

空间-电磁协同可编程天线综述：从概念内涵、最新进展到演进方向

于刊¹, 李凯璇², 赵禹嘉¹, 王文旭², 马丁友¹, 张徐琿³, 张奇勋¹, 冯志勇¹, 乐恒志¹

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 曲阜师范大学计算机学院, 山东 日照 276826;

3. 香港中文大学(深圳)深圳市未来智能网络研究院, 广东 深圳 518172)

摘要: 可移动天线(MA)技术凭借天线单元位姿可调实现电磁辐射特性操控, 近年来备受学术界与工业界关注。然而, 现有对MA的理解多将电磁辐射特性的可重构性归因于天线位置的变化, 实际上电磁层面的主动重构才是决定MA工作姿态的关键因素。基于此, 对MA技术的概念进行重新解读与分析, 指出电磁可重构能力是进一步突破通信性能瓶颈的必然发展方向, 并提出空间-电磁协同可编程天线(SEPA)技术, 以更全面地描述天线在空间与电磁域中的协同可重构特性。最后, 从电磁辐射特性智能重构范式、空域立体覆盖空洞补偿、平台设计与关键技术验证等方面, 展望SEPA的未来演进方向。

关键词: 可移动天线; 空间-电磁协同可编程天线; 电磁辐射特性; 空间自由度

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.TXXB250610

Survey on spatio-electromagnetic programmable antenna: fundamentals, recent advances, and future directions

Yu Kan¹, Li Kaixuan², Zhao Yujia¹, Wang Wenxu², Ma Dingyou¹, Zhang Xuhui³, Zhang Qixun¹, Feng Zhiyong¹, Le Hengzhi¹

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Qufu Normal University School of Computer Science, Rizhao 276826, China

3. Shenzhen Future Network of Intelligence Institute, The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen, Shenzhen 518172, China

Abstract: The movable antenna (MA) technology, which enables manipulation of electromagnetic (EM) radiation characteristics through adjustable antenna positions and postures, has attracted significant attention from both academia and industry in recent years. However, existing interpretations of MA often attribute the reconfigurability of EM radiation characteristics solely to changes in antenna position, while in fact, active reconfiguration at the electromagnetic level is the key factor determining the operational posture of MA. Based on this, the core concept of MA was clarified, emphasizing that electromagnetic reconfigurability was essential for breaking through current communication performance bottlenecks. On this basis, the spatio-electromagnetic programmable antenna (SEPA) was proposed to more comprehensively characterize the synergistic reconfigurability of antennas in both spatial and electromagnetic domains. Finally, several future research directions for SEPA were outlined, including intelligent paradigms for EM radiation reconfiguration, compensation for spatial coverage gaps, platform design, and validation of key technologies.

Key words: movable antenna, SEPA, electromagnetic radiation characteristic, degree of freedom

收稿日期: 2025-12-09; 修回日期: 2026-03-10

通信作者: 于刊, kanyu@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(No.62301076, No.62401077); 国家自然科学基金创新群体资助项目(No.62321001); 国家重点研发计划基金资助项目(No.2022YFB4300403); 北京邮电大学海南先进数字技术与系统实验室资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62301076, No. 62401077), The Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation (No.62321001), The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB4300403), The Hainan Laboratory of Advanced Digital Technology and Systems

0 引言

2024 年，全国两会首次将“低空经济”写入政府工作报告。随后，工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民用航空局联合印发《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030 年）》，指出“继续深化通用航空装备在应急救援、物流配送、城市空中交通、新型通用航空消费等领域的示范应用，形成万亿级市场规模”。这类典型应用场景的规模化发展，对空基通信网络提出了多维度极限性能要求，亟须在广域无缝覆盖、超高可靠与超低时延通信、复杂电磁干扰抑制及信息传输安全等方面实现协同突破。作为空基通信网络的核心物理基础设施，固定位置天线（fixed-position antenna, FPA）阵列基站在支撑低空经济应用中发挥着关键作用。

低空立体覆盖是保障“低空经济”安全运行的基石。FPA 阵列基站凭借其多天线技术与智能波束成形能力，成为构建低空覆盖网络的核心基础设施，并通过密集组网形成低空连续覆盖网络，为安全应用提供支撑。然而，一方面，现有 FPA 阵列基站主要针对地面用户覆盖设计，其垂直扫描角度通常仅为 20°左右^[1]，且采用下倾部署（1°~15°）以平衡覆盖范围与邻区干扰，导致实际垂直覆盖高度有限，难以满足 300 m 空域连续覆盖需求。另一方面，FPA 系统受限于其静态部署特性，在实际应用中面临显著性能约束，主要体现在：垂直面覆盖能力不足，广域覆盖与高频增益难以兼顾，对环境动态变化的适应性较差，干扰协调能力有限，如表 1 所示。“FPA 阵列向上倾斜”是一种改善低空覆盖的直观方法，但依然存在一系列固有的、难以克服的根本性局限性，主要体现在以下 4 个层面。

（1）空间自由度（degree of freedom, DoF）受限：覆盖能力僵硬，无法兼顾与自适应

FPA 阵元位置固定，阵列流形与典型波束形态

（如主瓣宽度、旁瓣分布等）在设计定型后基本确定；工程上虽可通过扫描、多波束、分时或分频等方式提升覆盖与服务能力，但在孔径、功率与射频链资源受限的条件下，其可同时满足的覆盖-增益-约束目标仍存在可达边界。倾斜天线主要改变指向而非重构阵列几何，在动态低空与城市环境中面临以下困难。①覆盖与增益的矛盾，扩展覆盖往往需更宽波束或更多并发波束，带来能量分散与峰值增益下降；高增益窄波束覆盖有限，难以兼顾大范围机动或密集目标。②遮挡规避能力不足，楼宇遮挡具有时变性，主路径受阻时即使调整指向也可能受限于可用反射/绕射路径与链路预算，存在中断风险。③多目标能力受限，当目标分布于不同方位/高度且需求差异显著时，系统需在波束数量、增益分配与约束条件间权衡，难以同时为多个目标提供彼此独立且均最优的高增益链路。

（2）电磁自由度不足：应对动态环境与安全威胁的能力薄弱

FPA 可通过自适应波束成形（如最小方差无失真响应波束成形、线性约束最小方差波束成形等）在干扰/窃听方向形成零陷，并在一定程度上对移动干扰源进行跟踪与抑制。然而，其性能受以下因素共同制约。①自由度约束与权衡，在给定阵元规模与射频链条件下，可同时满足的“主瓣增益保持、旁瓣约束与多零陷约束”数量有限，零陷深度/“有效宽度”与主瓣增益、旁瓣电平之间存在不可避免的权衡。②统计估计与快拍限制，在强动态场景中，干扰协方差矩阵及角度统计特性快速变化，有限快拍与估计误差会导致自适应权值失配，进而引发干扰抑制性能下降。③多源/高机动场景的鲁棒性问题，当干扰源数目增加、机动性增强或出现协同干扰/移动窃听者时，FPA 的稳健抑制与安全零陷跟踪将更依赖高精度感知与快速更新机制。

表 1 配备 FPA 阵列的新一代基站面向低空通信领域的局限性

固化特性	局限性	空城场景中的具体不利影响
波束指向固定	垂直面覆盖能力弱	天线通常下倾覆盖地面用户，高空域覆盖差，形成“覆盖空洞”或“安全盲区”
波束形状固定	无法兼顾覆盖与增益	广域搜索（宽波束）和精准跟踪/通信（高增益窄波束）矛盾，无法动态切换波束形态，性能难以兼顾
DoF 有限	干扰抑制能力受限	零陷指向受限于固定阵列构型，难以灵活调控零陷方向与深度以动态应对多干扰源或移动窃听者，通信质量下降或安全隐患上升
环境交互固定	环境适应性差	视距链路被建筑物或临时障碍物遮挡时，只能等待无人机（unmanned aerial vehicle, UAV）飞出遮挡区，造成通信中断和安全盲区

(3) 资源协同维度狭窄: 优化天花板低

FPA 系统优化变量主要是功率和相位, 属于电磁域资源, 优化变量少, 求解空间有限, 难以实现多目标同步提升, 系统性能存在瓶颈。

(4) 范式落后: 被动适配而非主动构造

FPA 阵列向上倾斜依然是一种静态的、被动的低空覆盖策略, 这是最根本的局限, 无法应对低空高度动态的场景, 具体不足如下。①“后验”而非“先验”, FPA 系统通常在感知到信道质量下降后, 再调整波束去“补救”, 这种“感知-决策-执行”的延迟在高速移动场景下会导致决策永远滞后。②只能被动地适应信道, 基于既定位置微调波束, 无法提前规避遮挡或主动构造有利信道。

因此, 亟须变革传统辐射特性固化的天线静态几何结构, 基于可移动天线 (movable antenna, MA) 的电磁辐射可重构特性, 动态调控多域资源与智能协同, 实现低空立体覆盖范围扩展与安全性能跃升。当前 MA 技术已在低空经济^[2]、车联网^[3]、卫星通信^[4]等领域展开研究, 围绕物理层安全、网络容量、通信-感知性能互惠等方向, 均依赖其引发的天线电磁辐射特性可操控的特点。事实上, 天线电磁辐射的重构需求源于无线通信系统在复杂动态环境中面临的根本性挑战与演进性目标。其必要性可归纳为以下核心维度。(1) 突破传统 FPA 的物理极限: ①波束覆盖僵化, 固定波束方向图无法适配用户移动性 (如高速铁路、UAV), 导致信号盲区; ②孔径效率瓶颈, 静态阵列的孔径效 $\eta = \frac{G\lambda^2}{4\pi A}$ 受物理尺寸制约 (A 为孔径面积, G 为峰值方向增益的线性量, λ 为波长), 难以提升增益; ③自由度稀缺性, 固定天线受射频 (radio frequency, RF) 链数与信道秩所限, 可控自由度有限, 难以满足大规模用户并发接入需求。(2) 应对复杂电磁环境的动态需求: ①时变信道适配, 多径分量角度扩散 $\Delta\theta_{(r)}$ 与多普勒频移 $f_d(t)$ 要求实时重构辐射方向图; ②深度衰落规避, 需动态调整波束零点位置以避开干扰源或衰落区域; ③极化匹配优化, 在复杂散射环境中, 极化失配损耗 $L_p = -\lg(|\hat{p}_t \cdot \hat{p}_r|^2)$ 需通过可重构极化消除 (其中, $\hat{p}_t$ 和 $\hat{p}_r$ 分别表示发射端电场的极化向量和接收天线的等效接收极化向量)。

然而, MA 技术字面含义聚焦于“通过调控天线单元位置重构电磁辐射特性”, 隐含“电磁重构

是位置移动的被动结果”这一潜在理解。事实上, 电磁辐射特性的可重构性本身可以作为独立的系统调控目标, 空间位姿变化只是实现该目标的物理路径之一。因此, 本文首先给出 MA 概念内涵与演进历程, 并尝试讨论“可移动天线”概念是否存在理解局限性, 同时试图寻找一个更适配“天线电磁辐射特性可操控”的技术称谓。其次, 与当前以 MA 为核心的综述不同, 其更侧重对技术内涵、电磁重构和主动适配等的总结, 除了上述 3 个方面内容, 本文更加关注概念解读: 定义“空间-电磁协同可编程天线 (spatio-electromagnetic programmable antenna, SEPA)”概念, 提出“电磁域-空间域-智能域”跨域融合的电磁辐射特性智能操控架构, 并给出 SEPA 在智能范式重构、多尺度空间-频谱联合可重构性和空域立体覆盖等领域的未来演进方向。

1 MA 概念内涵与演进历程

MA 是一种通过机械驱动实现天线位置连续调控的系统级技术。其本质是具有连续空间调谐功能的机械可重构天线 (mechanically reconfigurable antenna with continuous spatial tuning, MRACST), 核心目标是通过挖掘 DoF 动态优化电磁辐射特性。

“可移动天线”一词可以追溯到 2008 年^[5], 它的原型甚至在 1999 年^[6]就已出现。这个术语最初指的是借助微机电系统 (microelectromechanical systems, MEMS) 驱动天线运动/旋转。聚焦雷达成像, 给定物理上分离的一个发送/接收天线, 利用步进电机独立、精确地调整两个天线到预定位置, 模拟多基地雷达 (等效模拟在哪些位置上有实际天线单元) 的信号获取过程, 进一步将采集信号处理后得到雷达图像, 验证系统模拟的有效性和数据处理流程的可行性。图 1 为移动天线演进历程。遵循 MA 的最初定义, 2024 年, Zhu 等^[7]在无线通信领域中正式引入 MA 理论概念并进行研究, 其核心在于打破传统 FPA 空间约束, 利用机械或电磁驱动实现天线单元的精确位移 (微米至毫米级), 从而主动适配时变信道特性, 解决复杂环境下的通信效率瓶颈问题。通过控制发射机/接收机上天线或天线子阵列的三维位置和/或三维旋转, 六维可移动天线 (6-dimensional movable antenna, 6DMA) 能够基于信道空间分布自适应地分配天线资源并充分利用无线信道的 DoF, 以经济高效的方式显著提高无

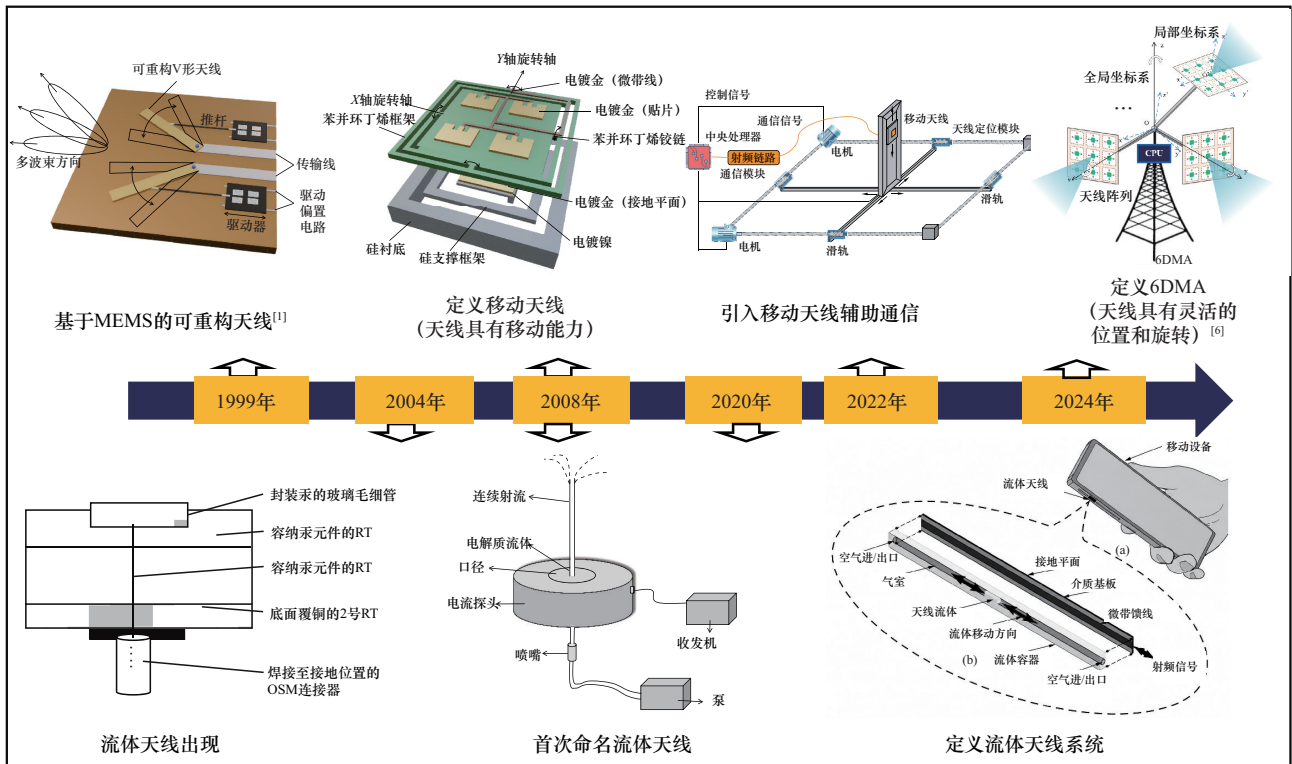


图1 移动天线演进历程

线网络的性能, 而不需要添加更多天线。6DMA 开辟了一个全新的可变形天线体系, 其赋能的无线网络将从根本上提升天线的灵活性和适应性, 有望为 6G 无线通信和感知网络的研究和应用带来无限的新机遇, 具体包括以下内容。

(1) 电磁辐射特性动态调控。调整天线单元位置或姿态 (旋转或俯仰), 突破固定天线波束参数的静态限制, 支持方向图主瓣指向、波束宽度及散射参数的动态重构, 灵活平衡广域覆盖与高增益传输需求, 解决传统天线波束宽度与增益的固有矛盾; 融合环境感知与实时决策能力, 主动识别建筑遮挡、隧道等信号盲区, 通过多维波束调控矩阵与天线阵列位移的联合优化实现精准补盲, 解决固定天线因物理位置固化导致的覆盖缺陷。

(2) 跨域资源协同潜力。突破 FPA 以电磁性能为核心指标的设计局限, 天线位置空间布局、电磁特性与通信性能的跨域协同, 平衡干扰抑制、能效优化与容量提升等多重目标, 扩展系统综合性能的帕累托边界。通过建立电磁参数、空间参数与通信指标的动态耦合关系, 在保持天线基础电磁性能的同时, 提升系统级通信质量与资源利用效率。

MA 技术核心思想如下: 动态调整天线单元位

置与旋转位姿, 突破传统 DoF 限制, 实现阵列几何构型的实时优化; 消除半波长间距物理约束, 主动重构无线信道传播路径, 充分挖掘信道空域时变特性; 在指定区域内定位最佳信号强度点, 基于用户分布动态重构阵列拓扑, 精准适配复杂传播环境; 增强空间复用增益与多用户干扰抑制能力, 为高密度场景提供自适应网络覆盖; 以显著减少的天线数量逼近传统大规模阵列性能, 规避近场效应并降低硬件成本与系统功耗。不同传播路径数 ($L = 2, 4, 6$) 下信道增益空间分布等高线如图 2 所示。考虑不同传播路径数, 接收端波长级别区域内的信道增益空间分布呈显著的非均匀特性。随着多径丰富度的增加, 阵列由规则的条带状逐渐演变为复杂的细胞状结构。传统 FPA 阵列受限于半波长间距的刚性格网约束, 其信道增益分布固定, 难以规避深度衰落区域, 导致性能急剧恶化。相比之下, MA 动态调控各天线单元物理位置, 实现电磁辐射特性可重构, 使 MA 能够精确定位到信道增益的局部峰值点, 有效避开深度衰落零点。通过天线空间位置优化, MA 在最差信道增益上分别实现 12.04 dB、11.49 dB 和 26.78 dB 的显著提升。这种自适应定位机制使 MA 能够充分利用多径传播环境固有的

DoF, 通过优化对电磁场分布的空间采样, 相比传统FPA获得实质性的性能增益。

2 技术演进的驱动力:是“需求驱动技术”还是“技术创造需求”

在技术演进的历史长河中,“需求驱动技术”与“技术创造需求”构成辩证统一的共生关系,但二者存在根本性逻辑序位差异。需求驱动是技术诞生的原发性动力,其根源可追溯至人类对突破物理世界约束的永恒追求;技术创造需求则是创新扩散过程中的次生效应,本质是技术实现后对潜在需求的显性化挖掘。这一规律在无线通信领域尤其显著,香农极限的物理瓶颈与麦克斯韦自由度的未开发性,共同构成天线技术变革的底层需求。当传统固定天线因波束僵化、极化失配、孔径效率衰减等问题无法满足6G对容量(>1 Tbit/s)、时延(<0.1 ms)、可靠性(>99.999 99%)的要求时,MA作为响应需求的解决方案应运而生。正是这些无法回避的系统性能天花板,迫使研究者突破传统FPA的思维窠臼,探索通过动态调控电磁辐射特性以适配信道时变特性的新路径——MA由此应运而生。其技术价值体现在,通过物理位置移动规避深衰落区域并规避动态干扰,将离散的空间采样扩展为连续优化问题,从而部分释放无线信道的DoF。

本质上,DoF的“释放”是对物理定律的妥协性利用,MA仅能通过改变天线边界条件间接扰动/触发电磁场分布,未能触及麦克斯韦方程组中更具潜力的自由度——介质本构参数的实时编程能力。当MA的性能提升遭遇机械惯性延迟、量子化噪声、模型非闭合等固有局限时,进而驱动新技术诞生。这种“需求满足→需求升级→技术迭代”的螺旋上升,本质上是马克思“生产-消费”关系在技术域的映射,需求是技术生产的动力源,而技术产品培育出更精微的需求感知能力。在基础科学层面,“技术创造需求”更具合理性。爱因斯坦的质能方程($E = mc^2$, 其中 E 、 m 和 c 分别表示能量、质量和光速)在1905年纯属理论突破^[8],直至核能需求随战争显现才被工程化。但在工程领域,尤其是通信此类应用科学,需求始终是主导力量。纵观天线发展史,Marconi^[9]的fan-like arrangement of wires(1901年)响应跨洋通信需求;伊斯贝尔实验室^[10]的相控阵(1960年)服务于雷达跟踪需求。这也印证了恩格斯的技术观:“社会一旦有技术需求,比十所大学更能推动科技进步”。终极而言,技术演进是“需求牵引”与“技术推动”的量子纠缠。

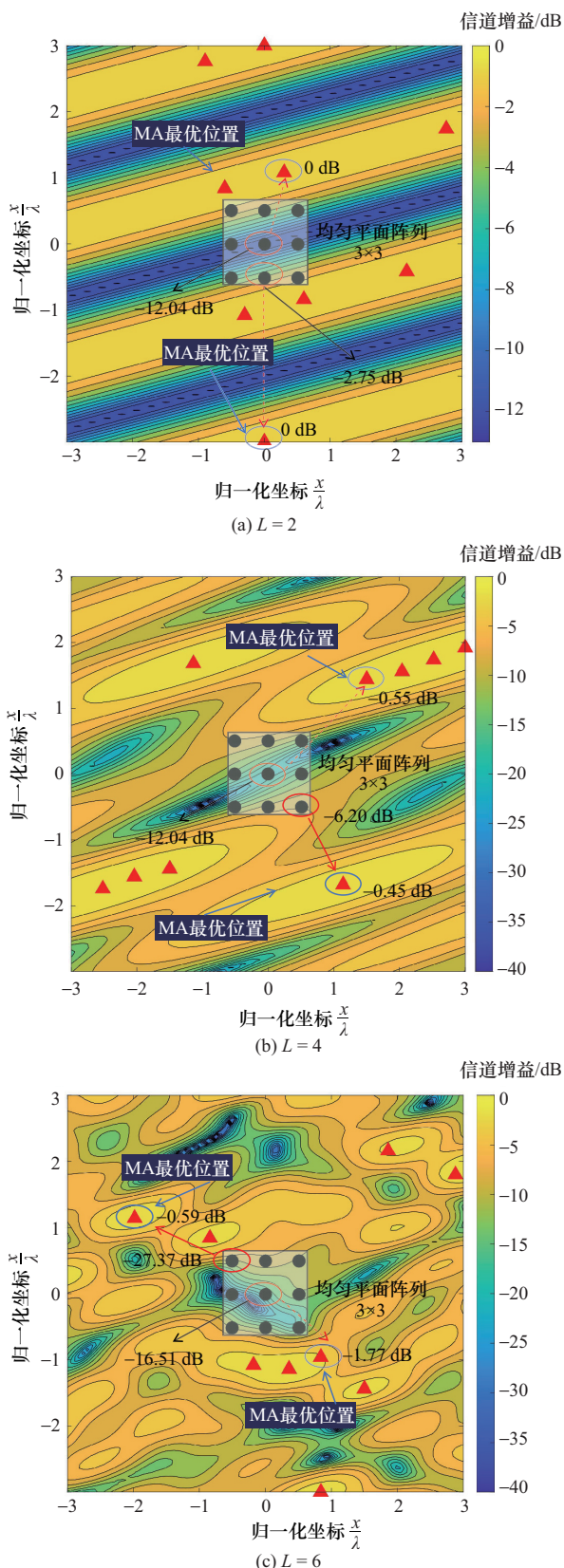


图2 不同传播路径数下信道增益空间分布等高线

缠态。但在无线通信领域中,需求永远是波函数坍塌的确定性基点。电磁辐射可重构性并非MA催生的概念,而是香农理论框架下突破通信系统固有瓶颈的必然需求。

3 MA概念内涵解读:位置移动与电磁重构关系的隐含认知解析

3.1 MA概念解读

MA的概念命名存在根本性局限,其字面含义聚焦于“通过调控天线单元位置重构电磁辐射特性”,隐含了“电磁重构是位置移动的被动结果”这一内涵。然而,电磁辐射特性可重构是突破通信系统固有瓶颈(如深衰落规避、动态干扰抑制)的必然需求,正是这一需求驱动研究者探索包括MA、流体天线、可编程超表面等多元技术路径。换言之,MA仅是响应需求的技术载体之一,其称谓潜在将手段与目的倒置,未能体现“需求驱动技术”与“技术创造需求”的辩证统一关系。

$$MA = \{\Phi_{\text{rad}}(r_a) | r_a \in \Gamma \subseteq \mathbb{R}^3\} \quad (1)$$

其中, r_a 表示天线位置坐标,在给定移动区域 Γ 内移动, $\mathbb{R}^3$ 表示所有三维实数空间的集合, $\Phi_{\text{rad}}(r_a)$ 为不同位置对应的辐射特性。该关系仅描述位置-辐射的标量映射,未建立电磁参数协同机制。

类比动力系统演进:内燃机的诞生源于对蒸汽机热效率极限的突破需求,而非内燃机本身创造了高效动力需求。同理,本文建议使用SEPA的概念代替MA,本质是对“性能边界逼近”与“香农极限突破”这一原始需求的更高维度响应。空间-电磁协同可编程天线展现的规范场调控、电磁辐射特性与天线位姿相互驱动调控、控制论与电磁论耦合等特性,核心是空间-电磁双自由度耦合联合编程,而非机械位移驱动辐射特性变化。表面看似是技术创造的新需求,实则是原始需求在理论深度(规范场论、控制论与电磁论耦合)与物理维度(介质编程协同位置移动)上的自然延伸。

3.2 技术内涵的局限性

(1) 自由度维度残缺

MA仅能调控天线的空间位置坐标/位姿,从而影响增益、散射参数、极化方式等电磁特性;事实上,电磁辐射特性由天线位姿、介质本构参数(介电常数、磁导率、电导率)及几何结构共同决定。这种单一自由度调控导致关键电磁功能无法实现:

极化重构需动态调整介电张量各向异性分量,MA的刚性介质材料无法改变极化响应;磁谐振匹配要求实时编程磁导率分布以优化近场耦合,MA对此难以实现;工作频带扩展需调节等效谐振结构尺寸,MA的固定物理结构形成硬约束。本质上,MA将无限维电磁场函数空间的优化问题降维至 $6N$ (N 为可独立调控的天线数量) 维位置空间,造成辐射特性编辑能力严重残缺。

(2) 动态响应性能瓶颈

机械传动机制导致MA响应速度存在物理极限。天线质量引发的惯性约束使最大加速度受限于驱动力 ($a_{\text{max}} = \frac{F_{\text{drive}}}{M}$, 其中 a_{max} 为天线移动时最大加速度, F_{drive} 为电机或执行器的最大驱动力, M 为天线及其支架的质量), 在毫米波段需微米级定位精度时,机械摩擦与间隙进一步降低位移稳定性。以 60 GHz 为例(波长 $\lambda \approx 5$ mm),当天线以 200 mm/s 线速度移动时,对应相干时间 6~11 ms;步进电机完成 $\frac{\lambda}{2}$ 位移需 10 ms 以上,易导致导频信号、信道状态信息(channel state information, CSI) 过时与波束失配。此外,端到端控制与执行存在显著延迟,当天线单元移动至最优位置时,CSI已发生变化,难以实现有效的波束对准与信道一致性。

(3) 电磁模型非闭合性

MA虽已通过场响应信道模型(基于格林函数表示与数值求解)提升了物理一致性,但其理论框架仍存在动态耦合方面的不足:该模型主要在静态场景中给出位置-场强的响应映射,难以直接应对环境时变带来的挑战——当物体移动时,格林函数会随时间变化,若缺少快速感知与在线更新,模型易产生滞后性;更进一步,机械控制与电磁响应在工程实现上多为弱耦合,位置轨迹的生成往往独立于麦克斯韦方程的求解,尚未形成将场变化率与运动速度关联的闭环。此外,严格模型的计算开销较大,实践中常采用平面波/射线等近似方法,这在远场通常有效,但会弱化近场耦合与边缘绕射的刻画。上述因素在高速运动(多普勒扩展、相干时间缩短)场景下更易引入模型偏差,表明MA在“机械运动-电磁演化”的实时协同方面仍有待突破。

(4) 信道容量提升天花板

MA获得的理论香农容量 $C = W \log \det \left(I + \frac{P_t \mathbf{H} \mathbf{H}^H}{N_0} \right)$

(其中 W 为信道带宽, I 为单位矩阵, H 为信道矩阵) 存在本质性瓶颈: 其位置移动仅能对 H 内的元素值进行局部扰动, 特征值谱或改善谱条件数。当信道相关矩阵条件数很大 (如典型强相关场景) 时, MA 的 DoF 难以有效分解信道相关性。综上, MA 对容量的提升受制于信道的结构特征值谱或改善谱条件数, 仅靠位置微调难以实现质变。

(5) 环境适应机制缺陷

MA 在环境适应性方面存在系统性缺陷: 其离散位置移动策略虽可规避部分深衰落区域, 却可能陷入新的信号零点, 且连续空间全局优化属于 NP-难问题, 导致性能提升受限; 更严重的是机械转向延迟导致干扰抑制响应滞后, 面对高速机动干扰源时, 波束跟踪速度难以匹配其角动态变化。上述缺陷共同制约了 MA 在复杂电磁环境中的鲁棒性。

MA 的根本矛盾在于试图用机械自由度 (位置移动) 解决电磁自由度 (场分布调控) 问题, 其技术框架在自由度维度、动态响应、模型严谨性及容量极限层面存在不可逾越的缺陷。这使其仅能作为传统天线向全维可编程天线演进的过渡方案, 无法成为 6G 的颠覆性使能技术。

3.3 SEPA 概念内涵

从通信系统发展的根本需求出发, 电磁辐射特性的可重构性本身才是突破深度衰落规避、动态干扰抑制与性能边界受限等瓶颈的原始驱动力, 单纯将 “是否移动” 作为核心概念维度, 难以准确反映该类技术的本质。因此, 本文认为单纯将 “是否移动” 作为核心概念维度, 难以准确反映该类技术的本质, 且 MA 这一概念弱化了电磁层面主动调控在系统设计中的核心地位。因此, 本文将这一技术重

新命名为 SEPA, 旨在将研究视角从 “手段导向” 提升为 “需求导向”, 强调空间调控与电磁重构的协同统一, 而非将电磁重构视为位置变化的附属结果。

本文将 SEPA 定义为 “一种以通信性能目标为牵引, 将电磁辐射特性重构纳入建模、优化与闭环决策的天线系统范式, 其中空间自由度与电磁自由度共同构成可编程调控变量, 用于实现主动电磁构造与通信性能边界逼近”。在该范式下, 天线系统不再仅被视为辐射单元的几何排列或电磁参数配置问题, 而是被抽象为 “空间-电磁双自由度耦合调控系统”。本质上来说, SEPA 概念与 MA 是同一技术的不同解读方式, 两者均通过改变辐射单元的空间位置或阵列结构, 实现信道响应与电磁辐射结构的重构。MA 更多强调 “机械结构移动性” 这一工程实现特征, SEPA 则从电磁结构角度出发, 强调辐射模式重构能力。

4 相关工作分析与总结

4.1 电磁辐射演变规律

(1) FPA 电磁辐射特性适配的根本性局限

传统 FPA 几何结构一旦部署完成便无法改变, 严重制约其波束成形的灵活性和性能极限。通过引入 “天线位置移动” 这一新的自由度, MA 技术为波束调控带来革命性的挖掘潜力^[11]。通过协同优化天线位置与波束成形权重, 系统能够实现对阵列几何位姿的动态重构, 从而灵活调控电磁辐射特性。这种电磁辐射特性调控能力可进一步转化为更精准的波束定向、更深的零陷、更广的覆盖范围以及更强的环境适应性。本节将对基于 MA 的电磁辐射调控方法^[12-24]进行系统梳理与总结, 表 2 为 MA 电磁辐射特性调控部分代表性工作。

表 2 MA 电磁辐射特性调控部分代表性工作		
文献	电磁特性调控类型	技术手段
文献[12]	主瓣增强, 旁瓣抑制	优化天线位置与发射波形矩阵, 在恒模、频谱共存、天线间距等约束下, 最小化波束合成均方误差
文献[15]	调整波束零陷位置	联合优化天线位置矩阵和波束成形矩阵
文献[16]	多波束设计	优化天线位置矩阵和波束成形矩阵, 最大化多个目标方向的最小波束增益, 同时控制干扰功率
文献[17]	智能波束设计	优化天线位置与天线权值, 实现对电磁波束指向与增益分布控制, 最大化多用户场景下的最小波束增益
文献[19]	宽波束覆盖	优化天线位置矩阵和波束成形矩阵, 最大化目标角度区域内的最小波束增益, 实现宽角度范围内的均匀电磁辐射覆盖
文献[21]	动态波束覆盖	优化天线位置与天线权值矢量, 在满足覆盖区域最小增益约束下, 最小化对干扰区域电磁辐射泄漏功率
文献[23]	近场波束设计	优化 MA 的位置, 最大化整个宽带频谱上最小的模拟波束成形增益

(2) MA 赋能电磁辐射特性适配新范式

MA 电磁辐射特性的重构能力, 源于其通过挖掘 DoF 实现的场响应动态重构机制, 从根本上突破了传统 FPA 依赖离散布局与静态波束的局限。通过协同优化天线位置与波束成形矩阵, MA 能够精确塑造辐射方向图, 从而直接实现对主瓣增强、旁瓣抑制及多波束生成等关键阵列电磁辐射特性的灵活调控。An 等^[12]首次提出将 MA 阵列引入多输入多输出 (multi-input multi-output, MIMO) 雷达波束设计, MA 阵列通过重构天线位置, 改变阵列流形的本征子空间结构, 从而实现目标区域能量聚焦增强与非目标区域能量抑制。相比传统 FPA, MA 引入了全新的 DoF, 除灵活设计波束成形之外, 还可以调控电磁场的空间分布特性, 实现对辐射模式的“结构性重塑”。另外, 联合优化天线位置矢量与发射波形矩阵, 在恒模与频谱兼容性约束下, 显著提升波束合成精度。实验结果表明, 相比 FPA 系统, MA 系统在主瓣对准、旁瓣抑制和频谱控制方面表现更优, 提高了波束合成的自由度与性能, 为 MA 电磁特性调控提供新范式。类似地, Hu 等^[13]优化天线位置和波束成形矩阵, 降低峰值旁瓣电平, 在保证主瓣增益的同时抑制旁瓣, 增强天线阵列的指向性。考虑到无线信道与天线位置之间的高度非线性关系, Liu 等^[14]提出了一种低复杂度的 MA 位置优化框架, 通过将天线可移动空间离散化, 顺序更新 MA 最佳采样点, 将连续优化问题转化为离散点选择问题, 并引入吉布斯抽样, 避免算法陷入较差的局部最优解。聚焦通信物理层安全领域, Yu 等^[15]提出联合优化 MA 天线位置与 FPA 波束成形矩阵, 协同调控电磁辐射特性, 增强合法用户方向的主瓣功率以保证通信质量, 同时在窃听者方向生成深度的波束零陷以抑制其接收信号。实验验证表明, 电磁辐射特性动态调控能够显著提升系统安全性能的有效性, 与单独的 FPA/MA 阵列生成人工噪声 (artificial noise, AN) 的物理层安全方法相比, FPA-MA 协同框架在保密性能方面取得了显著的提升, 保密率分别提高 42.34% 和 9.12%。除了在抑制旁瓣方面的优势, MA 还可以进行多波束设计。Ma 等^[16]利用 MA 阵列实现多波束成形, 通过联合优化天线位置和权重向量, 在多个期望方向形成高增益波束并抑制干扰, 突破 FPA 在波束成形中的性能瓶颈。此外, Kang^[17]采用深度学习 (deep learning,

DL) 技术对天线位置和波束成形权重进行端到端联合优化, 实现多播用户最小波束增益的最大化。Liu 等^[18]设计了 MA 增强的 UAV 通信模型, 旨在通过 MA 位置、UAV 飞行轨迹和发射波束成形以最大化可实现的数据速率, 有效提升性能增益。这些进展充分展现了 MA 技术在动态调控电磁波特性方面的巨大潜力与应用价值。

MA 技术的出现, 其意义不仅在于更精准地调控波束角度与增益, 更带来了一种波束调控范式革新: 动态调整天线构型来实现灵活的波束覆盖, 从根本上突破传统 FPA 在波束设计上的能力局限。Wang 等^[19]提出利用 MA 突破 FPA 波束覆盖受限的瓶颈: 联合优化天线位置和波束权重, 实时重构波束增益分布, 使目标角域内最小增益最大化。实验结果表明, MA 波束平坦度与最小增益显著优于 FPA, 充分展现了 MA 以“位置即 DoF”调控电磁辐射的独特能力。Zhou 等^[20]提出利用 MA 实时调节阵列单元位置, 主动重构辐射方向图, 实现电磁能量在空间中的动态聚焦与均匀覆盖。MA 以位置自由度重塑波束主瓣、抑制旁瓣, 显著提升空对地通信的覆盖效率与链路质量, 充分展现了 MA 对电磁辐射特性的灵活调控能力。Zhu 等^[21]提出在近地轨道卫星部署 MA 阵列, 利用天线位置微调实时重塑辐射方向图, 联合优化位置与权值, 动态调控主瓣与零点, 在保障覆盖增益的同时抑制干扰泄漏。此外, 他们还提出离散化交替优化框架与低复杂度单几何方案, 实现卫星在轨周期重构电磁能量分布, 进一步验证 MA 以“位移”自由度调控电磁辐射的能力。Mao 等^[22]针对 UAV 抖动设计鲁棒的波束成形和天线位置方案, 确保在不确定信道下利用 MA 实现波束的稳定覆盖。

上述 MA 研究主要聚焦于远场区域的波束设计。然而, 在近场区域, 电磁辐射特性与远场截然不同, 其分析与调控也更为复杂。尽管如此, 已有部分研究开始探索 MA 在近场场景下的波束调控方法。Zhu 等^[23]基于近场球形波前模型, 将波束斜视归因于“频率-位置”耦合的路径差, 提出以最大化宽带最小增益为准则, 通过调节 MA 平面坐标实时均衡各子载波相位, 使阵列电磁辐射方向图在整个频带内保持高而一致的主瓣, 从而以“位移”自由度主动抑制波束斜视, 实现近场宽带动态波束覆盖。进一步, Zhu 等^[24]将近场球形波前纳入场响应

信道模型,将每个可移动子阵的位置作为可调参数,联合优化天线位置向量与数字/模拟波束成形,调控阵列在各用户方向的相位差与幅度增益。MA通过“位移”自由度主动重塑近场辐射方向图,实现高一致性的空间复用或覆盖,从而以电磁特性可编程方式适应近场多用户通信需求。

MA电磁辐射特性调控方面的深入研究,充分揭示了其通过位置重构实现阵列辐射模式动态重构的潜力。这种辐射特性的灵活重构能力,有望在复杂通信环境中显著提升系统性能。该研究不仅是实现高密度、高可靠与高效无线通信的重要基础,更标志着波束成形技术实现了从“静态配置”到“动态重构”的根本性跨越,具有深远的理论与工程价值。

4.2 信道估计与预测

MA技术凭借其位置的连续可调性,为突破传统信道估计范式提供了新的路径。基于场响应信道

模型,该系统能够将无限维的空间信道响应,解析为有限个多径分量的叠加,其中每个分量均由发射角(angle of departure, AoD)、到达角(angle of arrival, AoA)与路径响应矩阵(path response matrix, PRM)精确表征^[25-26]。图3为收发端MA信道估计^[25]。得益于MA在角度域固有的稀疏特性,目前已提出了多种高效的信道获取方法,表3为MA电磁辐射特性调控部分代表性工作。

(1) 基于压缩感知的信道评估方法

Ma等^[25]率先提出基于压缩感知的逐次场响应信息(field response information, FRI)估计方法,通过3个步骤顺序估计场响应信息:首先固定接收MA估计发射波矢量,然后固定发射MA估计接收波矢量,最后基于估计的波矢量通过最小二乘法估计PRM。为了解决逐次估计可能带来的累积误差问题,Xiao等^[26]提出联合FRI估计框架,在选定发射和接收天线位置进行测量,实现对所有FRI组件

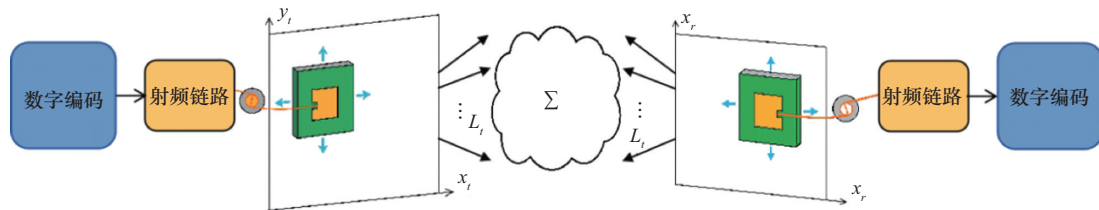


图3 收发端MA信道估计

表3

MA电磁辐射特性调控部分代表性工作

方法分类	文献	信道维度	估计方法	主要贡献
压缩感知方法	文献[25]	2D 连续 Tx/Rx 区域	逐次FRI估计（压缩感知）	提出三步法顺序估计 AoD/AoA 和 PRM，开创了基于模型估计的先河
	文献[26]	2D 连续 Tx/Rx 区域	联合FRI估计（压缩感知）	实现所有 FRI 组件的联合估计，精度更高但计算复杂度有所增加
	文献[27]	2D 连续区域	多重测量向量压缩感知框架与同步正交匹配追踪算法	将信道频率响应分解为场响应、时延响应和路径响应张量，实现时-频-空三维信道联合估计
张量分解方法	文献[28]	2D 连续 Tx/Rx 区域	逐次FRI估计（张量分解）	克服了对离散网格的依赖，利用 ESPRIT 算法实现无网格超分辨率估计
	文献[29]	1D 连续区域	多帧位移采样与 ESPRIT 算法	设计多帧位移采样机制构建高维虚拟阵列以扩展孔径，结合 ESPRIT 算法实现低开销精确信道重建
无模型方法	文献[30]	1D 离散区域	邻近假设	假设未测量位置的信道与邻近已测量位置相同
	文献[31]	1D 离散区域	贝叶斯线性回归	将信道建模为关于 MA 位置的高斯随机过程，通过后验分布估计信道，不确定性随测量次数增加而降低
	文献[32]	1D 离散区域	机器学习	映射神经网络学习已测量位置和未测量位置
分布式方法	文献[33]	6D（3D 位置 + 3D 旋转）	分布式处理	揭示 6DMA 信道的方向稀疏性，设计分布式框架，由局部处理单元并行估计，降低主 CPU 计算负担
	文献[34]	1D 连续区域	深度神经网络与无网格细化	提出学习辅助框架，联合优化信道估计期间的天线位置和估计函数，引入无网格算法克服分辨率限制

的联合估计。虽然计算复杂度高,但该方法获得了更高的估计精度。Cao 等^[27]进一步将该思想扩展至时频维度,通过结构化分解信道频率响应,并利用多重测量向量压缩感知框架及同步正交匹配追踪算法,最终实现“时-频-空”三维信道的联合估计。

(2) 基于张量分解的信道评估方法

为克服压缩感知方法对离散网格量化的依赖,Zhang 等^[28]提出基于张量分解的信道估计方法。该方法将接收的导频信号建模为三阶张量,通过典范多项式分解获得因子矩阵,结合旋转不变子空间(estimation of signal parameters via rotational invariance technique, ESPRIT)算法实现波矢量的无网格估计,在高信噪比条件下可达到超分辨率性能。聂皓旻等^[29]利用多帧位移采样机制和虚拟阵列构建技术,考虑 MA 系统中天线位置动态变化导致的高维信道参数估计难题,结合 ESPRIT 算法实现了低导频开销下的精确信道重建。

(3) 模型独立的信道评估方法

除了模型驱动的信道估计方法外,部分学者也探索了不需要依赖特定信道模型的方法。例如,Skouroumounis 等^[30]提出基于空间相关性的简化方法,假设未测量位置的信道与邻近测量位置相同。Zhang 等^[31]采用贝叶斯线性回归,将信道建模为关于 MA 位置的高斯随机过程,通过计算后验分布实现信道估计,其不确定性随测量次数增加而逐渐减小。Ji 等^[32]利用机器学习方法,通过神经网络学习测量与未测量位置间的映射关系。

(4) 分布式与低复杂度方法

为应对高维信道估计的计算挑战,Shao 等^[33]通过揭示 6DMA 信道的方向稀疏性,设计分布式处理框架,各天线表面配备局部处理单元并行估计信道,从而降低中央处理器的计算负担。Jang 等^[34]引入深度神经网络驱动的学习辅助框架以联合优化 MA 位置以及信道估计函数,实现维持低复杂度的同时逼近理论性能下界。

总体而言,模型驱动方法在大尺度或高维移动区域中展现出较低的测量开销,其复杂度主要取决于路径数量而非区域物理尺寸;无模型方法虽对建模误差具有鲁棒性,但在大区域场景下面临测量开销显著增加的挑战。未来研究需在估计精度、计算复杂度和测量开销之间寻求更优的平衡。

4.3 MA 驱动的多维优化与性能增强

传统通信架构中,天线位置固定导致信道条件被动适配通信环境,系统容量、覆盖及可靠性面临性能瓶颈。MA 技术通过动态调整天线位置重构信道特性,将天线空间位姿、波束成形矩阵及通信资源分配三者深度协同,突破传统 FPA 性能局限。其应用领域^[35-46]主要包括:①通信-感知性能折中,通过合理设计天线位置或朝向,平衡通信速率与感知精度^[35],或保证感知性能约束下的通信速率提升^[36];②MA 赋能干扰零陷方向调控,通过优化天线位置改变信道矩阵的导向矢量,实现期望方向的高增益和干扰方向的零增益(干扰调零),或增强多方向波束成形能力^[15,40];③干扰缓解,调整接收端天线位置规避其他系统的干扰信号;④MA 机械延迟约束下的位姿调控。图 4 为 MA 多域优化整体场景,表 4 为 MA 位置调控与算法设计的典型代表性工作。

(1) 面向通信-感知融合网络的性能权衡与协同重构

面向通信感知一体化(integrated sensing and communication, ISAC)技术通过硬件平台与频谱资源的共享,降低系统部署成本并提升整体性能效率。然而,传统 FPA 刚性结构导致 DoF 受限,动态复杂环境下系统难以同时兼顾高质量的通信传输和高分辨率的感知能力。MA 依托其灵活的位姿调控能力,实现对信道状态的实时适配与波束的精准赋形,实现通信-感知双功能更精细化的资源配置。

Zhang 等^[36]考虑天线连续位置优化,在满足最小雷达探测功率约束下,联合设计波束和流体天线位置以最大化多用户通信速率。仿真结果表明,在欠载场景下,FPA 和流体天线均能提供足够的 DoF 服务用户;在过载场景下,流体天线具有显著的优越性。然而,FPA 系统在满足感知需求的同时,无法在所需方向满足通信需求。相反,流体天线则能提供更好的通信增益。此外,Lyu 等^[35]最大化通信速率和互信息(Mutual Information, MI)的总和,利用加权因子来控制通信和传感的优先级。研究表明,与传统 FPA 阵列相比,天线通过一维移动可使 ISAC 性能提升 59.6%。Zou 等^[37]通过联合设计流体天线离散位置及发射波束成形,旨在满足通信和感知性能需求的前提下,实现发射功率最小化。相较于传统 FPA,所提方案功率消耗降低了 33%。针对

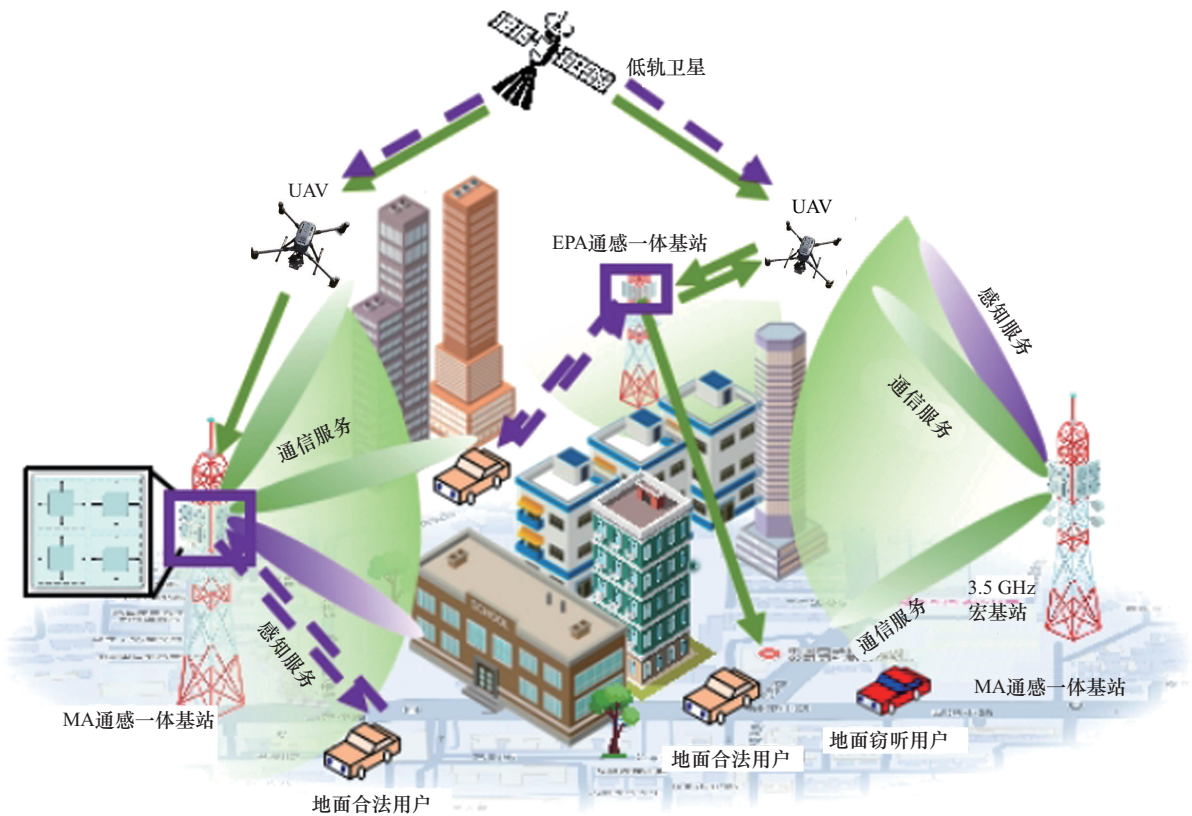


图 4 MA 多域优化整体场景

表 4 MA 位置调控与算法设计的典型代表性工作			
研究方向	核心贡献	优势	劣势
通信-感知性能折中	动态调节流体天线/MA 位置和波束, 以实现: 权衡通感性能 ^[35-38] ; 满足感知约束下, 优化通信性能 ^[36] ; 满足通感性能约束性最小化系统功率 ^[37]	增加 DoF, 扩大信号覆盖范围 ^[38] ; 实现高精度多目标定位; 通过调整天线位置和灵活的波束设计权衡通感性能, 减少通感互扰	忽略近场效应; 忽略天线移动延迟; 算法复杂度高
MA 赋能干扰零陷方向调控	优化 MA 布局及波束指向: FPA 发送机密信号, MA 发送 AN 信号 ^[15] ; MA 同时生成机密和 AN 信号 ^[40] , 从而提升通信安全性能	利用 MA 的 DoF 在窃听者方向形成更深的零陷, 同时降低对合法用户的干扰; 兼顾通信可靠性和安全性; 动态窃听场景性能显著	高度依赖于完美 CSI; 忽略用户移动性与天线移动的速率失配问题
MA 赋能干扰缓解	动态调节天线位置, 充分利用信道变化, 规避干扰 ^[43-44]	平衡系统性能与干扰抑制需求; 微小移动可显著提升性能	低地球轨道卫星/UAV 高动态场景下需要信道快速响应 ^[44] ; 忽略天线移动延迟; 忽略通感信号间相互干扰; 多干扰源场景难以适用
MA 机械延迟	考虑 MA 机械运动延迟 ^[45]	考虑机械延迟与信息传输时间的权衡	忽略系统反馈延迟; 聚焦通信场景, 忽略通信感知间相互干扰

FPA 赋能 ISAC 系统的性能瓶颈与远场假设失效问题, Ding 等^[38]构建全双工基站配备 MA 的近场 ISAC 系统, 采用均匀球面波模型刻画信道, 通过联合优化波束成形、感知信号协方差矩阵、天线位置等变量, 最大化感知-通信加权速率之和。为满足低空通感需求, Kuang 等^[39]设计 MA 赋能的低空

平台, 在满足感知波束方向图阈值约束下, 联合设计通信和感知波束成形以及 MA 阵列位置, 实现数据速率的最大化。

MA 技术通过动态调控天线位置和波束方向, 突破传统 ISAC 系统的性能边界, 在通信速率、感知精度、能效等方面均展现出显著优势, 为未来

6G 智能感知通信网络提供了重要技术支撑。然而, 其仍需在算法效率、硬件实现和标准化方面进一步突破, 以实现 MA-ISAC 的大规模实际部署。

(2) MA 赋能干扰零陷方向调控

聚焦无线物理层安全, 传统 AN 是典型手段之一, FPA 阵列配置因其静态空间构型存在覆盖盲区的固有缺陷, 导致窃听者可利用移动性主动潜入 AN 辐射方向图的空间零点, 规避干扰抑制并成功截获机密信息。为了最大限度地放大有用信号、抑制干扰信号, 最直观的是将主瓣对准有用信号的入射方向, 并将方向图中的最低增益点, 即零陷指向窃听器方向。

对此, Tang 等^[40]提出 MA 基站在发射机密信息的同时生成 AN, 在最大发射功率和 MA 最小间距约束下, 通过联合优化发射预编码矩阵、AN 协方差矩阵及 MA 位置来最大化系统机密速率。实验验证了 MA 在提升系统安全性方面显著优于传统 FPA 方案, 且明确了发射区域大小、天线数量、路径数、发射功率及准确 FRI 对 MA 系统安全性的影响。Yu 等^[41]概述 MA 技术在通信性能增强方面的优势, 并指出 MA 在通信、感知系统中天线方向图调控和电磁环境适应性的研究方向, 通过感知-通信耦合干扰优化和 MA 技术的应用, 实现通信可靠性、安全性和感知准确性的三重保障。

然而, 现有研究仍面临实时性 (如 MA 机械延迟)、非完美 CSI 及多窃听者协作等挑战, 亟须结合智能算法优化 MA 控制策略。

(3) 基于 MA 位置调控的干扰抑制方案

恶意用户或相邻基站的干扰信号给用户间通信带来安全隐患。通过位置优化, MA 能够移动至“干扰机-接收端”链路的局部信道功率增益最小处, 从而有效削弱干扰影响。仅需在亚波长尺度移动, MA 即可使接收端的干扰功率降低数十 dB。即便仅配备单个 MA, 也能实现近乎完全的干扰抑制, 而不需要依赖多天线系统所常用的干扰消除或归零技术^[7]。调整天线位置还有助于改变不同转向角度下导向向量的空间相关性, MA 的灵活性和可重构性使其在恶劣环境下也能有效缓解干扰, 实现可靠通信。Ren 等^[42]聚焦 6DMA 辅助的 UAV 通信场景, 联合优化 UAV 配备的天线位置矢量、阵列旋转矢量、接收波束成形矢量和相关基站的选择, 最大限度地提高 UAV 的接收信干噪比 (signal to in-

terference plus noise ratio, SINR)。考虑到近地轨道和地球静止轨道卫星系统之间共享频谱造成的系统间干扰, Zuo 等^[43]提出一种新型低轨-地球静止轨道频谱共享系统, 低轨卫星配备 MA 并充分利用其自由度以增强低轨系统服务并抑制干扰。

MA 技术通过空间维度重构增强干扰管理的潜力, 该应用可进一步迁移到 ISAC 场景中。未来研究需解决 MA-ISAC 中的实时联合优化、硬件实现复杂度及感知-通信资源分配等挑战。

(4) 机械延迟约束下 MA 位姿调控

现有大多数研究基于无线信道随时间缓慢变化的假设 (传输块时长较长, 而 MA 从初始位置移动到目标位置的距离通常仅为几个波长), 天线移动延迟相对于整个传输块时长而言可忽略不计。实际场景中, 用户可能会在一段信道可视为稳定的时间内, 依次与多个发射机进行通信, 这意味着分配给每个发射机的传输块 (服务时间) 通常相对较短。针对这一局限, Wang 等^[44]充分考虑天线延迟局限性, 揭示了用户在延迟和 SINR 之间的权衡, 通过量化虚拟到达角, 推导出天线移动所需的区域大小, 设计初始 MA 位置, 并阐明量化分辨率与移动区域大小之间的关系; 构建了优化 MA 位置和发射波束成形的联合优化问题, 以实现所有用户的最小吞吐量最大化。仿真结果表明, 忽略移动延迟的方案在短传输块、低移动速度场景下性能显著下降, 甚至不如 FPA; 所提算法通过联合优化延迟与 SINR, 适配各类通信场景。为了降低移动带来的延迟, Li 等^[45]提出通过设计 MA 的运动轨迹, 最小化所有 MA 的移动延迟, 为实际设计提供了重要方向。对于二维运动区域无运动方向约束的情况, 提出了一种两阶段优化算法, 首先生成初始轨迹 (不考虑 MA 间距离约束), 然后通过连续凸优化细化; 对于运动方向约束的情况, 则通过生成所有移动方向的初始轨迹作为曼哈顿路径, 随后进行细化, 扩展了两阶段优化算法。仿真结果表明, 只有当 MA 的最大速度足够大时, 电机引起的运动方向约束才可能带来边际性能损失。此外, Ning 等^[46]指出了机械延迟问题, 进一步提出了电子驱动的方式实现等效的天线运动和旋转, 对比了机械调控和电子调控的不同之处。机械驱动运动范围更广, 然而灵活性受限, 且机械磨损可能降低运动的准确性和可靠性、增加维护成本; 相比之下, 电子驱动方式具备

更优的响应速度,运动分辨率依赖于电子技术的精度和控制算法,尽管复杂的设计、安装和调试流程使得实施成本较高,但降低了维护频率,最大限度地减少了运营问题。

MA通过位置与朝向的灵活可调,在通信-感知性能权衡、干扰抑制、物理层安全增强等方面展现出显著潜力。然而,现有研究仍主要停留在理想化信道与可忽略机械延迟的假设下,缺乏对硬件可实现性、实时控制复杂度以及信道动态性的系统性分析。尤其在短时延、强干扰、多用户协作等实际场景中,MA的性能优势能否稳定保持仍存在不确定性。此外,如何在ISAC架构下实现资源的动态分配、优化算法的低复杂度求解,以及与现有通信标准的兼容性,是未来亟须攻克的关键问题。

4.4 MA电磁辐射特性智能调控

尽管传统优化算法在MA位置优化、波束设计、信道估计等方面已取得初步成效,但其应用场景过于单一,难以实现环境自适应调控。智能方法的引入能够弥补这一不足:一方面,该类方法具备自学习和自适应能力,可以随环境变化动态调整优化决策;另一方面,智能方法能够高效处理非线性和高维优化难题,并在有限计算资源约束下获得近似最优解。因此,智能方法成为提升MA系统灵活性、鲁棒性与实用性的关键途径。表5为MA电磁辐射特性智能调控现状^[47-57],其主要包括以下4个

方向:①多域资源协同优化,联合优化MA位置、波束、功率等关键参数,提升不同环境下的系统性能;②MA性能提升,聚焦于MA抗干扰技术和信道估计方法,以增强其在复杂环境中的抗干扰能力和通信稳定性;③空地一体化通信,聚焦UAV辅助的空地一体化系统,提升通信网络的覆盖范围和系统性能;④MA位置预测,针对MA的机械移动延迟,提出高精度位置预测方法,以减少由此带来的性能波动和优化响应速度。

(1) 面向地面通信的MA智能位置优化

信道估计是实现可靠通信的基础,Jang等^[34]将MA位置调整与信道估计函数联合建模,以降低信道估计误差并提升MA系统的信道状态重构精度。Xie等^[47]提出了一种基于卷积神经网络的灵活预编码框架,利用DL技术优化天线位置和波束成形权重。

考虑到MA在抗干扰中的潜力,Tang等^[48]构建SINR最大化问题,设计了一种基于多层感知机的神经网络架构以优化天线位置,仿真验证了MA在干扰缓解方面的优势,且所提方法可在多种无线环境中有效应对恶意干扰。针对多用户通信系统,Weng等^[49]提出了一种异构多智能体深度确定性策略梯度算法,两个智能体分别独立学习MA的波束成形与移动决策,并在不完美CSI场景中实现离线学习与协同优化。针对6G场景下大语言模型

表5 MA电磁辐射特性智能调控现状

研究方向	核心贡献	优势	劣势
地面通信MA智能位置优化	信道估计:优化MA采样位置和信道估计参数以提升信道估计精度和效率 ^[48]	结合DL提高信道估计精度和效率	需要大量数据训练;忽略MA机械延迟
	预编码:设计天线位置和波束成形权重,提升频谱效率 ^[48]	计算效率高;结合卷积神经网络,有效挖掘位置与波束成形的空间关系	基于MISO,场景单一;忽略MA机械延迟
	干扰消除:调整MA位置以及接收波束成形,提高抗干扰能力 ^[50]	无信令开销,不需要干扰CSI;动态跟踪干扰源	依赖于高精度信道估计;忽略用户移动性;忽略MA机械延迟
	优化天线位置、波束成形,实现通信性能提升 ^[51-55]	提升通信/感知性能;提升能源效率 ^[52] ;与传统方法相比,能够高效解决非凸优化问题;动态适应环境变化	大多基于通信场景研究,忽略感知信号;忽略MA机械延迟;忽略潜在窃听用户;通常依赖于完美CSI
空地通信MA智能位置优化	UAV充当基站/中继辅助通信或收集数据,进行天线位置、波束优化	UAV灵活性实现空地通信;NLoS条件下覆盖能力强	忽略用户移动性与天线移动速度失配问题;忽略潜在窃听用户
空地通信MA智能天线位置预测	依据历史数据预测MA最优位置并提前部署	缓解MA机械移动带来的系统延迟;环境自适应能力强	基于离线训练,难以形成实时在线训练

(large language model, LLM) 在带宽受限无线链路上的训练时延与能耗问题, Zhao 等^[50]提出了一种联合调整全局轮次、CPU 频率、小批量大小、MA 位置以及波束成形的优化方法, 旨在解决联邦微调 LLM 过程中固有的延迟、能耗与通信挑战, 从而提升模型性能与训练效率。Shao 等^[51]提出了一种高效的混合场广义 6DMA 信道模型, 并利用深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 以较低复杂度联合设计 6DMA 位置、方向与波束成形。MA 多域资源协同设计会显著增加计算复杂度, 进而影响整体效率。为了在通信性能与复杂度之间取得平衡, Xie 等^[52]提出了一种新颖的异构多智能体深度确定性策略梯度框架, 用于优化 MA 位置, 有效提升感知精度、通信可靠性以及能量传输效率, 增强系统在动态环境下的适应能力。类似地, Kang 等^[53]设计了一种基于 NMAP-Net 的 DL 模型, 并将其划分为 3 个可学习模块分别用于特征提取、天线位置优化和多波束成形设计。

(2) 面向空地通信的 MA 智能天线位置优化

聚焦空地通信场景, UAV 作为空中平台提供高机动灵活性, 成为解决传统通信网络覆盖盲区和动态需求的理想选择。与固定基站相比, UAV 能够快速部署并根据需求调整其位置, 适应不同的通信环境和用户分布, 有效增强网络的覆盖能力和通信性能。为此, Bai 等^[54]设计了一种 UAV 轨迹与 MA 方向的联合优化框架, 以最小化数据采集总时延, 并提出了一种基于 DRL 的策略, 其中智能体的观测空间由 UAV 与各反向散射设备之间的方位角与距离简化而成。考虑到地面基站与用户间非视距链路造成的通信质量下降问题, 郭天昊等^[55]利用 UAV 作为中继节点辅助基站和多用户间通信, DRL 使智能体能够通过与环境交互来学习决策, 以最大化每个时隙所有用户的最小通信速率。

(3) 面向空地通信的 MA 智能天线位置预测

实际上, MA 的机械调整速度与用户的移动速度之间面临速率失配难题。尤其是低空场景下高速机动性引发的信道快速时变使基于历史观测的被动估计结果严重滞后, 系统因缺乏前瞻预测能力而无法规避“观测-决策-执行”链路的相位延迟, 最终引发跨周期干扰累积与信道容量边界坍塌, 影响其性能和可靠性。为此, Yu 等^[56]设计一种 MA 自适应调控系统, 通过位置预测并提前移动至合适位

置以最大化通信性能。首先, 从物理层安全角度出发, 构建机密速率最大化问题寻找 MA 最优位置; 然后, 提出基于 Transformer 和长短期记忆网络 (long short-term memory, LSTM) 的天线位置预测模型, 通过捕获 MA 的时空变化规律, 主动适应用户移动性并自适应调节天线位置, 提升 MA 系统在动态开放环境中的实用性和鲁棒性。仿真结果表明, 与基准方案相比, 所提方案的归一化均方误差和准确率分别优化 49% 和 14.76%。进一步, Wang 等^[57]设计角色感知的 MA 天线位置预测架构, 将用户空间特征、角色博弈关系和安全约束显式融入网络架构与训练过程, 同时损失函数融合位置精度、保密速率指标及天线物理约束。仿真结果表明, 所设计架构可以实现 0.356 9 bit/(s·Hz) 的平均保密速率和 81.52% 的严格正保密容量, 与基准方案相比, 性能分别提升 48.4% 和 5.39%。

人工智能方法赋能 MA 在处理高维非凸优化、实时决策和环境自适应等方面展现出显著优势, 然而当前研究普遍忽略了 3 个关键因素: MA 移动延迟与信道实时变化的适配问题; 感知场景需求以及通信感知间的耦合作用; 通信安全问题。这些局限性严重制约 MA 技术在实际复杂无线环境中的部署潜力, 亟须在后续研究中重点突破。

5 未来研究展望

事实上, SEPA 是电磁论、信息论、控制论三元融合的新一代辐射系统。其核心突破在于将天线的空间 DoF (位置、朝向) 与电磁 DoF (介电常数、磁导率) 统一编码为可编程状态流形, 通过实时编译电磁响应函数实现场分布的精确编辑。相较于传统 MA 仅能调整单一维度参数 (如频率或方向图), SEPA 在微分几何框架下构建“空间位形-场响应”的全局映射, 使天线从被动辐射器件进化为主动场分布编译器。SEPA 能够突破传统天线架构下的通信容量瓶颈, 更能逼近香农信道容量极限。该范式以电磁拓扑演化为物理基础、熵最小化调控为优化准则、嵌入式感知-重构闭环为控制机制, 为 6G 突破香农极限提供底层使能。

5.1 核心机理: “电磁论-信息论-控制论”融合

(1) 三论融合的必要性与意义

控制论、电磁论与信息论的融合是 SEPA 区别于 FPA 和 MA 的根本标志。该框架将天线的物理

行为、环境交互与性能优化纳入统一数学描述:

① 电磁论提供物理定律层描述, 麦克斯韦方程组 $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ 定义辐射场的动力学边界; ② 控制论构建系统行为层模型, 建立状态方程 $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(\mathbf{p}, \mathbf{u})$, 其中天线空间位形 $\mathbf{p} = [x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$ 作为状态变量, 属控制论层面的可观测、可调控量, 电磁参数 $\mathbf{u}$ 代表电磁自由度 (可编程介质的本构参数与馈电幅相激励), 属电磁论层面的设计变量, 输出 $\mathbf{y}$ 则表征信息论层面的系统性能指标 (如信道矩阵、互信息、保密速率), 将电磁边界条件与天线几何构型统一编码为可编程状态, 通过状态演化驱动系统性能逼近理论极限; ③ 信息论制定优化目标层准则, 以香农容量 $C = \max I(X; Y)$ (X 和 Y 分别为输入信号与输出信号) 为终极目标, 通过互信息最大化驱动控制决策。三者形成“物理约束-系统响应-目标导向”的闭环三角, 促使 SEPA 从被动器件升维为具有自主意识的电磁生命体。

(2) 场响应实时适配

基于空间-电磁耦合闭环反馈机制, SEPA 可以构建信道状态与辐射特性的动态协同体系。通过嵌入式感知网络实时捕获空间电磁场分布, 利用智能架构提取多径传播的核心特征 (如角度扩散特性与极化变换关系); 控制核心通过求解电磁反演问题生成最优辐射方案, 实现增益、极化特性等参数的瞬时重构。相较于 MA 的机械迟滞响应, SEPA 自主构建的“感知-决策-重构”闭环形成类神经反射的智能电磁调控能力, 提升波束追踪精度与通信可靠性。此过程本质是将环境信息流、控制指令流与场分布重构流融合为统一的自主电磁神经反射弧。

5.2 前沿演进方向

(1) 智能重构范式: 电磁态势的动态博弈

围绕电磁域与空间域的深度智能融合, 基于复杂电磁环境认知与多站-多用户间协同, 构建基于“感知-决策-调控”的闭环自适应调控体系。引入多智能体强化学习架构, 将通信基站、用户设备及干扰源建模为自主博弈实体。该框架构建高维电磁环境状态空间, 涵盖信道响应与干扰场分布等关键参量; 定义协同调控指令空间, 整合 SEPA 空间位形调整与电磁参数编程等多维操作; 设计基于通信性能均衡优化的奖励机制, 驱动博弈智能体探索帕累托最优策略。纳什均衡求解器通过分布式决策实

现电磁资源动态分配, 在复杂城区环境中显著提升频谱利用效能与抗干扰鲁棒性。此范式将传统静态波束成形升维为具备环境认知能力的电磁博弈系统, 为密集网络提供自主协同重构能力。

(2) 多尺度空间-频谱联合可重构性

SEPA 突破经典天线设计的尺度约束, 实现跨数量级空间-频谱协同调控。在亚波长维度, 通过超构原子结构操控近场倏逝波分布, 突破衍射极限实现电磁能量纳米聚焦; 在谐振尺度, 结合机械位移动态调谐谐振腔体电磁模态, 实现宽带频谱无缝迁移; 在远场范畴, 利用相位梯度超表面构造非衍射波束, 拓展无线传输的物理边界。这种多尺度融合机制使单一天线平台兼具近场高精度感知与远场超衍射传输的双重能力, 颠覆传统天线按场景分立的架构范式, 为全域无缝覆盖提供基础使能。

(3) 空域立体覆盖空洞补偿

现有网络在垂直方向和空域范围内覆盖能力有限, 仅能覆盖 150 m 以下范围, 且难以实现连续、稳定的空地连接^[58]。针对传统 FPA 结构僵硬、电磁辐射特性固化带来的天线覆盖范围挑战, 围绕多维度、可重构的覆盖优化问题, 探索 SEPA 驱动的波束成形与多尺度覆盖增强技术。通过融合空间几何特性与电磁场分布规律, 构建面向复杂空域环境的波束调控机制, 实现从二维角域向三维体域的可控扩展。重点围绕多层异构网络的协同机制与资源统筹展开, 构建兼顾通信、感知与计算的空天地一体化体系结构。通过 SEPA 在卫星、高空平台与地面节点间的分布式部署, 实现电磁参数与空间几何的联合可编程控制, 支撑跨层信道的动态映射与自适应匹配。

(4) 轻量级平台设计与天线位姿调控机制

现有 MA 多基于“天线单元可独立驱动”的假设, 这种独立控制模式依赖大量电机逐单元驱动, 不仅质量与结构复杂度线性累积, 而且能耗随规模快速攀升、续航受限, 难以迁移至载荷、能耗受限平台。面向轻载、低功耗场景, 亟须设计轻量级天线位置/姿态调控平台, 同时兼顾天线间机械耦合与多重约束 (联动同步、碰撞/防干涉边界、单位时间位移等), 实现“重量-能耗-性能”间权衡。

(5) 多智能体协同调控机制

针对集中式控制难以应对高动态信道与天线耦

合复杂性的问题,将阵列中每个天线单元建模为具备感知与决策能力的独立智能体。各智能体在本地信道感知与环境反馈的约束下自主学习位姿调控策略,并通过邻域交互实现局部协同与全局一致。该机制可在时变信道条件下实现分布式调控与快速收敛,显著提升阵列在动态环境中的实时自适应能力与决策稳定性。

参考文献:

- [1] 3GPP. ETSI TR 126 989-2024: LTE 5G 关键任务推送对讲(MCPTT)在LTE上的媒体、编解码器和多媒体广播/多播服务(MBMS)增强功能[S].
3GPP. ETSI TR 126 989-2024: LTE 5G mission critical push-to-talk (MCPTT) enhancements for media, codecs, and multimedia broadcast/multicast services (MBMS) on LTE[S].
- [2] Li K X, Yu K, Ma D Y, et al. Can movable antenna-enabled micro-mobility replace UAV-enabled macro-mobility? a physical layer security perspective[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2026, 25(3): 4317-4330.
- [3] Feng Z Y, Zhao Y J, Yu K, et al. Movable antenna empowered PLS with eve's location uncertainty: joint optimization of beamforming and antenna positions[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(12): 13708-13724.
- [4] Wang J M, Zhu L P, Han S, et al. Joint antenna positioning and beamforming for movable antenna array aided ground station in low-earth orbit satellite communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2026, 25: 9437-9451.
- [5] Tam D W S. Electrolytic fluid antenna: US7898484B1[P]. 2011-03-01.
- [6] Chiao J C, Fu Y, Chio I M, et al. MEMS reconfigurable Vee antenna[C]//Proceedings of the 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Piscataway: IEEE Press, 1999: 1515-1518.
- [7] Zhu L P, Ma W Y, Zhang R. Movable antennas for wireless communication: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(6): 114-120.
- [8] Einstein A. On the electrodynamics of moving bodies[J]. Annalen Der Physik, 1905, 17(10): 891-921.
- [9] Marconi G. Wireless telegraphic communication[J]. Nobel Lecture, 1909, 11: 198-222.
- [10] Threat N C. ABM research and development at Bell laboratories, project history[R]. Bell Labs, 1975.
- [11] 虞湘宾, 钱盼盼, 蔡鸿飞. 面向6G无线通信的可移动天线技术研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(5): 773-783.
Yu X B, Qian P P, Cai H F. Overview of movable antenna for 6G wireless communication[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(5): 773-783.
- [12] An D X, Hu J F, Wang R, et al. Movable antenna enhanced beam pattern synthesis for spectrum constrained MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2025, 73: 3478-3495.
- [13] Hu D X, Zhu L D, Song Q J, et al. Low peak sidelobe level beamforming with minimum movable-antenna array size[C]//Proceedings of the 2024 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [14] Liu C H, Mei W D, Chen Z, et al. A general optimization framework for movable antenna systems via discrete sampling[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2026, 15: 475-479.
- [15] Yu K, Wang W X, Liu X W, et al. Does movable antenna present a dual-edged nature? from the perspective of physical layer security: a joint design of fixed-position antenna and movable antenna[PP]. V1. (2025-07-08)[2025-12-09]. arXiv: arXiv.2507.05784.
- [16] Ma W Y, Zhu L P, Zhang R. Multi-beam forming with movable-antenna array[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(3): 697-701.
- [17] Kang J M. Deep learning enabled multicast beamforming with movable antenna array[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(7): 1848-1852.
- [18] Liu W C, Zhang X H, Xing H J, et al. UAV-enabled wireless networks with movable-antenna array: flexible beamforming and trajectory design[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(3): 566-570.
- [19] Wang D, Mei W D, Ning B Y, et al. Movable antenna enhanced wide-beam coverage: joint antenna position and beamforming optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2026, 25: 3541-3558.
- [20] Zhou T, Xu K, Hu G J, et al. Joint trajectory, beamforming and antenna deployment design for movable antenna-aided A2G communication: a DRL-based two-stage method[C]//Proceedings of the 2025 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-5.
- [21] Zhu L P, Pi X Y, Ma W Y, et al. Dynamic beam coverage for satellite communications aided by movable-antenna array[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(3): 1916-1933.
- [22] Mao H B, Zhu L P, Pi X Y, et al. Robust design for movable-antenna array enabled AAV communications with jittering[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(11): 3470-3474.
- [23] Zhu Y Z, Wu Q Q, Liu Y, et al. Suppressing beam squint effect for near-field wideband communication through movable antennas[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2026, 75(2): 3446-3451.
- [24] Zhu L P, Ma W Y, Xiao Z Y, et al. Movable antenna enabled near-field communications: channel modeling and performance optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(9): 7240-7256.
- [25] Ma W Y, Zhu L P, Zhang R. Compressed sensing based channel estimation for movable antenna communications[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(10): 2747-2751.
- [26] Xiao Z Y, Cao S Q, Zhu L P, et al. Channel estimation for movable antenna communication systems: a framework based on compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9): 11814-11830.
- [27] Cao S Q, Zhu L P, Xiao Z Y, et al. Channel estimation for movable antenna aided wideband communication systems[C]//Proceedings of the 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-6.
- [28] Zhang R Y, Cheng L, Zhang W, et al. Channel estimation for movable-antenna MIMO systems via tensor decomposition[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(11): 3089-3093.

- [29] 聂皓明, 游昌盛, 周超, 等. 基于ESPRIT算法的可移动天线系统信道估计[J]. 移动通信, 2025, 49(4): 49-54.
- Nie H Y, You C S, Zhou C, et al. ESPRIT-based channel estimation scheme for movable antenna systems[J]. *Mobile Communications*, 2025, 49(4): 49-54.
- [30] Skouroumounis C, Krikidis I. Fluid antenna with linear MMSE channel estimation for large-scale cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(2): 1112-1125.
- [31] Zhang Z J, Zhu J A, Dai L L, et al. Successive Bayesian reconstructor for channel estimation in fluid antenna systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(3): 1992-2006.
- [32] Ji S Y, Psomas C, Thompson J. Correlation-based machine learning techniques for channel estimation with fluid antennas[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 8891-8895.
- [33] Shao X D, Zhang R, Jiang Q J, et al. Distributed channel estimation and optimization for 6D movable antenna: unveiling directional sparsity[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2025, 19(2): 349-365.
- [34] Jang S, Lee C. New view of learning-aided channel estimation for movable antenna systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(7): 5694-5708.
- [35] Lyu W T, Yang S J, Xiu Y, et al. Flexible beamforming for movable antenna-enabled integrated sensing and communication[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE 24th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1315-1320.
- [36] Zhang Q, Shao M J, Zhang T, et al. An efficient sum-rate maximization algorithm for fluid antenna-assisted ISAC system[PP]. V3. (2024-12-11)[2025-12-09]. arXiv: arXiv.2405.06516.
- [37] Zou J Q, Xu H, Wang C, et al. Shifting the ISAC trade-off with fluid antenna systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(12): 3479-3483.
- [38] Ding J Z, Zhou Z J, Shao X D, et al. Movable antenna-aided near-field integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2026, 25: 493-508.
- [39] Kuang Z M, Liu W C, Wang C J, et al. Movable-antenna array empowered ISAC systems for low-altitude economy[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 776-781.
- [40] Tang J, Pan C H, Zhang Y, et al. Secure MIMO communication relying on movable antennas[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(4): 2159-2175.
- [41] Yu K, Li K X, Zhao Y J, et al. Movable antenna-aided secure V2X communication: an integrated sensing and communication perspective[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2025, 32(6): 118-124.
- [42] Ren T S, Zhang X C, Zhu L P, et al. 6-D movable antenna enhanced interference mitigation for cellular-connected UAV communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(6): 1618-1622.
- [43] Zuo S R, Jing W P, Lu Z M, et al. Movable antenna-aided interference mitigation for LEO-GEO spectrum-sharing system[C]//*Proceedings of the 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-6.
- [44] Wang H H, Wu Q Q, Gao Y, et al. Throughput maximization for movable antenna systems with movement delay consideration[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2026, 25: 883-899.
- [45] Li Q L, Mei W D, Zhang R, et al. Trajectory optimization for minimizing movement delay in movable antenna systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2026, 25: 6986-6999.
- [46] Ning B Y, Yang S J, Wu Y F, et al. Movable antenna-enhanced wireless communications: general architectures and implementation methods[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2025, 32(5): 108-116.
- [47] Xie C F, Xiu Y, Yang S J, et al. Deep learning for movable antenna precoding in 2D MISO communication system[C]//*Proceedings of the 2024 10th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 2500-2504.
- [48] Tang X, Jiang Y D, Liu J X, et al. Deep learning-assisted jamming mitigation with movable antenna array[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(9): 14865-14870.
- [49] Weng C H, Chen Y B, Zhu L P, et al. Learning-based joint beamforming and antenna movement design for movable antenna systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(8): 2120-2124.
- [50] Zhao Y, Xiu Y, Dai C X, et al. Movable antenna enhanced federated fine-tuning of large language models via hybrid client selection optimization[PP]. V2. (2025-10-26)[2025-12-09]. arXiv: arXiv.2506.00011.
- [51] Shao X D, Hu L M, Sun Y L, et al. Hybrid near-far field 6D movable antenna design exploiting directional sparsity and deep learning[PP]. V1. (2025-06-18)[2025-12-09]. arXiv: arXiv.2506.15808.
- [52] Xie C F, Li Y H, Tu Q Q, et al. A learning-based flexible beamforming method for movable antenna-enabled integrated sensing, communication, and power transmission system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2025, 29(9): 2043-2047.
- [53] Kang J M. NMAP-net: deep-learning-aided near-field multibeamforming design and antenna position optimization for XL-MIMO communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(11): 18397-18413.
- [54] Bai Y, Xie B X, Zhu R F, et al. Movable antenna-equipped UAV for data collection in backscatter sensor networks: a deep reinforcement learning-based approach[PP]. V1. (2024-11-21) [2025-12-09]. arXiv: arXiv.411.13970.
- [55] 郭天昊, 尹瑞龙, 李仙钟, 等. 一种基于可移动天线和深度强化学习的无人机中继通信方案[J]. 移动通信, 2025, 49(4): 96-103.
- Guo T H, Yin R L, Li X Z, et al. A UAV relay communication scheme based on movable antenna and deep reinforcement learning[J]. *Mobile Communications*, 2025, 49(4): 96-103.
- [56] Yu K, Li K X, Liu X W, et al. Predictive position control for movable antenna arrays in UAV communications: a spatio-temporal Transformer-LSTM framework[PP]. V1. (2025-08-14) [2025-12-09]. arXiv: arXiv.2508.10720.
- [57] Wang W X, Liu X W, Gong W, et al. Moving or predicting? RoleAware-MAPP: a role-aware transformer framework for movable antenna position prediction to secure wireless communications[PP].

V1. (2025-10-23)[2025-12-09]. arXiv: arXiv.2510.20293.

[58] 中国信息通信科技集团有限公司. 低空智联网场景和关键技术白皮书[R]. 2025.

China Information Communication Technologies Group Corporation.
Scenarios and key technologies for low altitude intelligent network[R].
2025.

[作者简介]



于刊 (1990-), 男, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为无线物理层安全、可移动天线等。



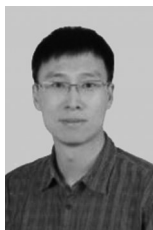
马丁友 (1993-), 男, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为通信感知一体化、雷达系统、雷达信号处理。



张徐琿 (1996-), 男, 香港中文大学(深圳)在站博士后, 主要研究方向为低空无线网络、无人机通信、可移动天线、人工智能与无线系统的深度融合。



李凯璇 (2000-), 女, 曲阜师范大学硕士生, 主要研究方向为无线通信安全、可移动天线等。



张奇勋 (1983-), 男, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为异构无线网络认知组网、6G通感一体化技术、车联网宽带通信与资源优化的理论与方法。



赵禹嘉 (2001-), 男, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为无线物理层安全、可移动天线技术、低空无人机检测等。



冯志勇 (1971-), 女, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知无线网络频谱感知与动态频谱资源管理、感知通信计算融合的智能车联网等。



王文旭 (2001-), 男, 曲阜师范大学硕士生, 主要研究方向为可移动天线、AI赋能无线通信等。



乐恒志 (1994-), 男, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为卫星通信、通信系统等。