控制信号,驱动 PC 对输入光束之间的相位差进行补偿,控制系统闭环工作,使得性能指标最大。SPGD 迭代速率为 10 kHz,开闭环各持续 6 s,实验结果如图 14(a)所示。开环时,相干偏振合成效率的均值为 74.18%,MSE 值为 0.3041。闭环时,经过大约 25 次迭代(约 2.5 ms),相干偏振合成效率增大至 99.31%,MSE 值降低至 0.0017。

其次,对偏振控制的方法进行验证。实验中采用基于偏振控制的相干偏振合成模块,利用 SPGD 优化控制算法产生四路控制信号,驱动 DPC 对合成光束的偏振态进行转换,控制系统闭环工作,使得性能指标

最大。SPGD 迭代速率为 6 kHz,开闭环各持续 10 s,实验结果如图 14 (b)所示。开环时,相干偏振合成效率的均值为 62.03%,MSE 值为 0.0572。闭环时,经过大约 20 次迭代(约 3.3 ms),相干偏振合成效率增大至 99.61%,MSE 值降低至 0.0028。

第二步,通过调节 VOA 改变第一路输入光束的光强值逐步增大输入光束之间的光强不匹配,验证输入光束光强比对两种控制方法合成效果的影响,实验结果如图 15 所示。图中蓝线为基于相位控制的相干偏振合成方案的理论结果,利用式(5)计算所得。红线和绿线分别为基于相位控制和基于偏振控制的相干偏振合成方案的实验结果,其中每一个点均由十次实验结果取平均。一方面,基于相位控制的相干偏振合成方案的实验结果和理论结果一致,验证了基于相位控制的相干偏振合成方法中光强失配会造成合成效果下降的结论。另一方面,基于偏振控制的相干偏振合成方案中,无论输入光束光强比值为多少,相干偏振合成效率几乎不变,该结果表明基于偏振控制的相干偏振合成方案可实现任意输入光强比的两束输入光束的高效相干合成。

4.2 相位-偏振混合控制

上述两种相干偏振合成方法均存在不足之处。在基于相位控制的相干偏振合成方法中,相干偏振合成效率随输入光束光强的不匹配而降低。在基于偏振控制的相干偏振合成方法中,随着输入光强数的增加,所需的控制信号数快速增加,系统复杂度随之增大,收敛速度随之变慢。

为了解决上述两种方法的不足,本课题组在其基础上提出基于相位-偏振混合控制的相干偏振合成方法,其原理示意图如图 16 所示。当输入光束光强一致

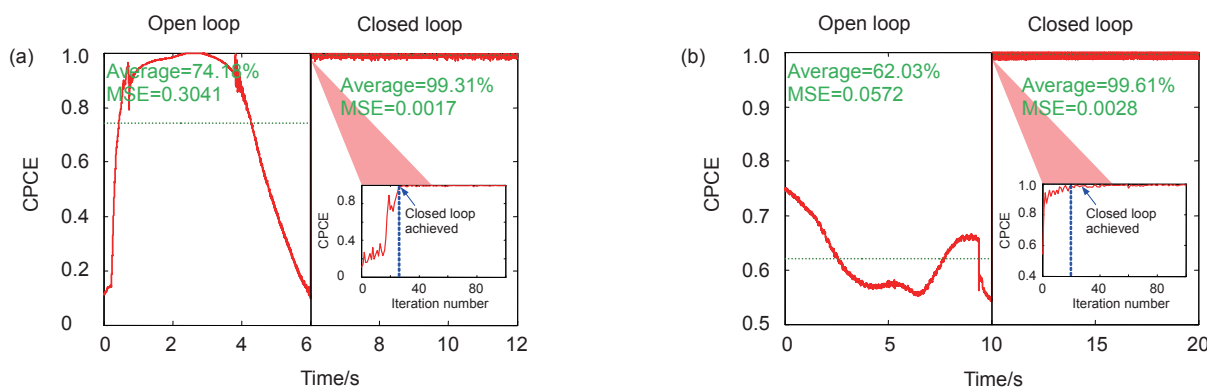


图 14 两单元相干偏振合成实验结果图。(a) 基于相位控制; (b) 基于偏振控制

Fig. 14 Experimental results of the fiber-based CPBC. (a) PL control; (b) PT control

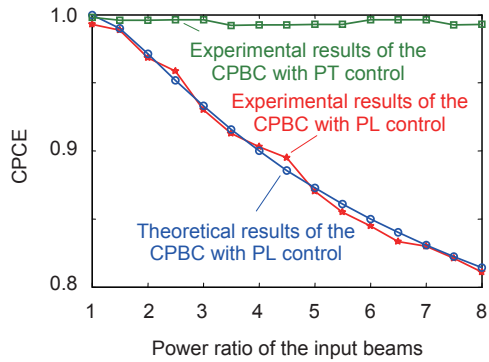


图 15 相干偏振合成效率与输入光强比之间的关系曲线

Fig. 15 Curves of CPCE as the function of the power ratio of the input beams

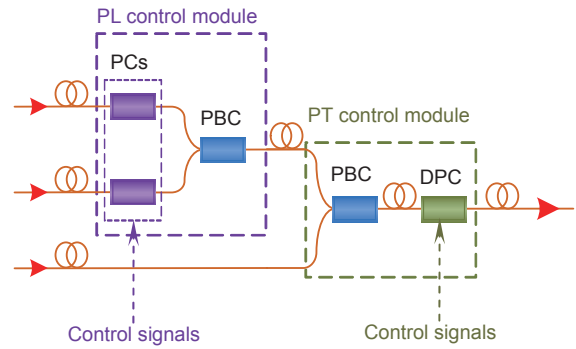


图 16 基于相位-偏振混合控制的相干偏振合成方法原理示意图

Fig. 16 Basic principle of the fiber-based CPBC with cascaded PL and PT controls

时，利用相位控制模块实现合成，当输入光束光强不一致时，利用偏振控制模块实现合成。该方法综合了相位控制和偏振控制方法的优点。与基于相位控制的相干偏振合成方法相比，可补偿系统不对称引入的额外光强不匹配，获得更优的合成效果；与基于偏振控制的相干偏振合成方法相比，需要更少的控制信号，收敛速度更快。因此，该方法在子孔径数为非 2^M 的多孔径接收天线中具有很大的应用潜力。

基于相位-偏振混合控制的三路相干偏振合成实验方案图如图 17 所示。激光源产生的线偏振光经光纤分束器分为三路，分别利用 VOA 对三路输入光束的光强进行调节。首先利用相位控制模块将两束光强一致的输入光束合为一束，产生合成子光束。当相位控制闭环时，由于输入光束的相位锁定、光强一致，合

成子光束为偏振方向沿光纤慢轴的线偏振光，可进行下一级合成。其次利用偏振控制模块对合成子光束与第三束输入光束进行合成。合成光束输入至光纤检偏器，输出线偏振光。实验中利用 PD 探测输出线偏振光的光强值，作为性能指标输送至控制器，控制器采用 SPGD 优化控制算法产生六路控制信号，分别驱动 PC 和 DPC 进行相位控制和偏振控制。控制系统闭环工作，使性能指标最大化，从而实现高效的相干偏振合成。

前文提到的两路相干偏振合成实验中，利用式(6)中定义的相干偏振合成效率来评价合成效果。然而，当输入光束多于两路时，利用式(6)中定义的相干偏振合成效率来评价合成效果将不再准确。在考虑所有器件损耗的情况下，首先进行了链路预算。

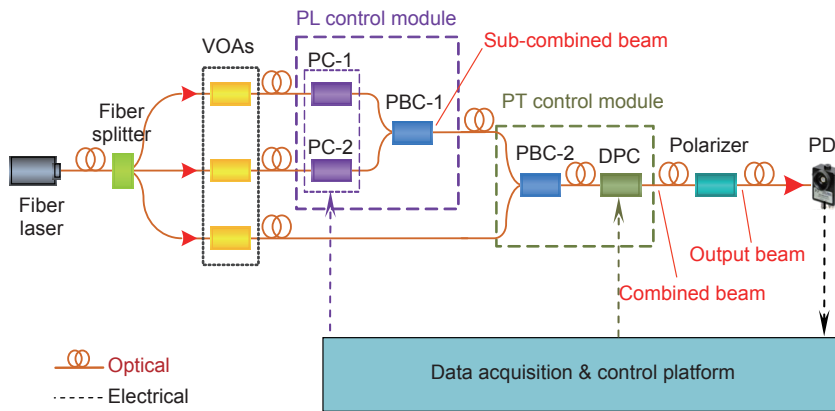


图 17 基于相位-偏振混合控制的三单元相干偏振合成实验方案图

Fig. 17 Basic experimental setup of the fiber-based CPBC of three laser beams with cascaded PL and PT controls

假设三路输入光强值分别为 P_{in1} , P_{in2} 和 P_{in3} , 那么合成子光束的光强为

$$P_{sub} = (P_{in1} \times 10^{-IL_{PC-1}/10} + P_{in2} \times 10^{-IL_{PC-2}/10}) \times 10^{-EL_{PBC-1}/10} \times \eta_{PL}, \quad (7)$$

其中: IL_{PC-1} 是 PC-1 的插入损耗, IL_{PC-2} 是 PC-2 的插入损耗, EL_{PBC-1} 是 PBC-1 的附加损耗, η_{PL} 可由式(5)计算, 此时:

$$I_R = \frac{P_{in2}}{P_{in1}} \times 10^{(IL_{PC-1} - IL_{PC-2})/10}. \quad (8)$$

合成光束的光强值为

$$P_{com} = (P_{sub} + P_{in3}) \times 10^{-EL_{PBC-2}/10 - IL_{DPC}/10}, \quad (9)$$

其中: IL_{DPC} 是 DPC 的插入损耗, EL_{PBC-2} 是 PBC-2 的附加损耗。

因此, 输出光束的光强值为

$$P_{out} = P_{com} \times 10^{-IL_P/10}, \quad (10)$$

其中 IL_P 是检偏器的插入损耗。

实验中, 三路输入光束光强值分别为 0.55 mW, 0.55 mW 和 0.2 mW。实验装置中各器件的损耗分别为: $IL_{PC-1}=0.45$ dB, $IL_{PC-2}=0.45$ dB, $EL_{PBC-1}=0.93$ dB, $EL_{PBC-2}=0.81$ dB, $IL_{DPC}=0.55$ dB, $IL_P=0.63$ dB。利用式(7)~式(10), 可计算出理论上合成后的输出光束的光强值应为 0.63 mW。值得注意的是, 在实验中利用光纤熔接技术减小连接头损耗可进一步提高输出光强。

为了评价三路相干偏振合成的合成效果, 利用公式(11)中定义的合成效率作为评价指标:

$$\eta' = \frac{P_{det}}{P_{out}} \times 100\%, \quad (11)$$

其中 P_{det} 是实验中 PD 探测到的输出光强值。

实验结果如图 18 所示, SPGD 迭代速率为 6 kHz, 开闭环各持续 10 s。开环时, 合成效率的均值为

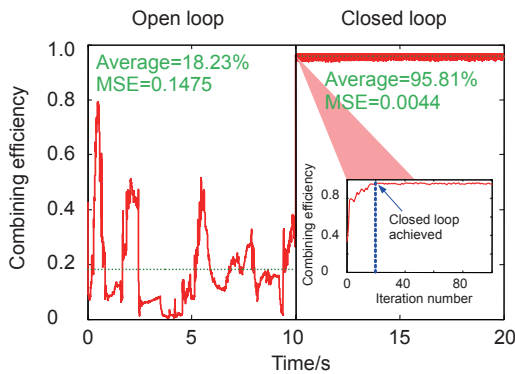


图 18 基于相位-偏振混合控制的三单元相干偏振合成实验结果图

Fig. 18 Experimental results of the fiber-based CPBC of three laser beams

18.23%, MSE 值为 0.1475。闭环时, 经过大约 20 次迭代(约 3.3 ms), 合成效率增大至 95.81%, MSE 值降低至 0.0044。

假设实验中第二级合成无法补偿光束不匹配的影响, 一小部分光强将会被损耗, 此时理论上输出光束光强值应为

$$P'_{out} = (P_{sub} + P_{in3}) \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{1}{1 + P_{in3}/P_{sub}} \times \left(1 + \sqrt{\frac{P_{in3}}{P_{sub}}} \right)^2 \right] \times 10^{-EL_{PBC-2}/10 - IL_{DPC}/10} \times 10^{-IL_P/10}. \quad (12)$$

计算可得, 此时理论输出光强值 P'_{out} 为 0.57 mW。

实验结果显示, 系统控制闭环时, 输出光强值的平均值为 0.60 mW, 大于上述理论输出光强值 0.57 mW。因此, 可以认为该实验验证了基于相位-偏振混合控制的相干偏振合成方案的可行性及其相比于基于相位控制的相干偏振合成方案具有更高的合成效率的结论。另一方面, 如果利用偏振控制实现三路相干偏振合成, 系统中需要两个偏振控制器即八路控制信号, 显然其达到闭环所需的收敛时间将大于 3.3 ms(基于偏振控制的两路相干偏振合成实验中的收敛时间)。因此, 该实验同样证明了基于相位-偏振混合控制的相干偏振合成方案相比于基于偏振控制的相干偏振合成方法而言具有更高的收敛速度。

5 结论

本论文简要介绍了中国科学院自适应光学重点实验室面向激光大气传输应用的激光组束传输与湍流校正技术研究近况, 采用自主研发的新型光纤像差校正器, 实现了 7 单元激光组束目标在回路传输控制和相干合成, 证明了相控阵抑制湍流效应的有效性; 重点介绍了关于多孔径接收空间光通信系统中的光纤相干合成研究进展, 主要包括基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成和基于光纤偏振合束器的相干偏振合成两种方法。基于 3 dB 光纤耦合器的相干合成方法可补偿输入光束之间的相位差, 实现高效的相干合成, 而输入光束之间的光强不匹配会降低合成效果。在此基础上, 提出了两种级联结构, 一体式级联结构和分布式级联结构, 并搭建了四单元相干合成实验平台, 分别对两种级联结构进行了实验验证。针对基于光纤偏振合束器的相干偏振合成方法, 首先提出了相位控制和偏振控制两种, 分别对其进行了理论分析和实验验证。研究结果表明, 这两种控制方法均能实现相干偏振合成,

但同时也有不足之处, 基于相位控制的相干偏振合成方法无法补偿输入光束光强不匹配的影响, 而基于偏振控制的相干偏振合成方法随着输入路数的增加, 所需的控制路数急剧增大, 收敛速度变慢。在此基础上, 结合两种控制方法的特点, 提出了基于相位-偏振混合控制的相干偏振合成方法, 并搭建了三单元相干偏振合成实验平台, 对其可行性进行了验证。本论文中所介绍的光纤相干合成方法均可用于构建多孔径接收天线中的光束合成模块, 在空间光通信系统中具有极大的潜在应用。

参考文献

- [1] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(4): 840–843.
- [2] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(14): 2686–2688.
- [3] Li F, Geng C, Li X Y, et al. Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 602–609.
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.
- [4] Chan V W S. Free-space optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4750–4762.
- [5] Ghassemlooy Z, Minh H L, Ijaz M. *Free space optical communications*[M]. O Strobel. UK: Optical and Microwave Technologies for Telecommunication Networks, 2016: 349–377.
- [6] Zhao Y, Tong S F, Song Y S, et al. Research progress of optical phase locked loop in space laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(8): 080002.
赵毅, 佟雪峰, 宋延嵩, 等. 空间激光通信中光学锁相环的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(8): 080002.
- [7] Zhang R C, Wang J M, Zhao G, et al. Fiber-based free-space optical coherent receiver with vibration compensation mechanism[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 18434–18441.
- [8] Li K N, Ma J, Tan L Y, et al. Performance analysis of fiber-based free-space optical communications with coherent detection spatial diversity[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(17): 4649–4656.
- [9] Zheng D H, Li Y, Chen E H, et al. Free-space to few-mode-fiber coupling under atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(16): 18739–18744.
- [10] Wu H L, Yan H X, Li X Y. Modal correction for fiber-coupling efficiency in free-space optical communication systems through atmospheric turbulence[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2009, **121**(19): 1789–1793.
- [11] Chen M, Liu C, Xian H. Experimental demonstration of single-mode fiber coupling over relatively strong turbulence with adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(29): 8722–8726.
- [12] Belmonte A. Capacity of coherent laser downlinks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(11): 2128–2132.
- [13] Geisler D J, Yarnall T M, Stevens M L, et al. Multi-aperture digital coherent combining for free-space optical communication receivers[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(12): 12661–12671.
- [14] Belmonte A, Kahn J M. Array receivers in downlink coherent lasercom[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9354**: 935407.
- [15] Geisler D J, Yarnall T M, Schieler C M, et al. Experimental demonstration of multi-aperture digital coherent combining over a 3.2-km free-space link[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10096**: 100960C.
- [16] Yang Y, Geng C, Li F, et al. Combining module based on coherent polarization beam combining[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(7): 2020–2028.
- [17] Yang Y, Geng C, Li F, et al. Multi-aperture all-fiber active coherent beam combining for free-space optical communication receivers[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(22): 27519–27532.
- [18] Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. High power narrow-linewidth nanosecond all-fiber lasers and their actively coherent beam combination[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(5): 0903913.
- [19] Zhang C, Chang W Z, Galvanauskas A, et al. Simultaneous passive coherent beam combining and mode locking of fiber laser arrays[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(15): 16245–16257.
- [20] Yang Y, Geng C, Li F, et al. Research of cascaded coherent combining of fiber lasers based on 3-dB fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(S1): S106005.
杨燕, 耿超, 李枫, 等. 基于 3-dB 光纤耦合器的级联式光纤激光相干合成方法研究[J]. *光学学报*, 2015, **35**(S1): S106005.
- [21] Li F, Geng C, Li X Y, et al. Co-aperture transceiving of two combined beams based on adaptive fiber coupling control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(17): 1787–1790.
- [22] Li F, Geng C, Huang G, et al. Experimental demonstration of coherent combining with tip/tilt control based on adaptive space-to-fiber laser beam coupling[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(2): 7102812.
- [23] Geng C, Luo W, Tan Y, et al. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 25045–25055.
- [24] 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.

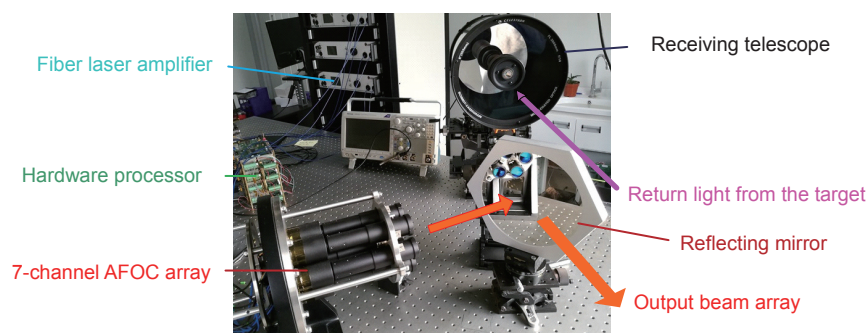
Research progress of fiber laser coherent combining

Geng Chao^{1,2}, Yang Yan^{1,2,3}, Li Feng^{1,2}, Huang Guan^{1,2,3}, Li Xinyang^{1,2*}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



The photo of laser beam transmitter and receiver in the 7-channel laser-array transmission and TIL control experiment

Overview: To build an optical phased array (OPA) based on multi-channel fiber lasers, each channel equipped with a fiber optical collimator, is crucial and effective for the long-range laser transmission application, where the atmospheric turbulence will weaken the beam quality and power intensity on the target. Aberrations in such transmission systems include turbulence-induced dynamic aberrations located at the path from the fiber laser based OPA to the target, besides the inherent phase errors like phase noises and tip/tilt errors. With the help of the OPA structure, the monolithic optical wavefront is replaced by multi-subwavefronts emitting from the subapertures, where each subaperture is provided with the abilities of correcting the piston and tip/tilt type phase aberrations. So, the OPA structure can deal with atmospheric turbulence aberrations and inherent system aberrations to achieve the coherent beam combining, and even the conformal emission. Effective control bandwidth for eliminating such aberrations is limited by the optical transmission time delay and the increment of the array scale in the OPA system. Existing techniques, e.g., target-in-the-loop (TIL) and delayed stochastic parallel gradient descent (SPGD), are difficult to deal with the fast-changing turbulence-induced tip/tilt aberrations. In recent years, the fiber laser coherent beam combining technique was deeply studied in the Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences. The new-style fiber-based aberration correctors, e.g., adaptive fiber-optics collimator (AFOC) and piezoelectric fiber phase corrector (PZT-PC) were developed for the tip/tilt and piston phase error compensation. The indoor coherent beam combination of a three-element fiber array based on TIL technique was achieved. With the help of 500 W AFOC, the 2 kW incoherent beam combining of four fiber lasers was demonstrated. The coherent beam combining with tip-tilt control of seven-channel AFOC array was achieved by using the divergence cost-function in SPGD algorithm. In the front of this paper, research progress of multi-aperture laser transceiving control for coherent combining applications was presented, where the outdoor demonstration of TIL technique with seven-channel AFOC array was realized under 200 m horizontal atmosphere distance. The coherent beam combining technique for laser transmission in atmosphere has been widely investigated, while the study of this technique's application in space optical communications is few. In fact, the structure of multi-aperture receiving antenna based on coherent beam combining could be employed to correct the atmospheric turbulence effect and to enhance the performance of the space optical communication system. In most part of this paper, the research progress of fiber-based coherent beam combining in multi-aperture receiving space optical communication system is reported in detail, including the coherent combining based on 3 dB fiber coupler and the coherent polarization combining based on fiber polarization beam combiner, which might have great potential in space optical communication system.

Citation: Geng C, Yang Y, Li F, *et al.* Research progress of fiber laser coherent combining[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170692

Supported by the National Natural Science Foundation of China(61675205) and the CAS "Light of West China" program
* E-mail: xyli@ioe.ac.cn