



# 毫米波/太赫兹相控阵与系统集成技术专题简介

毛军发<sup>1</sup>, 吴柯<sup>2</sup>, 张跃平<sup>3</sup>, Jun YIN<sup>4</sup>, 赵涤燮<sup>5</sup>, 程钰间<sup>6\*</sup>

1. 上海交通大学, 上海 200240, 中国

2. Polytechnique Montréal, MONTRÉAL (QUÉBEC) H3T 1J4, Canada

3. Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore

4. 澳门大学, 澳门 999078, 中国

5. 东南大学, 南京 210096, 中国

6. 电子科技大学, 成都 611731, 中国

\* 通信作者. E-mail: chengyujian@uestc.edu.cn

毫米波与太赫兹相控阵技术近年来发展迅速, 在高速无线通信、卫星互联网、车载与空间雷达、精细成像以及通感一体化等领域展现出重要应用潜力. 得益于丰富的频谱资源和短波长特性, 毫米波/太赫兹技术能够提供更大的传输带宽、更高的空间分辨率和更强的波束指向能力, 为 5G/6G、低轨卫星通信、智能感知和高精度测量等新型信息系统提供关键支撑. 然而, 随着工作频率持续提升, 系统同时面临自由空间损耗增大、器件功率与噪声受限、封装散热压力提升、大规模阵列校准复杂以及多层级协同设计难度加剧等挑战. 围绕相控阵天线、电路封装协同、芯片天线一体化、宽带宽角波束控制及系统级验证等关键问题开展研究, 已成为推动毫米波/太赫兹技术走向高集成、高性能和工程实用化的重要方向.

为及时展示该领域的最新进展, *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2026 年第 69 卷第 5 期出版了“毫米波/太赫兹相控阵与系统集成技术专题”(Special Topic: Millimeter-Wave and Terahertz Phased-Array and System-Integration Technologies), 集中探讨了毫米波/太赫兹相控阵与系统集成中的关键科学问题与工程实现路径. 专题共收录了 7 篇文章, 内容覆盖了大规模宽带阵列架构、商业航天多波束相控阵、硅基 MEMS 太赫兹前端集成、片上太赫兹超表面天线, 以及混合波

束形成、多波束透射阵、亚太赫兹移动跟踪通信与 H 波段收发芯片等多个层面, 较为系统地呈现了本领域从阵列、封装到芯片, 从器件到系统验证的发展脉络.

针对大孔径宽带相控阵中的波束斜视问题, 论文“Design of a wideband phased array using true-time-delay and phase-shifter (TTD-PS) hybrid beamforming for beam squint mitigation”提出了一种子阵级真时延与阵元级移相器相结合的混合波束形成架构, 并完成了由 4 个 256 单元子阵拼接而成的 1024 单元 Ku 波段阵列验证. 实验结果表明, 在 60° 扫描条件下, 该架构可将 800 MHz 带宽内的最大波束指向误差由  $\pm 3.5^\circ$  降低至  $\pm 1^\circ$ , 并将 600 MHz 带宽 64-QAM 信号的误差矢量幅度由高于 7% 改善至 2% 以内. 这种混合方案为缓解大孔径与宽带宽之间的设计矛盾提供了一种兼顾性能与复杂度的实现思路, 展示了其在下一代卫星通信和雷达系统中的应用潜力.

面向商业航天通信中的宽角高效阵列需求, 论文“A circular-polarization high-efficiency wide-angle-AR four-beam AiP phased array for commercial aerospace communication”提出了一种 Ka 波段圆极化四波束接收型 AiP 相控阵. 该工作采用 8×8 阵列规模、16 个 AiP 模组分块集成、三维堆叠 GaAs 波束形成芯片以及无介质辐射与互连结构, 在兼顾高效率与宽角扫描轴

引用格式: 毛军发, 吴柯, 张跃平, 等. 毫米波/太赫兹相控阵与系统集成技术专题简介. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 1299–1300, doi: 10.1360/SSI-2026-0112

Mao J F, Wu K, Zhang Y P, et al. Special topic: millimeter-wave and terahertz phased-array and system-integration technologies. *Sci Sin Inform*, 2026, 56: 1299–1300, doi: 10.1360/SSI-2026-0112

比性能方面取得了较好结果. 实测结果表明, 该阵列在 29 GHz 下总辐射效率达到 82%, G/T 为  $-4.8$  dB/K, 并在宽角扫描条件下保持小于 5 dB 的轴比, 展示了面向商业航天应用的高可靠多波束阵列实现方案.

针对太赫兹前端高集成、低损耗封装实现难题, 论文“Silicon-based MEMS hybrid packaging approach for terahertz front-end integration: architecture, design, and prototype validation”提出了一种硅基 MEMS 混合集成封装方法, 在多层硅片平台上实现了波导缝隙阵列天线、GSG——波导横向过渡、射频互连与有源芯片的统一集成. 该工作结合了波导方案高效率 and 基板方案平面化、易互连的优势, 所设计天线剖面仅为 0.75 mm, 在 151 GHz 实现了 25.3 dBi 峰值增益和 83.2% 的辐射效率, 并完成了 D 波段原理样机验证, 为低损耗、高集成度太赫兹前端提供了新的实现路径.

在片上太赫兹波束调控与新型波前生成方面, 论文“Terahertz on-chip non-diffractive OAM metasurface antenna based on silicon microfabrication technology”提出了一种基于硅微加工工艺的片上太赫兹超表面天线, 可在 300~308 GHz 产生携带  $l = \pm 1$  模式的高阶贝塞尔轨道角动量波束. 实验结果表明, 该天线在 300~308 GHz 范围内的 OAM 模式纯度均超过 0.78, 并在  $20.4\lambda_0$  距离处保持了较好的能量约束; 同时, 其厚度仅为  $0.16\lambda_0$ , 且具备 CMOS 兼容潜力, 体现了片上太赫兹天线与新型波前调控融合的发展趋势.

针对大规模混合波束形成系统中的紧凑多波束产生需求, 快报“One-dimensional planar multi-beam dual-polarized transmitarray for large-scale hybrid beamforming system”改进了滑动孔径多波束透射阵理论与参数选取准则, 实现了可扩展的平面双极化多波束透射阵. 该结构可生成 5 对双极化波束, 覆盖  $\pm 30^\circ$  扫描范围, 在 5.8 GHz 时 5 个波束的实测增益为 12.34~13.62 dBi, 为大规模混合波束形成系统中的低复杂度模拟多波束实现提供了一种新思路.

面向低空平台与车联网等智能移动场景下的稳定链路保持需求, 快报“Demonstration of tracking and communication based on sub-terahertz phased-array system for next-generation intelligent mobile scenarios”构建了 94 GHz 相控阵跟踪与通信系统, 提出了将跟踪信标与通信信号解耦的频分复用架构, 以及由自适应交叉扫描、EKF 引导自适应圆锥跟踪和 EKF 引导锁定恢复构成的 ATL 跟踪方案. 外场实验表明, 该系统在 900 m 距离、20 km/h 运动条件下实现了约 1.5 Gbps 实时无压缩视频稳定传输, 并在动态场景下保持低于  $1 \times 10^{-8}$  的误块率, 展示了亚太赫兹移动链路的实时可行性.

针对硅基太赫兹相控阵系统中的高频收发与低复杂度移相实现需求, 快报“An H-band sliding-IF transmitter and receiver chipset in 130-nm SiGe BiCMOS”提出了一种面向 H 波段的滑动中频收发芯片组方案, 在 130 nm SiGe BiCMOS 工艺下实现了高功率 PA-last 发射机和宽带 LNA-first 接收机, 并通过在 80~100 GHz 中频段进行移相降低了关键器件的高频实现难度. 实测结果表明, 发射芯片在 246~282 GHz 范围内实现了 23.1~24.9 dB 转换增益和 7.2~8.5 dBm 饱和输出功率, 接收芯片在 248~258 GHz 范围内实现了 15.5 dB 峰值转换增益; 独立移相器在对应 240~300 GHz 射频范围内实现了小于 0.16 dB 的均方根增益误差和小于  $1.2^\circ$  的均方根相位误差, 为硅基太赫兹相控阵芯片实现提供了新的电路路径.

总体来看, 本专题所收录的 7 篇文章从毫米波到太赫兹、从阵列与封装到芯片与系统验证, 较为全面地反映了相控阵与系统集成技术的发展趋势. 相关研究不仅面向高频高集成信息系统的瓶颈提出了新方法, 也为未来 6G、商业航天通信、智能感知与高分辨成像等应用场景提供了重要技术储备. 以上是本专题收录的全部文章, 衷心感谢所有撰稿作者, 并诚挚感谢所有审稿专家和编辑部的辛勤工作.