

光学相控阵技术发展概述

马阎星, 吴 坚, 粟荣涛, 马鹏飞, 周 朴, 许晓军, 赵伊君

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 截至目前, 光学相控阵技术已经发展了 70 多年, 针对不同的应用方向, 发展出了液晶、MEMS、光波导、相干合成等多种器件和技术方案, 在激光雷达、空间光通信、高亮度激光产生、合成孔径探测等应用领域获得了初步应用。光学相控阵技术通过对光束阵列中单元光束相位的控制, 从而实现阵列光束等相面的重构或精密调控, 具有系统体积质量小、响应速度快、光束质量好等优点。首先介绍了光学相控阵的工作原理, 然后从激光发射和远距离成像两方面对几种主流相控阵技术的发展现状、应用方向及发展趋势进行了综述, 最后给出了笔者的一些思考与建议。

关键词: 光学相控阵; 液晶; MEMS; 相干合成; 目标在回路; 自适应光学
中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201042

Review of optical phased array techniques

Ma Yanxing, Wu Jian, Su Rongtao, Ma Pengfei, Zhou Pu, Xu Xiaojun, Zhao Yijun

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Up to now, optical phased array (OPA) technology has been developed for more than 70 years. According to different applications, a variety of devices and techniques have been developed, such as liquid crystal, MEMS, optical waveguide, coherent beam combination and so on. Optical phased array technology has been applied in laser radar, space optical communication, high brightness laser generation, synthetic aperture detection and other application fields. By controlling the phase of sub-beam in the beam array, the phase plane of the array beam can be reconstructed and accurately controlled with the optical phased array technology, which has the advantages of small volume and weight, fast response speed and good beam quality. In this paper, the principle of optical phased array was firstly introduced. Secondly, the development status, application areas and development trend of several main techniques were reviewed from two aspects of laser emission and long-distance imaging. Finally, some thoughts and suggestions were given.

Key words: optical phased array; liquid crystal; MEMS; coherent beam combination; target in-the-loop; adaptive optics

收稿日期: 2020-07-10; 修订日期: 2020-08-16

作者简介: 马阎星 (1985-), 男, 副研究员, 主要从事光纤激光及其相干合成方面的研究。Email: xm_wisdom@163.com

0 引言

相控阵天线的概念最早出现在微波领域,早在 20 世纪 30 年代就已提出,并建立了完整的数学理论^[1]。二次世界大战初期,美国海军研制成功的第一部相控阵天线 FHMUSA^[2],工作频率为 S 波段,由 42 个辐射元组成,排列成 3 行 14 列,移相器采用机械控制方式。到 20 世纪 60 年代就研制出 AN/FPS-46、AN/FPS-85、MAR、MSR 等多部大型相控阵雷达。光波和微波都是电磁波,具有相似的传播特性,但是由于光波波长较短,相位控制困难,直到 20 世纪 60 年代,光学相控阵的相关研究才取得了一些进展^[3-6]。

回顾历史,在理论研究方面,光学相控阵最初主要集中在单光束或阵列光束的夫琅禾夫衍射和非涅尔衍射的计算和仿真方面^[3-4];在实验方面,相控阵技术首先被应用到了自适应光学领域,用以补偿大气湍流造成的探测图像或发射光束的相位畸变^[5-7],实际上是自适应光学领域中一种特殊的波前控制技术。业界普遍认为 1953 年 Babcock, H. W. 撰写的论文“The possibility of compensating astronomical seeing”是关于自适应光学应用的最早文献,之后自适应光学技术进入了一个快速发展期,光学相控阵技术也是在这一段时期内被最先应用到了自适应光学中。之后,随着半导体激光器、光纤激光器、微机电、材料等相关技术的发展,光学相控阵技术也获得了长足发展,成为激光雷达、空间光通信、高亮度激光产生、合成孔径探测等领域的研究热点。

1 光学相控阵基本原理

在《物理学词典》中,相控阵定义为相位补偿(或延时补偿)基阵^[8],它既可用以接收,也可用以发射。其工作原理是对按一定规律排列的基阵阵元的信号均加以适当的移相(或延时)以获得阵波束的偏转。按照上述定义,光学相控阵技术既包括用于光束发射阵列的光束大角度偏转技术,也包括用于远距离目标高分辨率成像的阵列望远镜干涉成像技术,下面进行分别介绍。

从发射角度来讲,光学相控阵是对阵列发射光束的相位进行控制,从而实现阵列光束整体偏转或者相位误差补偿。光学相控阵的基本原理如图 1 所示,其

中图 (a) 是非相干合成阵列,即只有“阵”,没有“相控”的情况;图 (b)~(d) 是光学相控阵(即相干合成阵列)的三种不同工作状态。非相干合成系统只是将阵列光束进行简单的功率叠加,不对阵列光束的相位进行控制,其光源可以是多台波长不同的激光器,远场光斑尺寸由发射阵列单元的尺寸决定,与阵元数量、阵列等效口径和光束阵列占空比无关,不能算作真正意义上的相控阵。但是非相干合成系统结构简单、对光源性能要求低、输出功率高,已经获得大量应用。

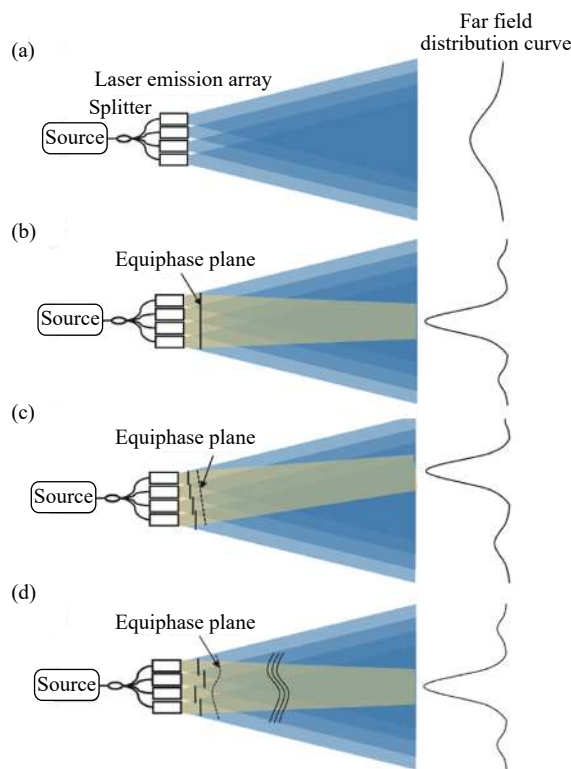


图 1 光学相控阵技术在光束发射中的应用原理图

Fig.1 Schematic of the optical phased array technology in beam launch

光学相控阵要求所有阵元输出的激光均来自于同一单频或窄线宽种子源激光器(如图 1(c)~(d)所示),偏振状态相同,彼此之间能够实现良好干涉。系统一般由光源、分束器、相位控制器件和光束发射阵列组成,采用相位控制器件对所有阵元光束进行精确的相位控制,从而构建出所需的阵列光束等相面,使得阵列光束满足应用需求。当所有阵元光束的相位差为 0,即相位面位于同一平面时,阵列光束将在远场实现相长干涉,其能量集中于干涉图样的中央主瓣内(如图 1(b)所示)。理论上中央主瓣的峰值光强是单元

光束峰值光强的 N^2 倍 (N 为阵元数量), 是非相干合成远场光斑峰值光强的 N 倍, 远场光斑尺寸小于非相干合成, 由光束阵列的等效口径决定, 阵列光束的占空比直接影响远场光斑中央主瓣能量, 占空比越高, 中央主瓣能量占比越高。当各阵元间的相位相差一固定值时, 阵列光束的等相位面将会倾斜, 从而引起光束偏转, 如图 1(c) 所示。当相控阵在大气中传输时, 还可通过构建与大气湍流引起像差共轭的等相位面, 实现对大气湍流的补偿, 达到自适应光学的目的, 如图 1(d) 所示。

从接收角度来讲, 光学相控阵应用在远距离目标高分辨率成像中^[9], 原理如图 2 所示, 由望远镜阵列、相位延迟器阵列、光束组合器和成像器件组成, 目标发出的光传输到望远镜阵列, 之后相位延迟器可将各路光束的相位差补偿为 0, 经光束组合器后进行干涉, 获得目标源的复相干度, 根据范西特-泽尼克定理计算出目标图像, 该技术被称为干涉成像技术, 是合成孔径成像技术中的一种。从系统结构来看, 干涉成像系统和相控阵发射系统的结构基本相同, 只是两种应用情况中的光路传输方向相反。

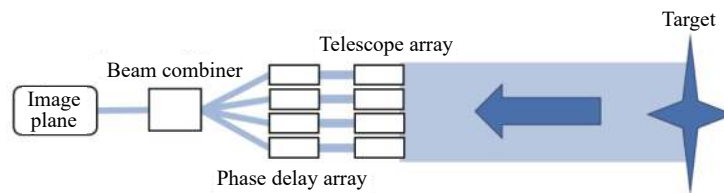


图 2 光学相控阵技术在远距离高分辨率成像中的应用原理图

Fig.2 Schematic of optical phased array technology in long-distance high-resolution imaging

2 光学相控阵技术在激光发射领域的应用

光学相控阵技术在激光发射方面也有多种不同的应用场景, 主要包括: 补偿大气湍流、光束大角度偏转和构建高亮度光源。

2.1 补偿大气湍流

20 世纪 70 年代, 美国休斯实验室 (Hughes Research Laboratory) 首先将阵列光束相位控制技术应用到了大气湍流补偿实验中, 称之为相干光自适应技术 (coherent optical adaptive techniques, COAT)^[7]。该技术的基本思路如图 3 所示, 一个理想的光学锁相阵列 (optical phased array) 可以通过设置合适的相位分布实现远距离聚焦发射, 在远场目标处获得理想的光斑分布, 如图 3(a) 所示。然而, 由于大气的存在, 大气湍流将会破坏发射阵列光束的相位分布情况, 导致远距离目标上光斑发散, 如图 3(b) 所示。如果能够实时探测到大气湍流引起的相位变化情况, 通过阵列移相器进行补偿校正, 那么就可实现通过大气后的良好聚焦, 如图 3(c) 所示。

射端设置目标反射光接收装置 (PM), PM 根据探测到的反射光可实时解算出大气湍流引起的相位畸变, 然后通过伺服系统将其补偿到具有移相器的一路光束中, 从而实现目标处的稳定干涉。7 路 COAT 实验中的实验装置及光路原理如图 5 所示。

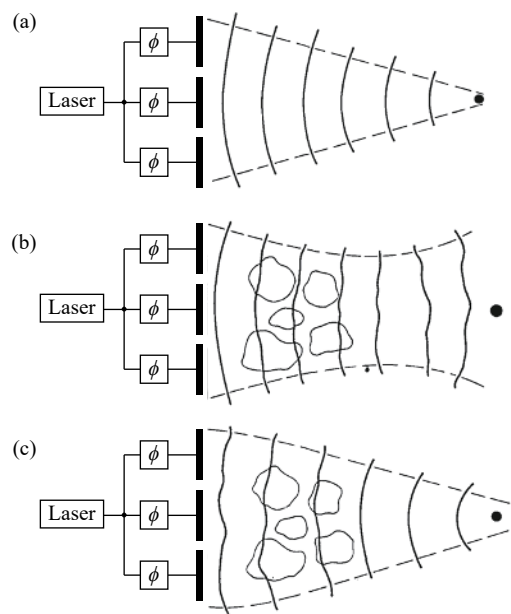


图 3 COAT 技术原理图

Fig.3 Schematic of COAT technology

在上述基本思路的指导下, 休斯实验室开展了 7 路光束 COAT 实验, 实验原理如图 4 所示 (图中以两路光束示意)。激光器输出激光分为两路, 一路直接发射到目标, 另一路经过移相器后发射到目标。发

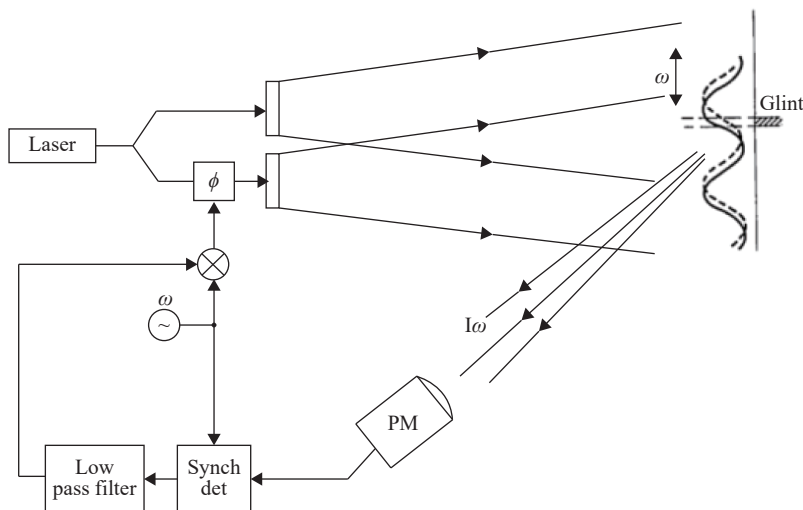
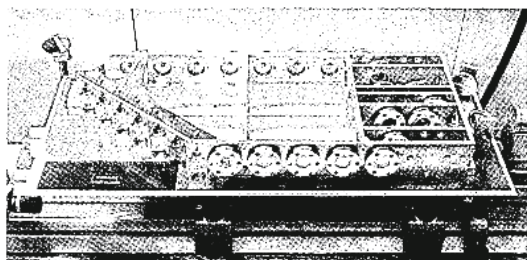


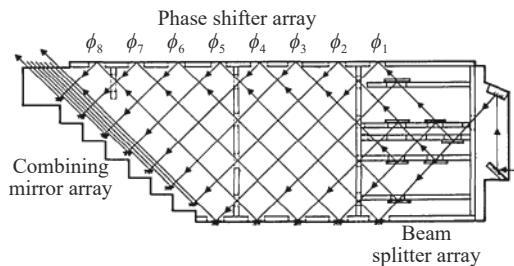
图 4 两路 COAT 实验系统原理图

Fig.4 Schematic drawing of a two-element dithered COAT system



(a) 实物图

(a) Photograph of experimental setup



(b) 实验光路图

(b) Schematic drawing showing optical paths

图 5 7 路 COAT 实验装置图

Fig.5 Seven-element COAT experiment setup

实验结果如图 6 所示, COAT 系统闭环后, 远场光斑的干涉条纹对比度明显增加, 说明 COAT 技术对大气湍流引起的相位畸变进行了有效补偿。

受到当时技术条件限制, COAT 技术在后期并没有得到良好发展。进入 21 世纪后, 随着光纤激光相干合成技术的发展, 阵列光束在大气传输过程中的相位畸变实时补偿技术再次获得重视。2005 年, 美国陆军实验室 Mikhail Vorontsov 提出了 APPLE (adaptive

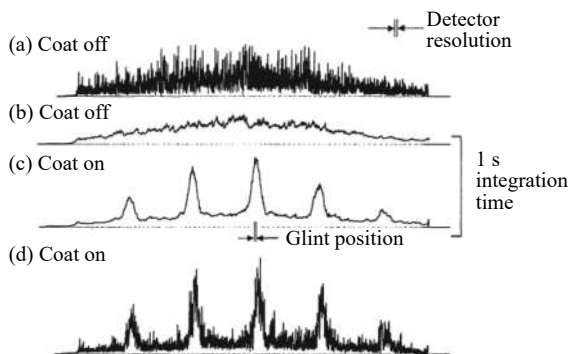


图 6 7 路光束 COAT 实验结果

Fig.6 Experiment results of the 7 beams COAT

photonics phase-locked elements) 概念^[10], 旨在通过可进行相位锁定的小口径阵列光束发射系统替代传统的单一一大口径发射系统及其自适应光学系统。参考文献 [10] 对传统单口径激光发射系统和 APPLE 系统进行了深入比较, 认为后者在体积、质量、成本和性能等方面均具有明显优势。

APPLE 系统的结构如图 7 所示, 主要由可锁相的自适应光学望远镜阵列和万向架系统两部分组成, 万向架系统用于实现光束阵列的大角度偏转, 可锁相的自适应光学望远镜阵列用于实现阵列光束相位锁定、自适应光学波前校正、目标高精度跟踪等功能, 原理如图 8 所示。首先对预放大后的种子激光进行分束, 形成光束阵列, 分束后的各路激光分别经过移相器、高功率光纤放大器后进入各发射子孔径 (Applets), 之后发射到目标。图 8 中的桶中功率接收器 (Power-in-

the-bucket receiver) 用于接收目标的散射/反射回光并生成相应的评价函数输出给控制器 (Controller), 控制器据此生成相位控制信号加载到各路光束的移相器上, 最终实现阵列光束的相位锁定和大气湍流补偿。APPLE 概念的提出在当时引起了高能激光领域的巨大反响, 被认为是高功率激光相控阵的重要发展方向, 之后光纤激光相干合成技术成为研究热点, 国内外数十家单位开展了相关研究。

2011 年, 美国代顿大学和陆军实验室基于 7 路自适应光纤准直器阵列^[11], 实现了传输距离为 7 km 的目标在回路相干合成 (如图 9 所示), 达到预期效果。实验结果如图 10 所示, 当锁相系统闭环时, 远场光斑的桶中功率出现明显提高, 表明系统从种子源到目标间所有因素引起的相位误差均得到了有效校正。

随后, 代顿大学的研究团队将光束数量拓展到了 21 路^[12], 实验原理与 7 路基本相同, 开展了不同大气湍流情况下的目标在回路相干合成实验, 获得了良好效果, 远场光斑桶中功率提升 16 倍。

国内相关研究工作开展较少, 主要是国防科技大学和中国科学院光电技术研究所开展了相关研究工作。国防科技大学在国内首先开展了光纤激光目标在回路相干合成技术方面的研究, 于 2011 年开展了 2 路 10 W 级光纤激光目标在回路相干合成室内实验^[13], 2012 年将路数拓展至 9 路, 实现了总功率 100 W 的目标在回路相干合成实验, 传输距离为 10 m^[14]。2011 年中国科学院光电技术研究所开展了 3 路光纤激光目

标在回路相干合成室内实验^[15], 2013 年将合成数量拓展到 7 路, 传输距离为 5 m^[16]。经过数年攻关, 两家单位于 2018 年左右开展了室外更远距离的目标在回路相干合成实验, 中国科学院光电技术研究所实现了 7 路 200 m 远距离传输^[17], 在远场获得了稳定的干涉光斑; 国防科技大学实现了 6 路 800 m 远距离传输^[18], 远场光斑中央主瓣能量较开环时提升了 3 倍。

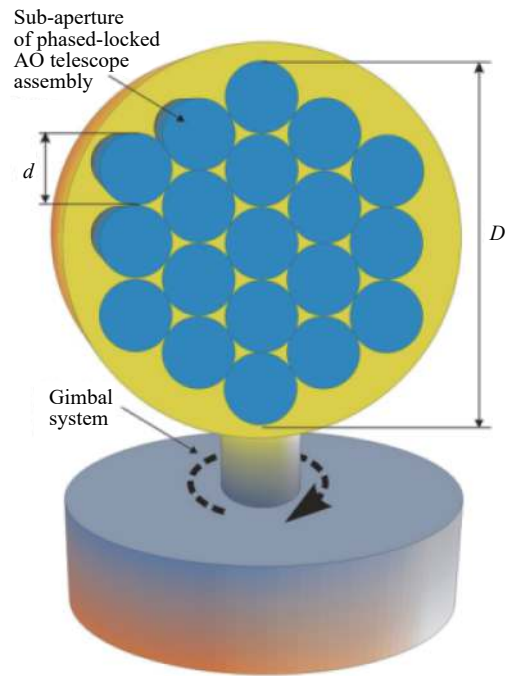


图 7 采用自适应锁相子孔径组成的大口径发射望远镜

Fig.7 Assembly of large-aperture transceiver telescope composed of adaptive phase-locked sub-apertures

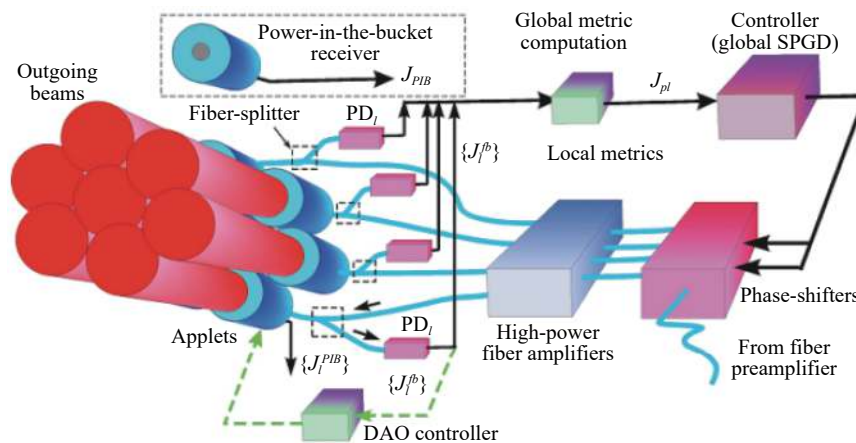


图 8 APPLE 系统中相位锁定和自适应光学补偿控制系统原理图

Fig.8 Schematic of phase locking and adaptive optical compensation control system in APPLE system

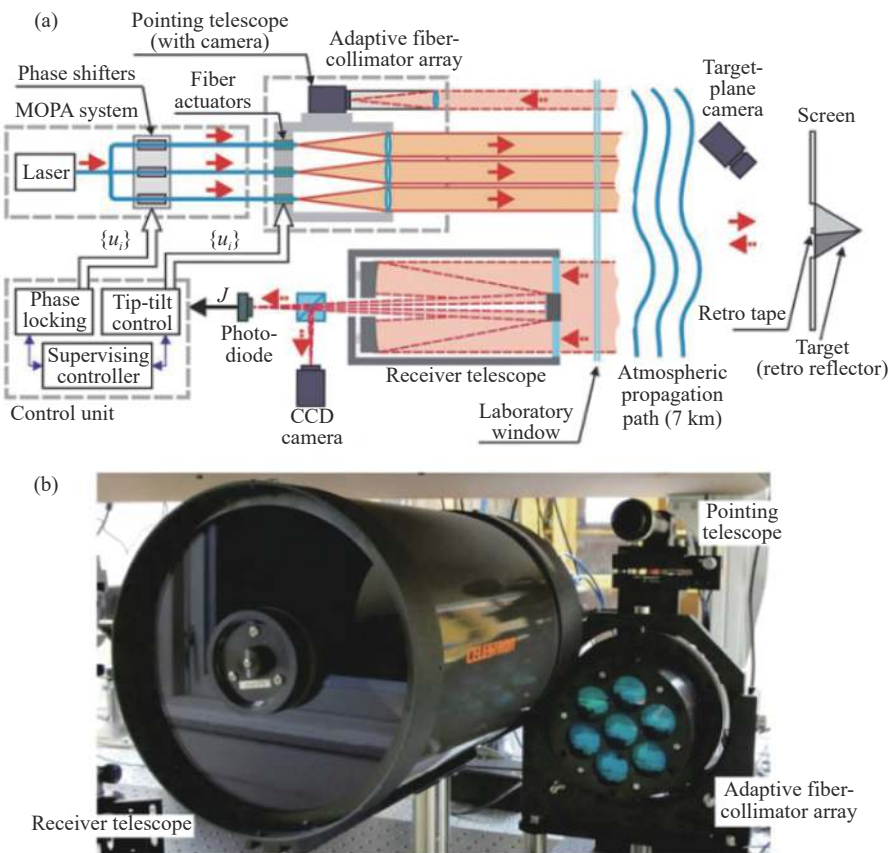


图 9 7 km 目标在回路相干合成的原理图与实物图

Fig.9 Schematic and photo of 7 km target-in-the-loop coherent beam combination

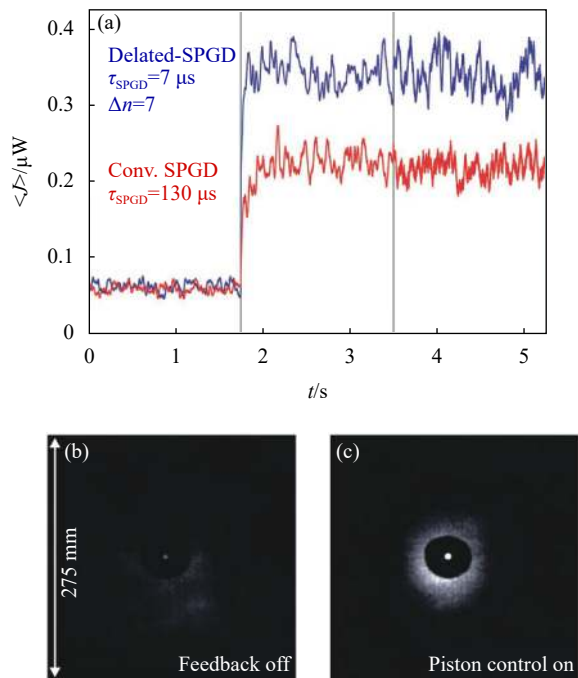


图 10 7 km 目标在回路相干合成的实验结果

Fig.10 Experimental results of 7 km target-in-the-loop coherent beam combination

2.2 光束大角度偏转

光学相控阵技术的另一个重要应用方向是光束的无机械大角度偏转。目前,可实现大角度偏转的光学相控阵技术主要是基于光波导、MEMS 结构或液晶的低功率小型器件,应用领域集中在激光雷达、图像投影、光学存储等近距应用场景中。在这一研究方向,业界普遍认为约翰·霍普金斯大学的 R. A. Meyer 在 1972 年首先采用钽酸锂晶体移相器实现了一维 46 通道光学相控阵,验证了光学相控阵技术的可行性^[6]。此后,人们将硅基光电子、MEMS 和液晶等先进技术引入到光学相控阵中,推动了这一领域的快速发展,下面对其典型成果进行介绍。

在硅基光子相控阵方面,2013 年,美国麻省理工学院的研究人员首先在硅基芯片上实现了 64×64 单元的大规模二维光学相控阵^[19],阵元尺寸为 $9 \mu m \times 9 \mu m$,发射激光波长为 $1.55 \mu m$,系统的结构原理如图 11 所示,其中图 (a) 为 64×64 光子相控阵原理结构图,图 (b) 和图 (c) 分别为阵列和阵元的扫描电镜图。基于这一

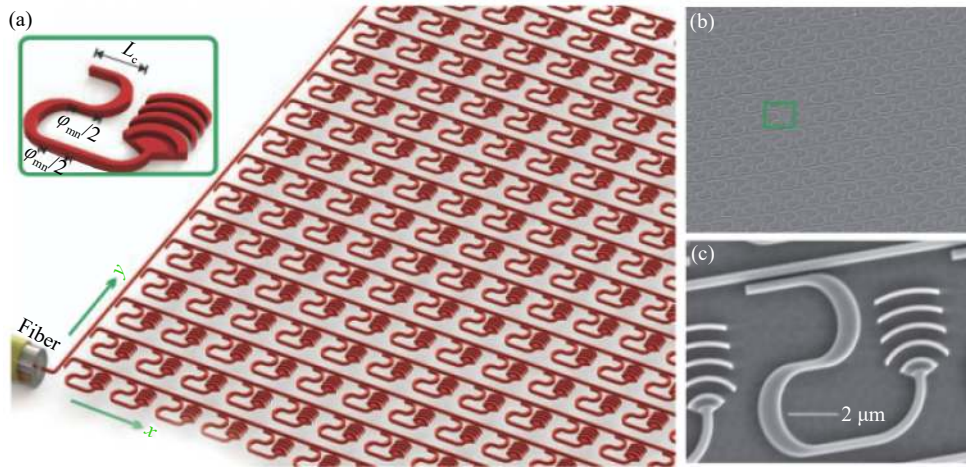


图 11 麻省理工学院 64×64 光子相控阵原理及实物图

Fig.11 Schematic and photo of MIT 64×64 photon phased array

器件开展了成像实验,在远场获得了预期的“MIT”标志图像(如图 12 所示),验证了大规模二维硅基光学相控阵的可行性,在光学相控阵研究发展历程中具有重要意义。2014 年,他们通过采用级联相移结构将光子相控阵的扫描角度拓展到 51°,扫描频率达到 100 kHz,是当时扫描角度最大的光学相控阵系统^[20]。

采用硅基微机电结构实现的光学相控阵最早可追述到 1977 年美国 IBM 实验室 K. E. Petersen 研制的 16 单元光学调制器阵列^[21]。当时正处于微机械技术的快速发展时期^[22],IBM 实验室研究人员采用集成电路制造技术在硅基芯片上制作出偏转角度大于 5°的薄膜,响应频率大于 40 kHz,研制成功的 16 单元光学调制阵列被应用在一个小显示系统中,获得了预期效果,如图 13 所示。之后这一技术得到了持续发展,1992 年斯坦福大学的 O. Solgaard 等人提出了一种新型的可变形光栅光学调制器,进一步提升了 MEMS 结构光学相控阵器件的响应带宽,降低了研制难度^[23]。2013 年,Byung-Wook Yoo 等人针对之前 MEMS 器件均采用薄膜反射技术难以承受高功率激光的问题^[24],提出采用高对比度亚波长光栅技术 (high-index-contrast subwavelength grating, HCG) 的光学相控阵技术,并制备了 8×8 的光学相控阵器件(如图 14 所示),对 1 550 nm 激光的反射率达到 99.9%,填充因子为 36%。2014 年,该课题组进一步提升了阵元数量和器件的填充因子,制备了 32×32 光学相控阵器件,填充因子达到 85%^[25]。2018 年,美国加利福尼亚

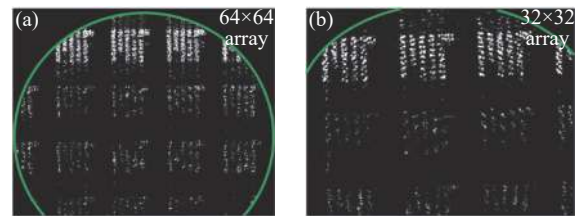


图 12 麻省理工学院 64×64 光子相控阵远场成像实验结果

Fig.12 Experimental results of MIT 64×64 photon phased array

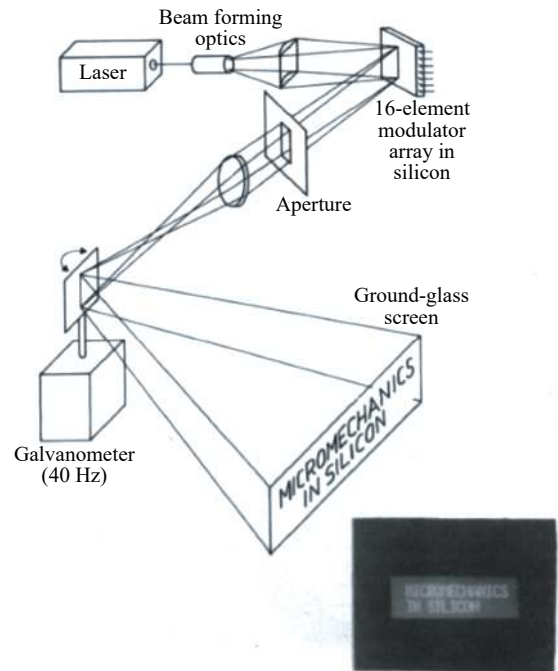


图 13 1977 年 IBM 实验室基于微机械结构研制的 16 单元光学调制器阵列在显示系统中的工作原理图

Fig.13 Schematic of the 16-unit optical modulator array developed by IBM Laboratory based on the micromechanical structure in the display system in 1977

大学 Youmin Wang 等人采用 MEMS 技术实现了 160×160 阵列光学相控阵^[26-27], 阵列尺寸为 3.1 mm×3.2 mm, 光束扫描视场为 6.6°×4.4°, 响应时间为 5.7 μs, 首次在同一块光学相控阵器件上同时实现了高光学效率、宽波长操作、快速响应时间和大偏转角度等多项功能, 实物如图 15 所示。

在液晶相控阵方面, 相关理论研究早在 20 世纪 30 年代以前就已开始, 由于无法获得透明电极, 实验研究开始较晚, 开始于 20 世纪 70 年代^[28-29], 是目前最成熟的光学相控阵技术^[24,30-32], 被广泛应用在显示、光束控制等领域。随着液晶器件研制技术的不断成熟, 开始走向高功率激光应用领域。2006 年, 美国 Rockwell Scientific 公司报道了高功率液晶空间光调制器^[32], 声称可以耐受千瓦级高功率激光的辐照, 将应用于高功率激光的波前调控领域, 测试现场如图 16 所示。液晶的耐受激光功率情况主要受限于透明电极在所用激光波段在的透过率^[33], 为此科研人员在电极材料、散热技术等方面开展了大量技术研究^[33-38], 目前液晶器件对连续激光的耐受功率密度可达数百瓦每平方厘米, 对脉冲激光的耐受功率密度

可达到数十焦耳每平方厘米。

在上述各种光学相控阵器件中, 液晶光学相控阵技术最为成熟, 应用最为广泛, 但是在耐受激光功率、光束偏转速度、大角度偏转效率等方面仍然存在不足^[24], 其他光学相控阵器件仍处在实验室阶段或初期应用阶段。

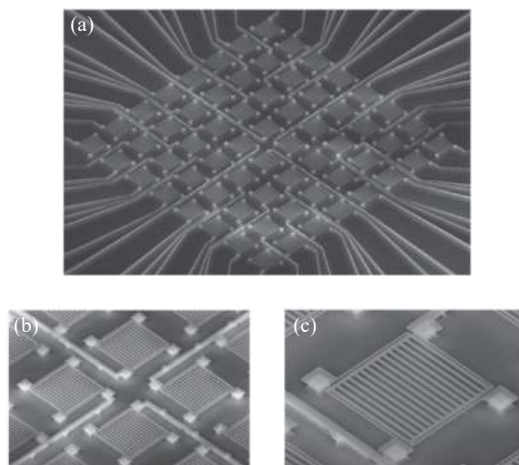


图 14 8×8 HCG MEMS 相控阵器件扫描电镜图

Fig.14 Scanning electron microscope images of 8×8 HCG MEMS phased array device

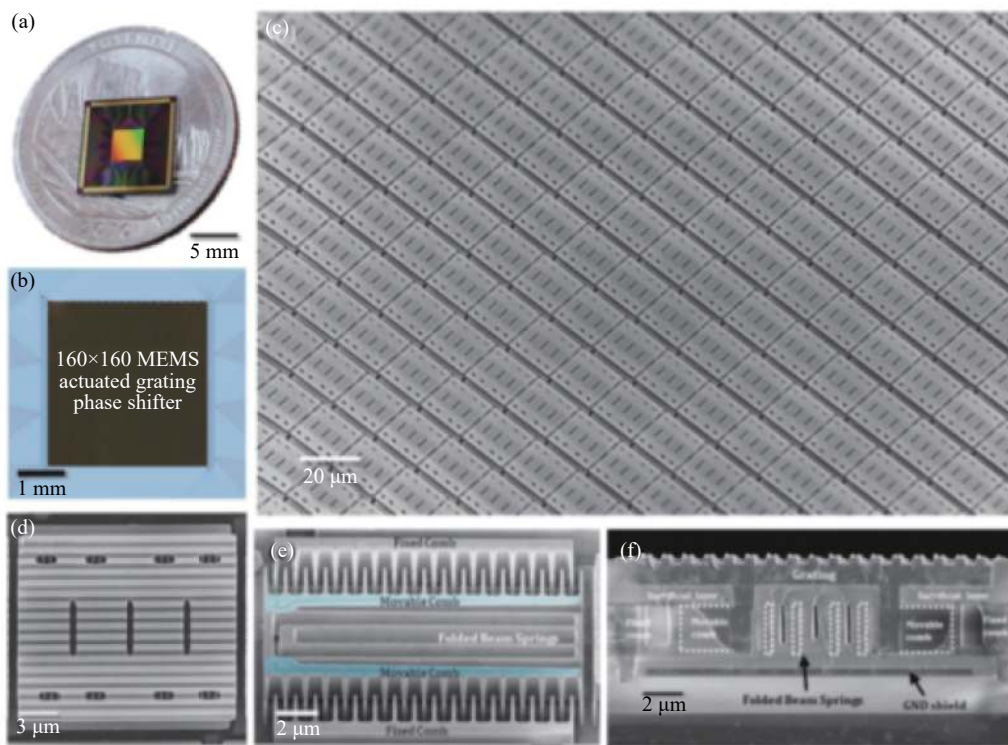


图 15 2018 年加州大学课题组制备的 160×160 MEMS 相控阵器件实物图

Fig.15 Photos of 160×160 MEMS phased array device prepared by the University of California research group in 2018

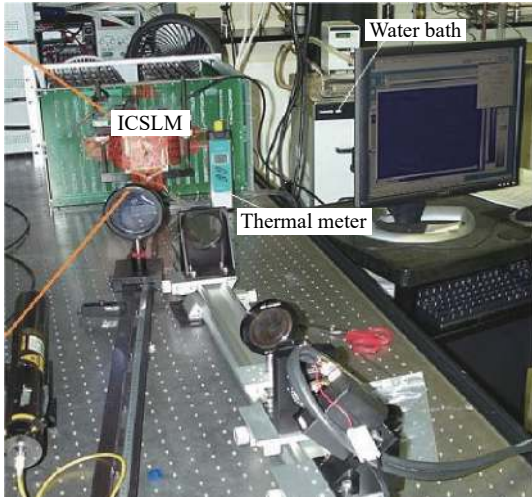


图 16 2006 年美国 Rockwell Scientific 公司研制的高功率液晶及测试现场

Fig.16 High-power LCD and test site developed by Rockwell Scientific in 2006

2.3 构建高亮度光源

光学相控阵在高功率激光方面的重要研究方向是构建高亮度光源，即激光相干合成技术。受到材料损伤阈值和各种物理效应限制，绝大部分激光器的输出激光亮度提升均存在一定瓶颈。为此，人们在激光器刚出现后不久就开展了相干合成技术研究。1964 年，美国 Bell 实验室就实现了两路氦氖激光的相干合成^[39-40]，随后人们对化学激光器、气体激光器、固体激光器、半导体激光器、染料激光器、光纤激光器等各种类型激光器均开展了相干合成技术研究^[41]。相

干合成的核心思想是通过精密控制阵列光束的波前相位，使其获得如同单路光束的光束质量和传输效果。相干合成技术可通过增加光束数量来实现输出功率的大幅提升，最终实现激光亮度的提升。

目前以光纤激光相干合成技术研究最为热门，下面进行重点介绍。光纤激光相干合成技术研究起步于 20 世纪初，2003 年美国诺格公司和麻省理工学院首先开展了光纤激光相干合成技术研究，分别实现了 4 路瓦级和 2 路十瓦级光纤激光相干合成^[42-43]。2005 年，美国陆军实验室 Mikhail Vorontsov 提出 APPLE 方案之后，高功率光纤激光领域掀起了相干合成技术研究的热潮，在锁相技术、合成阵元数量、输出功率等方面均取得了飞速发展。在合成阵元数量方面，2006 年，美国林肯实验室 C. X. Yu 等利用主动相位控制技术实现了 32 路光纤激光的相干合成^[44]。2011 年，法国 Thales 研究中心 Bourderionnet 等人实现了 64 路光纤激光的相干合成^[45]，锁相精度优于 $\lambda/10$ ，实验结构如图 17 所示。2015 年，在 DARPA 计划的支持下，美国林肯实验室实现了 101 路光纤激光的相干合成^[46]。2020 年，国内国防科技大学实现了 107 路光纤激光的相干合成^[47]，是当前这一领域的最大合成数量。

在合成功率方面，笔者所在的国防科技大学课题组于 2011 年首先将光纤激光相干合成的输出功率推向千瓦以上^[48]，采用 3×3 光纤激光阵列实现了 1.08 kW 的光纤激光相干合成，锁相精度优于 $\lambda/15$ ，实验原理

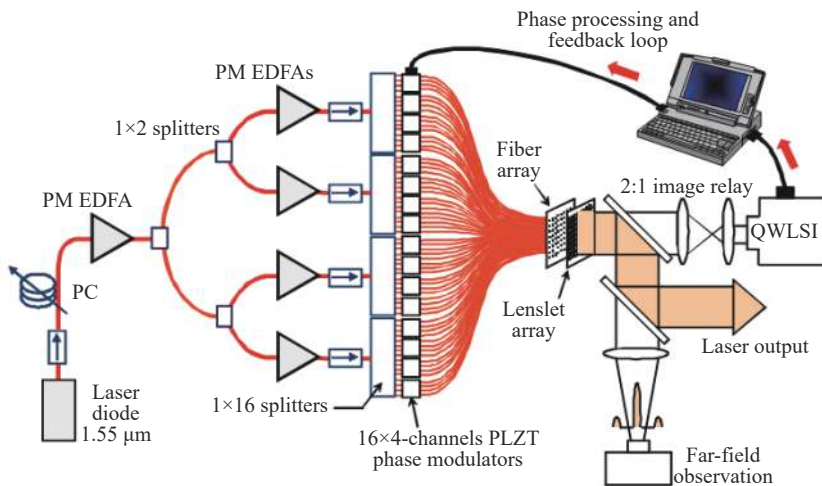


图 17 2011 年法国 Thales 实验室 64 路光纤激光相干合成实验结构

Fig.17 Schematic of 64-channel coherent beam combination of fiber lasers developed by Thales Research & Technology in 2011

如图 18 所示。随后,美国麻省理工学院采用 1 维排列的 8 路 500 W 光纤激光器实现了总功率 4 kW 的光纤激光相干合成^[49],原理如图 19 所示。2015 年,林肯实验室实现了 42 路高功率光纤激光的相干合成^[46],输出总功率达到 44 kW,光束质量近衍射极限,这是当前国际上最高的光纤激光相干合成功率。2019 年,国内国防科技大学联合中国科学院上海光学精密机

械研究所采用 7 路 1.2 kW 光纤激光器实现了总功率约 8 kW 的光纤激光相干合成^[50],是国内当前光纤激光相干合成的最高功率。此外,美国诺格公司于 2009 年以光纤激光作为前级、板条激光作为放大级,实现了 7 路万瓦级激光的相干合成^[51-52],输出功率达到 105.5 kW (如图 20 所示),是迄今为止最高功率的激光相干合成。

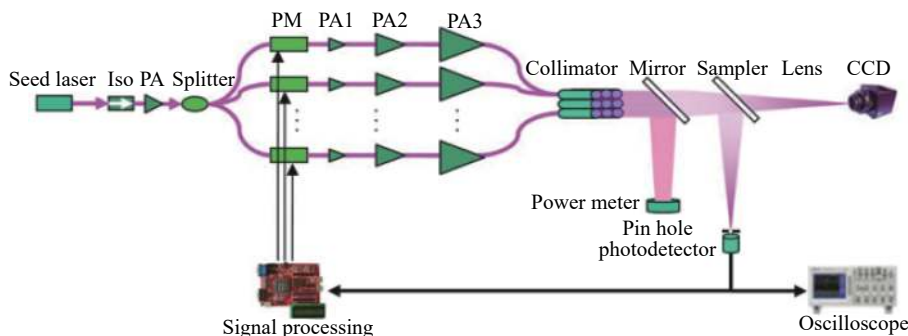


图 18 2011 年国防科技大学 1.08 kW 光纤激光相干合成原理图

Fig.18 Schematic of 1.08 kW coherent beam combination of fiber lasers developed by NUDT in 2011

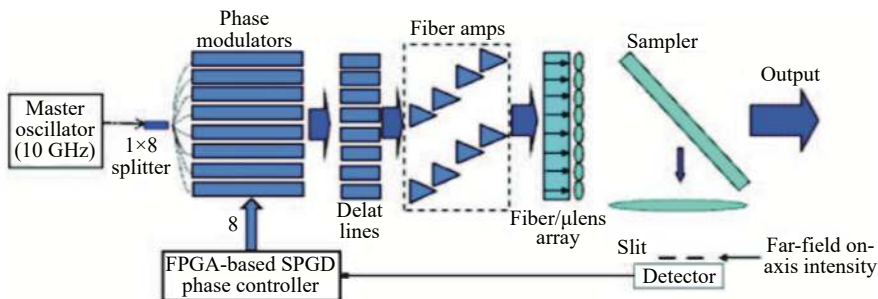
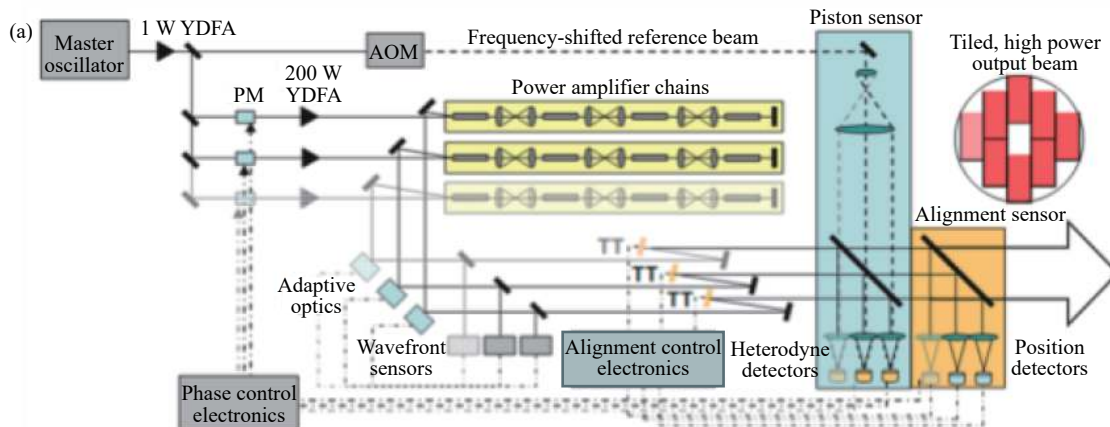


图 19 2011 年美国麻省理工学院 4 kW 光纤激光相干合成原理图

Fig.19 Schematic of 4 kW coherent beam combination of fiber lasers developed by MIT in 2011



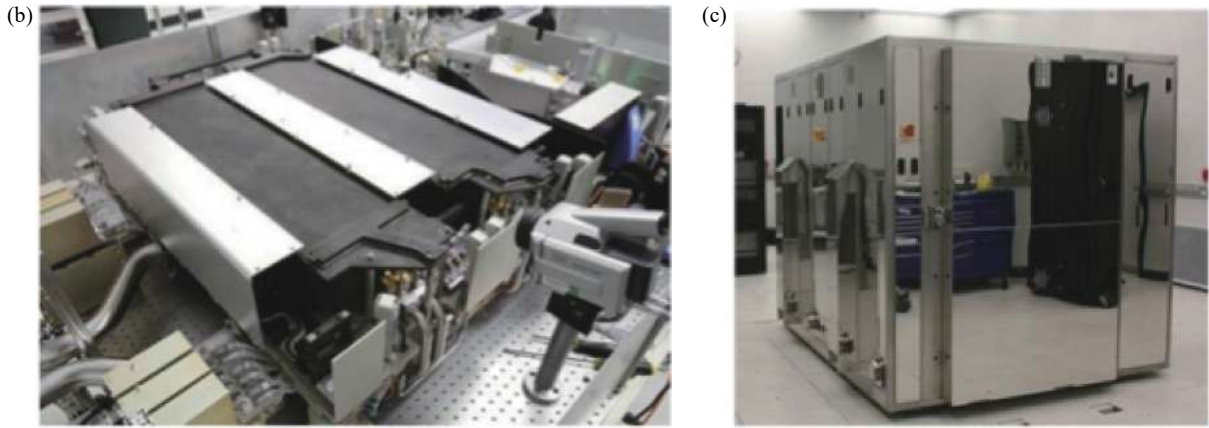


图 20 美国诺格公司 105.5 kW 板条激光相干合成原理图与实物图

Fig.20 Schematic and photo of 105.5 kW coherent beam combination of slab lasers developed by Northrop Grumman

综上所述,作为高功率光纤激光相控阵的核心技术,光纤激光相干合成技术在合成数量和输出功率等两个主要性能指标方面均取得了巨大进步,合成光束数量已超过百束,输出功率达到数十千瓦,但在走向实用过程中,仍然存在较多技术问题亟待解决,主要包括高功率单频/窄线宽光纤激光器技术、大阵元数量光束相位调控技术、阵列光束高效合成技术等。

3 光学相控阵技术在远距离成像领域的应用

为了对远距离目标进行高分辨率成像,人们不断增加光学望远镜口径,但是受到材料、加工技术、系统体积重量等因素的限制,单孔径望远镜系统的光学口径增加变得极为困难^[9],而采用多个子望远镜实现的干涉成像技术是解决这一困难的有效途径。干涉成像技术早期研究也开始于 20 世纪 70 年代^[53-55],1978 年美国亚利桑那大学就建立了 Multiple Mirror Telescope (MMT) 阵列望远镜,但由于当时的技术限制,分辨率没有明显提高^[9]。参考文献 [9] 对之前的干涉成像技术发展进行了详细介绍,文中不再进行详述。需要介绍的是,2012 年,美国洛克希德·马丁公司提出了一种基于干涉成像原理的新技术^[56],称为分块式平面光电探测成像技术 (segmented planar imaging detector for electro-optical reconnaissance, SPIDER)。

SPIDER 的系统结构如图 21 所示^[57],由多个辐射状的干涉臂组成,每个干涉臂由多组成对的探测单元(简称为干涉对)组成,每一个探测单元由遮光管、透

镜和相应的信息处理模块组成,分别对应于图中的 Tube arrays、Lenslet arrays 和 PICs。SPIDER 成像的基本原理依然是范西特-泽尼克定理,基于这一定理通过在探测平面上测量复空间相干度即可换算出目标图像。复相干度的通常测量方法为采用多个望远镜构成多组干涉对,每组干涉对可在像面上获得一组与基线方向垂直的明暗相间的干涉条纹,从干涉条纹中可以提取出复相干度的模和相位,即傅里叶振幅和相位。不同的干涉对对应于不同的空间频率分量,基线越长,采集到的目标信息对应的空间频率越高。因此可以通过增加不同基线长度、方向的干涉对数量来丰富采样的空间频率,最终实现目标的图像重构。

干涉对的工作原理如图 22(b) 所示,其中孔径 1 和孔径 2 的连线为基线 B, L 为视轴。目标发出的光波经孔径 1 和孔径 2 输入到干涉对,经不同路径传输到探测器处进行干涉,图中的延迟线 x_1 和 x_2 用于补偿两路光束的光程差,以便其在探测器处获得良好的干涉条纹复可见度。经过多年攻关,目前已经初步实现了对目标成像^[58]。成像实验选用美国空军的标准测试图作为目标,实验结果如图 22 所示,图 (a) 为测试目标图像,图 (b) 为数值仿真的 SPIDER 图像,图 (c) 是实验获得的经傅里叶逆变换后的重构图像,图 (d) 是经后期校正的重构图像。虽然实验效果仍然差强人意,但该方案的基本原理已得到验证,经过进一步的深入研究,有望快速获得令人满意的成像效果,是新一代紧凑型大孔径望远镜的重要发展方向之一。

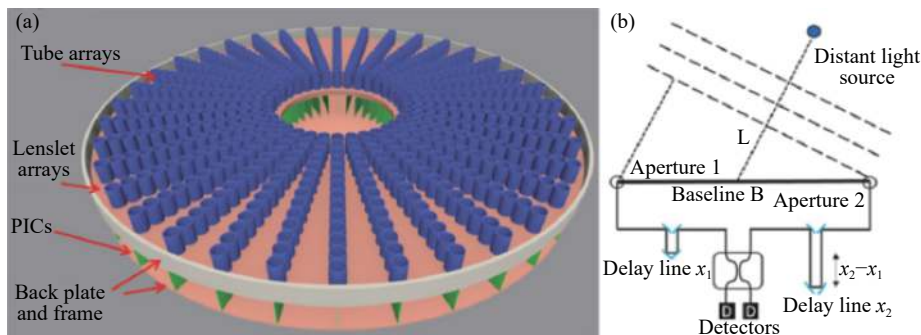


图 21 SPIDER 的系统结构原理图

Fig.21 Schematic of SPIDER

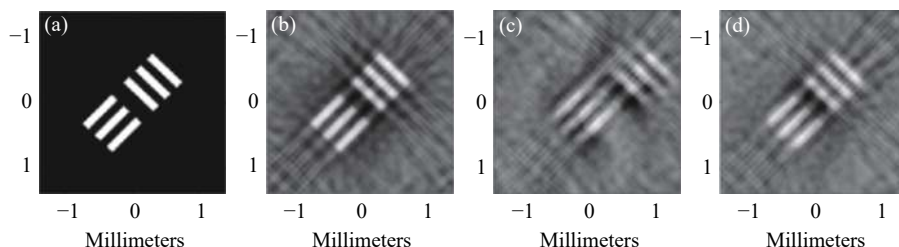


图 22 SPIDER 成像实验结果

Fig.22 Experimental results of SPIDER

4 思考与展望

光学相控阵技术已经经历了数十年的发展, 目前已在激光雷达、空间光通信、干涉成像等多个领域获得了应用, 但也存在很多问题需要解决, 现总结如下。

(1) 光学相控阵技术是一个很宽泛的概念, 正如《物理学词典》中给出的定义, 它是一种相位补偿(或延时补偿)基阵, 既可用以接收, 也可用以发射。因此, 符合上述定义的器件、设备、系统均可以称为光学相控阵的一种形式, 而不是局限于某种特定的器件或技术。比如, 有人认为光学相控阵必须是全电控的, 不能出现机械运动器件, 但是大家公认的第一部微波相控阵 FHMUSA 中的移相器采用的就是机械控制方式。只是在大多数情况下机械控制方式响应速度较慢, 不能满足应用需求。

(2) 光学相控阵技术已经进入多个技术领域, 发展出了多种不同的技术方案, 某一技术方案的发展状态不能代表光学相控技术的整体状况。因此, 在具体应用研究中, 需要针对实际情况进行深入调研分析, 选择合适的器件和技术, 避免半途而废。

(3) 从激光发射功率来看, 低功率情况下应用的相控阵技术和器件更加成熟, 未来将率先走向大规模

应用; 而高功率应用相对发展较慢, 需要攻克更多的技术难题。

(4) 从通光口径来看, 10 cm 以下的小口径器件和技术更加成熟, 大口径技术存在问题较多, 发展缓慢。

总体来看, 光学相控阵技术仍处于关键技术研究阶段, 到大规模应用还有一定距离。

参考文献:

[1] Xiang Zhengping. Review of phased array antenna technology [J]. *Foreign Electronic Technology-Phased Array Antenna*, 1975(S): 1-15. (in Chinese)
相正平. 相控阵天线技术评述[J]. 国外电子技术——相控阵天线(下集), 1975(S): 1-15.

[2] Cheng Kaiming. Study on fast measurement and calibration technology of phased array antenna[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2010. (in Chinese)
程开明. 相控阵天线快速测量与校准技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

[3] Mahan A I, Bitterli C V, Cannon S M. Far-field diffraction patterns of single and multiple apertures bounded by arcs and radii of concentric circles [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, 54(6): 721-732.

[4] Lee P D, Labree C T, Freibun R A. Fresnel diffraction patterns

- of an array of circular apertures [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1115-1120.
- [5] Cathey W T, Hayes C L, Davis W C, et al. Compensation for atmospheric phase effects at 10.6 μm [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(3): 701-707.
- [6] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 613-616.
- [7] Bridges W B, Brunner P T, Lazzara S P, et al. Coherent optical adaptive techniques [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(2): 291-300.
- [8] Xu Longdao. Dictionary of Physics[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
徐龙道. 物理学词典[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] Zhou Chenghao, Wang Zhile, Zhu Feng. Review on optical synthetic aperture imaging technique [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 25-38. (in Chinese)
周程灏, 王治乐, 朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发展现状[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 25-38.
- [10] Vorontsov M A. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): System architecture and wavefront control concept[C]// Proc of SPIE, 2005, 5859: 585901.
- [11] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(22): 4455-4457.
- [12] Thomas Weyrauch, Mikhail Vorontsov, Joseph Manganov, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(4): 840-843.
- [13] Tao R, Ma Y, Si L, et al. Target-in-the-loop high-power adaptive phase-locked fiber laser array using single-frequency dithering technique [J]. *Applied Physics B*, 2011, 105(2): 285-291.
- [14] Ma Yanxing, Zhou Pu, Tao Rumao, et al. Target-in-the-loop coherent beam combination of 100 W level fiber laser array based on an extended target with a scattering surface [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(7): 1019-1021.
- [15] Li X, Geng C, Zhang X. Coherent beam combining of collimated fiber array based on target-in-the-loop technique[C]// Proc of SPIE, 2011, 8178: 81780M.
- [16] Geng Chao, Tan Yi, Mou Jinbo, et al. Experimental research of tip/tilt control of a multi-channel fiber-laser array [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(2): 024206. (in Chinese)
耿超, 谭毅, 牟进博, 等. 多单元光纤激光阵列的倾斜控制实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024206.
- [17] Geng Chao, Li Feng, Huang Guan, et al. Research progress of laser phase array technique based on fiber adaptive manipulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103003. (in Chinese)
耿超, 李枫, 黄冠, 等. 基于光纤自适应操控的激光相控阵技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103003.
- [18] Zhi Dong. Study on the target-in-the-loop coherent beam combination of fiber laser[D]. Changsha: University of National Defense Science and Technology, 2018. (in Chinese)
支冬. 光纤激光目标在回路相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- [19] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195-199.
- [20] Yaacobi A, Sun J, Moresco M, et al. Integrated phased array for wide-angle beam steering [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [21] Petersen K E. Micromechanical light modulator array fabricated on silicon [J]. *Appl Phys Lett*, 1977, 31: 521.
- [22] Petersen K E. Silicon as a mechanical material [J]. *Proc of IEEE*, 1982, 70(5): 420-457.
- [23] Solgaard O, Sandejas E S A, Bloom D M. Deformable grating optical modulator [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(9): 688-690.
- [24] Yoo B W, Megens M, Chan T, et al. Optical phased array using high contrast gratings for two dimensional beamforming and beamsteering [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12238-12248.
- [25] Yoo B W, Megens M, Sun T B, et al. A 32 \times 32 optical phased array using polysilicon sub-wavelength high-contrast-grating mirrors [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19029-19039.
- [26] 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.
- [27] Wang Youmin, Zhou Guangya, Zhang Xiaosheng, et al. 160 \times 160 MEMS-based 2-D optical phased array[C]//CLEO, 2018: SM3I.3.pdf
- [28] Soref R A, Rafuse M J. Electrically controlled birefringence of thin nematic films [J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(5): 2029-2036.
- [29] Mailer H, Likins K L. Effect of ultrasound on a nematic liquid crystal [J]. *Applied physics Letters*, 1971, 18(4): 105-107.
- [30] Resler D P, Hobbs D S, Sharp R C, et al. High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(9): 689-691.
- [31] Zhang W G, Glushchenko A, West J L, et al. Stressed liquid-crystal optical phased array for fast tip-tilt wavefront correction [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(36): 7754-7759.
- [32] Gu D, Wen B, Mahajan M, et al. High power liquid crystal spatial light modulators[C]// Proc of SPIE, 2006, 6306: 630602.
- [33] Xing Zhibo, Fan Wei, Huang Dajie, et al. High laser damage threshold liquid crystal optical switch based on a gallium nitride

- transparent electrode [J]. *Opt Lett*, 2020, 45(13): 3537-3540.
- [34] Eva Otón, Javier Pérez-Fernández, Demetrio López-Molina, et al. Reliability of liquid crystals in space photonics [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 6900909.
- [35] Raszewski Z, Piecek W, Jaroszewicz L, et al.. Transparent laser damage resistant nematic liquid crystal cell “LCNP3” [J]. *Opto-Electronic Review*, 2014, 22(3): 196-200.
- [36] Dorrer C, Wei S K-H, Leung P, et al. High-damage-threshold static laser beam shaping using optically patterned liquid-crystal devices [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(20): 4035-4037.
- [37] Wang Xiangru, Zhou Zhuangqi. Research progress of liquid crystal optical phased array in high power laser application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103006. (in Chinese)
汪相如, 周庄奇. 液晶光学相控阵在高功率激光应用中的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103006.
- [38] Li Yanglong. Laser damage on functional films of liquid crystal optical elements[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010. (in Chinese)
李阳龙. 液晶光学器件功能薄膜的激光损伤机理研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.
- [39] Enloe L H, Rodda J L. Laser phase-cocked loop [J]. *Proc of IEEE*, 1965, 53: 165-166.
- [40] Stover H L, Steier W H. Locking of laser oscillators by light injection [J]. *Appl Phys Lett*, 1966, 8(4): 91-93.
- [41] Zhou Pu. Study on coherent beam combination technology of fiber lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [42] Anderegg J, Brosnan S, Weber M, et al. 8-watt coherently phased 4-element fiber array[C]//Proc of SPIE, 2003, 4974: 1-5.
- [43] Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining of ytterbium fiber laser amplifiers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2003.
- [44] Yu C X, Kinsky J E, Shaw S E J, et al. Coherent beam combining of a large number of PM fibers in a 2D fiber-array[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2006: CThAA6.
- [45] Jérôme Bourderionnet, Cindy Bellanger, Jérôme Primot, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [46] Ren Guoguang, Yi Weiwei, Qi Yu, et al. U S theater and strategic UVA-borne laser weapon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100002. (in Chinese)
任国光, 伊炜伟, 齐予, 等. 美国战区 and 战略无人机载激光武器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100002.
- [47] Chang Hongxiang, Chang Qi, Hou Tianyue, et al. Laser coherent synthesis of 100-beam-sized fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0916002. (in Chinese)
常洪祥, 常琦, 侯天悦, 等. 百束规模光纤激光相干合成[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0916002.
- [48] Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jinyong, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(6): 951-953.
- [49] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [50] Ma Pengfei, Ma Yanxing, Su Rongtao, et al. 8 kW High quality and high efficiency coherent synthesis of fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190577. (in Chinese)
马鹏飞, 马阎星, 粟荣涛, 等. 8kW光纤激光优质高效相干合成[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(5): 20190577.
- [51] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, et al. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [52] McNaught S J, Komine H, Weiss S B, et al. 100 kW coherently combined Slab MOPAs[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009: CThA1.
- [53] Meinel A B. Aperture synthesis using independent telescopes [J]. *Appl Opt*, 1970, 9(11): 2501-2504.
- [54] Labeyrie A. Interference fringes obtained on VEGA with two optical telescopes [J]. *Astrophys J Lett*, 1975, 196(2): L71-L75.
- [55] Eric Thiébaud, Jean-François Giovannelli. Image reconstruction in optical interferometry [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(1): 97-109.
- [56] Kendrick R, Duncan A, Wilm J, et al. Flat panel space based space surveillance sensor[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2013.
- [57] Su Tiehui, Ryan P Scott, Chad Ogden, et al. Experimental demonstration of interferometric imaging using photonic integrated circuits [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12653-12665.
- [58] Su Tiehui, Liu Guangyao, Katherine E Badham, et al. Interferometric imaging using Si3N4 photonic integrated circuits for a SPIDER imager [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12801-12812.