

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.05.001

面向 6G 无线通信的可移动天线技术研究综述

虞湘宾, 钱盼盼, 蔡鸿飞

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 211106)

摘要: 随着多天线技术的快速发展, 复杂多变环境和高能耗将是当前以及未来无线通信面临的主要问题。可移动天线 (Movable antenna, MA) 技术凭借天线的移动性带来的信号功率提升、干扰抑制、灵活波束赋形和空间多路复用等优势, 致力于提供低能耗且高效的通信环境自适应调整新思路, 吸引了学术界的广泛关注, 得到了快速发展。本文首先概述了 MA 技术基本原理和技术特点。然后, 给出了 MA 技术具体的应用场景, 并由此阐述了 MA 技术优势。最后在现有工作基础上, 总结了 MA 技术可能面临的挑战, 论述并展望了 MA 技术的未来发展方向。MA 技术的研究和发展将会进一步推动移动通信技术革新, 助力 6G 通信进入新场景多需求下的多技术融合新阶段。

关键词: 无线通信; 可移动天线; 空间自由度; 6G 通信

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)05-0773-11

Overview of Movable Antenna for 6G Wireless Communication

YU Xiangbin, QIAN Panpan, CAI Hongfei

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing 211106, China)

Abstract: With the rapid development of multi-antenna technologies, complex and variable environments, as well as high energy consumption, will be the main problems for the current and future wireless communications. Movable antenna (MA) technology, with the advantages of signal power enhancement, interference suppression, flexible beamforming, and spatial multiplexing brought by the mobility of antennas, is committed to providing new ideas for adaptive adjustment of low-energy and efficient communication environments, attracting widespread attention from the academic community and achieving rapid development. Firstly, the paper summarizes the fundamental principles and technical characteristics of MA. Then, the technical advantages of MA are summarized according to the specific application scenarios. Finally, the potential technical challenges of MA techniques are provided based on the existing work, and the research direction of MA techniques is further discussed and explored. The research and development of MA will further promote mobile communication technology innovation and help 6G communication enter a new stage of multi-technology integration in new scenarios and multiple demands.

Key words: wireless communication; movable antenna; spatial degree of freedom; 6G communication

基金项目: 国家自然科学基金(61971220)。

收稿日期: 2024-09-01; **修订日期:** 2024-09-12

作者简介: 虞湘宾, 男, 教授, 博士生导师, 中国电子学会通信分会委员, 中国电子学会信息论分会委员, IEEE 高级会员, 中国电子学会和通信学会高级会员。主要从事未来宽带移动通信关键技术研究。以第一作者身份在国内外学术期刊发表学术论文 120 余篇, 其中 SCI 检索 70 余篇。授权国家发明专利 30 余项。

通信作者: 虞湘宾, E-mail: yxbxwy@nuaa.edu.cn。

引用格式: 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 Xiangbin, QIAN Panpan, CAI Hongfei. Overview of movable antenna for 6G wireless communication[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(5): 773-783.

在过去的几十年里,从单输入、单输出向多输入、多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)的发展一直是无线通信系统发展的一个重要趋势。利用空间多路复用、干扰抑制、波束形成和分集增益等优势,MIMO技术显著提高了无线通信的容量和可靠性^[1]。特别是众所周知的大规模MIMO系统,由于其具有信道硬化和有利的传播等优越的信道特性,已然成为第5代移动通信的关键技术之一。在即将到来的第6代(The sixth generation, 6G)无线网络中,物联网(Internet of things, IoT)设备数量稳步增长。为了满足对越来越高的数据速率的需求,MIMO技术的发展趋势是为基站和无线终端配备更多的天线。例如,通过在基站上部部署比现有的大规模MIMO更多的天线,超大规模MIMO可以实现更高的空间自由度,以提高无线系统的通信/传感性能^[2]。此外,去蜂窝大规模MIMO技术,通过部署更多的分布式天线/基站^[3],为用户在网络中提供无缝和统一的性能覆盖。然而,这导致了更高的硬件成本和功耗。为了缓解这一问题,连续孔径MIMO、透镜天线MIMO和全息MIMO技术已经被提出,通过使用亚波长超材料来实现优越的波束形成性能^[4-6]。此外,智能反射表面/可重构智能表面(Reconfigurable intelligent surface, RIS)技术^[7]因其低成本、准无源特性,为移动通信提供了低能耗、通信环境自适应可重构服务,满足了复杂通信场景下多样化设备服务需求,为MIMO技术的发展开辟了新的途径。

上述多天线技术可以看作是固定位置MIMO。它采用固定位置天线,一旦部署,其位置就会被固定。在天线总数固定的情况下,除了传统的自适应MIMO处理(如传输预编码、接收组合)之外,无线网络不能根据用户空间的不均匀分布而灵活地分配其天线资源。同时,它们以增加硬件成本和能源消耗为代价,通过使用更多的固定位置天线来提高性能。因此,固定位置天线可能无法满足未来6G等无线网络的高性能和效率期望,为未来无线网络研究创新、高性能同时具有成本效益的MIMO技术仍然势在必行。

为了充分探索空间自由度,可移动天线(Movable antenna, MA)被提出作为一种新的解决方案,以打破上述固定位置天线系统的基本限制。具体而言,可移动天线通过一根柔性电缆连接到射频(Radio frequency, RF)链上,它可以在驱动器的帮助下在空间区域内实现实时移动^[8]。在收发端均配备多个MA的情况下,每个MA可以通过灵活地调整其在本地发射机/接收机区域的位置来充分利

用空间分集。由于多路径分量的叠加,发射机和接收机之间的信道增益随着天线在空间区域中位置的变化而变化,这被称为小尺度衰落。通过在空间区域连续移动,可移动天线系统可以实现发射机和接收机之间的最大信道增益,从而获得比传统的固定位置天线更高的接收信噪比,后者可能会经历深度衰落信道。此外,通过将可移动天线移动到相对于干扰器的信道增益最小的位置,可以有效地减轻干扰。除了提高信道功率增益,可移动天线系统在波束形成和空间复用^[9]中可以提供额外的自由度。特别是通过联合设计可移动天线的位置和波束形成权重,可以实现更灵活的波束形成。对于空间多路复用,通过优化可移动天线的位置,可以重塑MA-MIMO系统的信道矩阵,因此与传统的固定位置天线MIMO系统^[10]相比,可以进一步提高信道容量。另一种利用空间自由度的方法是固定位置天线系统中的天线选择技术。它通过从一个大的候选集^[11-12]中正确选择少量具有良好信道的天线来捕获MIMO系统的大量信道容量。然而,为了实现更高的无线传输分集顺序,天线选择系统需要部署更多的候选天线,这导致硬件成本、信道估计的开销和天线选择算法的开销随着天线总数^[13]的增加而大幅度增加。与传统固定位置天线以及天线选择技术相比,可移动天线技术用于无线通信系统中,通过实时调整天线位置来适应和优化信道条件,利用其灵活可控自由度优势,保障系统低硬件成本、低功耗前提下进一步提高信号强度,减少衰落现象,降低干扰,确保在复杂和多变的无线环境中保持稳定的通信性能。上述优势充分体现了可移动天线技术的发展能够较好地实现未来6G移动通信的绿色可持续发展,以及对未来更高层次的无线通信技术发展有着较为深远的实际应用价值。随着感知与通信的融合被确定为6G移动通信网络的典型应用场景之一,可移动天线技术通过利用空间自由度,在不增加天线及射频数量的前提下可以显著提升通信及感知性能,因此在未来6G网络中具有重要的应用潜力。此外,“空天地一体化”通信技术作为未来通信发展的关键研究方向,面临复杂多变通信网络环境的问题,可移动天线技术可通过调整天线位置和角度来适应和优化信道条件,从而进一步应对“空天地一体化”复杂多变通信网络环境,实现复杂动态多变传输环境下系统性能稳健提升。因此,可移动天线技术作为6G移动通信的关键技术之一,可与多种6G移动通信应用场景有机结合,利用其自身技术优势为6G移动通信技术发展提供动力,可推动6G移动通信技术的快速发展与应用。

1 MA 基本原理

相比于传统的固定天线系统,MA 系统可以用更少的天线甚至单个天线来利用给定区域的全空间分集。此外,天线选择系统中的天线只能离散部署在一维线型或二维表面的固定位置。相比之下,MA 可以在三维区域内灵活移动^[8],以充分利用其中的信道变化。因此,与固定位置天线以及天线选择相比,MA 是探索封闭区域空间自由度的一种更经济有效、更节能的解决方案。

1.1 系统模型

MA 技术是在当前以及未来通信环境复杂多变的应用背景下提出的,MA 协同或替代固定位置天线,旨在突破传统通信系统设计思路。利用 MA 的移动特性,自适应调整和改变传输环境,从而实现信号增强及干扰抑制的作用。同时,MA 技术更有效地利用无线信道空间自由度,从而提高了通信性能,可以满足未来 6G 等无线网络的高性能和效率期望。

图 1 所示为安装在发射机/接收机端的 MA 架构,它包含一个通信模块和一个天线定位模块^[9]。该通信模块类似于传统的固定位置天线系统,而可移动天线则通过一根柔性电缆连接到射频链路上,以支持天线的移动。中央处理单元(Central processing unit, CPU)用于数字信号处理以及控制天线的位置。对于天线定位模块,可移动天线安装在一个由步进发动机^[14-15]驱动的二维机械滑道上。在接收到来自 CPU 的控制信号后,发动机可以协同执行相应的步骤,将天线重新定位到目标位置,以及期望的精度(例如,波长的十分之一)。此外,

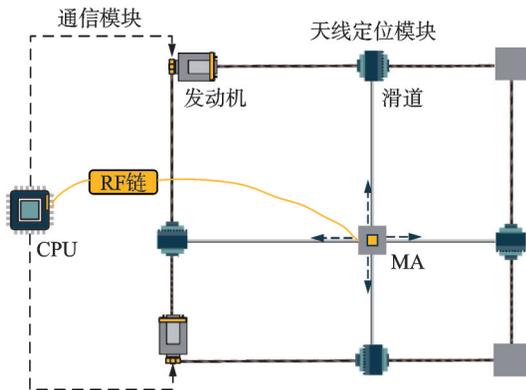


图 1 MA 结构^[9]

Fig.1 Structure of MA^[9]

在发动机的辅助下,给定位置的方向变化为天线运动提供了两个额外的自由度。此场景可推广到三维甚至是包含三维位置以及三维扭转的六维(Six-dimensional, 6D)空间,以满足不同通信场景的需求。对于多 MA 系统,每个可移动天线都可以由一个独立的定位模块驱动,并在一个单独的子区域中移动。

支持可移动天线的通信系统,通常是在收发两端用可以移动的天线替代传统的固定天线,通过灵活地调整其在发送/接收区域的位置来充分利用空间分集,从而达到降低干扰、提升通信系统容量的作用。收发端均为多 MA 的 MIMO 系统模型如图 2 所示^[10],该系统包含 N 个发送 MA 以及 M 个接收 MA。发送和接收 MA 通过柔性电缆连接到射频链路上,因此可以实时调整其位置。该系统中,信号经由 N 个发送 MA,通过 L_t 个发送路径以及 L_r 个接收路径到达 M 个接收 MA。

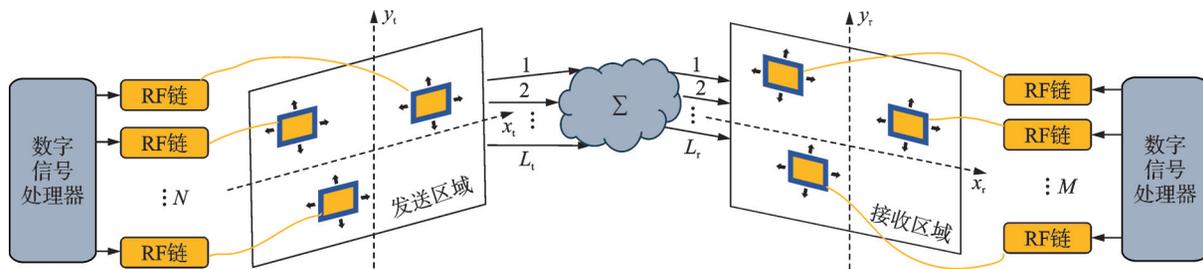


图 2 MA-MIMO 通信系统^[10]

Fig.2 MA-enabled MIMO communication system^[10]

此场景考虑窄带准静态信道,其中发射机和接收机在给定区域内是静态的或缓慢的。相比之下,假设发射和接收可移动天线能够移动得足够快,因此与更长的信道相干时间相比,调整可移动天线位置的时间开销是可以容忍的。对于 MA-MIMO 通信系统,信道可以通过调整发送和接收可移动天线的位置进行重新配置。

从发送端到接收端之间的 MIMO 信道矩阵可以表示为 $H(\tilde{\mathbf{i}}, \tilde{\mathbf{r}}) \in \mathbb{C}^{M \times N}$, 其中 $\tilde{\mathbf{i}}$ 和 $\tilde{\mathbf{r}}$ 分别为收发端可移动天线的坐标集合,且有 $\tilde{\mathbf{i}} = [t_1, t_2, \dots, t_N]$, $\tilde{\mathbf{r}} = [r_1, r_2, \dots, r_M]$ 。发送区域中第 n 个发送可移动天线以及接收区域中第 m 个接收可移动天线的坐标分别表示为: $\mathbf{t}_n = [x_{t,n}, y_{t,n}]^T$ 和 $\mathbf{r}_m = [x_{r,m}, y_{r,m}]^T$ 。

信道矩阵由信号传播环境以及发射和接收可

移动天线的位置决定。目前MA-MIMO场景均考虑远场无线信道模型^[16],其中发射/接收区域远小于信号传播距离。因此,对于每个信道路径分量,发射/接收区域的所有可移动天线都经历相同的离开角/到达角和振幅。

上述收发端的信道矩阵可以表示为

$$H(\tilde{\mathbf{t}}, \tilde{\mathbf{r}}) = F(\tilde{\mathbf{r}})^H \Sigma G(\tilde{\mathbf{t}}) \quad (1)$$

式中 $F(\tilde{\mathbf{r}}) \triangleq [f(\mathbf{r}_1), f(\mathbf{r}_2), \dots, f(\mathbf{r}_M)]$ 代表接收端 M 个可移动天线的场响应矩阵,其中第 m 个接收可移动天线的场响应向量为

$$f(\mathbf{r}_m) \triangleq [e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\rho_r^1(\mathbf{r}_m)}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\rho_r^2(\mathbf{r}_m)}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\rho_r^{L_r}(\mathbf{r}_m)}]^T \quad (2)$$

式中: L_r 为接收路径数, λ 代表波长, $\rho_r^q(\mathbf{r}_m) = x_{r,m} \sin \theta_r^q \cos \phi_r^q + y_{r,m} \cos \theta_r^q$ 是接收端第 m 个可移动天线位置的第 q 个接收路径的信号传播距离与接收区域原点的信号传播距离之差, $\theta_r^q \in [0, \pi]$ 和 $\phi_r^q \in [0, \pi]$ 分别为第 q 个接收路径到达角对应的仰角和方位角。

同理, $G(\tilde{\mathbf{t}}) \triangleq [g(\mathbf{t}_1), g(\mathbf{t}_2), \dots, g(\mathbf{t}_N)]$ 代表发送端 N 个可移动天线的场响应矩阵,其中第 n 个发送可移动天线的场响应向量为

$$g(\mathbf{t}_n) \triangleq [e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\rho_t^1(\mathbf{t}_n)}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\rho_t^2(\mathbf{t}_n)}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\rho_t^{L_t}(\mathbf{t}_n)}]^T \quad (3)$$

式中: L_t 为发送路径数, $\rho_t^p(\mathbf{t}_n) = x_{t,n} \sin \theta_t^p \cos \phi_t^p + y_{t,n} \cos \theta_t^p$ 是发送端第 n 个可移动天线位置的第 p 个发送路径的信号传播距离与发送区域原点的信号传播距离之差, $\theta_t^p \in [0, \pi]$ 和 $\phi_t^p \in [0, \pi]$ 分别为第 p 个接收路径离开角对应的仰角和方位角。此外, $\Sigma \in \mathbb{C}^{L_t \times L_r}$ 表示从发射区域的原点到接收区域的路径响应矩阵。

基于上述分析,接收信号向量可以表示为

$$\mathbf{y}(\tilde{\mathbf{t}}, \tilde{\mathbf{r}}) = H(\tilde{\mathbf{t}}, \tilde{\mathbf{r}}) \mathbf{s} + \mathbf{z} \quad (4)$$

式中: \mathbf{s} 表示发送信号矢量, $\mathbf{z} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ 为接收机处的加性高斯白噪声矢量, σ^2 为平均噪声功率。

可移动天线辅助通信系统的优化设计过程中,可移动天线的位置以及波束成形矩阵的联合优化设计是当前可移动天线系统以及未来研究的主流方向。相较于传统的固定位置天线系统,可移动天线系统的性能提升归因于其灵活可移动的天线位置,针对多个可移动天线的场景,结合可移动天线的位置优化以及波束成形优化,可以更好地发挥两者优势,提升系统性能。同时,可移动天线技术利用其灵活可控自由度优势来适应和优化信息传输链路来提升通信系统性能,根据其信道特性进行相应的系统优化设计将会进一步提升可移动天线技

术的优势。式(1~3)所给出的可移动天线辅助通信信道模型呈现出其信道包含收发两端的可移动天线的移动特性。可以发现,可移动天线的位置参数与信道强耦合,且与可移动天线的个数以及信道状态信息强相关。因此,设计出低复杂度的优化算法将是研究可移动天线技术的重点及难点问题,有着较大的应用前景。

利用可移动天线优势对系统进行优化设计的前提是系统信道状态信息(Channel state information, CSI)的获取。为了获取这种多路径信道的信息,可以将可移动天线移动到足够数量的位置以进行信道测量。基于信道测量,可以采用稀疏信号恢复算法,如压缩感知,来估计不同路径的多路径信道分量,如离开角、到达角和路径系数^[17]。只有深入研究可移动天线系统的CSI获取,才能进一步充分挖掘可移动天线技术潜能,实现其真正的实际应用价值。

1.2 MA的发展

“可移动天线”一词可以追溯到2008年^[18],它的原型甚至在1999年就已出现^[19]。这个术语最初指的是通过使用微机电系统(Micro-electromechanical systems, MEMS)而具有运动/旋转能力的天线。随后,在2015年提出了一种步进发动机启用的可移动天线^[20],允许在雷达系统中灵活调整天线位置。遵循可移动天线最初的定义,无线通信领域中正式引入可移动天线理论概念并进行研究^[8,10],并指出,可移动天线适用于任何无线系统并且可以灵活地在空间区域进行调整,从而改善信道条件和提高通信性能。随后,文献[9]概述了可移动天线在提高信号功率、减轻干扰、灵活波束形成和空间多路复用等方面对提高无线通信性能的主要优点。除此之外,文献[9]还指出,除了位置外,可移动天线在三维空间中的扭转/位置优化还可以为系统设计提供额外的自由度。

目前已经有一些初步的研究证明了可移动天线在无线通信领域^[16,21-25]中的潜力。文献[16]研究了一个由多个可移动天线辅助的多用户通信系统,并通过联合优化最终证实可移动天线系统比固定位置天线和天线选择系统性能更优。文献[21]研究了可移动天线的波束形成,并证实可移动天线阵列可以同时实现期望信号方向上的全阵列增益和非期望干扰方向上的零转向。文献[22]考虑了一个由多个可移动天线协助的多用户系统,并在每个用户的最小信噪比的约束下,通过联合优化波束成形以及多个可移动天线的位置,获得了最小化总传输功率的最优解。文献[23]基于统计CSI联合

优化可移动天线位置和传输协方差矩阵,从而最大化遍历可达速率。文献[24]重新考虑了具有可移动天线的多用户无线通信中的传统预编码,并提出一个比传统固定位置天线性能高出一倍的算法。文献[25]考虑了一个基站和用户均有可移动天线的系统,并提出了一个降低计算复杂度的可移动天线分组移动模式。

随着研究的深入发展,在前期理论研究基础上,可移动天线技术开始向多元化发展。文献[26]考虑具有协调多点接收的可移动天线阵列无线通信。文献[27]提出了一种基于指数调制MIMO通信系统的传输机制,该机制在不增加硬件复杂性的情况下提高频谱效率。基于可移动天线的位置优化问题,文献[28]采用离散选点的方式,通过将发射区域采样到多个离散点,从而将连续天线位置优化问题转化为基于点向信道信息的离散采样点选择问题,并提出了一种基于图的算法在多项式时间内解决点选择问题。除此之外,文献[29-30]采用深度学习的方式解决多个可移动天线高复杂度优化问题,并通过与传统固定位置天线系统的对比,验证了多个可移动天线系统的优越性。

上述系统充分探索了可移动天线辅助通信系统的潜能和优越性,也研究了可移动天线位置优化的可行性。因此,将MA技术与移动通信领域其他关键技术有机结合可有效推动移动通信技术快速发展。文献[31]探索了非正交多址技术与MA的结合,更好地研究了可移动天线辅助的多用户场景。文献[32]考虑利用MA增强无线通信物理层安全,是未来移动通信发展的关键研究方向。文献[33]将MA与移动边缘计算相结合,通过灵活调整每个MA在可用区域内的位置来提高自由度,从而提高了下行无线能量传输和上行任务卸载的效率。文献[34]将RIS与MA相结合,并通过使RIS反射元件可移动,消除固定RIS元件场景中存在的相位偏移现象。除此之外,文献[35]研究了一种由MA阵列增强的多用户无人机系统。同时发挥可移动天线系统的通信链路可重构优势以及无人机灵活位置部署能力,不仅增强了无人机通信的稳定可靠性,而且利用无人机增强了MA辅助通信系统设计自由度。文献[36-37]将可移动天线与通感一体化系统(Integrated sensing and communications, ISAC)相结合,探索可移动天线对雷达探测功率受限情形下系统的性能。文献[38]将MA布设在近地卫星(Low earth orbit, LEO)辅助的通信系统中,利用可移动天线阵列来提高卫星波束的覆盖范围和降低干扰的能力,为即将到来的6G移动通信实现无处不在的覆盖和大规模的连接提供了进一

步的探索。随着无线通信技术的快速发展,学者对可移动天线的研究越来越深入,旨在从不同方向和角度对可移动天线进行全面的探索。表1总结了可移动天线的研究进展以及介绍了部分代表性论文的研究内容^[39-44]。

相比于传统的固定位置天线,可移动天线技术充分利用无线信道空间变化在一个有限的区域这一特性,使天线能够局部运动。具体地说,可以动态地改变发射机和/或接收机处的天线位置,以获得更好的信道条件,从而提高通信性能。其显著优势表现为以下几个方面。

(1)空间分集增益增强。少数(主要)信道路径的叠加可能导致一个小发射机/接收机区域内的信道增益变化。无论是单MA^[8]还是多MA^[28]的场景,通过优化MA的位置,即将MA放置在最大信道增益的位置,能显著提高接收信号的功率,特别是对于多路径和大尺寸的发射机/接收机区域场景。除了提高期望信号的功率外,MA的位置优化也有助于降低干扰功率,通过将接收机天线放置在干扰器最小通道增益/干扰发射机的位置,可以显著减轻干扰。值得注意的是,完全的干扰抑制是通过最优定位单个MA来实现^[9],而不需要多天线干扰消除。

(2)灵活波束赋形。传统的固定位置天线阵列在制造后通常具有固定的几何形状,这限制了它们的波束形成性能。相比之下,可移动天线阵列的几何形状可以被重新配置,这样通过联合设计多个天线的位置和波束形成权值,可以实现更灵活的波束形成^[42]。可移动天线阵列的另一个好处是它们能够以更灵活的零方向合成波束模式^[21]。由于给定的固定位置天线阵列几何结构中,波束宽度内到达角的转向向量之间具有高度相关性,因此当其使用转向向量作为波束形成向量以最大限度地提高到达角的增益时,不能有效地抑制来自接近这个期望到达角的方向的干扰。而可移动天线阵列可以通过灵活地重构阵列的几何形状来克服这一限制,从而减少所需的转向向量和干扰到达角之间的相关性。

(3)空间多路复用。通过可移动天线位置优化来重塑信道矩阵,可以提高依赖于信道矩阵奇异值的MIMO系统的容量^[10]。在低信噪比条件下,单流波束形成策略是最优的,其中所有的传输功率都分配给MIMO信道的最强特征信道。在这种情况下,可以优化可移动天线位置,以增加信道矩阵的最大奇异值。相比之下,在高信噪比情况时,传输功率基于注水定理给多个特征信道进行分配,因此,为了最大化容量,可移动天线的位置应该进行

表1 MA研究进展

Table 1 Research progress of MA

| 年份 | 作者 | 具体研究 |
|------|---|---|
| 2024 | Shao等 ^[44] | 介绍了6DMA,以揭示其在无线网络中的巨大潜力,包括其相对于现有技术的动机和竞争优势、系统/信道建模和实际实现 |
| | Zhu等 ^[43] | 从信道建模、性能分析和性能优化3个方面介绍了在频率选择衰落信道中采用正交频分复用的MA辅助宽带通信 |
| | Ma等 ^[42] | 利用MA提供新的自由度,研究了线性MA阵列的增强多波束形成 |
| | Xiao等 ^[41] | 利用多路径场响应信道结构,提出了一种针对MA系统的通用信道估计框架 |
| | Zheng等 ^[40] | 介绍了MA在无线通信中的潜力,并讨论了其基本概念、主要应用、关键的技术挑战以及未来的发展方向 |
| | Zhang等 ^[39] | 讨论了基于MA的空中计算系统,并联合优化收发器设计和天线位置向量,从而最小化目标及估计函数值之间的均方误差 |
| | Ma等 ^[16] | 基于信道测量,采用稀疏信号恢复的压缩感知算法估计MA辅助通信系统的不同路径的离开角、到达角和路径系数 |
| | Ma等 ^[10] Zhu等 ^[9] Zhu等 ^[8] | 提出了收发端均多MA的MIMO通信系统,并对比其与传统固定位置天线系统的性能从信号功率提高、干扰缓解、灵活波束赋形和空间多路复用等角度,分析了MA的潜力和优势在无线通信领域中正式引入MA理论概念,并分别从信道建模和性能分析角度对MA协助的通信系统进行研究 |
| 2023 | Chen等 ^[23] | 通过联合优化基于统计CSI的MA位置和传输协方差矩阵来最大化可达率,提出了两种简化的天线运动模式,以促进天线移动和降低算法的计算复杂度 |
| | Wu等 ^[22] | 将MA元素的移动建模为离散运动,并研究了支持MA的多用户多输入单输出通信系统中相应的资源分配问题 |
| | Zhu等 ^[21] | 从MA阵列提高波束成形增益角度出发,对MA实现期望信号方向上的全阵列增益和非期望干扰方向上的零转向进行优化研究 |
| 2015 | Zhuravlev等 ^[20] | 开发了一种步进发动机启用的MA,允许在雷达系统中灵活调整天线位置 |
| 2008 | Pan等 ^[18] | 首次引入“可移动天线”一词,并探索通过MEMS而具有运动/旋转能力的天线带来的系统性能提升 |
| 1999 | Chiao等 ^[19] | 提出基于MEMS可重构天线,并研究其架构 |

优化,以平衡信道矩阵的奇异值,而不是简单地最大化每个天线的信道功率增益。

可移动天线技术利用天线的移动性带来的信号功率提升、干扰抑制、灵活波束赋形和空间多路复用等优势吸引了学术界的广泛关注,并得到了较好的发展。同时,利用系统优化设计方法对可移动天线位置进行合理优化设计,可显著提升通信系统性能,对未来6G动态复杂多变通信环境有着较大的实际应用价值。可以说,可移动天线技术的快速发展与应用离不开系统优化设计方法的支持,有效的系统优化设计方法可以充分挖掘可移动天线技术优势并将其发挥到极致。目前已有的优化方法可以分为:传统方法、基于学习的智能优化方法以及人工智能方法^[40]等。随着上述优化方法的不断创新,可移动天线技术优势将得以进一步发挥,并且,可移动天线技术与其他关键技术的结合搭配其对应的优化设计方法将进一步推动未来6G移动通信技术的创新与发展。

2 MA应用场景

MA技术是在当前以及未来通信环境复杂多

变的应用背景下提出的,根据系统的实时服务需求,利用MA的移动特性,自适应调整、改变传输环境,从而实现系统性能提升。如图3所示,MA技术在通信环境中有着丰富的应用场景。

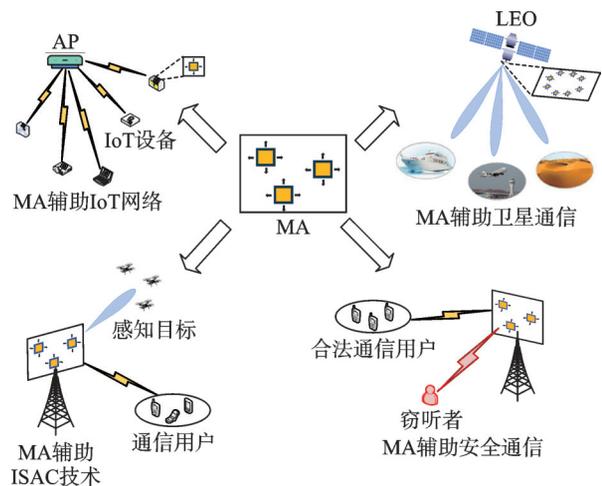


图3 MA应用场景

Fig.3 Examples of use scenarios for MA

2.1 MA辅助IoT网络

未来通信将是万物互联的时代,且行业发展将包括自动化和智能化,以减少对人工操作的需求。

而IoT具有大规模设备接入、信息传输环境复杂多变等特性,能帮助实现万物互联新时代,已是未来通信发展的必然趋势。在这种情况下,大量的IoT终端设备需要连接到它们的接入点(Access points, APs),以实时报告状态信息和接收控制指令。由于这些设备周围的传播环境通常变化缓慢,且通常部署在固定位置或移动性较低,因此安装在其上的所有MA可以帮助在长信道相干时间内改善无线信道条件^[9],从而提高其通信可靠性,降低延迟。同时,每个MA场能够自适应调整信息传输环境,是实现多样化服务需求的有效保障。

2.2 MA辅助ISAC技术

ISAC技术作为6G移动通信的关键技术之一,已经得到了学术界和工业界广泛关注。相比于通信和感知分离的系统,通感一体化系统能获得融合增益与协作增益^[45]。虽然当前的大规模MIMO-ISAC提供了丰富的空间自由度,但通信和感知对空间资源有着不同的处理方式,会导致ISAC对传统的固定位置天线自由度利用率不高^[46]。除此之外,大规模MIMO-ISAC系统的大量天线导致射频链路数目剧增、系统能耗和硬件成本过高等问题。可移动天线辅助的通信系统可以使用更少的射频链路,以相对低的硬件成本,在复杂环境下,通过移动天线位置来实现比传统MIMO更好的性能。并且,通过可移动天线,可实现更高的自由度,通过移动天线位置,既可以选择更好的信道来显著提高ISAC辅助的波束增益以及多用户场景的和速率^[36],又能有效降低系统的自干扰^[37]。因此,在未来6G移动通信应用场景下,MA辅助ISAC技术拥有较大的发展潜力。

2.3 MA辅助卫星通信

LEO卫星网络被认为是一项很有前途的技术,为未来的6G移动通信提供无处不在的覆盖和大规模的连接。由于超密集星座,有效的波束覆盖和减轻干扰缓解对LEO卫星通信系统至关重要,而传统的定向天线和固定位置天线阵列在波束形成方面都有有限的自由度,以适应地面用户的时变覆盖要求^[47]。并且,在实际情况中,卫星通常配备大规模的固定位置天线,用于合成窄光束,以补偿由于与地面用户的信号传播距离较长而造成的高路径损耗。因此,传统固定位置天线辅助的卫星通信具有一定的局限性。相比之下,可移动天线阵列的几何形状由于其天线的移动性可以被重新配置,从而可以通过联合优化可移动天线的位置和波束形成权重来获得更灵活的波束模式,从而增强地面用户的波束覆盖范围并在很大程度上降低了LEO

用户的干扰^[38]。虽然卫星通常保持着较高的移动速度,但由于其相对于地面的高海拔,覆盖地面区域的转向角度随时间推移变化缓慢,以及卫星的轨道固定、遵循周期性规律等特性,使卫星位置的优化和实现切实可行,并具有很大的发展前景。

2.4 MA辅助安全通信

物理层安全是通信未来发展需要面临的关键问题之一,它专注于保护无线通信信道免受窃听、拦截和其他恶意活动。与传统的依赖于计算复杂度较高的数据加密和解密方法不同,物理层安全利用无线信道固有的随机性和不可预测性来确保设备之间的安全通信,而不需要复杂的加密算法^[48]。目前已有的方案均基于固定位置天线系统,其中所有天线都部署在固定位置,相应的转向矢量在给定的固定转向角度下是静态的。因此,其波束形成方案不能充分利用空间自由度,导致在期望/非期望方向上的安全增益减弱。为了克服这一限制,可移动天线技术提供了动态调整其方向和配置的灵活性,通过改变不同角度对应的转向向量,允许在动态环境中实现最佳的信号传输和接收^[49],从而提高了通信系统的保密性能和安全速率^[32],有效应对复杂环境下物理层安全问题。

3 挑战与展望

尽管可移动天线技术有良好的优势和潜在的性能提高,但对其辅助的无线网络的研究仍处于起步阶段。现有的理论研究充分彰显了可移动天线技术的发展潜力,而且未来通信环境复杂多变,大规模接入设备的移动通信场景将为可移动天线技术提供更大的发挥空间。目前可移动天线技术与移动通信领域其他关键技术有机结合推动了移动通信技术的快速发展,随着新时代的技术变革,这势必会给可移动天线技术带来新的挑战 and 机遇。

3.1 面临的挑战

目前可移动天线技术的发展主要集中在联合优化可移动天线的位置和其他参数,从而验证由其移动性带来的系统性能增益。然而随着移动通信技术的快速发展与6G移动通信场景提出的需求,可移动天线技术将面临着更大的技术挑战。想要更快的发展与技术升级,必须面向未来通信实际场景需求,真正解决实际应用环境中的难题。因此,可移动天线技术还面临着以下几个方面的问题。

(1)信道估计问题。为了充分利用空间域的性能增益,可移动天线辅助系统在发射机/接收机区域内获得准确的CSI至关重要。一般来说,需要构造发射机和接收机区域之间的复值信道映射,其中

包括从发射机区域中的每个点到接收机区域中的每个点的信道响应^[41]。如果天线移动的发射机/接收机区域较小,则可以利用遍历天线移动从而测量整个发射机/接收机区域的信道图。然而,对于较大的区域,遍历法可能会导致非常高的训练开销。为了减少这种训练开销,通常使用稀疏信号恢复算法,如压缩感知,利用信道在角域的多路径稀疏性,基于少量天线位置信道测量来估计MA系统的瞬时CSI。然而,信道稀疏性假设在实践中并不总是成立的,由此产生的信道模型不匹配可能会导致MA信道估计的不可预测的性能损失。因此,找到适合MA的CSI获取方法是其未来研究与应用无法避免的难题,只有突破MA的CSI获取这一基本问题,才能进一步推动MA技术的发展,从而推动移动通信技术的快速发展。

(2)MA位置优化问题。MA系统相比于传统固定位置天线系统的性能增益归功于其灵活的天线定位。然而,找到能产生最佳通信性能的最优天线位置是一个关键的挑战,因为信道响应是包含所有MA位置的高度非线性函数^[9]。针对MA位置优化,可分为多种场景,如:精确CSI下、非精确CSI下、基于瞬时CSI、基于统计CSI、没有先验CSI以及离散位置下等。因此,如何针对不同场景,设计在实际约束下更有效的高性能、低复杂度的优化算法是未来MA技术发展面临的重大问题之一。

(3)移动调度问题。在获得每个MA的优化位置后,另一个需要解决的实际问题是移动调度,即处理如何随着时间的推移,将分布的MA单元移动到它们所需的位置上去这一问题。由于将MA移动到其优化好的新的位置时会导致临时的信道变化,这可能会中断当前的通信性能,因此需要联合设计在所有发射机/接收机上的MA移动调度,以减少性能损失以及移动能量和时间成本。MA的运动调度方法以及不同发射机/接收机的协同运动等设计是MA技术实际应用的主要难题之一,同时也是MA技术在未来移动通信实际应用场景中最有价值的推动力之一。

(4)时延和能效问题。虽然目前所有的MA均使用MEMS或者步进发动机来实现高精度、小型化和低功耗,但是,在实际应用中,MA硬件仍包含一定程度的机械部件,会增加其尺寸、重量和物理占地面积。同时,也会增加成本以及引入了潜在的故障点。此外,MA的移动和重新定位需要额外的动力来操作机械部件,这可能导致功耗增加,也可能是能源受限应用或电池供电设备中的一个问

题。目前所有的研究均假设MA移动的时延是容忍以及可忽略的,然而,对于宽带系统甚至是大发射机/接收机区域系统,MA移动的时延也会给系统性能提升产生局限性。因此,MA设备的时延和能效问题研究是MA技术在未来移动通信实际应用场景中不可忽略的问题。

3.2 未来研究方向

(1)MA辅助“空天地一体化”通信。空天地一体化网络可以为陆海空天用户提供无缝信息服务,满足未来网络对全时全域全空通信和网络互联互通的需求。同时,空天地结合将天基网络和空基网络作为地基网络的补充和延伸,有效地提升移动通信技术发展空间。然而,由于空天平台环境复杂多变,无人机以及高空平台等与地面用户间的直达径极易堵塞,而设计其放置/轨迹来避免直达径链路阻塞会导致额外的功耗和时间延迟^[50]。除此之外,卫星通信常使用合成窄光束,以补偿由于与地面用户的信号传播距离较长而造成的高路径损耗,这会导致其波束覆盖有限。可移动天线技术的加入将会有效地缓解上述问题带来的系统性能降低等影响。可移动天线技术因其自身具备的通信链路环境自适应可控能力等特点,与空天地一体化通信领域发展需求完美契合,有着较为宽广的技术发展空间,将成为推动未来6G移动通信发展的关键驱动力之一。

(2)MA结合去蜂窝大规模MIMO网络通信。去蜂窝技术是通过部署多个分布式接入点,利用相同的时频资源为所有用户服务,有效缩短接入点与用户的距离,获得空间宏分集增益,大幅降低路径损耗,并利用大量接入点带来的有利传播,减少多用户干扰,从而使全区域均匀覆盖并大幅提升用户体验^[51]。上述优点使去蜂窝大规模MIMO技术成为未来6G通信关键发展趋势之一。然而,为了便于实现,去蜂窝网络在实践中通常通过簇内联合信号处理将分布式的接入点分组到不同的集群中,这导致它们的簇间干扰可能仍然存在。可移动天线技术的提出,为干扰问题的解决提供了契机,通过适当地调整可移动天线的位置,使其朝向期望的集群方向,可以有效地缓解干扰,提升系统性能。因此,有效地将二者结合是未来移动通信技术发展的重要研究方向。

(3)MA结合无源RIS网络通信。RIS技术打破传统通信系统设计方案,从复杂多变的链路传输环境着手,通过相位控制自适应调控传输链路环境,以低成本、低功耗工作方式提升系统性能^[52]。现有的工作主要考虑部署在收发端的可移动天线

辅助通信,且它们均由有源天线组成。将可移动天线技术与RIS相结合,构造无源MA-RIS,并部署在环境中,可以巧妙地重新配置无线信号传播环境,从而进一步降低系统硬件成本,有效避开障碍物的影响以及降低系统的功耗等。通过无源基站与MA-RIS以及用户间的空间信道分布来优化它们的位置,无线通信系统的性能可以进一步提高。因此,将可移动天线结合无源RIS在未来通信需求的驱动下,有着更为广阔的发展潜能。

(4)MA结合隐蔽通信。隐蔽通信与对抗窃听的安全传输技术不同,通过隐藏传输的存在,从而消除可能的攻击威胁,隐蔽通信的目的是建立一个低概率的检测通信链路,以提供强大的安全保障^[53]。在隐蔽通信网络中,发射机通过引入随机性,将传输的信号隐藏在环境噪声或人工噪声中,以避免被窃听者发现。然而,隐蔽通信随机性一般由信道、噪声以及功率的不确定性引起,其普遍存在固化信号空间的问题。将可移动天线技术与隐蔽通信结合,可通过实时调整天线位置来适应和优化信道条件,利用广阔的空间资源构造的灵活可控自由度优势,打造基于信号空间重构的高动态隐蔽机制,进一步提升通信系统的安全可靠性。因此,可移动天线辅助的隐蔽通信研究将成为未来移动通信的热门方向之一。

(5)具有成本效益的6DMA辅助网络通信。6DMA系统由独立可调三维位置的分布式天线表面以及给定空间内的三维旋转组成,它能充分利用基站/无线终端的无线信道空间变化,并具有更多的空间自由度,以动态适应无线信道的空间分布,从而提高网络性能。然而,6DMA虽能用更少的天线实现更高的容量,但是多个6DMA的移动/扭转也会带来信号反射以及阻碍,同时,布设多个6DMA也会有硬件成本和能耗的上升。为充分利用空间自由度以及保证整体布设的成本,需要着重考虑该系统性能和成本间的平衡权衡。因此,研究具有成本效益的6DMA辅助网络通信将是推动未来6G移动通信发展的主要推动力之一。

4 结 论

MA技术作为一种新兴的移动通信技术,通过灵活调整天线位置,使天线在发射/接收区域进行局部移动,以提高信道条件和通信性能。本文主要论述了MA技术及其在未来移动通信系统中的应用。通过引入MA的基本原理及系统模型,阐述了其对比于传统固定位置天线系统的显著优势及其典型应用场景。在此基础上,结合现有MA技术应

用场景,给出了MA技术发展潜在的问题,并对未来的发展方向进行了论述和展望。MA技术将会进一步推动移动通信技术的变革,助力移动通信技术面向未来复杂、智能化场景应用需求。

参考文献:

- [1] WANG Mingjin, GAO Feifei, JIN Shi, et al. An overview of enhanced massive MIMO with array signal processing techniques[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(5): 886-901.
- [2] WANG Zhe, ZHANG Jiayi, DU Hongyang, et al. A tutorial on extremely large-scale MIMO for 6G: Fundamentals, signal processing, and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(3): 1560-1605.
- [3] BJORNSON E, SANGUINETTI L. Scalable cell-free massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(7): 4247-4261.
- [4] SAYEED A, BEHDAD N. Continuous aperture phased MIMO: Basic theory and applications[C]// *Proceedings of IEEE Communication, Control, & Computing*. [S.l.]: IEEE, 2010: 1196-1203.
- [5] ZENG Yong, ZHANG Rui. Millimeter wave MIMO with lens antenna array: A new path division multiplexing paradigm[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(4): 1557-1571.
- [6] HUANG Chongwen, HU Sha, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(5): 118-125.
- [7] WU Qingqing, ZHANG Shuowen, ZHENG Beixiong, et al. Intelligent reflecting surface aided wireless communications: A tutorial[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [8] ZHU Lipeng, MA Wenyan, ZHANG Rui. Modeling and performance analysis for movable antenna enabled wireless communications[J]. *IEEE Transactions Wireless Communications*, 2024, 23(6): 6234-6250.
- [9] ZHU Lipeng, MA Wenyan, ZHANG Rui. Movable antennas for wireless communication: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(6): 114-120.
- [10] MA Wenyan, ZHU Lipeng, ZHANG Rui. MIMO capacity characterization for movable antenna systems [J]. *IEEE Transactions Wireless Communications*, 2024, 23(4): 3392-3407.
- [11] LU Lu, LI G Y, SWINDLEHURST A L, et al. An overview of massive MIMO: Benefits and challenges

- [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 742-758.
- [12] SANAYEI S, NOSRATINIA A. Antenna selection in MIMO systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 68-73.
- [13] GHARAVI A M, GERSHMAN A B. Fast antenna subset selection in MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(2): 339-347.
- [14] ZHURAVLEV A, RAZVIG V, IVASHOV S, et al. Experimental simulation of multi-static radar with a pair of separated movable antennas[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Microwaves*. [S.l.]: IEEE, 2015: 1-5.
- [15] LI Xingxing, ZHOU Yuxuan, SHEN Zhiheng, et al. Using a moving antenna to improve GNSS/INS integration performance under low-dynamic scenarios[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 17717-17728.
- [16] ZHU Lipeng, MA Wenyan, NING Boyu, et al. Movable-antenna enhanced multiuser communication via antenna position optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(7): 7214-7229.
- [17] MA Wenyan, ZHU Lipeng, ZHANG Rui. Compressed sensing based channel estimation for movable antenna communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(10): 2747-2751.
- [18] PAN B, PAPAPOLYMEROU J, TENTZERIS M M. MEMS integrated and micromachined antenna elements, arrays, and feeding networks[M]. [S.l.]: Wiley, 2008: 829-865.
- [19] CHIAO J C, FU Y, CHOUDHURY D, et al. MEMS millimeterwave components[C]//*Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. [S.l.]: IEEE, 1999: 463-466.
- [20] ZHURAVLEV A, RAZEVI V, IVASHOV S, et al. Experimental simulation of multi-static radar with a pair of separated movable antennas[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Microwaves*. [S.l.]: IEEE, 2015: 1-5.
- [21] ZHU Lipeng, MA Wenyan, ZHANG Rui. Movable-antenna array enhanced beamforming: Achieving full array gain with null steering[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(12): 3340-3344.
- [22] WU Yifei, XU Dongfang, NG D W K, et al. Movable antenna-enhanced multiuser communication: Jointly optimal discrete antenna positioning and beamforming[C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. [S.l.]: IEEE, 2023: 7508-7513.
- [23] CHEN Xintai, FENG Biqian, WU Yongpeng, et al. Joint beamforming and antenna movement design for moveable antenna systems based on statistical CSI [C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. [S.l.]: IEEE, 2023: 4387-4392.
- [24] YANG Songjie, LYU Wanting, NING Boyu, et al. Flexible precoding for multi-user movable antenna communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(5): 1404-1408.
- [25] FENG Biqian, WU Yongpeng, XIA Xianggen, et al. Weighted sum-rate maximization for movable antenna-enhanced wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(6): 1770-1774.
- [26] HU Guojie, WU Qingqing, OUYANG Jian, et al. Movable-antenna-array-enabled communications with CoMP reception[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(4): 947-951.
- [27] ZHU Jing, CHEN Gaojie, GAO Pengyu, et al. Index modulation for fluid antenna-assisted MIMO communications: System design and performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 9701-9713.
- [28] MEI Weidong, WEI Xin, NING Boyu, et al. Movable-antenna position optimization: A graph-based approach[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(7): 1853-1857.
- [29] WENG Caihao, CHEN Yuanbin, ZHU Lipeng, et al. Learning-based joint beamforming and antenna movement design for movable antenna systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(8): 2120-2124.
- [30] KANG J M. Deep learning enabled multicast beamforming with movable antenna array[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(7): 1848-1852.
- [31] LI Nanxi, WU Peiran, NING Boyu, et al. Sum rate maximization for movable antenna enabled uplink NOMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(8): 2140-2144.
- [32] HU Guojie, WU Qingqing, XU Kui, et al. Secure wireless communication via movable-antenna array [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2024, 31: 516-520.
- [33] CHEN Pengcheng, YANG Yuxuan, LYU Bin, et al. Movable antenna-enhanced wireless powered mobile edge computing systems[EB/OL]. (2024-04-29) [2024-08-16]. <https://arxiv.org/abs/2404.18406>.
- [34] HU Guojie, WU Qingqing, XU Donghui, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communication with movable elements[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(4): 1173-1177.
- [35] LIU Wenchao, ZHANG Xuhui, XING Huijun, et al. UAV-enabled wireless networks with movable-anten-

- na array: Flexible beamforming and trajectory design [EB/OL]. (2024-05-31)[2024-08-16]. <https://arxiv.org/abs/2405.20746>.
- [36] ZHANG Qian, SHAO Mingjie, ZHANG Tong, et al. An efficient algorithm for sum-rate maximization in fluid antenna-assisted ISAC system[EB/OL]. (2024-05-10)[2024-08-16].<https://arxiv.org/abs/2405.06516>.
- [37] KUANG Ziming, LIU Wenchao, WANG Chunjie, et al. Movable-antenna array empowered ISAC systems for low-altitude economy[EB/OL]. (2024-06-11)[2024-08-16]. <https://arxiv.org/abs/2406.07374>.
- [38] ZHU Lipeng, PI Xiangyu, MA Wenyan, et al. Dynamic beam coverage for satellite communications aided by movable-antenna array[EB/OL]. (2024-04-24) [2024-08-16]. <https://arxiv.org/abs/2404.15643>.
- [39] ZHANG Deyou, YE Sicong, XIAO Ming, et al. Fluid antenna array enhanced over-the-air computation [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(6): 1541-1545.
- [40] ZHENG Jiakang, ZHANG Jiayi, DU Hongyang, et al. Flexible-position MIMO for wireless communications: Fundamentals, challenges, and future directions [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(5): 18-26.
- [41] XIAO Zhenyu, CAO Songqi, ZHU Lipeng, 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.
- [42] MA Wenyan, ZHU Lipeng, ZHANG Rui. Multi-beam forming with movable-antenna array[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(3): 697-701.
- [43] ZHU Lipeng, MA Wenyan, XIAO Zhenyu, et al. Performance analysis and optimization for movable antenna aided wideband communications[EB/OL]. (2024-01-17) [2024-08-16]. <https://arxiv.org/abs/2401.08974>.
- [44] SHAO Xiaodan, ZHANG Rui. 6DMA enhanced wireless network with flexible antenna position and rotation: Opportunities and challenges[EB/OL]. (2024-06-10)[2024-08-16]. <https://arxiv.org/abs/2406.06064>.
- [45] 曾勇,董珍君,王蕙质,等. 面向 6G 通信感知一体化的固定与可移动天线技术[J]. *信号处理*, 2024, 40(8): 1377-1407.
- ZENG Yong, DONG Zhenjun, WANG Huizhi, et al. Fixed and movable antenna technology for 6G integrated sensing and communication[J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(8): 1377-1407.
- [46] LIU Fan, CUI Yuanhao, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [47] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 23(1): 70-109.
- [48] YU Kan, YU Jiguo, DONG Anming. Cooperative communication and mobility for securing URLLC of future wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(5): 5331-5342.
- [49] TANG Jun, PAN Cunhua, ZHANG Yang, et al. Secure MIMO communication relying on movable antennas[EB/OL]. (2024-03-07) [2024-08-16]. <https://arxiv.org/abs/2403.04269>.
- [50] ZENG Yong, WU Qingqing, ZHANG Rui. Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(12): 2327-2375.
- [51] ZHENG Jiakang, ZHANG Jiayi, DU Hongyang, et al. Mobile cell-free massive MIMO: Challenges, solutions, and future directions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(3): 140-147.
- [52] 虞湘宾,于凯,钱盼盼. 面向 6G 移动通信的可重构智能反射表面技术研究综述[J]. *南京航空航天大学学报*, 2023, 55(5): 745-756.
- YU Xiangbin, YU Kai, QIAN Panpan. Overview of reconfigurable intelligent surface for 6G mobile communication[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 55(5): 745-756.
- [53] CHEN Xinying, AN Jianping, XIONG Zehui, et al. Covert communications: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(2): 1173-1198.

(编辑:刘彦东)