

空间一点对多点激光通信技术发展概述

王亚菁¹, 李立¹, 靳一¹, 张建华², 李文屏³, 孟令杰⁴, 徐常志², 梁慧剑², 齐志强⁵

(1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100;
3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 4. 国家航天局对地观测与数据中心, 北京 100101;
5. 华中光电技术研究所武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 激光通信是未来空间信息基础设施建设的关键支撑。传统“点对点”模式存在资源利用率低、结构复杂、可扩展性不足等问题,“一点对多点”激光通信架构逐渐成为重点研究方向。基于此,系统梳理了“一点对多点”激光通信架构的技术路径,将其分为机械式光束偏转与光学相控阵(OPA)两大类,并重点对比了液晶光学相控阵(LC-OPA)、微机电系统光学相控阵(MEMS-OPA)及硅基光波导相控阵(Si-OWPA)的性能优劣。随后,针对某遥感卫星典型应用场景,提出了基于Si-OWPA的空间“一点对多点”激光通信系统构想,为后续技术演进与工程应用提供参考。

关键词: 激光通信; 灵活组网; 光学相控阵; 芯片集成; 捕获跟踪

中图分类号: TN929.13

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025193

Overview of one-point-to-multi-point space laser communication technology

WANG Yajing¹, LI Li¹, JIN Yi¹, ZHANG Jianhua², LI Wenping³, MENG Lingjie⁴, XU Changzhi², LIANG Huijian², QI Zhiqiang⁵

1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
2. Xi'an Branch, China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China
3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China
4. Earth Observation and Data Center of China National Space Administration, Beijing 100101, China
5. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430074, China

Abstract: Laser communication serves as a key enabler for the future space information infrastructure. Since traditional point-to-point mode suffers from low resource utilization, complex structure, and limited scalability, the one-point-to-multi-point architecture has become an emerging research focus. Based on this, the technical approaches of one-point-to-multi-point laser communication were systematically reviewed and classified into mechanical beam steering and optical phased array (OPA) schemes. Meanwhile, the advantages and limitations of liquid crystal OPA, micro-electro-mechanical system OPA, and silicon-based optical waveguide phased array (Si-OWPA) were comparatively analyzed. Furthermore, for a typical scenario of remote sensing satellite, a conceptual one-point-to-multi-point space laser communication system based on Si-OWPA was proposed, providing a reference for subsequent technological evolution and engineering applications.

Keywords: laser communication, flexible networking, optical phased array, chip integration, acquisition and tracking

收稿日期: 2025-08-31; 修回日期: 2025-10-15

通信作者: 李立, lil@nwpu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2024YFC2206800); 国家自然科学基金资助项目(No.62301418); 中国科协青年人才托举工程基金资助项目(No.2023QNRC001)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2024YFC2206800), The National Natural Science Foundation of China (No.62301418), Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (No.2023QNRC001)

0 引言

在航天产业、电子信息技术及商业力量的推动下,全球卫星通信行业进入了以高通量卫星、移动通信卫星和低轨大规模星座为代表的卫星互联网发展阶段。2020年,国家发展改革委正式将“卫星互联网”纳入“新型基础设施建设”的范畴。我国《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》中明确提出要“打造全球覆盖、高效运行的通信、导航、遥感空间基础设施体系”。在政策推动和市场需求的双重驱动下,卫星互联网产业正处于高速发展阶段,天地一体化网络作为实现全球覆盖与高效运行的重要支撑应运而生。该网络以地面网为基础,天基网为延伸,构建覆盖天、空、地和海的立体化通信体系,其架构如图1所示。随着数据流量需求的快速增长,作为网络核心支撑技术的星间骨干链路,正面临着对通信容量、传输时延等关键性能指标数量级提升的严峻挑战^[1]。目前,星间链路通信技术主要包括微波通信和空间激光通信。微波通信凭借技术成熟和鲁棒性强的优势,长期作为星间链路通信的主流手段。然而,随着星间超远距离、极高速率和轻小型低功耗通信需求的激增,微波通信的频谱资源紧张、可用带宽有限及抗截获能力不足等问题日益凸显。相比之下,空间激光通信兼具无线通信和有线光纤通信的优势,具备发射能量集中、束散角小、可用带宽不受限、抗截获能力强、保密性高等优点,被认为是支撑新一代星间链路通信的首选技术路径^[2-4]。

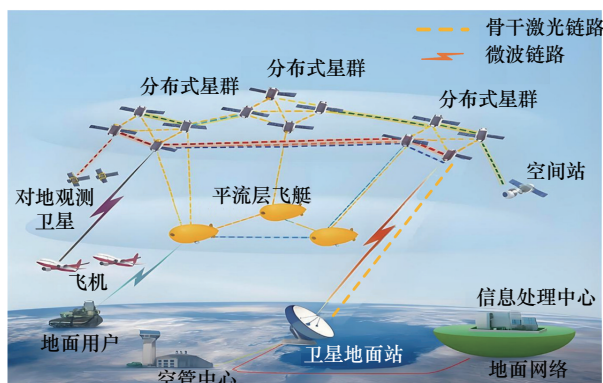


图1 天地一体化网络架构

近年来,全球各航天强国相继布局,系统推进理论研究、技术攻关、终端研制与在轨验证,推动了空间激光通信终端的快速发展与工程化应用。目

前,相关技术已在星间链路、深空探测、星地激光通信等典型场景中完成了多项在轨验证,并逐步迈向规模化组网和商用部署阶段。国际上,SpaceX公司的星链低轨星座率先实现激光通信的规模化工程应用,已累计发射逾9 400颗,在轨超8 100颗,其中配备激光通信的在轨卫星超7 000颗,为星间链路通信领域树立了技术落地标杆^[5]。在国内,中国星网主导的GW星座将激光通信作为核心支撑技术推进低轨星座建设,已累计发射组网星83颗,配备激光终端332个。商用领域的“千帆星座”(G60星链)也将通过星间激光链路构建组网能力,以推动激光通信在我国卫星互联网领域的工程落地^[6-7]。

目前,空间激光通信大多采用“点对点”传输模式,受限于激光强指向性和小光束发散角,单个激光通信终端在同一时刻通常只能与一个目标节点建立链路。当卫星节点需同时与同轨道面、异轨道面等多个目标节点进行通信与组网互联时,往往需要搭载多套激光通信终端。这种“一终端一链路”的传输模式不仅显著增加了卫星载荷的体积、重量与功耗开销,且无法适应未来卫星载荷高集成度、扫描无惯性和接入响应快的发展趋势^[8]。尤其在大规模和高动态的星座网络中,这一刚性架构导致通信资源利用率不足和链路调度效率下降,已成为新一代空间信息网络演进的主要技术瓶颈。因此,构建支持单终端多链路并发通信的“一点对多点”架构正成为学术界与产业界的研究共识^[9]。

基于此,本文系统梳理了以机械式光束偏转和光学相控阵(OPA, optical phased array)为代表的点对多空间激光通信发展现状,分析了其工程应用所面临的难题。针对基于硅基光波导相控阵(Si-OWPA, silicon-based optical waveguide phased array)具有快速捷变与灵活调控等特点,提出了具有“阵列高度集成、波束灵活重构、多链路稳定建立和时频测量精度高”特点的空间一点对多点激光通信系统构想,并阐述了其主要涉及的关键技术。最后,总结了未来一点对多点空间激光通信系统的发展趋势,展望了后续卫星工程应用前景。

1 国内外发展现状

“一点对多点”激光通信系统能够同时建立多条链路,从而显著提升链路资源利用率、网络调度

灵活性与业务承载能力, 尤其适用于未来高密度和大动态变化的星间组网环境。目前, 围绕实现单终端“一点对多点”激光通信的目标, 技术路线主要分为两大类: 一类是以传统万向节和特殊光机结构为代表的机械式光束偏转技术, 该技术可靠性高、工艺成熟, 但响应速度较慢、系统复杂度高; 另一类是以 OPA 为代表的非机械式光束偏转技术, 其凭借响应速度快、易集成、重量轻等突出优势, 被认为是未来主流发展方向。下面将对这两类技术路线的国内外研究进展进行概述。

1.1 机械式光束偏转技术

在空间“一点对多点”激光通信技术发展的初期, 机械式光束偏转技术凭借工艺成熟和可靠性高, 成为支撑卫星互联网多链路并发通信的主要实现路径。该类技术通过机械结构转动或专用光学系统设计来实现光束指向控制, 主要包括传统万向节与特殊光机结构。

1.1.1 传统万向节结构

传统万向节结构通常采用光电跟踪球形转塔结合两轴两框架、两轴四框架、三轴三框架或库德型单反射镜式跟踪转台结构, 实现对单个目标在全方位范围内的动态瞄准、捕获与跟踪。如图 2 所示, 该类系统通常涉及多级旋转机构与精密光学组件, 整体结构复杂、体积大、重量重、设计与系统集成难度高。此外, 机械式旋转扫描机构的转动惯量较大, 这将影响系统的响应速度、光束扫描性能和动态跟踪能力^[10]。尤其在面向多目标激光通信任务时, 传统万向节结构需通过时分轮询或布设多个独立转塔间接实现多目标波束控制, 进一步加剧了系统的体积、重量与能耗负担。

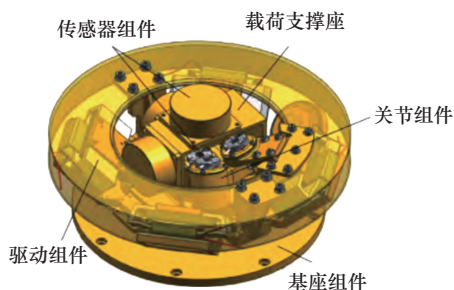


图2 传统万向节光电平台结构设计^[11]

1.1.2 特殊光机结构

特殊光机结构旨在对激光通信终端收发结构进行创新, 通过提升多通道复用能力、波束灵活调控

性能与多用户覆盖效率, 实现一点对多点的激光通信。作为代表性研究, 文献[12]采用 Ritchey-Chretien 望远镜结构, 利用其较大的焦平面支持光纤阵列布设, 从而在单孔径条件下实现多通道并行通信, 如图 3(a)所示。该结构在口径为 120 mm 时, 视场范围不超过 6°, 支持在静态或固定反射镜条件下实现发射端与接收端的自动对准, 有助于简化系统设计并降低制造成本。然而, 受限于光纤孔径数值和阵列排布密度, 该结构在耦合效率与系统集成方面仍有较大的改善空间。为突破单孔径系统在通信并发能力上的限制, 文献[13]提出了一种多发多收的自由空间光通信系统, 如图 3(b)所示。该系统主要采用空间物理隔离的多孔径结构, 实现“一点对多点”并行通信链路。具体地, 通过在可调反射元件上集成光馈送器, 对各个出射光束进行独立反射指向控制, 使其定向至多个远程终端, 实现多用户跟踪与动态瞄准功能。该结构在相同口径条件下(即 120 mm), 视场范围可扩展至 13°。虽然具备波束指向灵活、互不干扰以及可扩展性强等优势, 但在动态情况下, 捕获、瞄准和跟踪 (APT, acquisition, pointing and tracking) 中的跟踪环节仍难以实现。以上 2 种方案均存在视场范围扩展受限的问题, 至今尚未见到其实验结果的最新报道。

根据特定的一点对多点激光通信需求, 国内外各学者分别设计了不同的特殊光机结构方案。在波束复用与中继架构方面, 文献[14]提出了一种结合多个独立光学孔径与光学分插复用器的光束复用/解复用机制, 以实现多个目标间多条光链路的同时信息收发, 如图 3(c)所示。文献[15]提出了一种面向卫星中继的多光学望远镜系统, 如图 3(d)所示。通过集成可控光学开关, 该系统可在不经过电信号转换的条件下, 实现高带宽下的一点对多点自由空间光通信网络中继, 不仅有效降低了信号处理时延, 而且还提升了系统链路容量与响应速度。

姜会林等^[16]围绕提升光学天线的并发通信能力与组网适应性, 提出了适用于“一点对多点”空间激光通信的多个光学天线结构形式。文献[16]提出了一种三同心球面透镜系统, 主要由前透镜、中透镜和后像面透镜同轴排列组成, 该系统在结构上不需要依赖大范围的机械转动, 可实现超过 160°视场范围内的通信目标成像与波束发射, 如图 4(a)所示。文献[17]提出了一种以旋转抛物面为基底的多反

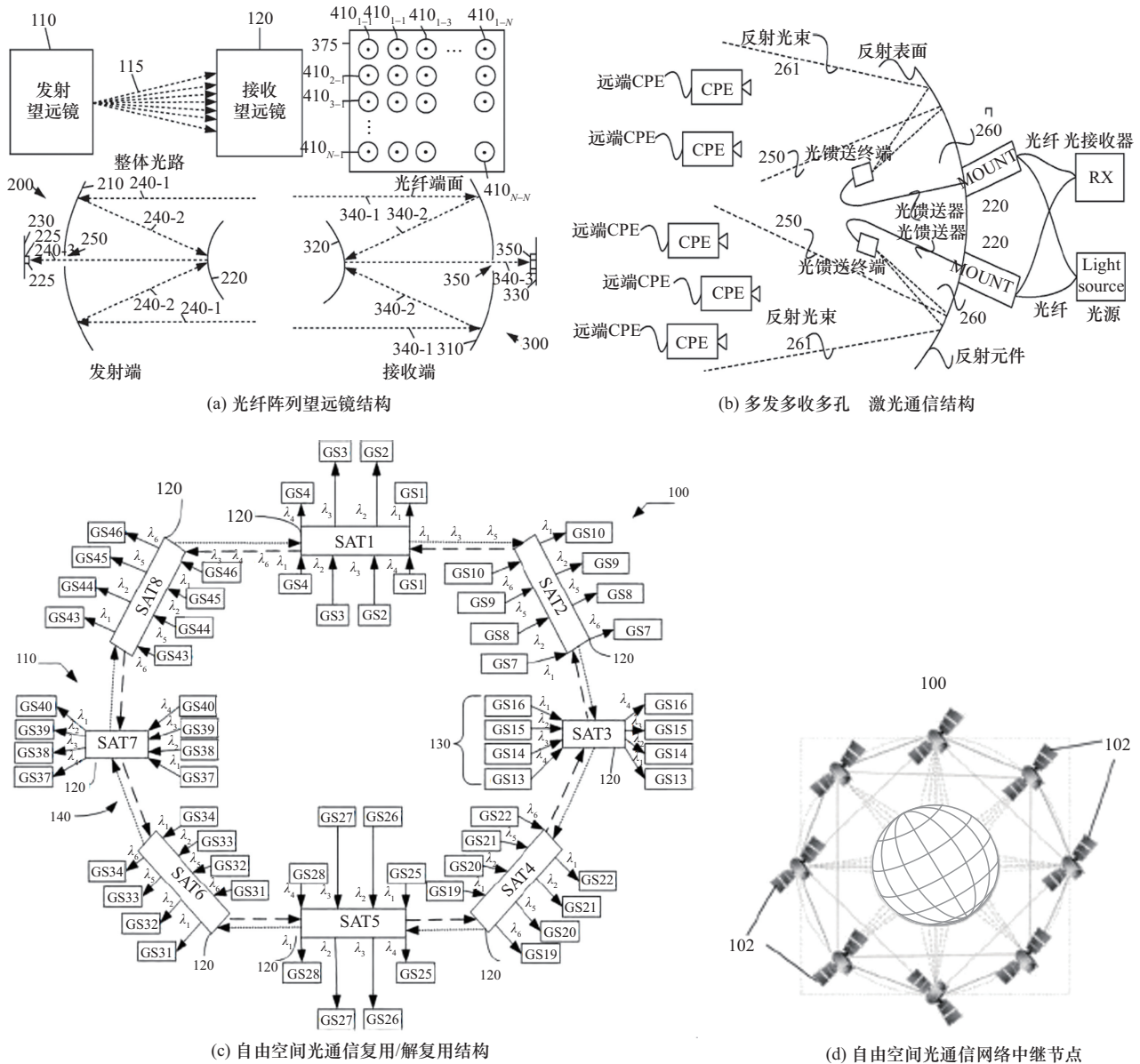


图 3 一点对多点特殊光机结构设计

射镜拼接式光学天线，利用入射光在旋转抛物面反射后与旋转对称轴平行的光学性质，实现“一点对多点”激光通信，如图4(b)所示。针对远距离与多目标并发通信的需求，文献[18]构建了一种基于广角扩束镜与双光楔棱镜组相结合的光学天线结构，如图4(c)所示。广角扩束镜用于收集来自不同方位的信号光，而双光楔棱镜组支持对多个方向目标的同步动态跟踪。针对该结构，该团队初步设计了一种一点对多点星间激光通信系统，该系统具备 400 km 的通信距离和 2.5 Gbit/s 的通信速率，并发束数为 3 个。然而，由于其结构复杂、整体体积和质量较大，在实际星载部署中仍需权衡其应用可行性。

尽管传统万向节与特殊光机结构在早期得到了广泛应用，但其固有的机械特性也带来了难以逾越的技术瓶颈。一方面，系统存在较大的转动惯量，导致灵活性差，响应迟缓；另一方面，系统整体偏转模式难以实现对多个波束的动态、独立控制，难以满足日益增长的多目标并发通信需求。为此，本文研究重心正逐步转向以电驱动为核心、无惯性响应的非机械式光束偏转技术——光学相控阵，以期实现更高灵活性和精度的光束调控能力。

1.2 非机械式光束偏转技术

目前，实现“一点对多点”激光通信的光学相控阵技术主要包括微机电系统光学相控阵 (MEMS-

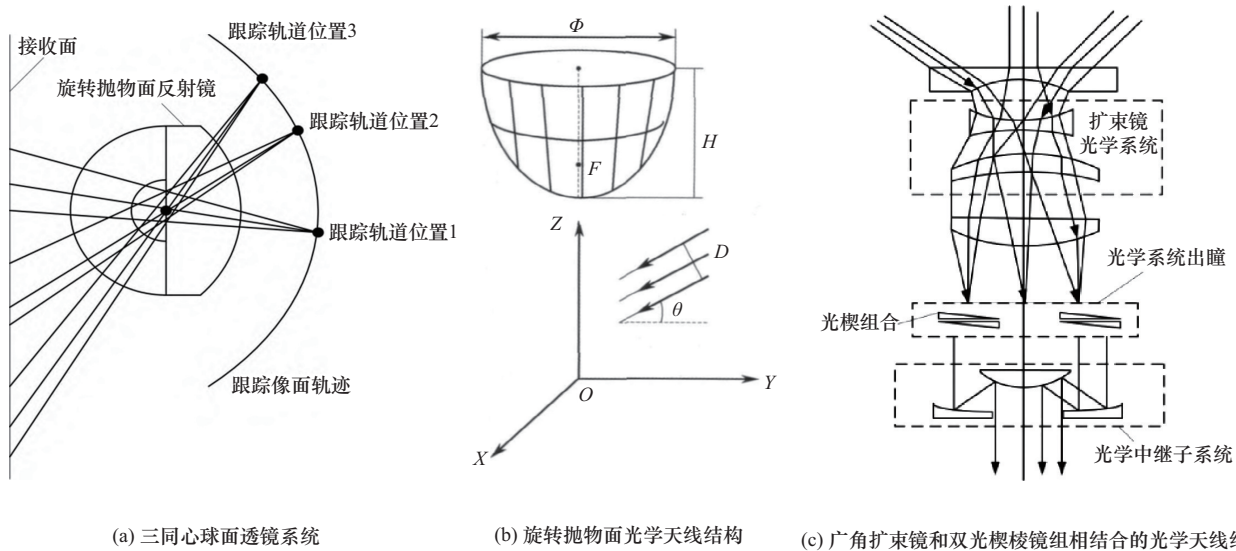


图4 多种适用于“一点对多点”空间激光通信的光学天线结构

OPA, micro-electro-mechanical system OPA)、液晶光学相控阵 (LC-OPA, liquid crystal OPA) 以及硅基光波导相控阵等, 下面分别对其最新研究进展进行介绍。

1.2.1 微机电系统光学相控阵

MEMS-OPA 本质上通过电磁效应、压电效应或电热驱动等方式, 利用微型机械结构实现光束的调控。有部分学者认为, 其严格意义上并不属于完全非机械式的波束控制技术。但因其结构尺寸小和质量低, 仍被视为一种近似无转动惯量的非机械式波束控制技术。

文献[19]提出了一种新型可变形光栅光学调制器, 有效提升了响应带宽, 并降低了器件研制难度, 为后续 MEMS-OPA 技术的发展提供了重要基础。文献[20]基于高折射率对比度亚波长光栅 (HCG, high-index-contrast subwavelength grating) 技术, 制备了 8×8 阵元的 MEMS-OPA, 实现了在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长高达 99.9% 的反射率, 填充因子为 36%。在此基础上, 文献[21]通过制备 32×32 阵元的 MEMS-OPA, 填充因子达到了 85%。文献[22]采用新型 MEMS 驱动光栅移相器, 制备了 160×160 阵元的二维 MEMS-OPA。该器件阵列尺寸为 $3.1\ \text{mm} \times 3.2\ \text{mm}$, 可在 $1\ 200 \sim 1\ 700\ \text{nm}$ 近红外波段内实现 $6.6^\circ \times 4.4^\circ$ 视场范围内的随机波束指向, 光学效率达 85%。这是首次在同一 OPA 器件上实现了大尺寸二维阵列、高光学效率、宽波长范围、快速响应以及较大偏转角度等功能^[23]。

随后, 文献[24]提出了一种卫星间全向光通信 (ISOC, inter-satellite omnidirectional optical communicator) 方案, 通过采用 MEMS 反射镜单元构建球形阵列结构, 使各单元在 $\pm 12^\circ$ 光学锥角范围内实现快速摆扫, 从而具备全天域空间角度覆盖能力。

随着 MEMS-OPA 器件的持续演进, 研究人员开始将其应用于实际的空间激光通信系统。文献[25]利用 MEMS 设计出了一套空间光跟瞄系统。该系统的最大跟瞄范围可达 14° , 且误差仅为 0.03° 。在 4.2° 的光束偏转范围内, 可实现稳定的 $10\ \text{Gbit/s}$ 无误码率通信, 接收功率最大衰减为 $2\ \text{dB}$ 。

此外, 文献[26]设计了一种基于宏观 MEMS 反射镜 2×2 阵列的 OPA 激光通信系统, 理论上可在三维空间实现相位控制, 具备 $\pm 20\ \text{mrad}$ 的波束扫描能力。基于此系统, 该团队实现了 $625\ \text{Mbit/s}$ 的二进制相移键控 (BPSK, binary phase shift keying) 通信。

尽管 MEMS-OPA 在小型化与灵活性方面相较于传统机械式光束偏转技术取得了显著进展, 但其仍依赖微机电结构, 难以实现波束的快速捷变, 且系统集成度有限。为克服这些瓶颈, 研究人员开始探索全电控和无机械运动部件的方案, 以实现更为高效灵活的光束调控能力。

1.2.2 液晶光学相控阵

LC-OPA 是目前发展较为成熟的非机械式波束控制器件, 通常基于向列型液晶材料构建, 由上下 2 片玻璃基板夹持液晶层组成。每个电极与其对应液晶区域形成独立阵元, 通过施加可编程电压调控

液晶分子的取向,进而改变局部折射率,实现出射波前的相位调制。在各阵元间维持恒定相位差的条件下,出射光束在特定方向形成的远场干涉增强,进而实现对光束指向的精确控制。

针对 LC-OPA 光束偏转和发射效率的理论研究起步较早,已较为成熟。文献[27]基于动态液晶散射理论发明了第一代液晶显示器,开启了电场调控液晶光学响应的新时代。后续该思路被拓展到液晶光阀和光学相位调制器,最终发展出用于光波前调控的首个一维 LC-OPA^[28]。如图 5 所示,该器件集成了 43 000 个独立驱动电极,通过施加周期性电压形成可控闪耀光栅,实现光束在 $\pm 4^\circ$ 范围内的离散偏转,透过效率最高达 85%。基于此,文献[29]设计了一种基于电控液晶波片的反射式一维 OPA 器件,采用 CO₂激光器实现了在 10.6 μm 波段的高效光束偏转,验证了 LC-OPA 在中红外波段实现电子波束调控的可行性。在此基础上,文献[30]研制了一种硅基液晶(LCoS, liquid crystal on silicon)光学相控阵器件,实现了 $\pm 3^\circ$ 范围内 8 000 个偏转角度的精准连续光束扫描,工作波段为 633~1 550 nm,有效光学口径达到了 7.4 mm \times 6 mm。随后,LC-OPA 器件朝着更大扫描角度的方向发展。文献[31]通过多层液晶偏振光栅的级联组合,在 1 550 nm 波段实现了 $\pm 40^\circ$ 范围内的连续光束扫描,衍射效率超过 80%,有效克服了单个液晶器件难以实现大角度扫描和高衍射效率的问题。

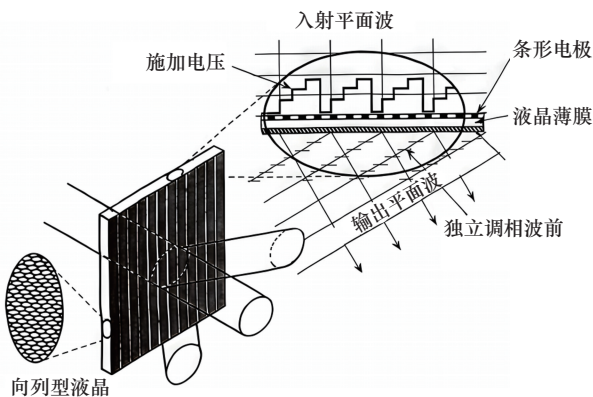


图 5 首个一维 LC-OPA

为突破一维光束扫描的功能局限,文献[32]提出了一种基于 LC-OPA 的二维光束扫描方案。该方案创新性地采用左右 2 组相控阵协同工作,并结合液晶可变介电常数的相位控制器,实现了光束在二

维空间内的灵活扫描,并支持对子孔径的动态配置,从而实现对多个终端波束的精准定位。

在此方案基础上,国内学者围绕 LC-OPA 的多波束调控机制与多用户适配能力展开拓展性研究,并取得系列重要进展。文献[33]围绕多波束形成的建模与实现,提出了子孔径法、阵分复用法与迭代傅里叶变换法 3 类技术路径,有效解决了多方向光束快速调控与分布控制的关键问题。文献[34]提出了一种基于 LC-OPA 空间-偏振分复用的双用户跟踪方案,在具备连续激光波束指向和多波束生成能力的同时,搭建模拟中继卫星与用户终端的一对二通信链路实验系统,验证了其跟踪精度优于 50 μrad 。文献[35]设计了一种 80 mm \times 80 mm 的并行四通道波束偏转天线,整体结构由级联液晶偏振光栅的粗跟踪子系统和基于 LC-OPA 的精细跟踪子系统组成,实现了 20 μrad 的偏转分辨率和 $\pm 12^\circ$ 的二维扫描覆盖范围。

随后,相关研究开始将 LC-OPA 引入通信链路系统与系统级实证。文献[36]提出并验证了基于液晶的可见光集成光学相控阵,在 ± 3.4 V 电压范围内实现了 7.2° 的光束扫描,并首次构建了基于集成 OPA 的自由空间与水下无线光通信链路,实现了 1 Gbit/s 的开关控制(OOK, on-off keying)可见光通信速率。进一步地,文献[37]将 LC-OPA 应用于“一对多”光通信组网系统(如图 6 所示),该系统包含 1 个卫星主通信节点和 3 个卫星通信节点,卫星主通信节点通过抛物面粗跟踪伺服镜与主镜天线构成多发多收光学天线,接收 3 个卫星通信节点的信标光后,由单探测器解算光斑位置以构成粗跟踪回路。在此基础上,多光束精跟踪 LC-OPA 构建多光斑单执行器的中继子光路,在四象限探测器信标引导下将多信号光束同时耦合至光纤环形器,形成精跟踪信号光收发通道,实现 LC-OPA 由单一器件功能向组网系统的应用升级。该系统采用波分复用实现多个卫星通信节点的激光信号传输,并发束数为 3 个。

尽管 LC-OPA 具有低功耗、结构紧凑与波束调控灵活等优势,但其响应速度受液晶材料特性限制、可扫描视场范围较小,难以满足高动态场景与多链路快速切换的需求。同时,将液晶材料引入片上系统在工艺与封装上仍存在挑战。因此,研究正逐步转向与互补金属氧化物半导体(CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor)工艺兼

容、易于高密度集成且具备更快响应速度的硅基光波导相控阵。

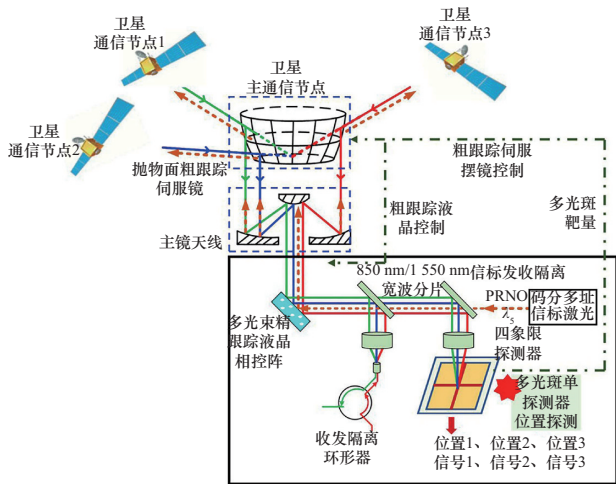


图6 “一对多”光通信组网系统

1.2.3 硅基光波导相控阵

Si-OWPA 依托硅光子集成平台，利用电光效应或热光效应调节阵元折射率，从而实现对多空间光束的有源可编程偏转控制。该类器件完全无机械运动部件，有效克服了传统机械式波束控制系统中存在的惯性与响应迟滞问题，使光束在空间中的指向可实现快速捷变与灵活调控。

Si-OWPA 的发展得益于绝缘体上硅（SOI, silicon on insulator）晶片所提供的优异光学特性，从而实现了百纳米级波导光路的构建^[38]。文献[39]提出了首个基于 SOI 波导的四通道相控阵式波分复用/解复用器，尽管未实现光束偏转，但有效验证了 Si-OWPA 的可行性。此后，Si-OWPA 持续向更大视场范围和更快扫描方向发展，已成为空间激光通信中实现一点对多点通信传输的重要技术路径。

1) 基于热光效应的 Si-OWPA 研究进展

在基于热光效应的 Si-OWPA 研究中，最早的硅基一维光栅阵列 OPA 于 2009 年提出^[40]。该器件基于 SOI 平台构建，采用多模干涉耦合器（MMI, multimode interferometer）将入射光分束为 16 路平行波导，并在每个波导上集成热光移相器，通过热光效应实现相位调控，并结合波长调谐实现了 2.3° 的热光转向和 14.1° 的波长转向。值得注意的是，结合“相位调控+波长调谐”实现二维光束偏转的技术路径，至今仍是主流实现方案。文献[41]提出了基于 CMOS 兼容工艺制造的片上 OPA，该

器件由 16 个沿一维线性排列的天线单元构成，采用级联热光相位调制器实现连续相位调控，可在水平方向实现 51° 连续扫描，扫描频率可达 100 kHz。在纵向维度上，可通过在同一芯片上集成多个具有不同光栅周期的一维阵列来生成多个扫描平面。此外，文献[42-43]还提出采用扫描波长实现纵向转向，或采用光谱梳驱动相控阵列，以同时发射多个波束，进而实现二维光束扫描。但这类方案结构复杂，占用通信频带大，对空间激光通信系统的实际应用存在不利影响。文献[44]提出了基于级联式相位调控的 50 路 Si-OWPA，实现了二维光束扫描。另外，文献[45]研制出了一款具有 128 通道大口径非均匀 OPA 器件，如图 7 所示，最大扫描角度可达 80°。文献[46]提出了一种新型多通道热光移相器，将单位相位调节功耗降低至 1.7 mW/π。基于该低功耗热光移相器，构建了一个包含 512 个主动控制通道的 Si-OWPA 系统，在执行扫描视场范围为 70°×6° 的二维光束扫描任务时，总功耗仅为 1.9±0.2 W，为构建包含数千个有源元件的可扩展相控阵提供了可行路径。

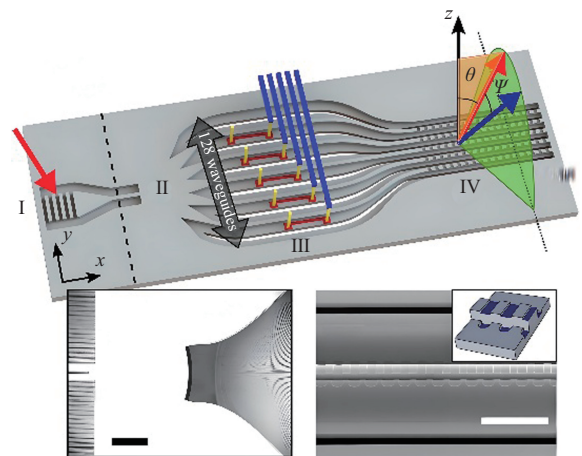


图7 基于热光效应的 Si-OWPA

Si-OWPA 在扫描视场方面显著优于其他技术路线的 OPA。然而，由于光在波导中的约束能力有限，在高密度集成条件下易产生倏逝耦合，难以满足 ±90° 无混叠扫描所需的半波长阵列间距。为突破这一瓶颈，文献[47]在 Si-OWPA 中引入了非等间距输出波导设计，从而放宽了大角度波束转向对波导间距的严格要求。该器件仅需 24.8 mW 及以下的功耗，即可完成 2π 范围内的相位调控，同时实现了 31.9° 的最大扫描范围。文献[48]设计并实现了一种

64通道的 Si-OWPA 平台, 利用不等宽度波导带来的相位匹配, 在半波长间距下实现低串扰的高密度波导集成。该器件总视场范围达到了 180° , 是目前已报道中扫描视场范围最大的一维光波导相控阵系统。此外, 文献[49]提出通过不同半径的弯曲波导引入相邻通道的相位失配, 将波导间距缩小至 $0.8 \mu\text{m}$, 显著降低了波导间串扰影响。文献[50]采用正弦波导降低波导间串扰, 将波导间距减小至 695 nm , 文献[51]进一步通过一款 8 通道正弦 Si-OWPA 芯片验证了该设计的有效性。

文献[52]首次提出了基于二维发射阵列架构的 Si-OWPA。该器件在尺寸为 $576 \mu\text{m} \times 576 \mu\text{m}$ 的硅芯片上密集集成了 64×64 (共 4 096 个) 发射天线单元, 每个天线单元均内置一个热光移相器。通过对所有天线单元进行精确的功率均衡与相位对齐, 该器件在远场中成功生成了预设的复杂辐射图样, 如图 8 所示。作为该设计的实验验证, 文献[53]实现了一个 8×8 阵列的 Si-OWPA 原型器件, 最终实现了最大 12° 的光束扫描范围。

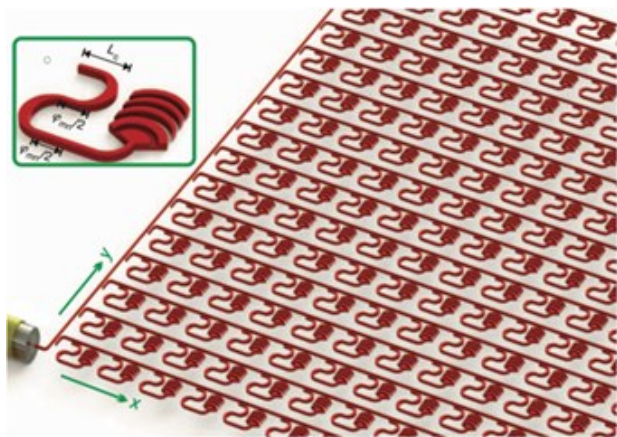


图8 基于二维发射阵列架构的 Si-OWPA

在 Si-OWPA 芯片中, 除硅波导外, 氮化硅 (SiN) 波导也是构建 OPA 的常用材料之一^[54-56]。相较于硅波导, SiN 波导在波长选择上展现出更优的灵活性, 并具备更高的激光功率耐受性。然而, 受限于材料特性, SiN 波导缺乏有效的相位调控机制, 其热光调谐效率较硅基器件低约 1 个数量级。文献[57]基于 SiN 波导平台, 首次在可见光波段 (635 nm) 实现了孔径尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 、光斑尺寸为 $0.064^\circ \times 0.074^\circ$ 的纳米光子相控阵。文献[58]进一步采用 SiN 波导, 通过热光调制技术在 905 nm

波长下实现了 $17.6^\circ \times 3^\circ$ 视场范围内的二维光束扫描。

在上述基于热光移相器的 Si-OWPA 中, 其核心优势在于相位调制过程几乎不引入额外光损耗, 但存在功耗高 (单移相器 $> 15 \text{ mW}/\pi$) 及响应速度慢 (毫秒量级) 的固有局限^[59]。为突破上述限制, 采用电光移相器替代热光调制技术已逐渐成为主流技术路径。

2) 基于电光效应的 Si-OWPA 研究进展

文献[60]基于 GaAs/AlGaAs 材料制备了 10 通道光波导阵列, 首次验证了光波导阵列电光扫描器原理的可行性。该器件在 8.7 V 驱动电压下实现了 13.6° 最大偏转角, 扫描频率达 800 Hz 。文献[61]进一步采用基于电光效应的相位调制方案, 将单个移相器功耗降至 2 mW 以下, 相位调制损耗控制在 2.4 dB 以内, 实现了 $56^\circ \times 15^\circ$ 的二维光束扫描。文献[62]采用 p-i-n 结构硅基电光移相器, 研制出了一款 4×4 阵列的 Si-OWPA, 有效降低了相控阵芯片的整体功耗。该器件是最早报道的电流注入型二维 Si-OWPA, 最大可实现 1.8° 的光束扫描范围, 如图 9 所示。文献[63]成功实现了首个二维 Si-OWPA 收发器的单片集成, 该 8×8 阵列的 OPA 芯片在单一硅基平台上集成了 300 多个不同类型的光学器件以及超过 74 000 个电气元件, 实现了当时电子-光子系统的最高集成度。

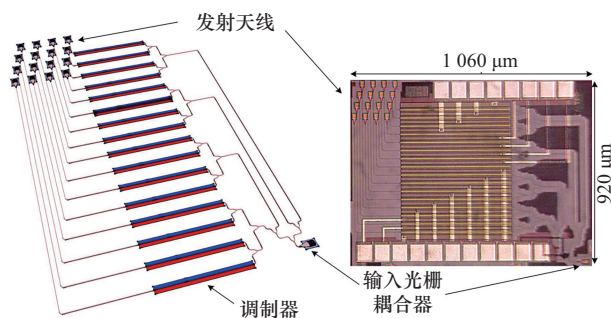


图9 基于电光效应的二维 Si-OWPA

基于 SOI 的电光 OPA 在响应速度方面具有显著优势。文献[64]提出并验证了一种基于电光移相器的 1×16 阵列的 Si-OWPA, 响应时间为 24 ns , 平均功耗仅 39.6 mW , 实现了高速响应和低功耗的光束扫描。文献[65]基于电光移相器研制了 Si-OWPA 原型, 响应时间约为 4.2 ns , 较典型热光与 MEMS 方案快约 3 个数量级, 并实现 11.1° (一维) 与 $7.4^\circ \times 3.7^\circ$ (二维) 的波束转向。文献[66]基于 SOI 平台构建了一

种模块化、可扩展的 32×32 OPA 架构, 扫描视场范围达 1.78° , 电光调制响应时间低至 1 ns 。

一般而言, 为实现二维波束控制, $N \times N$ 的 OPA 需要 N^2 个移相器以进行光学相控调制, 这导致功耗显著增加以及片上光/电布线复杂度激增, 严重制约最小天线间距。针对上述问题, 文献[67]在 27×27 均匀网格中仅部署 128 个光学天线, 通过优化算法实现了目前已报道的最高无光栅瓣视场范围与波束宽度比值, 即 $16^\circ/0.8^\circ$, 其性能等效于具有 484 阵元的均匀阵列。此外, 文献[68]提出了一种分离式二维 Si-OWPA 架构, 仅需 $2N$ 个天线阵列外部移相器即可实现二维波束控制, 如图 10 所示。文献[69]设计了一种蛇形分布的二维 Si-OWPA 结构, 使天线平均间距减少 30% 以上。

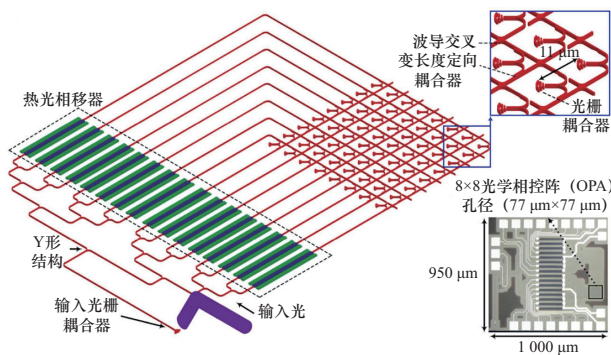


图 10 分离式二维 Si-OWPA 架构

得益于大角度光束扫描能力与快速响应特性, Si-OWPA 近年来在激光通信领域展现出良好的应用前景。文献[70]率先开展了基于 Si-OWPA 的自由空间光通信实验, 并构建了一对双目标静态通信系统: 发射端采用有源 Si-OWPA, 接收端配置 2 个无源 Si-OWPA, 最终在 1 m 通信距离下实现 1 Gbit/s 的传输速率, 该系统采用非归零关关键控 (NRZ-OOK, non-return-to-zero on-off keying) 调制格式, 并发束数为 2 个。随后, 文献[71]进一步拓展了基于 Si-OWPA 的通信架构, 构建出一发三收的光学相控阵通信系统, 在 0.15 m 通信距离下实现 10 Gbit/s 的单向静态传输; 该系统采用 OOK 调制格式, 经校正后误码率低至 3×10^{-3} , 且并发束数达到 3 个。

为进一步验证光学相控阵在多用户场景下的实用性, 文献[72]搭建了“一对二”光学相控阵通信演示系统, 验证了光束扫描与快速切换能力, 光束切换耗时约 50 ms , 通信速率可达 300 Mbit/s , 该系

统的并发束数为 2 个。在提升通信速率与链路性能方面, 文献[73]设计了一款 1×101 通道的 Si-OWPA, 通过 30.37 nm 波长调谐实现了 15.4° 光束扫描, 并在 5 m 自由空间链路中实现了 25 Gbit/s 无误码静态点对点通信。与此同时, 文献[74]采用面积为 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的大孔径集成 Si-SiN OPA, 实现了水平方向 100° 的光束偏转, 光束发散角低至 $0.021^\circ \times 0.029^\circ$, 多目标间切换时间小于 $27 \mu\text{s}$ 。该系统在 54 m 自由空间链路中成功传输 32 Gbit/s 的不归零信号, 误码率低至 1×10^{-9} , 展现出了良好的高速通信能力。

综合来看, Si-OWPA 凭借其全固态和无惯性的优势, 在响应速度 (纳秒级)、扫描视场和集成潜力等方面展现出巨大潜力, 已成为实现光束偏转控制的主流方案。然而, 现有研究仍面临诸多挑战。在阵列架构上, 尽管二维发射阵列是理想形态, 但高密度集成下严格的半波长阵元间距要求导致其难以获得大范围无栅瓣的光束扫描, 因此目前大视场二维光束扫描仍主要依赖“一维相位调控+波长调谐”的联合方案。更为关键的是, 要将 Si-OWPA 从实验室原型推向实用化系统, 必须解决光子芯片与驱动电子芯片的高效集成瓶颈。这不仅涉及硅、氮化硅等多种光学材料以及半导体光放大器等有源器件的协同集成, 还要求与大规模驱动、控制电路实现高密度、低损耗的封装互联。因此, 如何通过先进的异质集成技术, 研制大规模、多功能和高可靠性的光学相控阵芯片, 已成为制约其在空间激光通信等前沿领域应用的核心难题, 也是本文下一节亟须突破的关键技术之一。

1.3 对比与小结

表 1 对比了当前空间“一对多点”激光通信系统的主要技术路径及性能特点。总体来看, 机械式光束偏转技术 (如传统万向节、特殊光机结构) 虽然具备成熟的工程基础, 但受限于响应速度慢、体积大、惯性大和并发能力弱等问题, 难以满足未来卫星星座网络对高动态和多目标并行通信能力的需求。相较之下, 光学相控阵技术正成为系统演进的主流方向。其中, MEMS-OPA 通过微尺度机械反射单元实现波束指向调控, 在小型化、轻量化和低功耗方面取得显著进展, 适用于需要快速链路重构的中低动态星间通信场景。但其受制于扫描角度有限、波束难以快速捷变以及集成度不足, 在大规

表1 各类一点对多点激光通信方案特点对比

类型	类别	优点	不足
传统机械式	传统万向节结构	1) 工艺技术成熟度高 2) 可全方位动态瞄准跟踪	1) 响应速度慢 (百微秒级) 2) 多目标情况下需时分轮询/多终端, 利用率低 3) 体积、质量及转动惯量均较大, 功耗高 4) 难以实现对多波束的动态、独立控制
	特殊光机结构	1) 工艺技术成熟度高 2) 波束指向灵活 (如多孔径)	1) 响应速度慢 (百微秒级) 2) 体积、质量及转动惯量均较大, 功耗高 3) 难以实现对多波束的动态、独立控制
光学相控阵	微机电系统光学相控阵	1) 较传统机械式更为轻量化、小型化 2) 功耗低	1) 响应速度慢 (百微秒级) 2) 扫描视场小 (50 mm 口径下, 扫描视场 1°~2°) 3) 仍依赖微机电结构, 波束无法快速捷变 4) 与光电器件集成度低
	液晶光学相控阵	1) 响应速度较快 (微秒级) 2) 工艺成熟 3) 功耗低、结构紧凑	1) 扫描视场较小 (50 mm 口径下, 扫描视场 5°~10°) 2) 与光电器件集成度低
	硅基光波导相控阵	1) 响应速度快 (纳秒级) 2) 集成度高, 支持大规模阵元 3) 尺寸小、扫描视场大 (50 mm 口径下, 扫描视场 30°~40°)	1) 高密度集成易串扰 (阵元有效占比 50% 的情况下, 功率减半) 2) 异质集成工艺复杂

模多链路通信中仍存在局限。LC-OPA 依托液晶材料的电光可调性, 可实现低功耗和高精度的波前相位调制, 具备结构紧凑、工艺成熟、多波束生成灵活等优势, 适合中低速扫描、近距离通信及捕获跟踪应用。然而, 其扫描视场窄、与光电器件集成困难, 在高动态和多目标并发通信环境下的适应性不足。相比之下, Si-OWPA 依托硅光子集成平台, 通过电/热光调制实现了纳秒级的波束切换, 并具备高密度阵列集成与多波束灵活重构能力, 为“一点对多点”星间激光通信提供了高效和可扩展的硬件基础。虽然仍存在串扰抑制、异质集成工艺复杂等问题, 但其在高动态多链路通信场景下的综合性能最为突出, 被普遍认为是未来空间“一点对多点”星间激光通信的核心发展方向。

2 基于 Si-OWPA 的空间一点对多点激光通信系统方案构想

2.1 应用场景

本节以多星编队遥感卫星成像系统为例, 如图 11 所示。该系统由 1 颗主星和 3 颗辅星构成, 形成“一主多辅”的分布式协同观测网络。主星配备基于 Si-OWPA 的激光通信终端, 兼具高速通信与精密测距功能; 辅星则采用传统望远镜体制的激光通信终端, 实现光学信号的接收、响应与回传。在典型任务过程中, 主星通过多波束相控阵天线同时

向多颗辅星发射激光通信信号, 实现一对多的并发通信链路。每条链路可独立传输遥感数据、同步脉冲与校时信号。系统支持厘米级测距精度与皮秒级时间同步, 以保证多星成像数据的高时空一致性。此外, 主星扫描视场覆盖方位 360°、俯仰±6°, 链路距离≥1 000 km, 速率 5~10 Gbit/s。

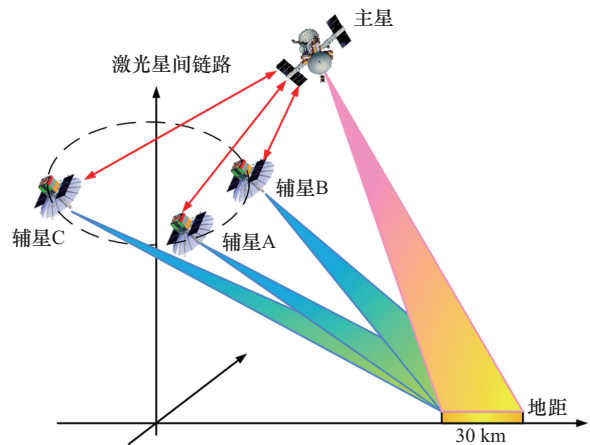


图 11 多星编队遥感卫星成像系统

2.2 系统设计构想

针对 2.1 节应用场景需求, 本文提出了“阵列高度集成、波束灵活重构、多链路稳定建立和时频测量精度高”的一点对多点激光通信系统设计构想, 具体如图 12 所示。该系统由收发不共阵面的发射和接收相控阵天线、光束控制及通信测量一体

化信号处理四部分组成。其中，单个 512×512 阵元的全固态相控阵芯片具备 $\pm 6^\circ$ 扫描能力；发射相控阵天线由30片此类芯片拼接构成，包括激光合束、光放大、波束形成网络和相控阵阵面等部分，实现 360° 全方位角发射；接收相控阵天线先将4片 512×512 芯片叠拼以扩大有效接收面积，再由30片芯片进行环形拼接，配合相控阵阵面、波束形成网络、低噪声光放大和窄带滤光等部分，实现 $12^\circ \times 360^\circ$ 的接收覆盖；光束控制主要用来实现OPA波束的捷变指向和一对多通信链路的捕获跟踪2个功能；通信测量一体化信号处理包括激光通信信号的调制解调、信道编译码，以及测距测速和时频传递软件的处理等功能。该架构同样适用于卫星互联网同轨激光通信链路接入组网需求。在此基础上，系统进一步引入空分复用技术，通过多波束天线发射若干个窄波束覆盖整个用户区域，信号能量均匀覆盖每个区域，各波束空间上相互独立、覆盖区域互不重叠，系统在这个层面上实现了空分多址与并行通信。

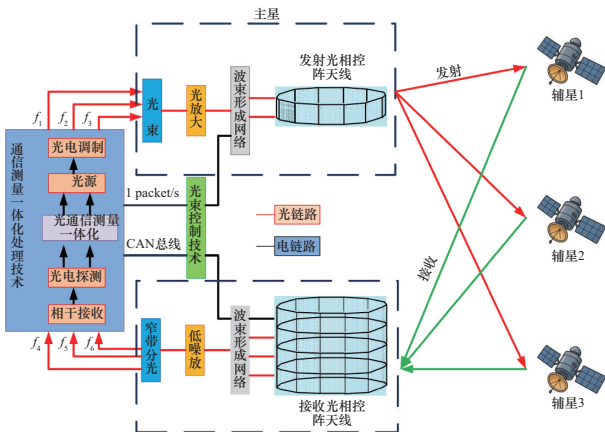


图12 基于Si-OWPA的空间一点对多点激光通信系统架构设计

2.3 关键技术1:大规模多源异质集成波导光学相控阵芯片

目前，国内外报道的二维OPA规模大多不超过64阵元，且很少同时开展发射和接收通信验证。 512×512 阵元SiN/Si光波导相控阵结构设计如图13所示，为实现 0.1 mrad 的扫描精度和 $\pm 6^\circ$ 扫描范围，发射相控阵需包含 512×512 个阵元，且阵元间隔应小于 $7.4 \mu\text{m}$ 。由于激光光源功率为 0.5 W ，超出了单模硅波导的承载能力，主干波导选用SiN材料。在发射系统中，主干道的光通过定向耦合器倏逝波耦合到硅波导支路中，并借助半导体光放大器

(SOA, semiconductor optical amplifier)对入射光进行分级放大。每个硅波导支路再用类似的分光方式均分并由天线阵元发射。在接收系统中，各个天线阵元接收到的信号经过合束后汇入主干道氮化硅波导。通过精确调节天线阵元前相移器的相移量，可以调节激光波束的偏转方向和接收信号的方向。考虑到发射系统需要将片外激光耦合到相控阵芯片上进行发射，接收系统则需要将光芯片上接收到的光信号耦合到后续光传输链路进行信号处理，因此需解决光纤与芯片的耦合问题。

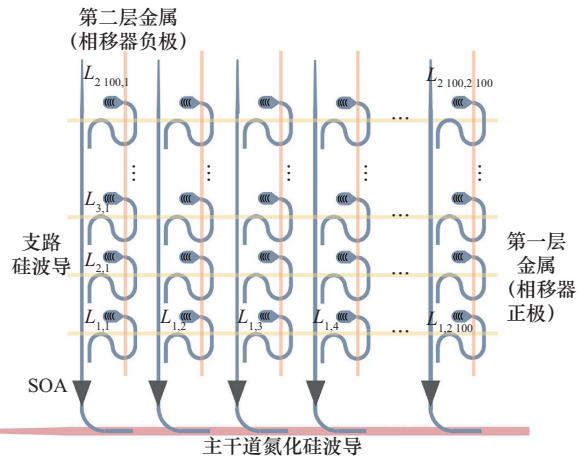


图13 512×512 阵元SiN/Si光波导相控阵结构设计

考虑到SOA芯片为InP基有源器件，需采取异质混合集成的方法将SOA芯片集成到相控阵芯片上。单个相控阵芯片总共有 2×512 个电极需要独立控制，如果采用引线键合的方式连接控制电路芯片和光学相控阵芯片，需要键合的金线过多，封装难度较大，稳定性差。可考虑采用2.5D封装中的硅通孔(TSV, through silicon via)技术解决此问题，如图14所示。 2×512 个电极分为2组分布在相控阵天线左边，其上层为硅中介层，通过TSV技术与最上层的DAC芯片阵列互联。DAC芯片将SOC发出的控制数字信号转为模拟电压信号分别施加在各路电极上。同时，SOA芯片也通过第一层电极和第二层电极分别给p电极和n电极供电。

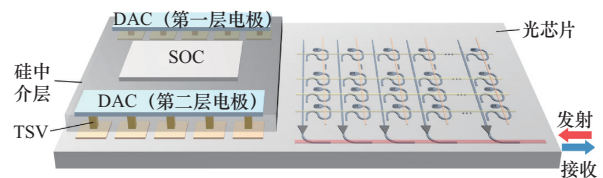


图14 驱动电路与光芯片异质集成方案

2.4 关键技术 2: 一点对多点激光通信链路的快速捕获与高精度跟踪

在多目标星间通信场景中, 快速建链与稳定跟踪是面临的核心技术挑战。依托光学相控阵的结构与波束可重构特性, 提出了“多波束并行扫描+逻辑子孔径自相干”策略, 以期有效突破传统机械扫描在响应速度与跟踪精度方面的限制。同时, 基于工程工况约束, Si-OWPA 虽具备 $40^\circ/\text{s}$ 的跟踪角速度能力, 但受轨道相对几何限制, 典型编队场景实际所需的视线角速度仅为 $1\sim 5^\circ/\text{s}$ 量级, 硬件裕度充足。

在快速捕获方面, 基于子孔径法将相控阵阵面划分为多个独立子单元 (如图 15 所示), 从而可并行生成多个信标波束, 实现对大范围空域的高效覆盖。通过优化多波束资源配置, 可提升单目标捕获速度与整体捕获概率。

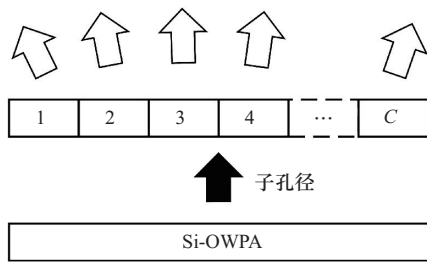


图 15 基于子孔径法的多波束成形方法

在稳定跟踪方面, 创新性地提出了逻辑子孔径自相干法, 可以将子阵划分为 2 个相邻逻辑子孔径, 并通过动态调整其形状与面积比, 实现远场光斑的相干合成, 从而提高跟踪分辨率, 并有效抑制平台微振动与轨道扰动引起的误差。

2.5 关键技术 3: 一点对多点激光通信地面等效验证与性能评估

为实现对空间光远场、卫星轨道运动和卫星平台微振动等场景的精确模拟, 构建一点对多点激光通信地面等效验证系统, 如图 16 所示。具体地, 辅端采用“空间滤波小孔+准直光学”结构, 将小孔置于准直镜焦平面, 以生成近似平面波的等效远场, 实现千公里级传播等效; 主端与辅端均安装于高精度转系统台, 模拟轨道运动与平台微振动; 主星转台搭载 Si-OWPA, 放置发射阵面与接收阵面各 144 片, 实现收发分置与多波束灵活控制。

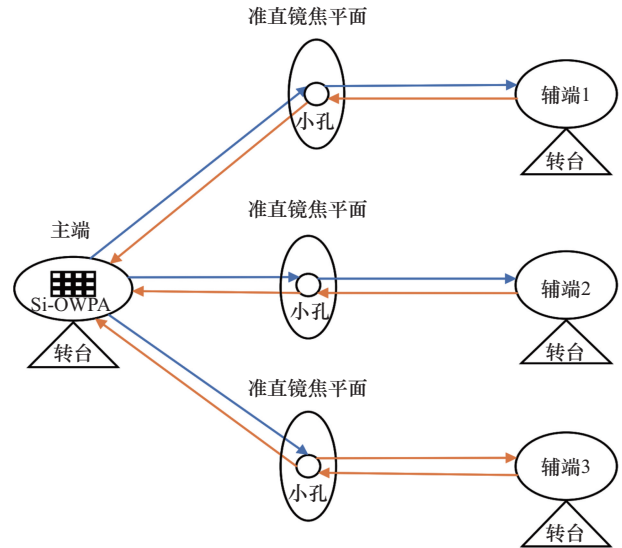


图 16 一点对多点激光通信地面等效验证系统

2.6 链路预算与发射阵列孔径设计

1) 链路预算

常用信号测距体制包括数据帧 BPSK、高速伪码 BPSK 以及兼具高速伪码与高速通信的正交相移键控 (QPSK, quadrature phase shift keying) [75]。其中, 数据帧测距体制相较于同速率伪码测距体制精度偏低; 高速伪码 BPSK 难以兼容数据帧测距与通信双功能, 而高速通信的 QPSK 虽具兼容性, 但因功率分配会使通信功率减半, 影响通信性能。因此, 本文拟采用非平衡双 BPSK 体制 [76], 以兼顾高精度激光时频传递与数据帧测距通信。

在此基础上, 为验证所提方案的可行性, 本文对主星-辅星 1 链路进行了功率预算: 在链路距离为 1 000 km 的条件下, 发射端和接收端天线口径均为 60 mm; 结果如表 2 所示。

2) 光学孔径计算

发射阵列采用二维相控阵方案, 阵元按 $N \times N$ 排布, 取 $N = 512$ 。阵元几何尺寸约 $a_x a_y = 3 \times 2.8 \mu\text{m}$, 阵元间隙约 $s \approx 7.4 \mu\text{m}$, 据此边长 $p = a_x + s \approx 10.4 \mu\text{m}$ 。单芯片 (子阵) 的有效孔径为

$$D_{\text{sub}} \approx Np = 512 \times 10.4 \mu\text{m} = 5.3248 \text{ mm} \quad (1)$$

为满足系统 $\approx 60 \text{ mm}$ 的口径需求, 采用 $M \times M$ 阵面拼接方式, 取 $M = 12$, 其几何拼接口径为

$$MD_{\text{sub}} \approx 12 \times 5.3248 \text{ mm} = 63.90 \text{ mm} \quad (2)$$

在考虑拼缝与圆形收口后等效有效口径约为 60 mm, 对应芯片数量 $M^2 = 144$ 。

表 2 功率预算

参数名称	数值	备注
工作波长/nm	1 550	—
发射功率/dBm	30	—
发射天线增益/dB	98.66	60 mm 发射口径
发射天线效率/dB	-1.87	发射天线效率 65%
发射波前损耗/dB	-0.76	波相差 $\frac{\lambda}{15}$
指向损耗/dB	-1	—
空间损耗/dB	-258.18	链路距离 1 000 km
接收天线增益/dB	101.69	60 mm 接收口径
接收天线效率/dB	-1.87	接收天线效率 65%
分光损失/dB	-3.01	通信分光比 0.5
光纤耦合损耗/dB	-6	—
探测器接收功率/dBm	-42.33	—
编码增益/dB	7	采用 LDPC 编码
接收灵敏度/dBm	-42	BPSK 10 Gbit/s, 误码率 1×10^{-7}
链路余量/dB	6.67	—
串扰阈值/dB	-13	—

3 结束语

本文围绕空间“一点对多点”激光通信技术的研究现状展开综述。首先，将现有技术方案分为机械式光束偏转与非机械式光束偏转技术（光学相控阵）两大类。其一，对于机械式光束偏转技术，阐述了传统万向节与特殊光机结构的基本原理、发展现状及主要性能瓶颈。其二，对于光学相控阵技术，聚焦 LC-OPA、MEMS-OPA 与 Si-OWPA，分析各自的最新研究进展与适用性。基于对以上两类技术的系统对比评估，Si-OWPA 在集成度、扫描视场范围与响应速度等关键指标上表现出最优的综合权衡性能，因而成为当前实现“一点对多点”空间激光通信系统的主要技术路线。在此基础上，结合光波导相控阵天线的研究进展及实际应用场景需求，提出了基于 Si-OWPA 的空间一点对多点激光通信系统方案构想，并展望了其所涉及的关键技术。

1) 在大规模芯片异质集成方面，需进一步优化多材料异质集成工艺，提升大规模阵元集成下的性能稳定性，降低串扰并增强功率承载能力，推动相控阵芯片向更高集成度与更优光束质量演进。

2) 在相控激光通信链路的捕获跟踪方面，应探索基于光学全固态相控阵的相控激光通信链路捕获跟踪技术，实现一对多激光通信建链的秒级捕获和微弧度级跟踪，实现大空域、高概率和多目标的激光通信建链。

3) 在地面集成等效验证与性能评估方面，研制具备远距离光学远场模拟、单频复合振动谱的微振动模拟，以及轨道相对运动模拟能力的一点对多点星间激光通信等效验证系统，实现核心功能性能验证与性能评估。

参考文献:

- [1] 孙建锋, 许倩, 鲁伟, 等. 空间相干激光通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2022.
SUN J F, XU Q, LU W, et al. Space coherent laser communication technology[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2022.
- [2] 侯霞, 刘哲琦, 常亦迪, 等. 卫星激光通信技术发展现状与趋势分析[J]. 中国激光, 2024, 51(11): 1101013.
HOU X, LIU Z Q, CHANG Y D, et al. Development status and trend analysis of satellite laser communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(11): 1101013.
- [3] 高锋瑞, 孙名扬, 何明泽, 等. 深空激光通信发展现状与趋势分析(封面文章·特邀)[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(7): 1-20.
GAO D R, SUN M Y, HE M Z, et al. Development current status and trends analysis of deep space laser communication (cover paper invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(7): 1-20.
- [4] 刘超, 李学莹, 张开河, 等. 深空激光通信研究进展及发展方向[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 84-93.
LIU C, LI X Y, ZHANG K H, et al. Research progress and future directions in deep space optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(7): 84-93.
- [5] 蒋长林, 李清, 王羽, 等. 天地一体化网络关键技术研究综述[J]. 软件学报, 2024, 35(1): 266-287.
JIANG C L, LI Q, WANG Y, et al. Survey on key technologies in space-ground integrated network[J]. Journal of Software, 2024, 35(1): 266-287.
- [6] 吴树范, 王伟, 温济帆, 等. 低轨互联网星座发展研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 1-11.
WU S F, WANG W, WEN J F, et al. Review on development of LEO Internet constellation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 1-11.
- [7] 张学军, 刘法旺, 张祖耀, 等. 低空智能网联体系[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(6): 1793-1815.
ZHANG X J, LIU F W, ZHANG Z Y, et al. Overview of low-altitude intelligent networked system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(6): 1793-1815.
- [8] 鲁绍文, 侯霞, 李国通, 等. 空间光通信技术发展现状与趋势[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(2): 39-46.
LU S W, HOU X, LI G T, et al. Development status and trend of space

- optical communication technology[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2022, 3(2): 39-46.
- [9] 彭晓卫, 魏新龙, 夏嘉俊, 等. 国外轻小型空间激光通信终端技术发展分析[J]. *航天器工程*, 2025, 34(4): 108-119.
- BIAO X W, WEI X L, XIA J J, et al. Analysis of development of light-weight and compact space laser communication terminal technology abroad[J]. *Spacecraft Engineering*, 2025, 34(4): 108-119.
- [10] HAELLSTIG E, STIGWALL J, LINDGREN M, et al. Laser beam steering and tracking using a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Laser Systems Technology*, 2003, 5087: 13.
- [11] 李全超. 基于万向节的机载高精度光电平台机构研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
- LI Q C. Research on mechanism of aerial high-precision optoelectronic platform based on universal joint[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022.
- [12] PRESBY H M, TYSON J A. Point-to-multipoint free-space wireless optical communication system[P]. U. S. Patent No.6445496 B1, 2002-09-03.
- [13] SPARROLD W S, UPTON E L, OKOROGU A O, et al. Free space point-to-multipoint optical communication system and apparatus[P]. U. S. Patent No.6912360 B1, 2005-07-28.
- [14] 史蒂芬·G·兰伯特. 自由空间光通信网络及用于中继节点的方法: CN118590143A[P]. 2020-09-15.
- LAMBERT S G. Free-space optical communication network and method for relay nodes: CN118590143A[P]. 2020-09-15.
- [15] G·D·科尔曼, C·T·小黑斯廷斯, D·史密斯, 等. 用于自由空间光通信的卫星: CN111865413A[P]. 2019-08-09.
- COLEMAN G D, HASTINGS C T, SMITH D, et al. Satellite for free space optical communication: CN111865413A[P]. 2019-08-09.
- [16] 姜会林, 胡源, 宋延嵩, 等. 空间激光通信组网光端机技术研究[J]. *航天返回与遥感*, 2011(5): 52-59.
- JIANG H L, HU Y, SONG Y S, et al. Research on optical terminal technology of space laser communication network[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2011(5): 52-59.
- [17] 姜会林, 胡源, 丁莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1006003.
- JIANG H L, HU Y, DING Y, et al. Optical principle research of space laser communication network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006003.
- [18] 江伦, 胡源, 王超, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学系统研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0506001.
- JIANG L, HU Y, WANG C, et al. Research on optical system of one-to-many simultaneous space laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0506001.
- [19] SOLGAARD O, SANDEJAS F S A, BLOOM D M. Deformable grating optical modulator[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(9): 688-690.
- [20] YOO B W, MEGENS M, CHAN T, et al. Optical phased array using high contrast gratings for two dimensional beamforming and beam-steering[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12238-12248.
- [21] YOO B W, MEGENS M, SUN T B, et al. A 32×32 optical phased array using polysilicon sub-wavelength high-contrast-grating mirrors[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19029-19039.
- [22] WANG Y M, ZHOU G Y, ZHANG X S, et al. 2D broadband beam-steering with large-scale MEMS optical phased array[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 557-562.
- [23] WANG Y M, ZHOU G Y, ZHANG X S, et al. 160×160 MEMS-based 2-D optical phased array[C]//Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics. OSA, 2018: SM31.3.
- [24] VELAZC J E, GRIFFIN J, WERNICKE D, et al. High data rate inter-satellite omnidirectional optical communicator[C]//Proceedings of the 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Reston: AIAA, 2018: 354-2305.
- [25] DENG P, KAVEHRAD M, LOU Y. MEMS-based beam-steerable FSO communications for reconfigurable wireless data center[J]. *Broadband Access Communication Technologies XI*, 2017, 10128: 1012805.
- [26] HAN R L, SUN J F, HOU P P, et al. Multi-dimensional and large-sized optical phased array for space laser communication[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5026-5037.
- [27] HEILMEIER G H, ZANONI L A, BARTON L A. Dynamic scattering: a new electrooptic effect in certain classes of nematic liquid crystals[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1968, 56(7): 1162-1171.
- [28] MCMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, et al. Optical phased array technology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [29] RESLER D P, HOBBS D S, SHARP R C, et al. High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(9): 689-691.
- [30] BELLINI B, GEDAY M A, BENNIS N, et al. Design and simulation of single-electrode liquid crystal phased arrays[J]. *Opto-Electronics Review*, 2006, 14(4): 269-273.
- [31] KIM J, OH C, ESCUTI M J, et al. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings[J]. *Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications VI*, 2008: 709302.
- [32] KIRINO H, HIRANAKA K, HATAKEYAMA T. Phased array antenna[P]. U.S. Patent No.US 2009/0278744 A1, 2009-11-12.
- [33] XIAO F, KONG L J. Optical multi-beam forming method based on a liquid crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(36): 9854-9861.
- [34] GUO H R, WANG X R, LIU X P, et al. Nonmechanical two-user tracking method of space-polarization division using the liquid crystal optical phased array[J]. *Optics Communications*, 2019, 447: 74-79.
- [35] LIANG Z Q, HUANG Y W, HE X X, et al. Four-access, 80 mm aperture all phase-controlled liquid crystal laser antenna[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(10): 105113.
- [36] NOTAROS M, DESANTIS D M, RAVAL M, et al. Liquid-crystal-based visible-light integrated optical phased arrays and application to underwater communications[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(20): 5269-5272.
- [37] 陈帅. 基于码分多址的多信标光单探测器同时识别技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2024.
- CHEN S. Research on simultaneous recognition technology of multiple beacon light single detector based on code division multiple access[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024.

- [38] JALALI B, FATHPOUR S. Silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [39] TRINH P D, YEGNANARAYANAN S, COPPINGER F, et al. Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelength multi/demultiplexer with extremely low-polarization sensitivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(7): 940-942.
- [40] ACOLEYEN K V, BOGAERTS W, JÁGERSKÁ J, et al. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1477-1479.
- [41] YAACOBI A, SUN J, MORESCO M, et al. Integrated phased array for wide-angle beam steering[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [42] HULME J C, DOYLEND J K, HECK M J R, et al. Fully integrated hybrid silicon free-space beam steering source with 32-channel phased array[J]. *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XVI*, 2014: 898907.
- [43] ACOLEYEN K V, ROGIER H, BAETS R. Optical phased arrays for wide-angle beam steering[J]. *Optics Express*, 2010, 18: 13655.
- [44] POULTON C V, YACOBI A, SU Z, et al. Optical phased array with small spot size, high steering range and grouped cascaded phase shifters[C]//*Proceedings of the Advanced Photonics 2016 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF)*. Washington: OSA Publishing, 2016: IW1B.2.
- [45] HUTCHISON D N, SUN J, DOYLEND J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering[J]. *Optica*, 2016, 3(8): 887-890.
- [46] MILLER S A, CHANG Y C, PHARE C T, et al. Large-scale optical phased array using a low-power multi-pass silicon photonic platform[J]. *Optica*, 2020, 7(1): 3-6.
- [47] KWONG D, HOSSEINI A, ZHANG Y, et al. 1×12 unequally spaced waveguide array for actively tuned optical phased array on a silicon nanomembrane[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(5): 051104.
- [48] PHARE C T, SHIN M C, SHARMA J, et al. Silicon optical phased array with grating lobe-free beam formation over 180 degree field of view[C]//*Proceedings of the 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [49] XU W H, ZHOU L J, LU L J, et al. Aliasing-free optical phased array beam-steering with a plateau envelope[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3354-3368.
- [50] YI X G, ZENG H Y, GAO S, et al. Design of an ultra-compact low-crosstalk sinusoidal silicon waveguide array for optical phased array[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37505-37513.
- [51] YI X G, ZHANG Y B, ZENG H Y, et al. Demonstration of an ultra-compact 8-channel sinusoidal silicon waveguide array for optical phased array[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 226-229.
- [52] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195-199.
- [53] SUN J, HOSSEINI E S, YAACOBI A, et al. Two-dimensional apodized silicon photonic phased arrays[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 367-370.
- [54] RAVAL M, POULTON C V, WATTS M R. Unidirectional waveguide grating antennas with uniform emission for optical phased arrays[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2563-2566.
- [55] SHANG K P, QIN C, ZHANG Y, et al. Uniform emission, constant wavevector silicon grating surface emitter for beam steering with ultra-sharp instantaneous field-of-view[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19655-19661.
- [56] SHIN M C, MOHANTY A, WATSON K, et al. Chip-scale blue light phased array[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1934-1937.
- [57] POULTON C V, BYRD M J, RAVAL M, et al. Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 21-24.
- [58] TYLER N A, FOWLER D, MALHOUITRE S, et al. SiN integrated optical phased arrays for two-dimensional beam steering at a single near-infrared wavelength[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5851-5858.
- [59] POULTON C V, RUSSO P, TIMURDOGAN E, et al. High-performance integrated optical phased arrays for chip-scale beam steering and LiDAR[C]//*Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics*. Washington: OSA Publishing, 2018: ATu3R.2.
- [60] 李家立. 光波导光学相控阵技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- LI J L. Study on waveguide optical phased array technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2005.
- [61] 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): 7700108.
- [62] AFLATOUNI F, ABIRI B, REKHI A, et al. Nanophotonic projection system[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 21012-21022.
- [63] ABEDIASL H, HASHEMI H. Monolithic optical phased-array transceiver in a standard SOI CMOS process[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6509-6519.
- [64] 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.
- [65] ZHAO C, ZHANG H Y, ZHENG Z, et al. Silicon optical-phased-array prototypes using electro-optical phase shifters[C]//*Proceedings of the 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-2.
- [66] ZHAO C, PENG C, HU W W. Blueprint for large-scale silicon optical phased array using electro-optical micro-ring pixels[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17727.
- [67] FATEMI R, KHACHATURIAN A, HAJIMIRI A. A nonuniform sparse 2-D large-FOV optical phased array with a low-power PWM drive[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(5): 1200-1215.
- [68] ASHTIANI F, AFLATOUNI F. $N \times N$ optical phased array with 2N phase shifters[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 27183-27190.
- [69] REN Y M, ZHANG L X, ZHAO W, et al. Compact 2D serpentine optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(24): 7158-7163.
- [70] BYRD M J, POULTON C V, KHANDAKER M, et al. Free-space communication links with transmitting and receiving integrated optical phased arrays[C]//*Proceedings of the Frontiers in Optics/Laser Science*. Washington: OSA Publishing, 2018: FTu4E.1.
- [71] YOU Q, CHEN D G, XIAO X, et al. 10 Gb/s free space optical interconnect with broadcasting capability enabled by a silicon integrated optical phased array[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(12): 120602.

- [72] 董涛, 贺敬文, 徐月. 光子集成相控阵技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2022.
DONG T, HE J W, XU Y. Photonic integrated phased array technology[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2022.
- [73] KIM J Y, YOON H, YOON J, et al. Demonstration of high-speed wireless data transmission using passive silica optical phased array[C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE Press, 2023: 7.
- [74] LI Y Z, CHEN B S, NA Q X, et al. High-data-rate and wide-steering-range optical wireless communication via nonuniform-space optical phased array[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(15): 4933-4940.
- [75] 陈亚玲. 面向空间激光通信的BPSK/QPSK码型切换技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2024.
CHEN Y L. Research on BPSK/QPSK modulation switching techniques for space laser communication[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024.
- [76] 姚鑫, 蒙艳松, 贺玉玲, 等. 一种基于非平衡双BPSK的激光测距通信一体化实现方法: CN116953715A[P]. 2023-10-27.
YAO X, MENG Y S, HE Y L, et al. A method for integrated implementation of laser ranging and communication based on unbalanced dual BPSK: CN CN116953715A[P]. 2023-10-27.

[作者简介]



王亚菁 (2001-), 女, 甘肃庆阳人, 西北工业大学博士生, 主要研究方向为空间激光通信、时频传递。



李立 (1976-), 男, 陕西渭南人, 博士, 西北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星数据处理与传输技术、先进卫星通信技术。



靳一 (1984-), 男, 河南三门峡人, 博士, 西北工业大学研究员, 主要研究方向为卫星高速数传、空间激光通信、高可靠抗干扰通信等。



张建华 (1976-), 男, 陕西大荔人, 博士, 中国空间技术研究院西安分院研究员, 主要研究方向为激光通信、高速数传、云计算。



李文屏 (1984-), 男, 湖南长沙人, 博士, 北京跟踪与通信技术研究所副研究员, 主要研究方向为航天系统工程、天基网络、卫星通信。



孟令杰 (1976-), 男, 山东潍坊人, 博士, 国家航天局对地观测与数据中心研究员, 主要研究方向为卫星遥感系统设计。



徐常志 (1985-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 中国空间技术研究院西安分院研究员, 主要研究方向为卫星高速数传、空间激光通信。



梁慧剑 (1991-), 男, 陕西渭南人, 博士, 中国空间技术研究院西安分院高级工程师, 主要研究方向为卫星高速数传、空间激光通信、高可靠抗干扰技术。



齐志强 (1987-), 男, 河北沧州人, 博士, 华中光电技术研究所高级工程师、硕士生导师, 主要研究方向为光子集成器件、光量子器件。