

光纤激光相控阵光束扫描技术发展

戈博王 张雨秋 常洪祥 常琦 冷进勇 马鹏飞 周朴

Recent progress in beam steering by fiber laser phased arrays

Shu Bowang, Zhang Yuqiu, Chang Hongxiang, Chang Qi, Leng Jinyong, Ma Pengfei, Zhou Pu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230250>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

公里级湍流大气环境下光纤激光高效相干合成

Efficient coherent beam combining of fiber laser array through km-scale turbulent atmosphere

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1005007 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1005007>

超短脉冲光纤激光相干合成(特邀)

Review on the progress in coherent beam combining of ultra-short fiber lasers(*Invited*)

红外与激光工程. 2018, 47(1): 103001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0103001>

线阵光纤激光相干合成角度扫描控制方法研究

Control method of coherent beam combining angle scanning based on linear fiber array

红外与激光工程. 2018, 47(9): 906006 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0906006>

光学相控阵技术发展概述

Review of optical phased array techniques

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20201042 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201042>

高能光纤激光器光束合成技术

Beam combining of high energy fibre lasers

红外与激光工程. 2018, 47(1): 103011 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0103011>

梳状大模场光纤结构的优化设计

Optimum design for comb-index core fiber with large mode area

红外与激光工程. 2019, 48(9): 918005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0918005>

光纤激光相控阵光束扫描技术发展

爻博王¹, 张雨秋¹, 常洪祥¹, 常琦¹, 冷进勇^{1,2,3}, 马鹏飞^{1,2,3}, 周朴^{1*}

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

摘要: 光纤激光相控阵扫描技术是一种通过相位调制实现光束偏转的非机械式扫描技术, 在激光加工、目标跟踪、自由空间光通信以及激光雷达等领域具有广泛的应用价值。文中概述了光纤激光相控阵光束扫描技术的基本原理和发展历程, 重点阐述了光学相控阵动态扫描技术中的相位控制技术、空间扫描特征及性能提升方法, 最后对光纤激光相控阵的发展趋势和应用前景进行了展望。

关键词: 光纤激光相控阵; 相干合成; 非机械扫描; 激光加工

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230250

0 引言

自 20 世纪 60 年代以来, 光学相控阵平台已在多个领域得到应用, 如自适应光学中的波前相位畸变校正^[1]、动态光束扫描^[2]、激光相干合成^[3]、远距离探测成像^[4]等。目前, 基于液晶光学相控阵^[2]、微机电系统 (Micro-electromechanical Systems, MEMS) 相控阵^[5]、光波导相控阵^[6]、硅基相控阵^[7]和光纤激光相控阵^[8]的光束扫描技术已取得了重要进展。与传统功耗大、灵敏度差、易遭受磨损的机械扫描装置相比, 光学相控阵扫描平台具备功耗小、灵敏度高、结构紧凑等优点。其中, 液晶光学相控阵通过电压控制液晶的折射率变化, 进一步改变光束偏转角度, 在空间光调制方面已经具备较为成熟的应用。但是, 实现二维扫描常常需要级联两个液晶光学相控阵, 且液晶分子的定位需要较长的响应时间。MEMS 相控阵系统稳定、功耗低, 但也同样存在类似的问题, 需要足够的调整时间才能实现光束偏转角度的切换^[9]。另外, 光波导光学相控阵、硅基相控阵采用互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 工艺刻写光子集成电路, 这种高密度的周期性天线单元

可以实现灵活的光束整形。然而, 上述光学相控阵平台所采用的液晶或是硅基等材料承受功率有限, 并且系统体系多趋于小型化, 不适用于大功率激光系统^[10]。而光纤激光相控阵平台借助成熟的相干合成技术, 不仅可以通过波束的灵活偏转实现快速访问寻址, 而且适用于远距离传输的高功率扫描装置。通过与“光、机、电、算”四个要素的有机结合, 光纤激光相控阵动态扫描技术正逐步向非机械式、大角度、高精度以及抗干扰强的方向发展。

近年来, 随着光纤激光技术和器件制造工艺的不断成熟, 光纤激光相控阵的扫描性能也实现了快速提升。文中首先重点讨论了光纤激光相控阵的相位控制技术。其次, 给出了实现包括扫描角度、扫描速度、扫描精度、衍射效率及旁瓣抑制在内的光束扫描性能提升的解决方案, 比如: 可精密调控的阵列单元, 多样化的结构设计, 不断更新的相位控制算法以及宽覆盖范围的波段等。接着, 介绍了光学相控阵在光场调控领域的功能拓展, 尤其是在大功率、大阵元集成这类大科学装置中的潜在应用价值^[11]。最后, 对光纤激光相控阵动态扫描技术在激光加工^[12]、跟踪扫描^[13]、

收稿日期: 2023-04-25; 修订日期: 2023-05-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3606000)

作者简介: 爻博王, 女, 博士生, 主要从事光纤激光及其相干合成方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 周朴, 男, 研究员, 博士, 主要从事光纤激光、光束合成和相关交叉科学研究。

自由空间光通信^[14]、激光雷达^[15]等领域的应用前景进行了展望。

1 光纤激光相控阵研究进展

光纤激光相控阵具有结构紧凑、热管理方便等特点,在高光束质量、高平均功率和高亮度的激光输出方面具有独特的优势。光纤激光相控阵主要呈现分孔径的结构分布特点,利用成熟的相干合成技术,已在功率提升和路数拓展方面展现出巨大的发展潜力。在功率提升方面,2011年,国防科技大学分别基于抖动法和随机梯度下降算法(Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm, SPGD),相继实现了 1.08 kW 和 1.14 kW 相干合成激光功率输出^[16-17];2021年,国防科技大学又将功率输出提升至于 21.6 kW^[18]。在合成路数拓展方面,早在 2011年,法国 Thales 研究所便实现了 64 路激光的相干合成^[19],其他单位如美国麻省理工学院林肯实验室、美国戴顿大学、中国工程物理研究院等都实现了数十路光纤激光的相干合成。国防科技大学也相继实现了 37 路^[20]、60 路^[21]和 107 路光纤激光相干合成^[22];2022年,又对 397 路的光纤激光光束的锁相控制进行了研究,并且在强噪声下进行了突破千路级光纤激光相干合成的实验验证^[23-24]。

光纤激光相干合成技术在输出功率和阵列拓展方面的快速发展为光纤激光相控阵技术在光束扫描

领域的应用奠定了基础,使得大功率激光束扫描以及任意光场定制的实现成为可能。目前,光纤激光相控阵光束扫描技术正成为相干合成领域新的研究热点,且进一步形成了“相干合成+”的概念。美国国防部高级研究计划局(DARPA)在该领域的研究起步较早,2005年便利用相干合成技术实现纯电子控制的光束扫描,突破了机械式扫描带来的扫描速度限制。图 1(a)所示为同年美国陆军实验室提出的以分孔径为发射面的“APPLE”激光相干合成系统,实现了可锁相的自适应光学望远镜阵列。图 1(b)给出了“APPLE”系统锁相以及自适应光学像差补偿控制原理图,利用 SPGD 算法可对相位误差进行校正^[25]。DARPA 后续的 Endurance 项目重点集中于制备可灵活调控且轻量化的光束扫描器件。2013年又相继实施 SWEEPER 项目,进一步开展以 10 W 级激光实现 45°范围内大视场扫描的研究计划。为了进一步推进 SWEEPER 的研究,后续出现的光电异质集成计划尝试发展硅基激光元件,期望在材料性能上寻求突破。由此可见,尽管这些项目取得了扫描性能方面的突破,但是相控阵器件在耐受强光方面依旧需要新的技术支持方案。此外,国外光束扫描技术的研究重点多集中于液晶相控阵、硅基相控阵以及 MEMS 相控阵平台;而国内对光纤激光相控阵扫描技术的报道相对居多,如中国科学院光电技术研究所、西安电子科技大学等单位,后续将进行详细描述。

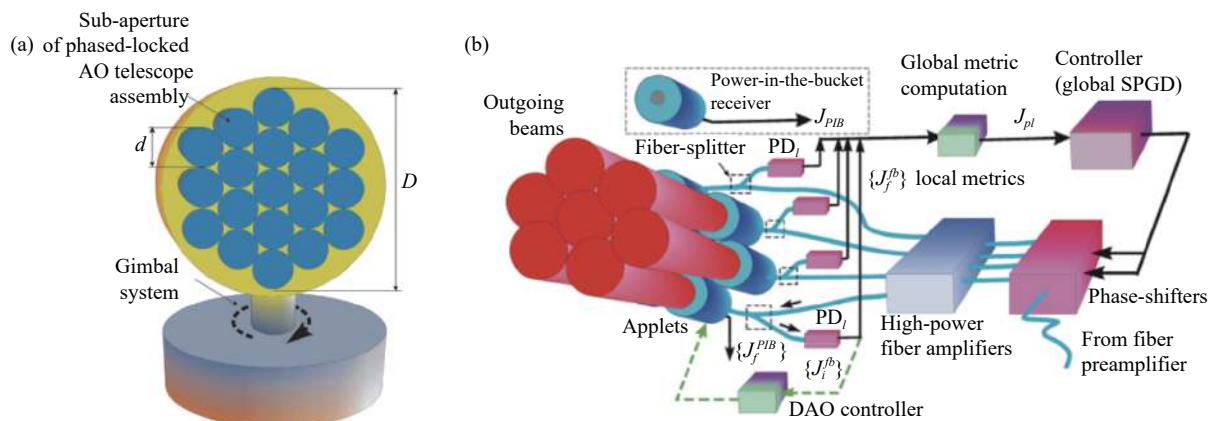


图 1 (a) 自适应锁相子孔径组成的大口径发射望远镜示意图; (b) “APPLE”系统中相位锁定和自适应光学补偿控制装置图^[25]

Fig.1 (a) Schematic diagram of a transmitting telescope composed of adaptive phase-locking systems with large-scale emitting area; (b) Schematic diagram of controlled phase-locking and adaptive optical compensation device in “APPLE” systems^[25]

近年来,以色列 Civan 公司已经在基于光纤激光相控阵平台的输出功率提升、光束整形、光场图案定制等方向展示了一定的成果(如图 2 所示)^[12]。2020 年,该公司实现了 32 路光纤激光相干合成,输出功率可达到 16 kW。在此基础上开发的动态光束激光器(Dynamic Beam Laser, DBL)实现了高功率且可调的激光输出,比如:OPA6 的输出功率在 7~28 kW 范围内可调,OPA12 的输出功率在 50~100 kW 范围内可调。光纤激光相控阵通过灵活的相位控制可以在远场实现精准的光束操控,并且高功率的激光输出可以进一步满足激光加工的需求,这也说明光纤激光相干合成技术实现了从实验验证到工业应用的跨越发展。

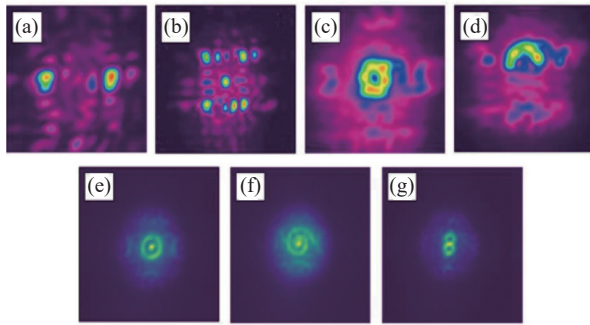


图 2 光纤激光相控阵的动态光束整形效果^[12]

Fig.2 Dynamic beam shaping based on fiber laser phased array^[12]

传统相干合成技术的主要目标为实现各路光束同相输出,通过子光束间的相互干涉在远场形成高亮度的激光束。与传统相干合成技术相比,光学相控阵更加突出了“相控”与“阵”的概念。在光纤激光相控阵基础上发展的光束扫描技术具有多方面的优势:一是分孔径的结构特点使得其在热管理方面降低了对器件热损伤阈值的要求;二是高平均功率的特点可为光束扫描技术提供更大的有效作用距离;三是高集成度的大阵元也为动态扫描装置提供了灵活的调整空间,有望赋予子阵列更多功能。此外,光纤激光相控阵覆盖可见光到红外波段,有望实现兼备高能、高速、高质量三重优势的动态光束扫描系统。下面将进一步对光纤激光相控阵的光束扫描关键技术,包括相位控制技术、空间扫描特征、性能提升方法及应用等方面进行介绍。

2 光纤激光相控阵光束扫描关键技术

2.1 相位控制技术

相位控制技术是光学相控阵系统实现光束扫描的关键技术。光学相控阵的光束扫描原理^[26]如图 3 所示,通过对子单元加载特定的相位分布形成倾斜波前,一般通过对各子光束间设置恒定的相位差实现。根据这一原理,为了实现精准控制光束偏转的效果,这就对相位控制模型提出了要求。在实际系统中,相位控制算法和光学移相器件是实现相位控制的关键。

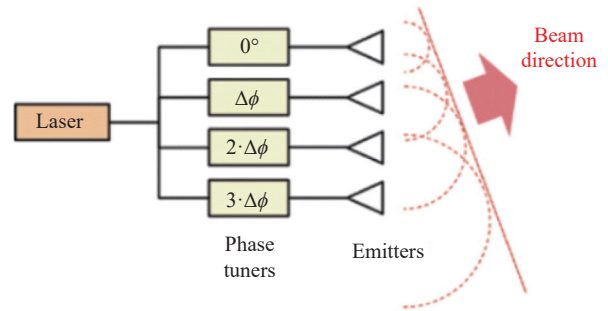


图 3 光学相控阵动态扫描技术原理图^[26]

Fig.3 Principles of dynamic beam steering by laser optical phased arrays^[26]

2.1.1 相位控制模型

根据目前相位控制器件的实现原理,主要有两类相位控制模型:第一类为二元光栅相位控制模型;第二类为闪耀光栅相位控制模型。这两种相位控制模型的具体区别是前者通过活塞相位调控可实现连续的寻址扫描,而后者通过倾斜相位调控只能进行离散的寻址扫描。此外,它们在扫描角度、衍射效率和具体调控器件等方面也有不同。下面主要对这两类相位控制模型进行介绍。

二元光栅相位控制模型如图 4(a)所示。由于 I 阶段整体倾斜相位难以用现有的移相器件实现。进一步将整体倾斜相位近似为阶段 II 的阶梯状相位,再将各阶梯状相位赋予各个阵元,形成阶段 III 的周期型相位,即相邻子阵元间活塞相位差恒定。该相位控制模型在远场的扫描角度一般采用公式 $\theta = \arctan(L/D)$ 来计算,其中: L 代表光纤激光相控阵的整体光程差, D 代表整个口径大小。当 L 连续改变时,光束也会按

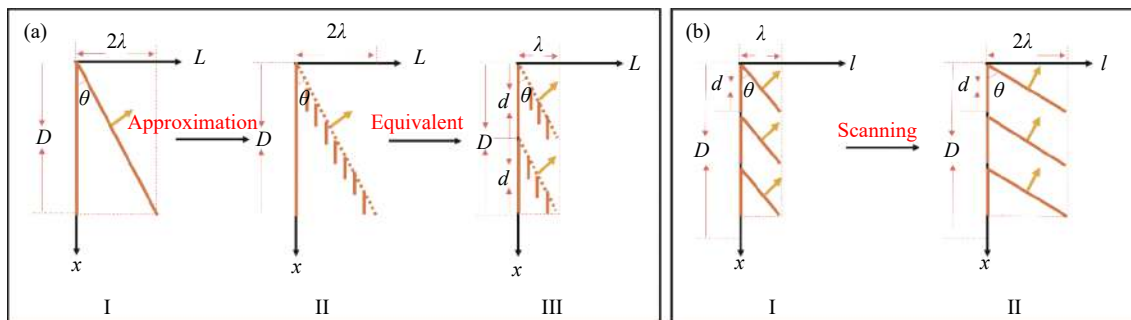


图 4 (a) 二元光栅相位控制模型和 (b) 闪耀光栅相位控制模型示意图

Fig.4 Schematic diagrams of (a) binary grating phase control model and (b) blazed grating phase control model

一定的角度连续偏转,若要获得大的扫描角度,意味着需要增加光程差 L 。该相位控制模型的优势在于可进行连续的寻址扫描。

对于闪耀光栅相位控制模型,其中闪耀光栅的闪耀角即为波前倾斜角,又由于闪耀角可调的特性,意味着可以实现远场的光束扫描。如图 4(b) 所示,闪耀光栅相位控制模型在固定锯齿状相位周期的前提下,改变每个锯齿状倾斜相位的最大光程差 l ,从 I 到 II 阶段的变化过程中,即可实现离散角度扫描。由于可扫描到的范围由单个锯齿状倾斜相位所经历的宽度 d 确定,因此扫描角度由公式 $\theta = \arcsin(l/d)$ 表示。该相位控制模型的优势不仅在于扫描角度不受限制,而且可以在视场的任意位置实现定点扫描,可用于光场图案的定制。

2.1.2 相位优化控制方法

由于实际系统会受到内部机械振动、热效应的干扰,或是传输过程中大气湍流等外界环境因素的影响,往往需要对光纤激光相控阵系统进行相位补偿达到精密控制相位的目的。除了需要相位控制模型以外,常常还需要相位补偿控制优化算法,使得发射面的相位分布在传输过程中避免遭到破坏。因此,合适的相位控制模型需要与有效的相位优化控制方法相结合,才可完成基于光纤激光相控阵的光束扫描系统的相位控制。

目前,常见的主动相位控制方法主要有抖动法、外差法、干涉条纹提取和人工智能等^[27-30]。抖动法利用高频小幅调制信号以并行或串行的方式加载到相位调制器上,最终以远场光斑的强度起伏反映出来。外差法要求每个相干合成光束都有相应数量的

检测器和解调电路,系统调整相对复杂。而优化控制算法将相位控制过程转化为衡量最佳性能的过程,常用优化算法包括遗传算法、模拟退火算法^[31]、粒子群算法^[32]、快速搜寻算法^[33]、蝙蝠算法^[34]和 SPGD 算法^[35]等。其中,SPGD 算法可有效进行梯度估计,收敛速度快,与混沌理论相结合可提供快速精准的自适应相位校准技术,但也存在局域极值不确定性的问题。近年来,随着深度学习在各个学科间的交叉应用,通过学习训练大量数据得出的模型结构可提供预测功能,使得激光技术在智能化领域迸发出新思路。比如:2019 年,国防科技大学提出神经网络补偿活塞像差^[30,36];2022 年,中国科学院光电技术研究所利用深度学习在螺旋相位调制领域也实现了像差控制^[37]。

2.1.3 光学移相器件

在实际系统中,要想实现光束偏转的灵活操纵,优化激光扫描效果,光学移相器件作为相位控制的核心器件,在灵敏度、响应时间和切换速度等方面都有较高的性能需求。一般是根据所需扫描效果刻画的相位轮廓转换的电压大小,将电压信号传递给光学移相器件后进一步控制相位分布。用于实现光束偏转的光学移相器件一般分为电光偏转器 (Electro-optic Deflectors, EODs)、声光偏转器 (Acousto-optic Deflectors, AODs) 和压电拉伸器件^[38]。EODs 以 LiNbO_3 和 LiTaO_3 晶体为代表,利用的是折射率随电场线性变换的 Pockels 效应。 KTiOPO_4 (KTP) 晶体主要利用折射率随电场二次方变化的 Kerr 效应。其中, LiNbO_3 晶体带宽可达 10 GHz 量级,但成本较高;而压电陶瓷 (Piezoelectric, PZT) 相位调制器带宽为 10 kHz 量级,

但成本较低,也是常用的移相器件。AODs 通过声波在介质传播过程中所形成的折射率光栅,再利用折射率变化与电场电压的关系进一步解算出相位分布。

1972 年, Mayer 将钽酸锂晶体应用于光束扫描^[39],制备了第一个一维光学相控阵光束扫描装置。国内西安电子科技大学在光纤激光相控阵中采用光电晶

体相位调制实现了光束扫描。2021 年 7 月,西安电子科技大学为了解决芯片级光学相控阵光束扫描功率限制在 mW 量级的问题,通过 LiNbO₃ 相位调制器实现了如图 5 所示的 8×8 单元光纤激光相控阵二维光束偏转系统,并采用 SPGD 算法锁相,利用雪崩二极管获得精准光束偏转电压^[40]。

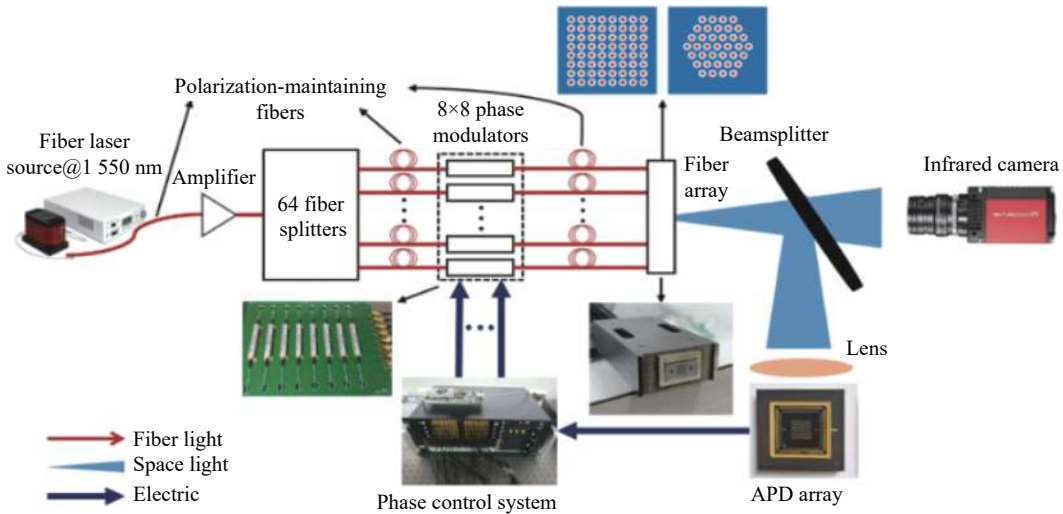


图 5 西安电子科技大学 8×8 光纤激光相控阵二维光束偏转系统示意图^[40]

Fig.5 Schematic diagrams of two-dimensional beam steering based on 8×8 optical phased arrays by Xidian University^[40]

在相干合成系统中,上述光电晶体一般只能实现活塞相位的调制,而要实现出射光束的光轴指向偏转以及大角度光束扫描,需要自适应光纤准直器(Adaptive Fiber-optics Collimator, AFOC)辅助倾斜相位的调控。AFOC 具有控制精确、惯性小、结构紧凑且易于集成等特点,同时兼备孔径填充和倾斜控制两个功能。2005 年, DARPA 和多家单位合作研制出了 AFOC,并应用于大气补偿和相干合成系统^[25]。国内在这方面也开展了一系列的工作。2011 年,中国科学院光电技术研究所利用 AFOC 同时补偿了活塞以及倾斜相差^[41]。2021 年,该单位将 AFOC 与压电陶瓷相位调制器件两者结合,得到了如图 6 所示的激光扫描系统实现整体倾斜相位变化,相应地也可得到准连续扫描效果,并且通过目标在回路技术实现远场一定范围内的目标跟踪^[42]。

同年,中国科学院光电技术研究所通过微透镜阵列和 AFOC 的协同工作突破了离散寻址扫描的限

制。如图 7 所示,相比左图中相邻扫描点之间的距离,右图中基本可以实现准连续的光束扫描,成功提升了扫描精度^[43]。2022 年,国防科技大学的研究团队改进了 AFOC 的结构,利用新型悬臂结构减小了 AFOC 的半径,可提供大于 1 mrad 的偏转角^[44]。

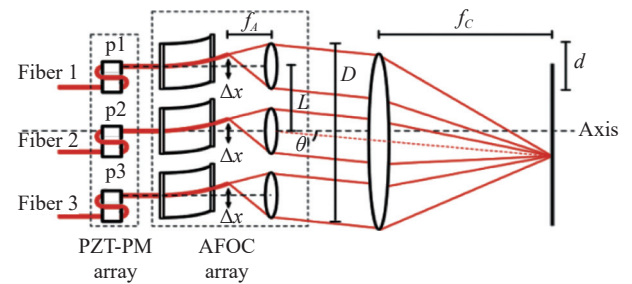


图 6 中国科学院光电技术研究所相干合成激光光束扫描系统示意图^[42]

Fig.6 Schematic diagram of beam steering system based on laser coherent beam combining by Institute of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences^[42]

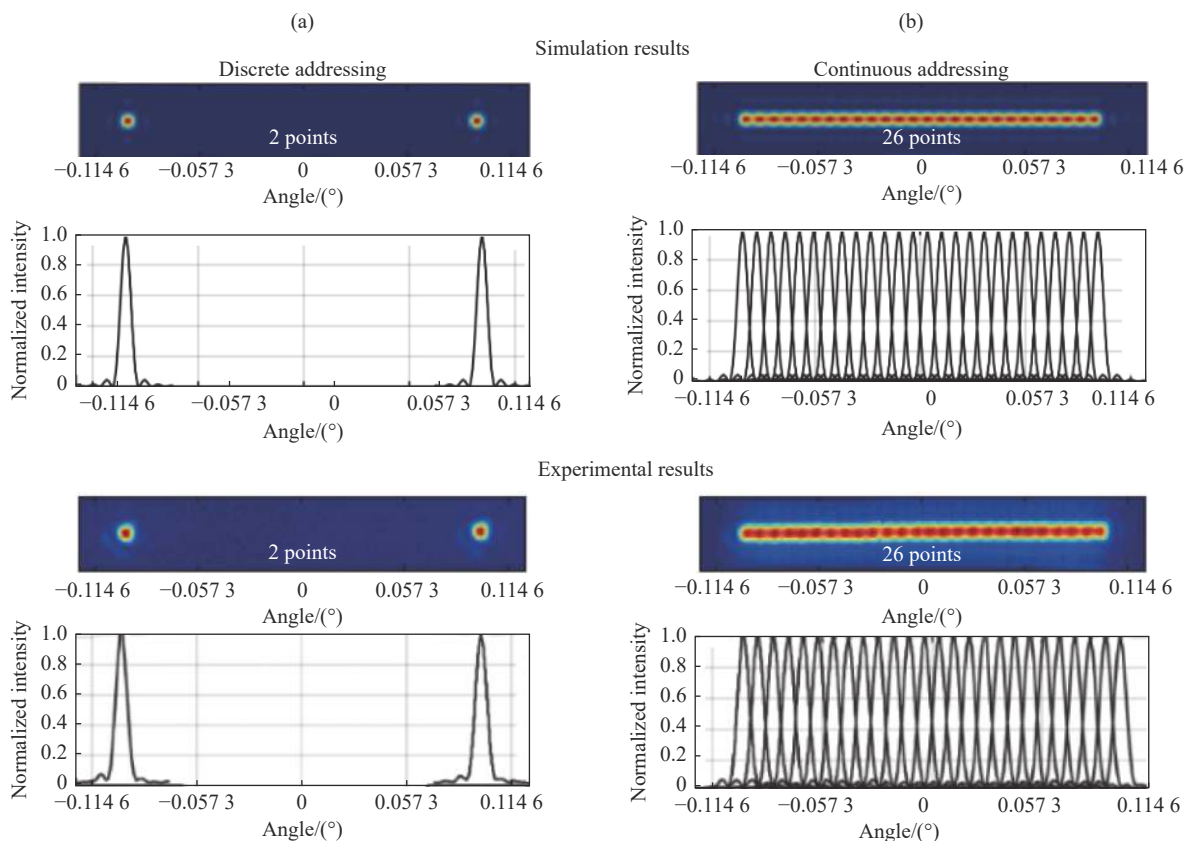


图 7 一个周期内微透镜阵列实现的离散扫描效果 (左图); 一个周期内微透镜阵列与 AFOC 共同实现的准连续扫描效果 (右图)^[43]

Fig.7 Discrete scanning realized by micro-lens arrays in one period (left); Quasi-continuous scanning realized by combination of micro-lens arrays and AFOCs in one period (right)^[43]

2.2 扫描性能优化

一般构成光纤激光相控阵的四个部分分别为激光源、分束器、移相器和发射器,各个部分的性能最终决定了系统的扫描性能。光纤激光相控阵光束扫描性能特征主要包括扫描精度、扫描范围、扫描速度、旁瓣抑制和衍射效率五个方面。为了寻求更好的扫描性能,对相关优化方法以及系统各要素间的约束制衡关系作了简要梳理。

2.2.1 扫描角度

由于视场受限的问题在各种类型的光学相控阵系统中十分常见,因此,扩大光纤激光相控阵的扫描角度(即扫描视场)具有重要意义。根据相控阵理论,影响扫描视场范围的因素主要与相位控制模型有关。

当使用活塞相位控制时,增大发射面口径可扩大扫描范围。如图 8 所示,2021 年,中国科学院光电技术研究所通过活塞相位调控的甚多孔径光纤激光相控阵,在理论上研究了 19、133 及 703 路激光阵列的

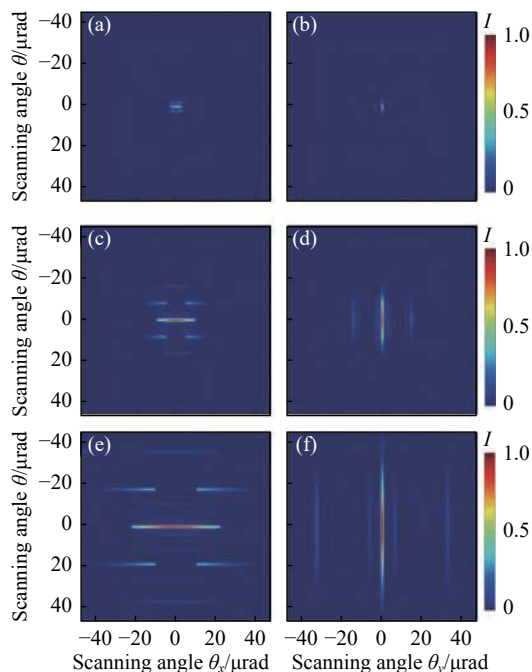


图 8 活塞相位控制下 19 路、133 路及 703 路阵列光场实现连续扫描的仿真结果^[45]

Fig.8 Simulated results of continuous scanning by 19, 133 and 703 channels with controlled piston phase^[45]

远场连续扫描效果^[45]。而当使用倾斜相位控制时,可以通过增大阵列光场单个孔径内部承受的最大锯齿型相位(即减小光栅周期的方式)增大扫描范围,理论上扫描范围并不受限^[46]。尤其结合 AFOC 这类结构可实现准连续扫描,这也在一定程度上说明倾斜相位控制模型的改进空间相对较大。

此外,西安电子科技大学提出的多光束扫描既可以保证扫描范围,又能兼顾扫描速度。该 16 路一维线性排列的阵元其主极大可在 0.71° 范围内进行扫描,而其他子光束跟随扫描可以实现 10.65° 全视场内光束覆盖^[47]。

2.2.2 扫描速度

为了满足快速记录和显示的要求,扫描速度也是作为扫描性能提高的重要指标之一。现阶段,工业移相器件主要以 EODs 为主,执行带宽可达到 GHz,使

得扫描速度有望达到 10^6 rad/s 量级。图 9 所示为西安电子科技大学利用 LiNbO₃ 相位调制器所研发的光纤相控阵扫描系统,采用“先校正后扫描”的方法,其扫描速度可达到 500 kHz。这种采用电光调制器的方式理论上可实现 40 MHz 的转向速度,适用于高功率下的波束成形^[47]。相比液晶空间光调制器和微机电阵列系统约 100 kHz 和 350 kHz 的扫描速度^[48-49],光纤激光相控阵具有一定优势,但同时也与其他新型光学相控阵平台存在一定差距。2020 年,澳大利亚国立大学物理研究所开发的可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)控制的光纤激光相控阵平台,可以将转向速度提升至 GHz,并且可扩展的发射器阵列有利于与大功率发射单元兼容^[50]。此外,快速转向芯片级的光学相控阵可达到十 MHz 以及百 MHz,甚至十 GHz 级别,前景十分广阔^[51]。

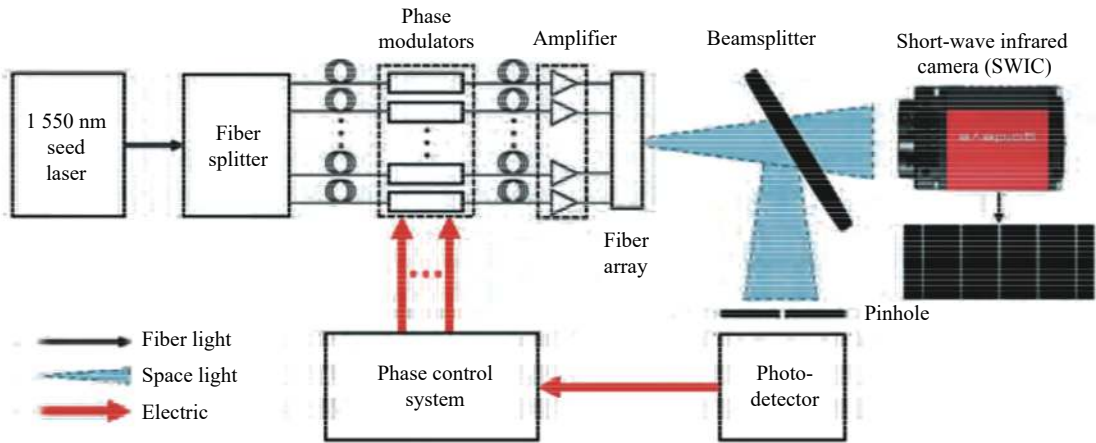


图 9 16 路一维线性排列光纤相控阵光束扫描原理示意图^[47]

Fig.9 Diagrams of beam steering system by sixteen arrays with one-dimensional linear arrangement^[47]

2.2.3 扫描精度

扫描精度与扫描分辨率含义一致,扫描分辨率是指将扫描对象每英寸可表示成的点数。当扫描对象可表示成的点数越多时,则代表所达到的扫描精度越高。由于光纤激光相控阵一般采取平铺孔径的阵列结构,扫描精度与发射面阵列尺寸有关,公式为 $\delta\theta = 1.22\lambda/D$, λ 为波长, D 为整个阵元面口径大小。早在 2012 年,林肯实验室采用 LiNbO₃ 相位调制器完成了一维 6 单元的光纤相控阵优化和扫描,由于阵元数量的限制,扫描角分辨率较低^[52];国内西安电子科技大学将阵元数量拓展至 16 路,提升了扫描角精度^[47],

可见阵元数量在扫描精度提升方面的重要性,大阵元相干阵列是实现高扫描精度的重要方式。另外,大孔径单元也可抑制光束的束宽,这也意味着光斑尺寸将随着发射孔径的增大而减小,扫描精度将有一定的提升,而激光本身的线宽对扫描角精度影响并不大^[53]。

2.2.4 旁瓣抑制

根据 Niequist 准则,微波相控阵规定 $d < \lambda/2$ (其中, d 为单元间隙, λ 为波长),由于微波波长与单元间隙相当,比较容易满足准则要求^[54];而光波波长短,要做到 $d < \lambda/2$ 很难,这也导致旁瓣问题的出现。旁瓣抑制效果可通过峰值旁瓣比 (Peak Sidelobe Ratio) $PSLR =$

$20\log_{10}(I_m/I_s)$ (其中, I_m 为主瓣强度, I_s 为旁瓣强度)来进行表征,解决旁瓣问题主要通过以下三种方式,一是高效的阵列设计方案,当增加设计的复杂性时,可以避免非周期阵列所引发的旁瓣问题。比如:稀疏阵列^[55]、非等距阵列和随机间距阵列。2007年, Yin等人提出了不等间距相控阵低栅瓣光束控制方法^[56];2020年,陈建明等人提出了利用粒子群算法得到理想的孔径单元分布^[32];长春理工大学团队提出了随机间距,以及遗传算法等全局优化算法来抑制旁瓣影响的方法^[57]。稀疏非周期阵列可以解决强烈的光学耦合有效抑制干扰,但是非等距空间子阵列由于需要极高的加工精度,难以应用到大型阵列。二是孔径填充技术,高阵列占空比有利于提高阵列光场形成光斑的能量集中度。三是减少主瓣能量损耗,这与系统设计中的参数误差息息相关,比如哈尔滨工业大学提出的相位加权法,引入步长系数在周期性相位上叠加非周期相位可抑制光学相控阵中的旁瓣^[58]。

2.2.5 衍射效率

衍射效率是指在指定方向上的发射功率和总输出功率的比值,这一指标与扫描效果紧密相关。理论上,当采用闪耀光栅相位控制模型时,衍射效率不受扫描角度的改变而改变,即在无元器件的插入损耗以及大气湍流干扰的情况下,衍射效率为1。而当采用二元光栅相位控制模型时,衍射效率将随着扫描角度的增大而减小。

用于优化光纤激光相控阵光束扫描各项性能参数的方法仍旧处于探索阶段,并多数沿用液晶光学相控阵、硅基光学相控阵或是光波导光学相控阵等已有的性能优化方案,因此各项参数还有待进一步提升。此外,现有仿真和实验数据表明各参数性能存在相互制约的关系。比如:由束宽公式 $FWHM \approx 0.886\lambda/Nd\cos\theta$ (其中, N 为孔径数量, d 表示孔径尺寸)可知,大扫描角度 θ 和窄束宽 $FWHM$ 无法同时兼得;当单元数量增多时,总体的能耗也会随之增加;激光快速扫描的同时还需要保证扫描角度的准确性,这与相位补偿调控紧密有关,扫描速度还受限于激光的重复频率,这对光源也提出要求。另外,基于阵列设计的旁瓣抑制方法常常会增加系统的复杂性,将削弱扫描速度或精度。由此可见,单一性能的提升已经无法满足光纤激光相控阵扫描系统的需求,光纤激光相控阵的综合设

计将成为突破性能限制的另一途径,也将是光纤激光相控阵光束扫描技术新的突破点。

3 光纤激光相控阵动态扫描技术的应用

3.1 激光加工

激光加工包括激光切割、激光焊接、表面处理、金属增材制造等方面,具有能量集中、热影响区域小、加工精度高等优势。非接触式的加工方式对工件不会产生污染,也不会对加工材料造成机械挤压或机械应力;加工过程自动化程度高,节约人工成本,无需模具,也不受加工数量限制,有利于投入大批量加工生产。当配合以电脑编程,加工更为精准,材料利用率也更高。但是激光加工也面临微米级别加工只能是小型成品的难题,而进行大面积或高速焊接时,热影响区间增大,同时也会带来裂纹和气孔等问题。

光纤激光相控阵光束扫描技术在激光加工领域可提供满足高功率光束整形需求的解决方案。以色列 Civan 公司开发的 DBL 引起了公众的关注,该激光器输出功率高于 14 kW,可应用于实际工业加工。如图 10 所示, DBL 在提供多样化的图案的同时,还能保持 MHz 级别的扫描速度,而在这个过程中不需要任何移动部件^[59]。由此可见,依托光纤激光相控阵可以实现高质量的光束整形、频率控制、波束排序和焦点转向,从而满足实际应用中切割和焊接工艺的需求。

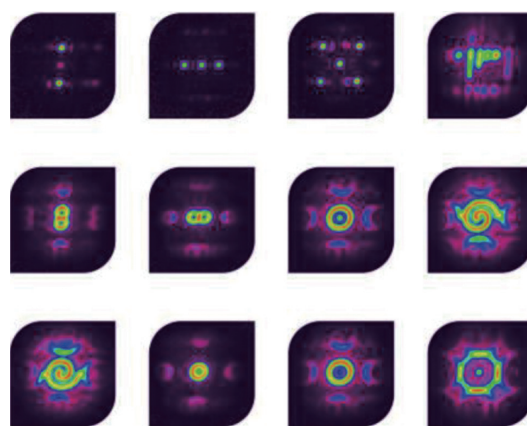


图 10 以色列 Civan 公司研发的动态光束激光器的定制图案效果^[59]
Fig.10 Designed patterns of DBL developed by Israeli Civan Company^[59]

但是,实际生产中也会遇到材料厚度不均一、物质对光的吸收率差别大等问题。为了能够以系统的

方式适应新变量进行工艺优化,后续的研究一方面是从根本上研究这种动态调制激光束与材料的相互作用,达到材料的最低性能要求^[60];另一方面通过诊断工具的帮助,如背反射测量、光学相干断层扫描、毛细管开口、熔池表面和飞溅形成的高速成像,以及热辐射测量和后续金相分析。IFSW(Institute für Strahlwerkzeuge)开发的 X 射线设备用于观察激光功

率如何影响加工过程。整个装置如图 11(a)所示,图中左边是 OPA6 激光源,右边是光学头,背景是 X 射线设备的铅壁。当 DBL 集成至 IFSW 的光线追踪软件时^[61],如图 11(b)所示,可对激光加工过程中能量输入大小进行控制,并对接下来的凝固和焊缝微观结构整条生产链路的细节进行监控,配合 HP-MSM 设备可进一步观察图 11(c)所示的焊接图样的强度变化。

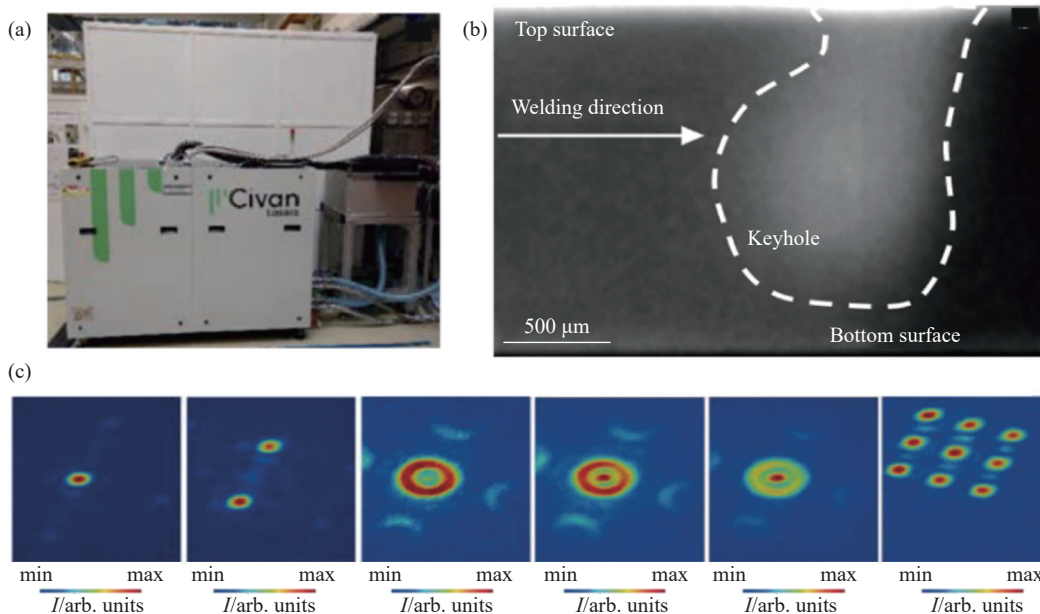


图 11 (a) IFSW 的装置; (b) 激光焊接过程中匙孔的 X 射线图像; (c) 不同焊接图样的强度模式变化^[61]

Fig.11 (a) Settings of the IFSW; (b) X-ray images of keyholes during laser welding; (c) Changes of intensity mode patterns of different welding patterns^[61]

对于一些特殊的加工类型,特殊结构光束可提供更加多样化的激光加工路径。通过调控光纤激光相控阵各单元光束的振幅、相位、偏振态等参数,可得到不同类型的结构光场,典型的结构光束主要有涡旋光束、艾里光束、贝塞尔光束和矢量光束等。利用线/面形光场可以进行整体加工,减小飞溅物的产生;无衍射光束和涡旋光束可实现特殊结构的快速加工,如微管道和微孔的加工,尤其是贝塞尔光束得到了较为广泛的应用,可进一步提升加工的灵活性。特殊光束生成可以在通信、传感、光学微操作、可伸缩激光光刻、光学相干断层扫描和量子通信领域均有应用价值^[62-64]。

3.2 目标跟踪

在天文、成像、导航等领域,目标捕获、跟踪、瞄

准的实现至关重要,同时这就要求系统具有快速灵敏的扫描能力。由于大气湍流将带来随机相位扰动,极易影响相干合成的稳定性以及合成效率,因此,要想实现目标的精确跟踪,则需要对大气湍流造成的远场光束相位畸变进行校正控制。目标在回路(Target-in-the-Loop, TIL)技术是一种无需波前探测的大气传输补偿自适应光学技术,有助于精确控制相干合成系统的活塞和倾斜相位,从而提升相干合成系统的连续扫描能力。

自 20 世纪 70 年代开始,休斯实验室便着手开始研究相干光自适应技术 (Coherent Optical Adaptive Techniques, COAT),光纤激光相控阵技术首先被应用于大气湍流的补偿^[65];2011 年,戴顿大学与陆军实验室共同完成了 7 km TIL 的激光相干合成,实现了 7 路

激光束相干合成的突破,在大气湍流效应下依旧可以保持良好的工作性能^[66]。2016年,戴顿大学利用TIL技术又完成了21路光纤激光室外7 km抗大气湍流传输和自适应光学校准^[67]。

2019年,国内国防科技大学研究团队通过主动倾斜相位控制和活塞相位控制,成功实现了大气湍流条件下0.8 km传输距离的6路光纤激光TIL相干合成实验,并首次将该技术拓展至大气参数表征及空心光

束产生等新领域^[68]。2021年2月,中国科学院光电技术研究所将AFOC组成19孔径密排发射阵列,经2 km湍流传输实现TIL相干合成,且全程闭环控制像差锁相校正和倾斜校正^[69]。次年3月,该单位又公开报道了如图12所示的57孔径光纤激光相控阵的TIL相干合成系统,满足更强湍流和更多孔径的TIL相干合成^[70]。

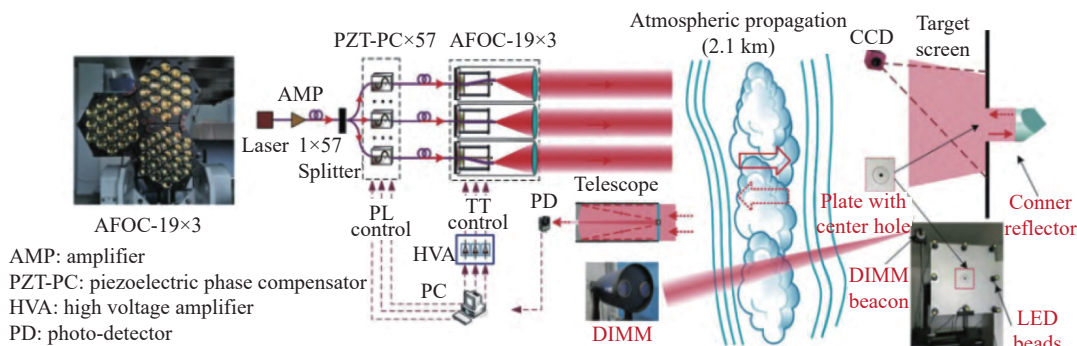


图 12 57 孔径的目标在回路相干合成实验装置示意图^[69]

Fig.12 Schematic diagram of 57 apertures coherent beam combining system by TIL^[69]

4 思考与展望

相干合成技术在高功率激光输出、自由光通信、国防安全和激光加工等领域具有广阔的发展潜力,以相干合成技术为基础的光纤激光相控阵技术有望在光束扫描领域焕发出新的活力,且仍有极大的发展空间。光纤激光相控阵的未来发展方向主要为:一是实现高功率、可定制化的扫描功能。凭借大阵元、高功率的特点,通过阵列的随机组合拓展光束扫描功能,而且通过能量分配提高利用效率,这在实际应用中可极大提升光束扫描的作用范围和有效距离。二是提升大视场、高精度的全域全细节的扫描性能。利用相干合成现有的成熟技术,大范围、高速、高精度以及高偏转效率的特点将以系统形式整体呈现,且突破机械式扫描方式的限制,以更加轻量化的器件实现光束扫描成为主要发展趋势。三是加强复杂环境下扫描技术的抗干扰能力。具备兼容其他激光系统的多种开发端口,在激光加工、自由空间光通信和目标跟踪领域发展迅速。尽管激光相干合成技术已经在性能指标上取得了实质性的进步,但是这种利用阵列光场的动态扫描技术距离大规模应用还面临一些挑战。

参考文献:

- [1] Geng Chao, Li Feng, Huang Guan, et al. Research progress of laser phased array technique based on fiber adaptive manipulation (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103003. (in Chinese)
- [2] Hu Jie, Du Shengping, Guo Hongyang, et al. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110002. (in Chinese)
- [3] 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(4): 0401003. (in Chinese)
- [4] Dehainaut C, Duneman D, Dymale R, et al. Wide field performance of a phased array telescope [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(3): 876-880.
- [5] Wang Youmin, Zhou Guangya, Zhang Xiaosheng, et al. 2D broadband beamsteering with large-scale MEMS optical phased array [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 557-562.
- [6] Jin Yadong, Yan Aimin, Hu Zhijuan, et al. Research progress of optical waveguide phased array scanner [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 080002. (in Chinese)
- [7] Sun Jie, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale

- nanophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195-199.
- [8] Ma Yanxing, Wu Jian, Su Rongtao, et al. Review of optical phased array techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20201042. (in Chinese)
- [9] Hosseini A, Kwong D, Zhao Y, et al. Unequally spaced waveguide arrays for silicon nanomembrane-based efficient large angle optical beam steering [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(5): 1439-1446.
- [10] Heck M J R, Bauters J F, Davenport M L, et al. Hybrid silicon photonic integrated circuit technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 96100117.
- [11] Wang Xiangru, Zhou Zhuangqi. Research progress of liquid crystal optical phased array in high power laser applications (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103006. (in Chinese)
- [12] Eyal S, Yaniv V, Benayahu U. 16 kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing [C]//Proc of SPIE, 2020, 11260: 1126021.
- [13] Tang Mingyuan, Cao Jie, Hao Qun, et al. Wide range retina-like scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106885.
- [14] Wu Yunhan, Shao Shuai, Li Yixuan, et al. Multi-beam optical phase array for long-range LiDAR and free-space data communication [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108027.
- [15] Poulton C V, Byrd M J, Russo P, et al. Long-range LiDAR and free-space data communication with high-performance optical phased arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5): 1-8.
- [16] 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.
- [17] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3121-3123.
- [18] 吴坚, 马阎星, 马鹏飞, 等. 光纤激光相干合成20 kW级高功率输出[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(9): 20210621.
- [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] Xi Jiachao, Chang Hongxiang, Su Rongtao, et al. Efficient phase-locking of a tiled fiber array of 37 fiber lasers using SPGD [C]//Proc of SPIE, 2019, 11046: 1104632.
- [21] Chang Hongxiang, Xi Jiachao, Su Rongtao, et al. Efficient phase-locking of 60 fiber lasers by stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(10): 101403.
- [22] 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.
- [23] Chang Qi, Hou Tianyue, Long Jinhu, et al. Experimental phase stabilization of a 397-channel laser beam array via image processing in dynamic noise environment [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(19): 6542-6547.
- [24] 常琦, 高志强, 邓宇, 等. 强噪声下光纤激光相干合成突破千路[J]. *中国激光*, 2023, 50(6): 0616001.
- [25] Mikhail V. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wavefront control concept [C]//Proc of SPIE, 2005, 5895: 589501.
- [26] Heck M J R. Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(1): 93-107.
- [27] 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.
- [28] Goodno G D, Asman C P, Anderegg J, et al. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 460-472.
- [29] Antier M, Bourderionnet J, Larat C, et al. kHz closed loop interferometric technique for coherent fiber beam combining [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 182-187.
- [30] 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(4): 13-19.
- [31] Zommer S, Ribak E N, Lipson S G, et al. Simulated annealing in ocular adaptive optics [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(7): 939-941.
- [32] Chen Jianming, Jia Yifang. Improvement and optimization method of grating lobes of optical phased array [J]. *Electronics Optics & Control*, 2020, 27: 107-110. (in Chinese)
- [33] Xiao Feng, Kong Lingjiang, Chen Jian. Beam-steering efficiency optimization method based on a rapid-search algorithm for liquid crystal optical phased array [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16):

- 4585-4590.
- [34] Huang Zhiwei, Wang Chunyang, Peng Lihua, et al. Beam optimization of liquid crystal optical phased array based on bat algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082303. (in Chinese)
- [35] Geng Chao, Luo Wen, Tan Yi, 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.
- [36] Hou Tianyue, An Yi, Chang Qi, et al. Deep-learning-assisted, two-stage phase control method for high-power mode-programmable orbital angular momentum beam generation [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 715-722.
- [37] Zuo Jing, Jia Haolong, Geng Chao, et al. Deep learning piston aberration control of fiber laser phased array by spiral phase modulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(12): 3980-3991.
- [38] Romer G R B E, Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 29-39.
- [39] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 613-616.
- [40] Wang Xiaobin, Liu Chunbo, Cao Yang, et al. High-precision two-dimensional beam steering with a 64-element optical fiber phased array [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(31): 10002-10008.
- [41] Geng Chao, Li Xinyang, Zhang Xiaojun, et al. Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5531-5536.
- [42] Yang Xu, Huang Guan, Li Feng, et al. Continuous tracking and pointing of coherent beam combining system via target-in-the-loop concept [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(20): 1119-1122.
- [43] Yang Xu, Geng Chao, Li Feng, et al. High-resolution beam scanning technique with microlens array and adaptive fiber-optics collimator [J]. *Optics Express*, 2021, 29(1): 359-367.
- [44] Ma Yanxing, Luo Gen, He Shuyue, et al. Cantilevered adaptive fiber-optics collimator based on piezoelectric bimorph actuators [J]. *Applied Optics*, 2022, 61: 3195-3200.
- [45] Zhou Xin, Zou Fan, Jiang Jiali, et al. Research on beam steering of numerous subaperture fiber laser phased array [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(7): 31-44. (in Chinese)
- [46] Yang X. Laser beam scanning technique for optical phased arrays[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [47] Wang Xiaobin, Liu Chunbo, Liu Ruyuan, et al. High-speed multibeam steering of one-dimensional optical fiber phased array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1705001. (in Chinese)
- [48] Horie Y, Arbabi A, Arbabi E, et al. High-speed, phase-dominant spatial light modulation with silicon-based active resonant antennas [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1711-1717.
- [49] Hamann S, Ceballos A, Landry J, et al. High-speed random access optical scanning using a linear MEMS phased array [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5455-5458.
- [50] 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.
- [51] Kang G, Kim S H, You J B, et al. Silicon-based optical phased array using electro-optic p-i-n phase shifters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(21): 1685-1688.
- [52] Huang W R, Montoya J, Kansky J E, et al. High speed, high power one-dimensional beam steering from a 6-element optical phased array [J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17311-17318.
- [53] Zhao Bin, Zhao Changming, Yang Suhui, et al. Performances analysis of optical phased array scanning based on blazed phase grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 341-346. (in Chinese)
- [54] Steinberg B D. Principles of Aperture and Array System Design [M]. New York: Wiley, 1976.
- [55] Dou Xian'an, Sun Xiaoquan, Cheng Yubao. Research on the design method of thinned optical phased arrays [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(2): 94-97. (in Chinese)
- [56] Yin S, Kim J H, Wu Fei, et al. Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam steering using unequally spaced phased array technique [J]. *Optics Communications*, 2007, 270(1): 41-46.
- [57] Ci Mingru, Liu Jingjiao, Han Long, et al. Optimization method for array element distribution of fiber laser phased array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0706007. (in Chinese)
- [58] Zhang S S. Phased weighted method to eliminate grating-lobes of optical phased array [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [59] Asaf Nissenbaum, Nina Armon, Eyal Shekel. Dynamic beam lasers based on coherent beam combining [C]//Proc of SPIE, 2022, 11981: 119810B.
- [60] Wanger J, Leis A, Armon N, et al. Coherent beam combining – unlimited flexibility in laser material processing [J]. *Photonics Views*, 2022, 19(3): 60-63.
- [61] Abt F, Boley M, Weber R, et al. Novel X-ray system for in-situ diagnostics of laser based processes – first experimental results

- [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 761-770.
- [62] Notaros J, Poulton C V, Raval M, et al. Near-field-focusing integrated optical phased arrays [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5912-5920.
- [63] Notaros J, Poulton C V, Byrd M J, et al. Integrated optical phased arrays for quasi-Bessel-beam generation [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3510-3513.
- [64] Sun Jie, Moresco M, Leake G, et al. Generating and identifying optical orbital angular momentum with silicon photonic circuits [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5977-5980.
- [65] Bridges W, Nussmeier T, Meara T O, et al. Coherent optical adaptive techniques [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, 9(6): 670-671.
- [66] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4455-4457.
- [67] 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.
- [68] Zhi Dong, Ma Yanxing, Ma Pengfei, et al. Efficient coherent beam combining of fiber laser array through km-scale turbulent atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1005007. (in Chinese)
- [69] 李枫, 左竞, 黄冠, 等. 19孔径光纤阵列激光经2 km湍流传输实现目标在回路的相干合成[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0316002.
- [70] 李枫, 邹凡, 姜佳丽, 等. 57孔径光纤激光相控阵自适应光学系统实现经2 km大气传输的目标在回路相干合成[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0616002.

Recent progress in beam steering by fiber laser phased arrays

Shu Bowang¹, Zhang Yuqiu¹, Chang Hongxiang¹, Chang Qi¹,
Leng Jinyong^{1,2,3}, Ma Pengfei^{1,2,3}, Zhou Pu^{1*}

(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, Changsha 410073, China)

Abstract:

Significance Fiber laser phased arrays have been applied in multiple regions, such as adaptive correction of wavefront phase distortion, dynamic beam steering technology, laser coherent beam combination and remote detection imaging, etc.. Among them, great progress has been achieved in dynamic beam steering owing to its tiling structures, organizable sub-apertures and available high power laser of laser coherent beam combination, which means it could be beneficial for flexible deflection, fast implementation of access addressing long-distance transmission. To further improve the performances of the whole scanning system and spatial scanning characteristics, this review discussed effective strategies provided by laser optical phased arrays, such as accurate regulation of array units, diverse array designs, flexible and free phase controlling methods, constant update of phase controlling algorithm and broad coverage of spectrum. These related advantages promote the development towards the direction of non-mechanical, large-angle, high precision and strong anti-interference.

Progress With the development of coherent beam combination, high power and more channels of system could be available in practice. Owing to these outstanding results, more possibility could be realized in dynamic beam steering, which was recognized to be an important application based on coherent beam combination. Since 2005, DARPA have tried to break through limitation of scanning speed with purely electronic-controlled laser phased arrays, which is caused by disadvantages of mechanical scanning device. In the same year, they put forward 'APPLE' system configured by distributed sub-apertures, which could be used for adaptive wavefront

compensation and adaptive phase-locking controlled by stochastic parallel gradient descent algorithm (Fig.1). This novel structure provides strategies for flexible, non-mechanical and fast addressing beam steering. In 2013, DARPA kept on carrying out the project of SWEEPER, which aimed to realize 10 W laser scanning within a wide field of view up to 45 degrees. Recently, Civan Lasers develop multiple dynamic beam laser solutions to output power controlling, beam shaping and light field pattern customization (Fig.2). Moreover, their products could be applied in cutting, welding, metal additive manufacturing and drilling, such as OPA 6 laser and OPA 12 laser. It is worth noting that these device could work at high power.

Interiorly, Xidian university have developed multiple beam steering system for realizing fast beam deflection with LiNbO_3 phase shifters in 2021. Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences have achieved great progress in continuous beam steering with the combination of piezoceramics phase-modulators and adaptive fiber optical collimators in the same year (Fig.9). To further judge the effects of beam steering, some indexes have been given including scanning precision, range, speed, energy concentration and effect of sidelobes. Although the works were still limited in dynamic beam steering based on coherent beam combination, it showed potential in large scientific devices with high power, expanding functions and large array integration.

Conclusions and Prospects Coherent beam combination possess great potential in information transmission, defense security, laser processing and material technology, etc.. There is still wide space in developing dynamic beam steering based on fiber laser phased arrays. Firstly, the dynamic instantaneous tracking scanning is hopefully realized by such platforms with large array areas and relatively high power. Secondly, scanning ability should be focused on wide field of view, high precision, large active range to achieve the sufficient details in the full region. Lastly, more light-weight device is required to be adaptive in all kinds of environment. Although great progress has been made in multiple indexes of coherent beam combination, large-scale application is still a challenge in dynamic beam steering.

Key words: fiber laser phased array; coherent beam combining; non-mechanical scanning;
laser processing

Funding projects: National Key Research and Development Project (2022YFB3606000)