

面向新一代 Wi-Fi 7/8 系统天线技术的演变与发展

董元旦, 尤佳雯, 李同博, 范羽飞

(电子科技大学电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 系统梳理新一代 Wi-Fi 系统中天线技术的演进历程, 重点聚焦 Wi-Fi 7/8 系统中的前沿天线技术, 分析其技术特征与发展趋势, 为未来研究提供参考方向。首先, 对可重构天线、波束扫描阵列、毫米波天线及小型化 MIMO 天线等关键技术进行综述, 深入探讨共享孔径天线与封装阵列的创新设计理念; 随后, 详细分析模式可重构天线、微型化 MIMO 天线及全平面覆盖模式多样化天线的实现方法与技术特征, 并对微型化相控阵、数字智能阵列和零点形成阵列等先进技术进行系统性对比研究。通过归纳总结各项技术的基本原理与研究现状, 明确了当前领域内的研究热点与关键技术挑战, 包括高密度集成、动态可重构性、全平面覆盖及干扰抑制等方向。基于技术发展趋势, 提出波束可控天线的未来发展路径, 强调其在 Wi-Fi 7/8 及未来通信系统中的关键作用, 为后续研究提供了理论支撑与实践指导。

关键词: 波束成形; 毫米波天线; 零点扫描; 可重构天线; 相控阵; 可重构智能表面; 共享孔径

中图分类号: TP393.0

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025231

Review on the new antenna evolution for next generation Wi-Fi 7/8 systems

DONG Yuandan, YOU Jiawen, LI Tongbo, FAN Yufei

School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: The evolution of antenna technologies in Wi-Fi systems was systematically reviewed in this study, with a focus on the state-of-the-art antenna technologies in Wi-Fi 7/8 systems. Their technical characteristics and development trends were analyzed to provide directional references for future research. Firstly, key technologies including reconfigurable antennas, beam-scanning arrays, millimeter-wave antennas, and miniaturized MIMO antennas were reviewed, and innovative design concepts of shared-aperture antennas and packaging arrays were explored. Subsequently, implementation methods and technical features of mode-reconfigurable antennas, miniaturized MIMO antennas, and full-plane coverage pattern-diversified antennas were analyzed in detail. A systematic comparative study was conducted on advanced technologies such as miniaturized phased arrays, digital intelligent arrays, and null forming arrays. By summarizing the fundamental principles and research status of various technologies, current research hotspots and key technical challenges in the field were identified, including high-density integration, dynamic reconfigurability, full-plane coverage, and interference suppression. Based on technological development trends, future development pathways for beam-controllable antennas are proposed, emphasizing their critical role in Wi-Fi 7/8 and future communication systems. Theoretical support and practical guidance are provided for subsequent research.

Keywords: beamforming, millimeter-wave antenna, null steering, reconfigurable antenna, phased array, reconfigurable intelligent surface, shared aperture

收稿日期: 2025-08-06; 修回日期: 2025-10-13

通信作者: 董元旦, ydong@uestc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62401100, No.62171091)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62401100, No.62171091)

0 引言

Wi-Fi 8 [1] 基于超高可靠性 (UHR), 其吞吐量预计将显著超越 Wi-Fi 7 [2], 这主要依赖于多接入点协同 (MAPC) 技术的突破。同时, 毫米波 (mm-Wave) 技术有望成为 Wi-Fi 8 及其后续标准的另一核心支撑。Wi-Fi 7/8 的演进对天线设计提出了更高要求, 亟须发展可重构、微型化 MIMO、波束导向 (含波束赋性与零陷扫描) 以及共享孔径毫米波天线等关键技术。此外, 光纤到房间 (FTTR) 与 Wi-Fi 融合组网模式 [3] 的普及, 进一步要求天线具备高带宽、动态可重构性 [4]、多频兼容及全空间覆盖能力, 新一代 Wi-Fi 系统的技术发展说明如图 1 所示。其中, 共享孔径天线通过优化结构复用, 在提升传输速率与可靠性的同时显著降低成本, 尤其适用于大频率比微波/毫米波设备; 可重构天线支持实时模式、频率及极化切换, 赋予系统动态适应能力; 而波束成形与零点扫描阵列则通过定向能量聚焦与干扰抑制, 有效提升链路稳定性。上述技术共同为未来 Wi-Fi 系统奠定了硬件基础。

本文聚焦下一代 Wi-Fi 7/8 系统中的天线技术演变, 重点解析 V 波段通信场景下的关键特性。下文将分章节探讨毫米波天线、可重构天线及波束成形阵列的设计进展。

1 毫米波天线

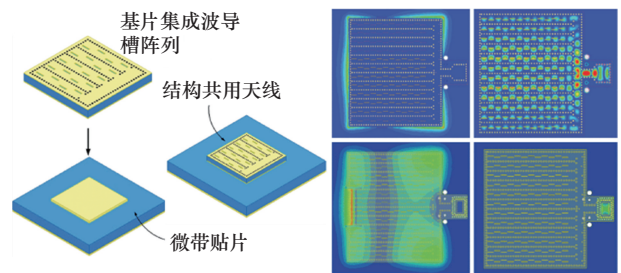
1.1 大频率比共享孔径天线

Wi-Fi 8 的工作频段将覆盖毫米波频谱, 兼具

大频率比、多频兼容与高隔离度的共享孔径天线的设计面临巨大挑战。现有方案可分为 2 类。

1) 分布式架构: 独立设计高频与低频天线单元, 常用于微波双频天线设计 [5]。然而, 因高低频单元尺寸差异悬殊, 整体辐射孔径难以压缩。

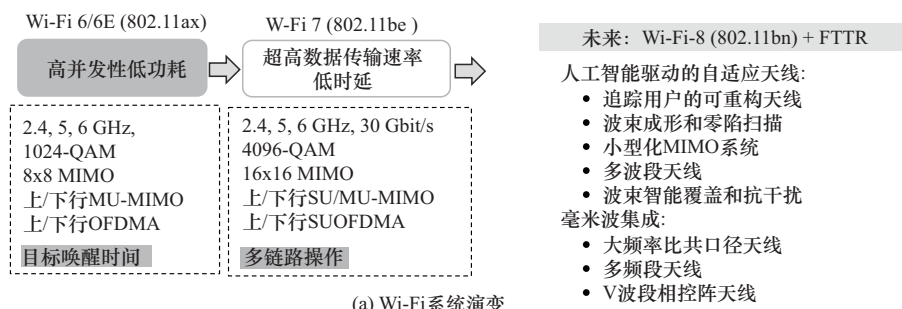
2) 复用架构: 通过结构集成提升孔径利用率。具有大频率比的双频 (Sub-6 GHz 和 V 波段) 共享孔径天线如图 2 所示, 文献 [6] 提出一种 Sub-6 GHz 与 60 GHz 双频共享孔径天线, 其创新性在于将 12×12 基片集成波导 (SIW) 缝隙阵列作为 3.5 GHz 贴片天线的辐射体, 实现高密度集成。



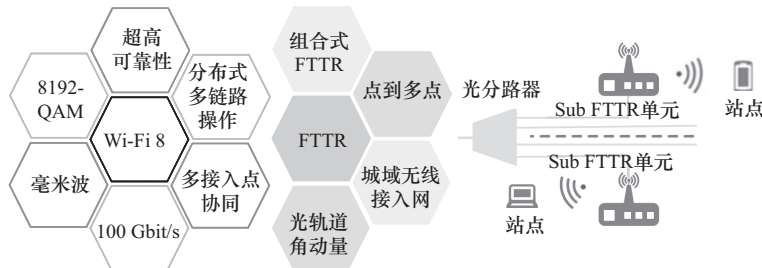
(a) 贴片和 SIW 槽阵列共口径结构 (b) 低频和高频的电场分布
图 2 具有大频率比的双频 (Sub-6 GHz 和 V 波段) 共享孔径天线

1.2 大频率比共享孔径天线

封装天线 (AiP) 技术通过芯片-天线一体化设计减少传输损耗, 但封装工艺对天线增益与电磁兼容性 (EMC) 的影响仍需优化。文献 [7] 系统探讨了封装材料、阵列排布与集成策略, 为毫米波封



(a) Wi-Fi 系统演变



(b) Wi-Fi 8 系统和 FTTR 深度融合的应用特征

图 1 新一代 Wi-Fi 系统的技术发展说明

装阵列设计提供重要参考。

2 可重构天线

2.1 模式可重构实现方法

电控模式多样性天线通过引入 PIN 二极管、MEMS 开关、变容二极管、石墨烯、液态金属等元件, 调控辐射孔径的电流与场分布, 从而实现波束动态控制。目前, 模式可重构天线的实现方式主要包括以下几种^[8-15]。

1) 复杂电控馈电网络设计^[8]: 通过切换不同馈电路径激发特定谐振模式或辐射单元, 但此类方案结构复杂且带宽较窄。

2) 多辐射单元紧凑集成^[9]: 在公共孔径上集成多个辐射单元, 通过选择特定辐射结构实现多模式辐射。然而, 该方案需额外偏置电路与可切换寄生结构^[10], 导致尺寸较大且损耗较高。

3) 特征模分析与超表面设计^[11]: 结合算法优化超表面天线结构, 但通常需要大量射频开关, 导致插入损耗增加。

4) 高阶或多模组合^[12-13]: 通过高阶模式或多模耦合实现波束调控, 但存在体积大、馈电网络复杂等问题。

5) 多端口技术^[14]: 利用多端口结构实现模式切换, 但需解决端口隔离问题, 且波束切换效率较低。

6) 新型电磁材料应用^[15]: 如石墨烯与液态金属, 需复杂控制系统支持, 增加了实现难度。

此外, 可重构天线还可通过以下设计方法实现。

1) 八木天线^[16]: 通过在驱动单元周围加载开关控制的反射器或引向器实现定向波束, 用于辐射操控的八木天线原理如图 3 所示。然而, 由于需额外构建寄生单元, 该方法存在空间占用大、孔径利用率低等问题^[17]。此外, 为提升方向性需增加反射器或引向器数量, 进一步加剧结构复杂度, 导致其在新一代通信应用中的局限性^[16]。

2) 电磁互补/惠更斯天线^[18]: 互补/惠更斯原理如图 4 所示, 通过正交放置的电流单元与磁流单元对实现定向辐射, 具有高前后比 (F/B 比)、低交叉极化与高辐射效率等优势。互补天线仅需在同一孔径内调控电偶极子或磁偶极子的相位或极化状态, 因而尺寸更紧凑。然而, 现有研究多集中于近场谐振寄生单元^[19], 较少拓展至其他天线类型。

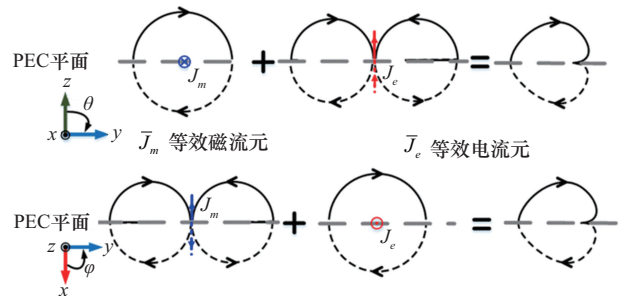


图 4 互补/惠更斯原理

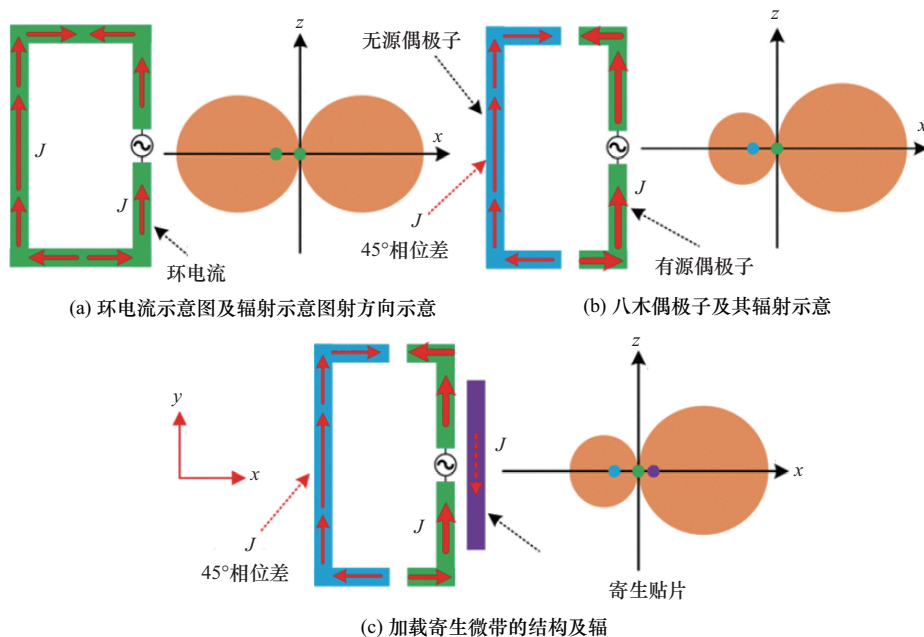


图 3 用于辐射操控的八木天线原理

3) 奇偶模天线^[20]: 结合偶模 (全向辐射) 与奇模 (宽边辐射) 2 种模式, 通过叠加实现多波束辐射。当 2 种模式相位差为 0° 或 180° 时, 可生成准端射 (quasi-endfire) 特性波束, 奇偶模式原理如图 5 所示。然而, 其波束覆盖范围有限, 仅能实现半球空间辐射^[21]。

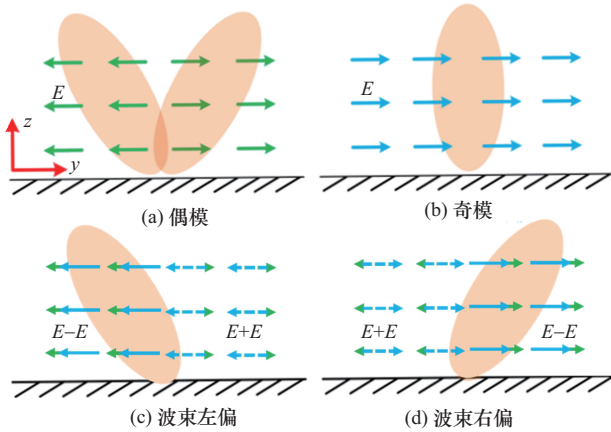


图 5 奇偶模式原理

2.2 小型化分集天线与 MIMO

共享孔径模式分集天线与电小天线是实现天线小型化的 2 种重要途径。

文献[22]提出了一种小型化共享孔径模式可重构天线, 突破了传统八木天线的尺寸限制。传统八木天线的导向器与反射器间距较大, 导致其整体尺寸难以压缩。低剖面的可重构 ZOR 超表面天线如图 6 所示, 该设计通过弯折单极天线形成顶部负载, 构造出蘑菇状准八木响应, 并结合零阶谐振蘑菇结构^[23]进一步压缩剖面, 最终创新性地 将蘑菇结构与零阶超表面集成, 实现了显著的小型化效果。

传统近场谐振天线虽易于实现小型化, 但其可重构性受限。例如, 磁电偶极子天线^[24]依赖大面积地板形成磁偶极子, 而惠更斯源天线^[25]则通过条状结构耦合环形天线与偶极子, 导致其灵活性不足。基于互补/惠更斯原理^[26-28]的模式可重构天线为小型化与平面模式分集提供了新思路。基于惠更斯原理的平面可重构天线如图 7 所示, 一种典型方法是通过小型地板参与互补辐射电流的形成^[26]。此外, 多种新型磁偶极子 (如阿尔福德环^[26]、半模 SIW^[28]、缝隙天线、分段环^[26]等) 与电偶极子 (如偶极子、单极子、半模缝隙等) 的结合, 进一步拓展了设计自由度。基于介质谐振器 (DR) 的

天线^[29]则通过探针馈电与条状结构或缝隙的结合, 实现了更高的可重构性。基于惠更斯源的新型可重构 DR 天线如图 8 所示, 通过调整辐射电偶极子的位置, 该设计可在水平面上以 45° 为步长实现 8 个不同方向的波束扫描。

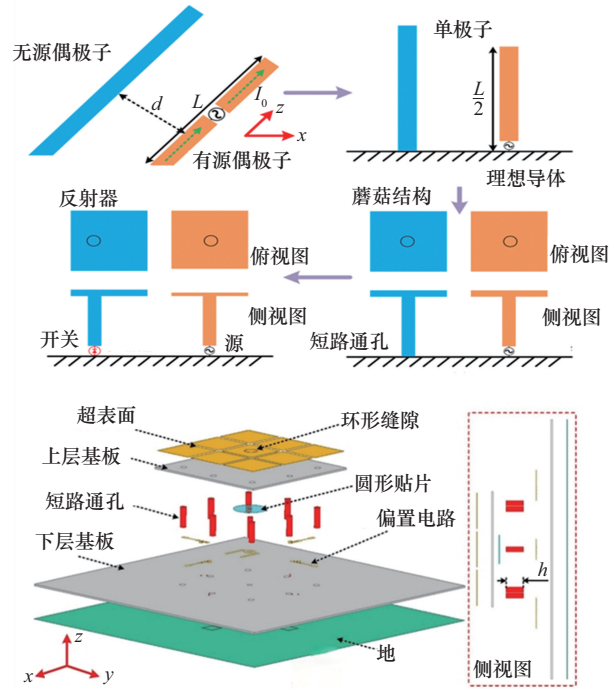


图 6 低剖面的可重构 ZOR 超表面天线

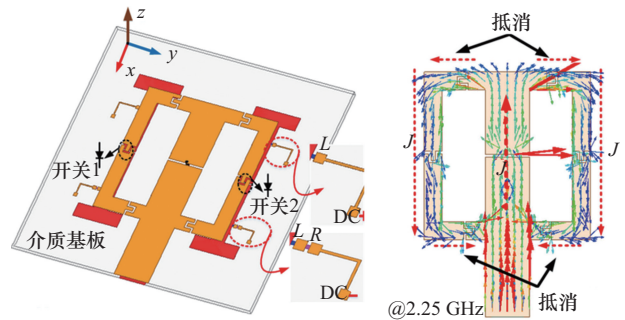


图 7 基于惠更斯原理的平面可重构天线

分集天线在 MIMO 系统的小型化与耦合抑制中也具有重要应用。极化分集^[30]通过正交放置天线单元降低空间辐射耦合, 但对拓扑结构要求较高, 不利于小型化。模式分集^[31]则利用定向天线作为 MIMO 单元, 通过非重叠辐射方向实现高隔离特性, 为 MIMO 系统的小型化提供了有效解决方案。

2.3 可重构天线的盲区消除

模式可重构天线的一个关键性能指标是其可控

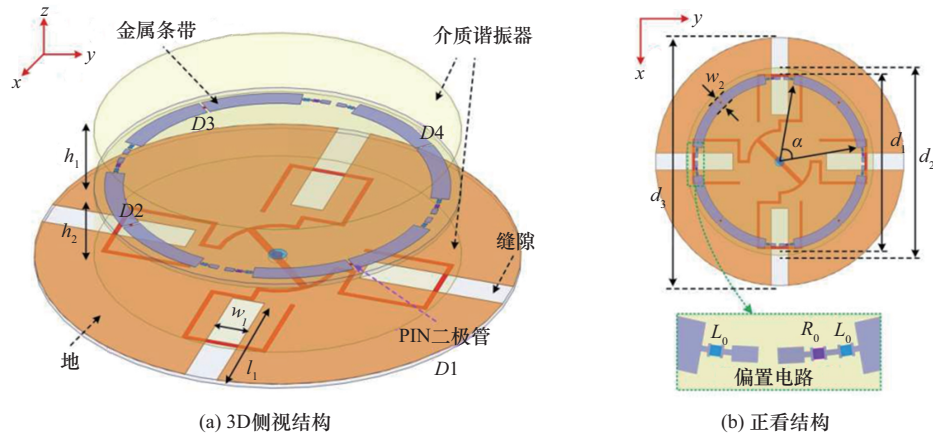


图8 基于惠更斯源的新型可重构DR天线

波束的覆盖范围。例如，许多奇偶模天线仅支持双波束切换或半平面覆盖^[32]，而实现全平面覆盖^[33]对小型化模式可重构天线而言仍具有较大挑战。定向天线虽具有高增益特性，但存在辐射盲区；全向天线虽覆盖范围广，但增益较低。因此，具备全平面覆盖能力的可切换波束天线结合了两者的优势，能够实现高增益、高传输效率以及任意角度调整，同时有效抑制不利方向的干扰。

为实现全平面覆盖，通常采用3个或4个大角度可切换波束^[27,33]，可在水平面上获得均匀的高增益与传输效率，大角度可切换波束的全平面覆盖如图9所示。对称结构常用于实现均匀模式分布，并通过共享孔径设计进一步实现小型化。此外，增加波束数量也是一种有效策略。小角度可切换波束（部分）的全平面覆盖如图10所示，文献^[34]提出了一种低剖面模式可重构四分之一模基板集成波导

(QMSIW) 天线，通过19个波束转向，实现了近乎全空间覆盖，其小角度波束控制机制显著提升了空间覆盖精度。

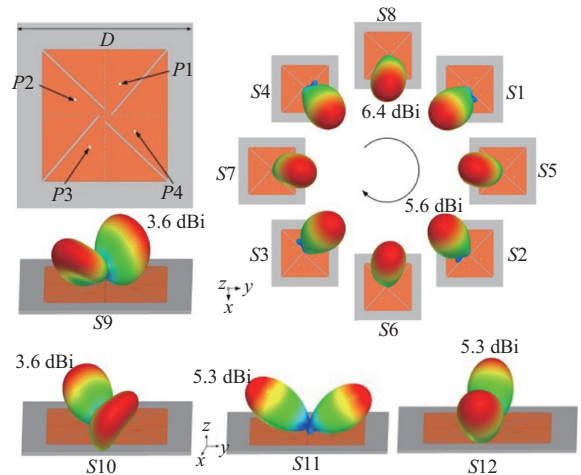


图10 小角度可切换波束(部分)的全平面覆盖

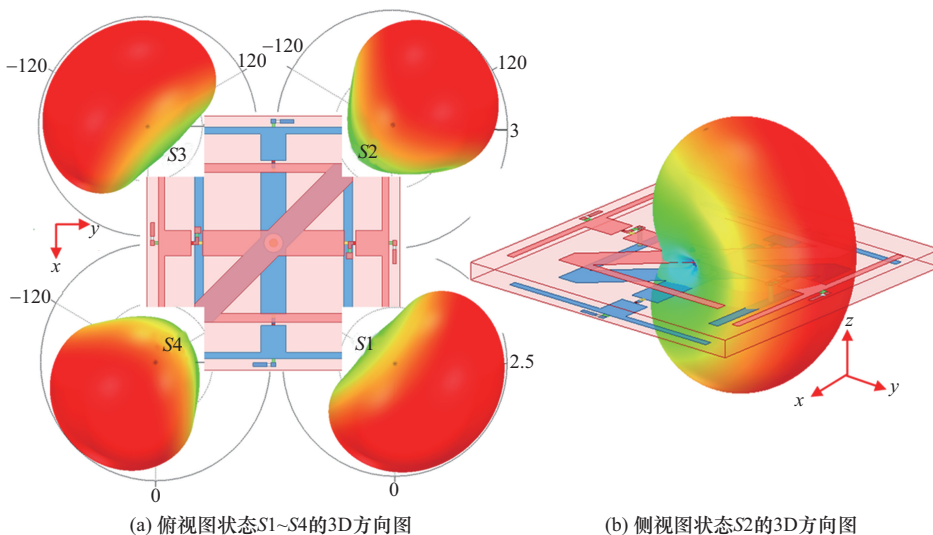


图9 大角度可切换波束的全平面覆盖

共享口径360°连续波束扫描天线如图11所示，文献[35]进一步提出了一种基于共享孔径多模式合成的360°连续波束扫描天线，实现了真正的全平面波束扫描。该设计利用奇偶模原理，结合固定的偶模（垂直单极天线）与0~360°可重构奇模（通过叠加右手圆极化RHCP和左手圆极化LHCP实现），通过多方向奇模的叠加或相消，构造出非平衡场分布，从而在水平面上生成多个不同方向的端射波束。

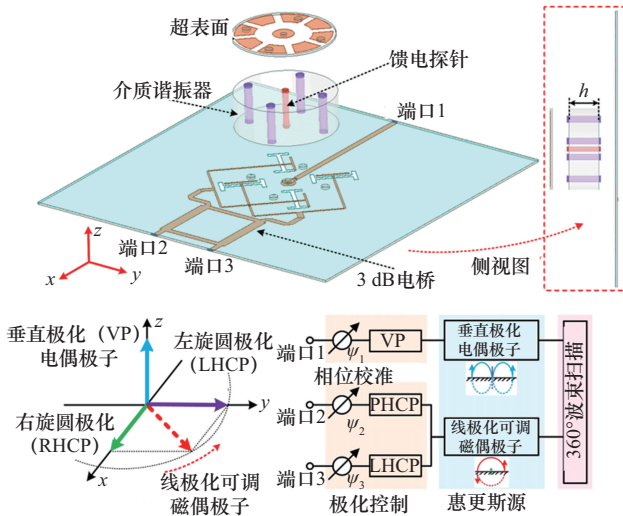


图11 共享口径360°连续波束扫描天线(包含天线3D结构图、极化原理图,以及电路控制说明)

复杂性限制了其被广泛应用。将可重构天线作为阵列单元可显著提升宽角波束扫描性能与小型化潜力。然而，现有阵列多采用八木可重构天线作为单元，导致阵元间距较大^[36]。为解决这一问题，文献[37]提出了一种基于小型化惠更斯源(Huygens源)的可重构方法，并将其推广至宽角扫描阵列中，进一步实现了小型化，基于分集天线的小型化相控阵如图12所示。

基于混合电磁超材料的宽角扫描阵列如图13所示，文献[38]提出了一种基于小型化混合电磁超材料谐振体的天线阵列，其谐振体以“一”字形排列成线阵。与传统半波长阵元相比，得益于混合电磁超材料的周期性及边缘场分布较弱的特点，阵元间距得以显著压缩。

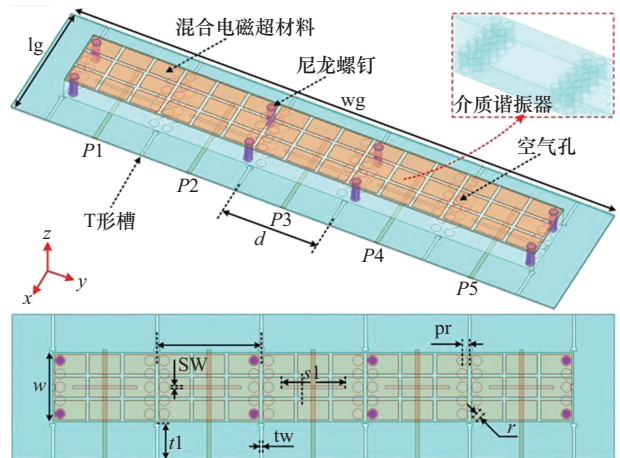


图13 基于混合电磁超材料的宽角扫描阵列

3 波束成形阵列

3.1 基于分集天线的小型化相控阵

单天线系统存在增益低、波束宽等问题，而相控阵虽具有高增益与可控波瓣的优势，但高成本与

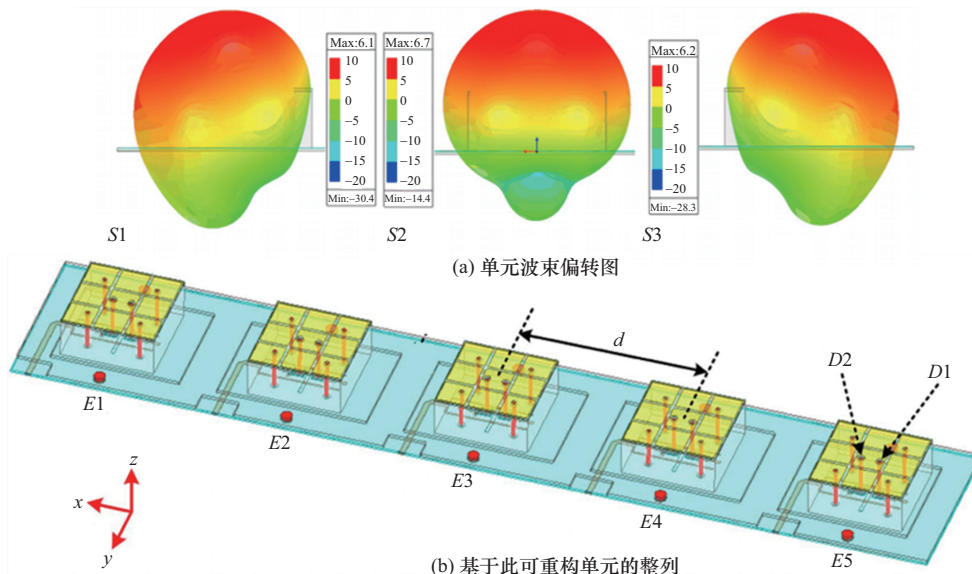


图12 基于分集天线的小型化相控阵

3.2 基于分集天线的数字智能阵列

传统相控阵因需配置移相器或 T/R 组件, 导致成本与复杂性较高。为满足新一代智能无线通信的需求, 天线需兼具智能辐射控制、低成本与紧凑尺寸等特性。随着数字超表面技术的发展, 数字控制理念被引入可重构天线设计^[39], 显著降低了传统移相器的成本。然而, 现有研究多集中于 1 bit 与 2 bit 移相的实现^[40]。文献[41]提出了一种多电磁组件数字可重构阵列, 通过生成 1 bit 相位 ($0^\circ/180^\circ$) 与 2 bit 极化 (0° 线极化、 90° 线极化、右旋圆极化 RHCP 及左旋圆极化 LHCP), 首次提出了数字相位与数字极化的概念, 大幅提升了辐射调控的灵活性, 多电磁特征的智能化数字阵列如图 14 所示。类似地, 文献[42]提出了一种低成本 2 bit 相位与 1 bit 振幅阵列, 通过引入极化与振幅控制维度, 进一步扩展了数字阵列的设计自由度。

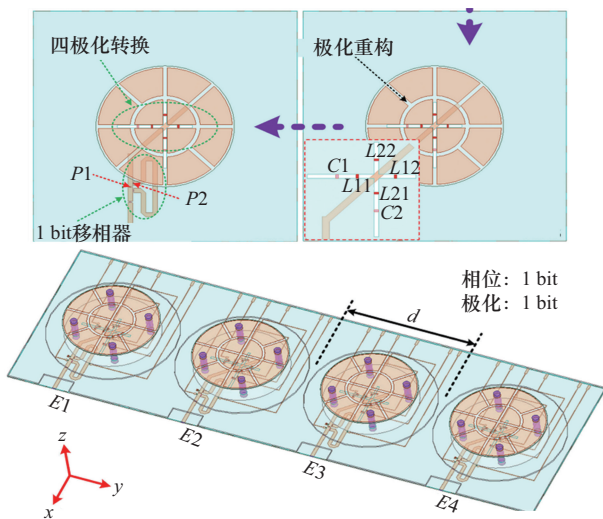


图 14 多电磁特征的智能化数字阵列

3.3 零点成形阵列

波束零点扫描天线^[43]的核心特性是能够将主波束指向目标信号, 同时将零点对准干扰区域。这一技术在 Wi-Fi 7/8 应用中具有重要潜力, 因此基于可重构天线单元的零点形成阵列值得重点关注。

4 结束语

本文系统探讨了面向 Wi-Fi 7/8 的天线技术的新发展, 包含毫米波共享孔径天线、可重构模式分集天线及波束成形阵列的技术等。FTTR 与 Wi-Fi 融合组网模式对天线设计提出了特殊需求: 一方面, FTTR 通过光纤直连实现超低时延骨干传输,

但末端无线覆盖仍需依赖高性能天线以支持多频段载波聚合与动态负载分配; 另一方面, FTTR 的高密度部署场景 (如智能家居、工业物联网) 要求天线在有限空间内兼顾高带宽、全向覆盖与干扰抑制能力。针对上述需求, 共享孔径天线通过多频复用显著降低多天线系统体积, 可适配 FTTR 设备的紧凑化趋势; 可重构天线则能动态切换波束指向与极化状态, 适应 FTTR 网络拓扑的实时变化; 而波束零点扫描技术可精准规避密集部署下的同频干扰, 提升多接入点协同效率。未来, FTTR 与毫米波、可重构天线的深度结合, 有望在室内超高速无线回传、高精度定位等场景中发挥关键作用。

为满足超高频谱效率、容量提升与抗干扰需求, 未来需进一步探索高频段兼容设计、智能调控算法与低成本大规模集成方案。此外, FTTR 与 Wi-Fi 8 的协同优化 (如光纤-无线信道联合调度、天线-光模块共封装设计) 也将成为重要研究方向。天线技术的持续革新将为 6G、太赫兹通信等前沿领域提供关键硬件支撑。

特别感谢华为 FTTR 部门对于本工作的支持。项目的相关研究成果, 包含多频段天线、智能天线和共口径天线在产品中得到了具体应用。

参考文献:

- [1] GALATI-GIORDANO L, GERACI G, CARRASCOSA M, et al. What will Wi-Fi 8 be? a primer on IEEE 802.11bn ultra high reliability[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(8): 126-132.
- [2] KHOROV E, LEVITSKY I, AKYILDIZ I F. Current status and directions of IEEE 802.11be, the future Wi-Fi 7[J]. IEEE Access, 2020, 8: 88664-88688.
- [3] ZHANG D C, ZHU J L, LIU X, et al. Fiber-to-the-room: a key technology for F5G and beyond[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(9): D1.
- [4] KESHMIRI F, XIONG H, REN Z X. Smart antenna for optical network terminals and indoor optical network[P]. WO2024007210A1, 2024-01-11.
- [5] LI Y X, CHU Q X. Coplanar dual-band base station antenna array using concept of cavity-backed antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7343-7354.
- [6] ZHANG J F, CHENG Y J, DING Y R, et al. A dual-band shared-aperture antenna with large frequency ratio, high aperture reuse efficiency, and high channel isolation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 853-860.
- [7] GU X X, LIU D X, SADHU B. Packaging and antenna integration for silicon-based millimeter-wave phased arrays: 5G and beyond[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(1): 123-134.
- [8] CAO W Q, ZHANG B N, LIU A J, et al. A reconfigurable microstrip antenna with radiation pattern selectivity and polarization diversity[J].

- IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 453-456.
- [9] ZHANG Y J, HAN Z X, TANG S W, et al. A highly pattern-reconfigurable planar antenna with 360° single- and multi-beam steering[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(8): 6490-6504.
- [10] DENG W Q, YANG X S, SHEN C S, et al. A dual-polarized pattern reconfigurable yagi patch antenna for microbase stations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(10): 5095-5102.
- [11] QIN Y F, ZHANG L, MAO C X, et al. Low-profile compact tri-band multimode reconfigurable antenna using characteristic mode analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(7): 6144-6149.
- [12] YANG Y H, ZHAO Z Q, DING X X, et al. Single slot antenna with multiple radiation modes using a parasitic loop pair[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 1335-1340.
- [13] ZHONG L, HONG J S, ZHOU H C. A novel pattern-reconfigurable cylindrical dielectric resonator antenna with enhanced gain[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 15: 1253-1256.
- [14] DING X X, ZHAO Z Q, YANG Y H, et al. A low-profile and stacked patch antenna for pattern-reconfigurable applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7): 4830-4835.
- [15] HAO J X, REN J, DU X Y, et al. Pattern-reconfigurable yagi-uda antenna based on liquid metal[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(4): 587-591.
- [16] WANG Z, LIU S X, DONG Y D. Compact wideband pattern reconfigurable antennas inspired by end-fire structure for 5G vehicular communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5): 4655-4664.
- [17] KITTIANPUNYA C, KRAIRIKSH M. A four-beam pattern reconfigurable yagi-uda antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(12): 6210-6214.
- [18] ZHAO S N, WANG Z, DONG Y D. Pattern-reconfigurable antenna using low-profile electric and magnetic radiators[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(3): 616-620.
- [19] TANG M C, ZHOU B Y, ZIOLKOWSKI R W. Low-profile, electrically small, Huygens source antenna with pattern-reconfigurability that covers the entire azimuthal plane[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1063-1072.
- [20] WANG Z, DONG Y D. Low-cost metamaterial-based reconfigurable antenna with even-odd mode pattern control method[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-3.
- [21] YUAN W T, HUANG J J, ZHANG X F, et al. Wideband pattern-reconfigurable antenna with switchable monopole and Vivaldi modes[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(1): 199-203.
- [22] WANG Z, ZHAO S N, DONG Y D. Pattern reconfigurable, low-profile, vertically polarized, ZOR-metasurface antenna for 5G application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(8): 6581-6591.
- [23] LEE J G, LEE J H. Zeroth order resonance loop antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(3): 994-997.
- [24] LUK K M, WONG H. A new wideband unidirectional antenna element[J]. International Journal of Microwave and Optical Technology, 2006, 1(1): 35-44.
- [25] TANG M C, SHI T, ZIOLKOWSKI R W. A study of 28 GHz, planar, multilayered, electrically small, broadside radiating, Huygens source antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6345-6354.
- [26] ZHAO S N, WANG Z, DONG Y D. A planar pattern-reconfigurable antenna with stable radiation performance[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(4): 784-788.
- [27] YOU J W, DONG Y D. Miniaturized planar pattern-reconfigurable antenna for smart Wi-Fi applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 23(1): 109-113.
- [28] YOU J W, DONG Y D. Smart Wi-Fi antenna with reconfigurable omnidirectional and unidirectional patterns[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(3): 1010-1014.
- [29] HAN S Q, WANG Z, DONG Y D. Dielectric resonator antenna with reconfigurable patterns based on Huygens source[C]//Proceedings of the 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-3.
- [30] 夏运强, 唐涛. 多用途双频双极化双通道MIMO室内基站天线[J]. 微波学报, 2013, 29(4): 53-56, 61.
XIA Y Q, TANG T. Multi-purpose dual-band dual-polarized and dual-channel MIMO indoor base station antenna[J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(4): 53-56, 61.
- [31] XU Y Z, DONG Y D, WEN S C, et al. Vertically polarized quasi-yagi MIMO antenna for 5G N78 band application[J]. IEEE Access, 2021, 9: 7836-7844.
- [32] WANG Z, NING Y W, DONG Y D. Compact shared aperture quasi-yagi antenna with pattern diversity for 5G-NR applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(7): 4178-4183.
- [33] YOU J W, DONG Y D. Pattern diversity antenna with odd and even modes for intelligent Wi-Fi applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(11): 3704-3708.
- [34] BAI H, WANG G M, XIE P, et al. A nineteen-beam steering pattern reconfigurable antenna based on quarter-mode substrate integrated waveguide[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(9): 8560-8565.
- [35] WANG Z, DONG Y D. Theory, design, and verification of miniaturized phase-controlled Huygens antenna for 360° continuous beam scanning[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(4): 3104-3113.
- [36] BAI Y Y, XIAO S Q, TANG M C, et al. Wide-angle scanning phased array with pattern reconfigurable elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(11): 4071-4076.
- [37] WANG Z, DONG Y D, PENG Z L, et al. Hybrid metasurface, dielectric resonator, low-cost, wide-angle beam-scanning antenna for 5G base station application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(9): 7646-7658.
- [38] 王焱, 董元旦. 基于混合电磁超材料的宽角扫描相控阵天线[J]. 电子学报, 2023, 51(2): 267-274.
WANG Z, DONG Y D. A hybrid metamaterial-based wide-angle beam-scanning phased array antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(2): 267-274.
- [39] WANG Z, ZHAO S N, DONG Y D. Miniaturized, vertically polarized, pattern reconfigurable dielectric resonator antenna and its phased array for wide-angle beam steering[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(10): 9233-9246.
- [40] ZHANG X G, JIANG W X, TIAN H W, et al. Pattern-reconfigurable

planar array antenna characterized by digital coding method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 68(2): 1170-1175.

[41] YIN L, YANG P, GAN Y Y, et al. A low cost, low in-band RCS microstrip phased-array antenna with integrated 2 bit phase shifter[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 4517-4526.

[42] WANG Z, DONG Y D. Phase and polarization digitally modulated array using reconfigurable DR element: proposal, design, and verification[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(5): 4102-4114.

[43] 邓长江, 吕昕. 利用贴片天线的奇偶模实现宽频带辐射零点扫描[J]. 微波学报, 2021, 37(6): 48-51.

DENG C J, LV X. Wideband radiation null steering using the odd/even modes of microstrip patch antenna[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(6): 48-51.

[作者简介]



董元旦 (1983-), 男, 江苏无锡人, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为射频电路、电磁场与微波技术、天线与传播等。



尤佳斐 (2000-), 女, 河北石家庄人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为智能天线、方向图可重构天线、小型化天线等。



李同博 (2004-), 男, 安徽六安人, 主要研究方向为可重构天线、手机天线。



范羽飞 (2001-), 男, 安徽合肥人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为共口径天线、基站天线、透镜天线。