

6G 通感一体化: 从传统 MIMO 到稀疏 MIMO*

曾勇^{1,2}, 杨定邦¹, 李鑫睿¹, 闵红旗¹

1. 东南大学 / 移动通信全国重点实验室, 江苏南京 210096
2. 紫金山实验室, 江苏南京 211111

摘要: 通信感知一体化(ISAC)已被确定为 6G 移动通信网络的六大典型应用场景之一, 这对未来天线阵列的空间分辨率、抗干扰能力、感知自由度等提出了更高的要求。为了支撑 6G 高性能 ISAC, 一种方法是继续增加天线数量, 这会不可避免地增加硬件成本、信号处理复杂度以及能量消耗。另外, 稀疏多输入多输出(MIMO)是一种具有潜力的替代方案。相较于传统紧凑式 MIMO, 稀疏 MIMO 可以利用相同数量的天线阵元实现更大的孔径, 进而提供更精细的空间分辨率。为此, 本文对基于稀疏 MIMO 的 ISAC 进行综述。首先介绍稀疏 MIMO 的基础阵列架构, 接着讨论了稀疏 MIMO 在无线通信领域具有的优势和面临的挑战, 涉及空间分辨率、抗干扰能力、空间复用增益、信道容量和栅瓣问题, 然后探讨基于稀疏 MIMO 的无线感知具有的优势和面临的主要挑战。最后, 阐述了稀疏 MIMO 应用于 ISAC 的巨大潜力。

关键词: 6G; 通信感知一体化; 多输入多输出

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)04-0001-11

6G integrated sensing and communications: From traditional MIMO to sparse MIMO

ZENG Yong^{1,2}, YANG Dingbang¹, LI Xinrui¹, MIN Hongqi¹

1. Southeast University / National Mobile Communications Research Laboratory, Nanjing 210096, China
2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

Abstract: ISAC (integrated sensing and communications) has been identified as one of the six typical application scenarios of the 6G mobile communication network. This puts higher requirements for the spatial resolution, anti-interference ability and sensing freedom of the antenna array in the future. To support the 6G high-performance ISAC, one approach is continue to increase the number of antennas which will inevitably increase the hardware cost, signal processing complexity, and energy consumption. On the other hand, sparse MIMO (multiple-input multiple-output) is a potential alternative. Compared with traditional compact MIMO, sparse MIMO can use the same number of array elements to achieve a larger aperture, thus providing finer spatial resolution. Therefore, this paper presents a comprehensive review of ISAC based on sparse MIMO. The basic array architecture of sparse MIMO is first introduced, and then the advantages including spatial resolution, communication rate, spatial multiplexing gain, channel capacity and gating lobe, and main challenge of sparse MIMO based wireless communication are discussed followed by sparse MIMO based wireless sensing. Finally, the huge potential of sparse MIMO on ISAC is introduced.

Key words: 6G; integrated sensing and communications; multiple-input multiple-output

* 收稿日期: 2024-12-23 录用日期: 2025-02-05 网络首发日期: 2025-04-07

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20240070)

作者简介: 曾勇(1986年生), 男; 研究方向: 通信与感知一体化; E-mail: yong_zeng@seu.edu.cn

全文阅读



ZR20240363

2023年6月,国际电信联盟关于《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》明确了6G无线通信网络的关键性能指标。相较于5G,6G将实现从Gpbs至Tpbs级别的峰值数据传输速率增长,满足99.999 99%超高可靠性,每平方千米 $10^6\sim 10^8$ 台设备的超高密度连接以及厘米级的高精确定位能力(ITU, 2023)。通信感知一体化(ISAC, integrated sensing and communications)作为6G的全新场景,能够在统一系统中同时实现无线通信和雷达感知功能,是实现高精度定位追踪、自动驾驶以及工业物联网等的关键技术(Liu et al., 2022; Zhang et al., 2024)。传统的雷达感知和通信功能通过各自独立的设备分别实现,互不影响。而ISAC能够实现通信和感知设备的复用和共享,在提高频谱效率和节约成本方面展现出显著的优势。随着毫米波和太赫兹通信的发展,通信频段与雷达感知频段逐渐趋于重合(Li et al., 2024a)。因此,ISAC能够有效支撑通信能力的广域拓展,实现万物智联、数字孪生的美好愿景(陈智等, 2024)。

多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)技术是支撑ISAC的关键技术之一(Paulraj et al., 2004)。传统的MIMO以信号半波长为阵元间距进行天线阵列部署,称为紧凑MIMO。对于紧凑MIMO系统而言,为了实现6G移动通信网络的指标,其通常需要大量的阵元数目。这不仅需要极高的硬件成本,还需进行复杂的信号处理。此外,紧凑MIMO通常被部署在一个连续的平台,在实际应用中会面临部署环境的限制。稀疏MIMO系统是阵元间距大于信号半波长的架构(Li et al., 2023; Wang et al., 2023),其突破了紧凑MIMO的半波长阵元间距限制,拥有多样的变式架构。相比于传统紧凑式阵列,稀疏阵列能够通过对阵元间的信号进行(共轭)相关,形成更大维度的虚拟天线阵列,在空间分辨率、感知自由度、目标定位等方面均有更好的性能提升。在移动通信领域,稀疏阵列已经被证实能够获得比紧凑式阵列更好的空间分辨率、空间复用增益以及干扰抑制能力(Li et al., 2024a; Wang et al., 2024b)。Min et al.(2024)验证了在用户密集分布的情况下,相比于传统紧凑式阵列,嵌套阵列可以在保持其感知性能优势的同时提供更高的通信性能。Asif et al.(2023)提出了可重构智能表面辅助的ISAC系统,使用L形稀疏阵列进行信道估计和目标到达角

(DOA)估计。然而,目前关于稀疏MIMO通信感知一体化系统的研究仍然较少。因此,本文首先介绍了稀疏MIMO的基础阵列架构。然后,从通信和感知视角出发,讨论了稀疏MIMO具有的优势和面临的挑战。最后,阐述了稀疏MIMO对ISAC系统的影响及其在ISAC领域的应用前景。

1 稀疏MIMO阵列架构

稀疏阵列天线架构以利用数量较少的天线阵元实现较大的天线阵列孔径为导向,其两个相邻天线阵元之间的距离 $d = \eta\lambda/2$, λ 为传输信号的波长, $\eta > 1$ 为天线阵列的稀疏度参数。根据各个相邻阵元间距 d 是否相等,稀疏阵列被分为均匀稀疏阵列(USA, uniform sparse array)和非均匀稀疏阵列(NUSA, non-uniform sparse array)。

非均匀稀疏阵列的部分相邻天线阵元具有不同的间距,其天线间距通常大于半波长。下面,对典型的非均匀稀疏阵列如最小冗余阵列、模块化阵列、嵌套阵列和互质阵列进行具体阐述。

1.1 最小冗余阵列

最小冗余阵列通过最小化重复对,用较少的物理阵元产生较大的连续虚拟孔径。Moffet(1968)指出只要天线阵元对之间的间距包括1到 L 之间的所有整数,就应该最小化阵列元素的数量,其中 L 是期望的归一化孔径,间距定义为 $\{u_k - u_{k'}\}$,其中 $\{u_k\}$ 是归一化天线位置。Chen et al.(2008)研究了基于最小冗余阵列的MIMO应用场景。在MIMO雷达中,考虑一个有 M 个天线单元的紧凑式线性发射阵列和一个有 N 个天线单元的紧凑式线性接收阵列。发射阵列和接收阵列是平行的。第 m 个发射天线位于 $x_{T,m}$,第 n 个接收天线位于 $x_{R,n}$ 。考虑均匀紧凑MIMO雷达,令

$$x_{T,m} = u_{T,m}\lambda/2, \quad x_{R,n} = u_{R,n}\lambda/2,$$

其中 $u_{T,m}$ 和 $u_{R,n}$ 是整数。定义 $\{u_k\} = \{u_{R,m} + u_{T,n}\}$,则

$$\{u_k - u_{k'}\} = \{u_{T,m} - u_{R,n} - u_{T,m'} + u_{R,n'}\},$$

$$m, m' \in \{0, 1, \dots, M\},$$

$$n, n' \in \{0, 1, \dots, N\}.$$

若 L 已知,则最小冗余MIMO雷达的接收和发送阵列的阵列架构可通过求解下述优化问题得出:

$$\min_{\{u_{T,m}\}, \{u_{R,n}\}} N + M,$$

$$|\{u_{T,m}\}| = M, \quad |\{u_{R,n}\}| = N,$$

$$\{u_{T,m} - u_{R,n} - u_{T,m'} + u_{R,n'}\} \supset \{1, 2, \dots, L\},$$

其中 $|\{u_{T,m}\}|$ 为 $\{u_{T,m}\}$ 的基数。该问题是一个复杂

的组合问题, 在 L 值较小时, 可以使用穷举法进行求解。随着阵元数的增加, 该阵列架构设计难度呈几何式增长, 这对实际应用造成了很大的困难。

1.2 嵌套阵列

嵌套阵列是通过线性连接两个或多个均匀线性阵列而获得的稀疏阵列(Pal et al., 2010)。嵌套阵列能够显著提高虚拟联合阵列的阵列自由度(Liu et al., 2016; Yang et al., 2018)。对于给定的阵元数 N , 传统的紧凑型阵列可实现的自由度仅为 $O(N)$ 。

以二阶嵌套阵列为例。二阶嵌套线性阵列是两个均匀子阵列的拼接, 其中内部子阵为 N_1 个间距为 d_1 的阵元组成的均匀线性阵列, 外部子阵为 N_2 个间距为 d_2 的阵元组成的均匀线性稀疏阵列, 其中 $d_2 = (N_1 + 1)d_1$, $d_1 = \lambda/2$ 。该嵌套线性阵列的内部子阵阵元位置表示为 $S_{in} = \{md_1, m = 1, 2, \dots, N_1\}$, 外部子阵阵元位置表示为 $S_{out} = \{n(N_1 + 1)d_1, n = 1, 2, \dots, N_2\}$, 由此可得该嵌套阵列的差联合阵列对应的虚拟阵元位置为

$$S_{nested} = \{-(N_2(N_1+1)-1)d_1, \dots, 0, \dots, (N_2(N_1+1)-1)d_1\}.$$

相比于最小冗余阵列, 嵌套阵列有明确的阵列结构和自由度闭式解, 仅使用 $N_1 + N_2$ 个阵元能实现 $2(N_2(N_1 + 1)) - 1$ 的阵列自由度, 而无需进行复杂的优化计算或遍历迭代搜索最终解。定义阵元总数为 $M = N_1 + N_2$, 则嵌套阵列架构的最大自由度如表1所示。

表1 二阶嵌套阵列的最大自由度¹⁾
Table 1 Maximum freedom degree of a second-order nested array

M	N_1, N_2	自由度
偶数	$N_1 = N_2 = \frac{1}{2}M$	$\frac{1}{2}(M^2 - 2) + M$
奇数	$N_1 = \frac{1}{2}(M - 1), N_2 = \frac{1}{2}(M + 1)$	$\frac{1}{2}(M^2 - 1) + M$

1) 资料来源于 Pal et al. (2010)。

1.3 互质阵列

互质阵列由两组均匀稀疏阵列组成(Qin et al., 2017; Shi et al., 2017)。其中, 子阵1相邻阵元间距为 N_2d , 阵元数为 N_1 ; 子阵2相邻阵元间距为 N_1d , 阵元数为 N_2 。此时, 阵列天线阵元总数为 $N_1 + N_2 - 1$, 天线物理阵元位置表示为

$$S_{N_1} = \{mN_2d, m = 0, 1, \dots, N_1 - 1\},$$

$$S_{N_2} = \{nN_1d, n = 0, 1, \dots, N_2 - 1\},$$

则其对应的差联合阵列的阵元位置为

$$S_{coprime} = \{\pm(N_1n - N_2m)d\}.$$

因此, 互质阵列使用 $N_1 + N_2 - 1$ 个阵元可以实现 $O(N_1N_2)$ 的自由度。然而, 互质阵列所生成的虚拟阵列并非完全连续, 仅其中间部分为均匀线性阵列。同时, 考虑到其更大的阵元间距, 互质阵列阵元间电磁互耦效应较弱。与嵌套阵列类似, 互质阵列同样具有准确的阵列设计架构和自由度闭式解, 这使得互质阵列在应用中相比于最小冗余阵列更加实际。

1.4 模块化阵列

模块化阵列是由多个紧凑型均匀线性阵列(ULA, uniform linear array)模块按照对应的模块间距排列组成的阵列。定义某一模块化阵列的总模块数为 N , 每个阵列模块由 M 个天线阵元组成, 该阵列共有 NM 个天线阵元。模块内天线阵元间距 $d = \lambda/2$, 相邻模块间距为 D (如模块中心阵元之间的距离), D 的大小通常远大于波长, 与实际部署结构尺度近似。 $D = \Gamma d$, 其中 $\Gamma \geq M$ 为该对模块间的模块化分离参数(Li et al., 2024a)。 Γ 的值由具体阵列布置结构决定。例如, 模块化超大阵列可以融入机场等的外墙中, 不同的阵列模块之间用窗户隔开(Li et al., 2022)。

Ashkenazy et al.(1983)将模块化设计思想带入了微带天线阵列设计中, 并将数个由小天线单元组成的天线阵列模块组成一个大阵列, 并通过这种方式获得所需要的增益。Li et al.(2024a)对模块化阵列在无线通信系统中的效益进行了研究, 首次提出了简化的均匀球面波模型, 并验证了模块化MIMO系统在优化系统频谱效率和空间分辨率方面的优势, 提出了一种高效的基于贪婪算法的用户分组方法用于解决栅瓣现象引起的用户间干扰(IUI, inter-user interference)。

2 基于稀疏MIMO的无线通信

相比于传统MIMO, 稀疏MIMO对于ISAC更具优势, 即更精细的空间分辨率、更高的通信速率、更优的空间复用增益和更大的信道容量。

2.1 空间分辨率

稀疏MIMO利用自身的大孔径结构特点, 可以为通信提供比传统MIMO更高的空间分辨率。然而, 在提高阵列空间分辨率的同时, 由于稀疏MIMO阵元间距大于传输信号半波长, 在阵列的

波束图中会产生栅瓣。

远场稀疏 MIMO 系统采用均匀平面波模型, 其空间分辨率由波束图的主瓣宽度(即波束图中心相邻两个零点之间的间隔)决定。在远场情况下, 不同阵列架构的波束图仅是其空间频率差 $\Delta_\theta = \sin\theta - \sin\theta'$ 的函数, 其中 θ 为观测方向, θ' 为期望波束形成方向。Wang et al. (2023) 给出了视距主导场景下均匀线性稀疏阵列的最大比合并波束图

$$G_{\text{US}, M}(\Delta_\theta) \triangleq \left| \frac{\sin[0.5\pi M\eta\Delta_\theta]}{M\sin[0.5\pi\eta\Delta_\theta]} \right|$$

$$\text{BW} = \frac{4}{M\eta}$$

可以看出, 主瓣宽度随着稀疏度 η 的提升而缩减, 这意味着对两个空间频率差 Δ_θ 较小的用户, 采用传统紧凑式阵列有可能遭受严重的 IUI, 而采用均匀稀疏阵列 ($\eta > 1$) 则受到 IUI 的可能性较小。令 $\eta = 1$, 传统紧凑式阵列的远场波束方向图 $G_{\text{CO}, M}(\Delta_\theta) = \left| \frac{\sin(0.5\pi M\Delta_\theta)}{M\sin(0.5\pi\Delta_\theta)} \right|$, 其主瓣宽度为 $\text{BW} = \frac{4}{M}$ 。

图 1 是 $\eta = 1$ 的传统紧凑 ULA 和 $\eta = 4$ 的稀疏 ULA 的波束方向图, 阵元数均为 8。由图可见, 相比于传统紧凑式阵列, 均匀稀疏阵列的主瓣宽度更窄, 拥有更好的角度分辨率, 在用户密集区域可以减小 IUI。但由于均匀稀疏阵列阵元间距大于半波长, 会导致栅瓣的出现, 而相互位于对方栅瓣区域的用户会遭受相比于传统紧凑式阵列更强的 IUI。

Li et al. (2023) 给出了模块化天线阵列的远场波束图表达式。对于一个阵元总数为 NM 的模块化 ULA, 其远场波束图可以表示为一个阵元数为 N , 间距为 Γ 个半波长的均匀稀疏阵列波束图与阵元数为 M 的紧凑式线性阵列波束图的乘积, 即

$$G_{\text{Mo}, NM}(\Delta_\theta) = \left| \frac{\sin(0.5\pi N\Gamma\Delta_\theta)}{N\sin(0.5\pi\Gamma\Delta_\theta)} \right| \left| \frac{\sin(0.5\pi M\Delta_\theta)}{M\sin(0.5\pi\Delta_\theta)} \right| \quad (1)$$

此时, 主瓣宽度为 $\text{BW} = 4/(N\Gamma)$ 。图 2 给出了阵元总数相同的传统紧凑 ULA 和模块化 ULA 的远场波束图。由图 2 可见, 相较于传统紧凑式阵列, 与均匀稀疏阵列相同, 模块化阵列也具有更窄的主瓣宽度和更好的角度分辨率。因模块间距大于半波长, 模块化阵列的远场波束图同样存在栅瓣现象。

表 2 展示了传统紧凑式阵列、均匀稀疏阵列和模块化阵列的远场波束图、主瓣宽度以及角分辨率。由表 2 可知, 阵元总数 NM 的增加会使得阵列的角分辨率更高。同时, 由于 $\Gamma \geq M$, $\eta \geq 1$, 均

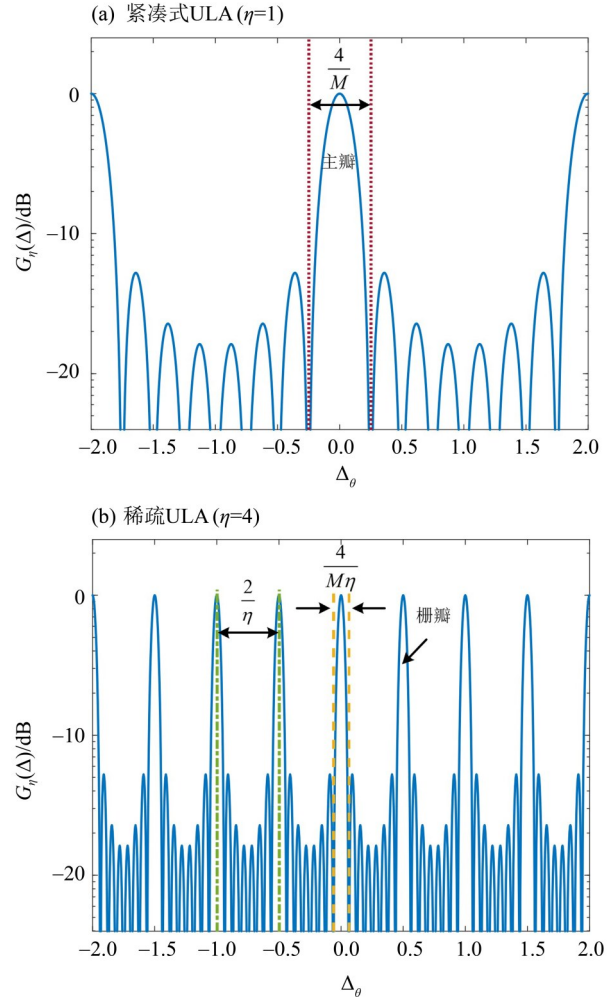


图 1 传统紧凑式和均匀稀疏 ULA 的波束方向图 (Wang et al., 2023)

Fig. 1 Beam pattern of traditional compact and uniform sparse ULA (Wang et al., 2023)

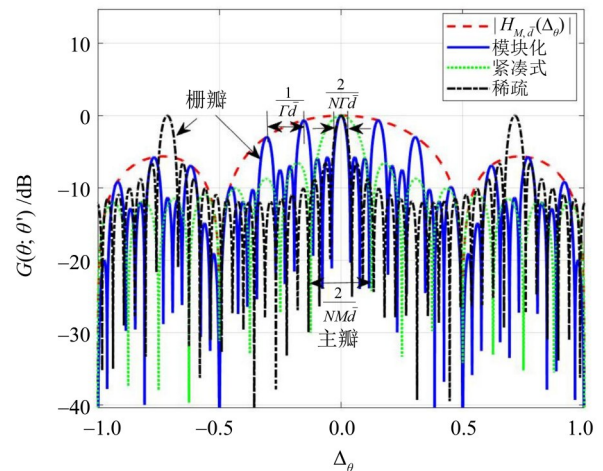


图 2 传统并置和模块化 ULA 的远场波束图 (Li et al., 2023)

Fig. 2 Far-field beam pattern of traditional compact and modular ULA (Li et al., 2023)

匀稀疏阵列和模块化阵列相比于传统紧凑阵列均具有更高的角度分辨率。

表2 不同阵列架构的远场波束图、主瓣宽度和角分辨率

Table 2 Far-field beam pattern, mainlobe width and angular resolution of different array architectures

阵列架构	远场波束图	主瓣宽度	角分辨率
紧凑型阵列	$G_{\text{co}, NM}(\theta, \theta') = \left \frac{\sin(0.5\pi NM\Delta_\theta)}{NM\sin(0.5\pi\Delta_\theta)} \right $	$\text{BW} = \frac{4}{NM}$	$\omega_\theta^{\text{co}} = \frac{2}{NM}$
均匀稀疏阵列	$G_{\text{us}, NM}(\theta, \theta') = \left \frac{\sin(0.5\pi NM\eta\Delta_\theta)}{NM\sin(0.5\pi\eta\Delta_\theta)} \right $	$\text{BW} = \frac{4}{NM\eta}$	$\omega_\theta^{\text{us}} = \frac{2}{NM\eta}$
模块化阵列	$G_{\text{mo}, NM}(\theta, \theta') = \left \frac{\sin(0.5\pi N\Gamma\Delta_\theta)}{N\sin(0.5\pi\Gamma\Delta_\theta)} \right \left \frac{\sin(0.5\pi M\Delta_\theta)}{M\sin(0.5\pi\Delta_\theta)} \right $	$\text{BW} = \frac{4}{N\Gamma}$	$\omega_\theta^{\text{mo}} = \frac{2}{N\Gamma}$

对于近场稀疏 MIMO 场景, 基于球面波的近场系统同时具有角度和距离分辨能力, 即分辨实际物理空间位置的能力。Li et al. (2023) 针对模块化阵列结构特点, 提出基于子阵非共角与子阵共角的均匀球面波模型, 分析了其近场波束聚焦图。基于子阵非共角均匀球面波模型, 模块化超大规模线性阵列的近场波束聚焦图取决于从不同阵列模块中观察到的位置 (r_n, θ_n) 和 (r'_n, θ'_n) 。即

$$G_{\text{dir}}^{\text{Mo}}(r, \theta; r', \theta') = \frac{1}{N} \left| \sum_{n \in \mathcal{N}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta_{r,n}} \frac{\sin(\pi M \bar{d} \Delta_{\theta,n})}{M \sin(\pi \bar{d} \Delta_{\theta,n})} \right|,$$

其中 $\Delta_{r,n} = r_n - r'_n$, $\Delta_{\theta,n} = \sin\theta_n - \sin\theta'_n$, $n \in \mathcal{N}$ 。整数集 $\mathcal{N} = \{0, \pm 1, \dots, \pm \frac{N-1}{2}\}$, $\bar{d} = \frac{d}{\lambda}$ 为使用波长归一化后的内部阵元间距。可见子阵非共角的波束聚焦图是由 N 个波束图的加权和构成的, 每一个波束图都有着不同的 $\Delta_{\theta,n}$, 而各个波束图中的复值加权系数 $e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta_{r,n}}$ 取决于第 n 个模块中参考元素的精确相位差。而, 基于子阵共角均匀球面波模型下的近场波束聚焦图为

$$G_{\text{com}}^{\text{Mo}}(r, \theta; r', \theta') = \frac{1}{N} \left| \sum_{n \in \mathcal{N}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta_{r,n}} \left| \frac{\sin(\pi M \bar{d} \Delta_\theta)}{M \sin(\pi \bar{d} \Delta_\theta)} \right| \right|.$$

在此基础上, Li et al. (2024a) 对模块化超大规模 MIMO 阵列在近场场景下的角度和距离分辨率进行了仿真实验。考虑到不同模块间的非线性相位变化, 角度域和距离域波束图中的主瓣宽度闭式解难以直接推导。因此, 采用角度域中近似零点间主瓣宽度的一半作为有效角度分辨率, 并采用距离域中的半功率 (-3 dB) 主瓣宽度的一半数值作为有效距离分辨率。图 3 为紧凑阵列和模块化阵列在近场信道模型下的波束聚焦图。从图中可以发现, 与具有相同天线阵元数量的紧凑型阵列相比, 无论是在角度域还是距离域, 模块化天线阵

列都拥有明显更窄的主瓣宽度, 可以同时提升角度分辨率和距离分辨率。然而, 在近场环境下, 栅瓣问题依然存在。

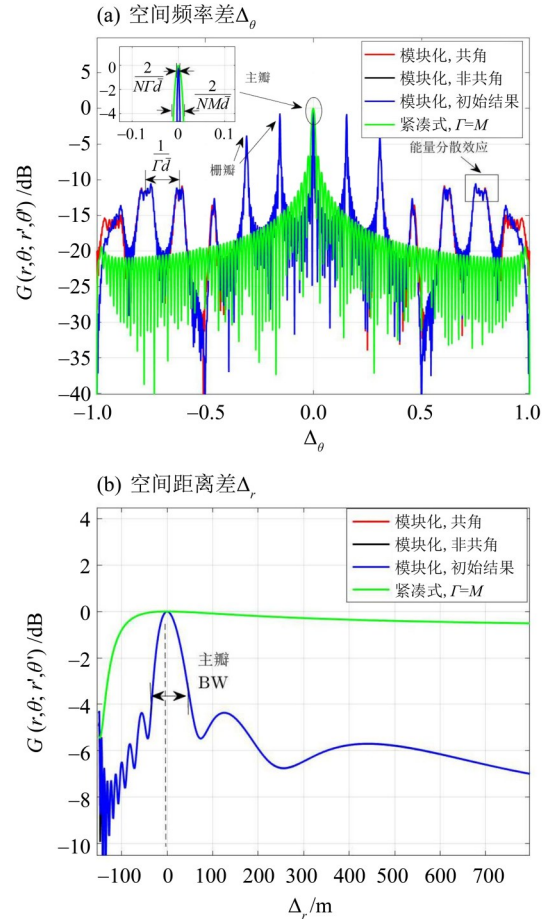


图3 近场环境下紧凑阵列和模块化阵列的波束图(Li et al., 2024a)

Fig. 3 The near-field beam pattern of compact array and modular array (Li et al., 2024a)

2.2 通信速率

相比于传统 MIMO, 在用户密集分布场景下, 稀疏 MIMO 被证实具有更高的通信速率 (Wang et

al., 2024a; Min et al., 2024)。Wang et al. (2024a) 通过理论分析和仿真研究了多用户场景下基于稀疏 MIMO 的远场和近场通信。研究表明: 对于远场情况, 当用户端阵列稀疏度 η_{UE} 固定时, 随着 η_{BS} 增加, 通信和速率先增加然后减小, 这表明了基站端使用稀疏阵列以及合适 η_{BS} 的重要性, 同时也显现了稀疏 MIMO 相比于紧凑型 MIMO 在远场情景通信速率方面的优势。此外, 当 η_{BS} 固定时, 随着 η_{UE} 的增加, 通信和速率并无明显变化。对于近场情况, 图 4 为通信和速率随接收信噪比 SNR \bar{P} 的变化。可以观察到, 在不同稀疏度下通信和速率随接收信噪比的增加而增加。同时, 对于固定 \bar{P} 的情况, 随着基站端阵列稀疏度的增大, 通信和速率会逐渐增加。

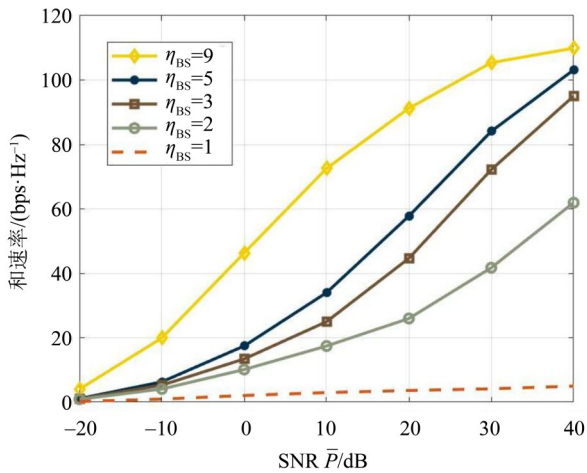


图 4 近场通信和速率随 SNR \bar{P} 的变化 (Wang et al., 2024a)
Fig. 4 Near-field sum rate versus SNR \bar{P} (Wang et al., 2024a)

针对嵌套阵列, Min et al. (2024) 通过仿真发现: 与传统的紧凑型阵列相比, 嵌套阵列在保持感知优势的同时, 也能实现更优的通信和速率, 且在用户密集场景下, 和速率的提升更为明显。图 5 为基站端紧凑型阵列和嵌套阵列的用户通信速率。可以观察到, 嵌套阵列的通信数据速率增益不仅受阵列结构的影响, 还受用户分布的影响。嵌套阵列和紧凑型 ULA 的数据速率随着阵元数 M 的增加显著提升。此外, 当用户密集分布在热点区域 ($\theta_{\max} = 5^\circ$) 时, 相比于传统紧凑型阵列, 嵌套阵列可以获得更好的通信传输速率, 这是因为嵌套阵列的主瓣宽度更窄, 可以提供更高的空间分辨率来有效抑制 IUI。然而, 当 θ_{\max} 继续增加时, 嵌套阵列的优势会发生衰减, 甚至于 θ_{\max} 达到 30° 时嵌套阵列的传输速率低于传统紧凑型阵列。这

是因为随着 θ_{\max} 的增加, 嵌套阵列会产生更多的栅瓣来加剧 IUI 的影响。

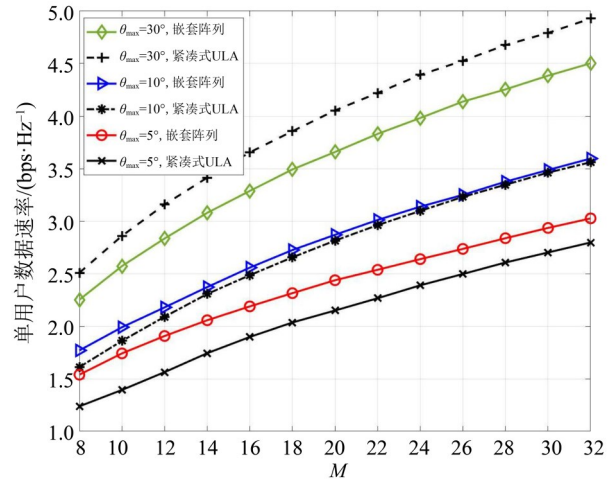


图 5 用户通信速率随 M 的变化 (Min et al., 2024)

Fig. 5 Data rate versus M (Min et al., 2024)

图 6 为阵元总数 $M = 16$ 时不同嵌套阵列结构和传统紧凑型阵列的感知和通信性能。假设用户均匀分布在紧凑型阵列的主瓣范围内 ($\theta_{\max} = 3.58^\circ$)。通过观察可知, 当阵元总数相同时, 嵌套阵列在保持其感知优势的同时, 具有更好的通信速率。

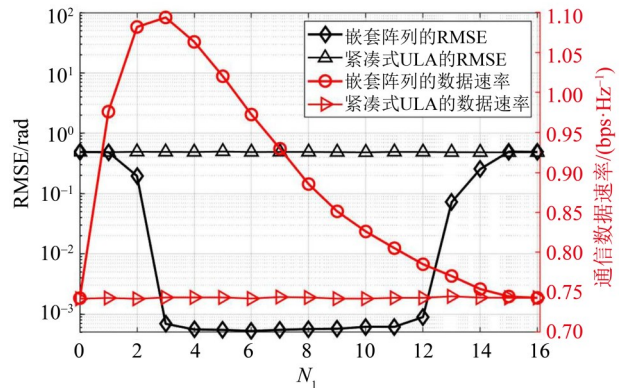


图 6 RMSE、数据速率随 N_1 的变化 (Min et al., 2024)

Fig. 6 RMSE and data rate versus N_1 (Min et al., 2024)

2.3 空间复用增益

在无线通信中, 空间复用增益为信道容量相对于信噪比 SNR 的渐近斜率, 也称为自由度 (DOF) (Heath et al., 2018)。一般情况下, DOF 用来表示信道可以同时支持的独立数据流的数量, DOF 越大, 系统容量性能越好。Miller (2019) 首次提出有效自由度 (EDOF) 的概念, 其被用于近似低信噪比状态下的 MIMO 信道容量为 $\text{EDOF} \times$

$\left[\log_2 \frac{E_b}{N_0} - \log_2 \frac{E_b}{N_{0, \min}} \right]$, 其中 $\frac{E_b}{N_0}$ 定义为比特能量除以噪声功率谱密度, $\frac{E_b}{N_{0, \min}}$ 定义为可靠通信的最小值。

Yuan et al. (2021) 基于并矢格林函数 (Dyadic Green function) 对信道 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M_r \times M_t}$ 进行建模。因此, 有效自由度近似为

$$\text{EDOF} \approx \left(\text{tr}(\bar{\mathbf{H}}) / \|\bar{\mathbf{H}}\|_F \right)^2,$$

其中 $\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{H}^H \in \mathbb{C}^{M_r \times M_r}$ 。

由于均匀平面波的传播特性, 阵元数较少的紧凑型 MIMO 在远场区域的空间复用增益将受到一定限制, 导致视距 (LoS, line of sight) 场景下的自由度仅为 1。与此相反, 由于近场非均匀球面波的非线性相位和非均匀振幅特性, 对于发送端和接收端阵元数量相等的稀疏 MIMO, 近场环境下的空间复用增益可能会显著增强。

对于近场下的单用户通信, 当传输能量足够大时, MIMO 信道的自由度可以通过稀疏 MIMO 阵列结构获得提升。Wang et al. (2024a) 研究了单用户稀疏 MIMO 通信系统的远场和近场空间复用增益, 其中用户和基站都配备均匀稀疏 MIMO。基于有效自由度的定义, 近场有效自由度 ε 的通用表达式为 $\varepsilon = \frac{\|\mathbf{H}\|_F^4}{\text{tr}(\mathbf{R}^2)}$, 其中

$$\mathbf{R} = \begin{cases} \mathbf{H}\mathbf{H}^H, & N_{\text{UE}} > N_{\text{BS}}, \\ \mathbf{H}^H\mathbf{H}, & N_{\text{UE}} \leq N_{\text{BS}}, \end{cases}$$

是信道相关矩阵 (Bohagen et al., 2005)。

在远场条件下, 有效自由度 ε 的值不会被天线阵列的稀疏度所影响。近场条件下, 考虑用户位于基站的近场区域的通用场景, 用户处稀疏 MIMO 阵元数为 N_{UE} , 基站处稀疏 MIMO 阵元数为 N_{BS} 。定义 $\eta_{\text{min}} \triangleq \eta_{\text{BS}} \eta_{\text{UE}}, \bar{N} \triangleq \min(N_{\text{UE}}, N_{\text{BS}}), \overline{N} \triangleq \max(N_{\text{UE}}, N_{\text{BS}})$, Wang et al. (2024a) 推导了近场条件下基于 η_{min} 的有效自由度 ε 表达式, 并证明了对于近场单用户通信系统, 当传输信号能量足够大时, 稀疏 MIMO 可以实现比紧凑型 MIMO 更高的有效自由度。此外, 当基站和用户之间的距离足够大时, ε 也会衰落为近似 1 值。基于此, Wang et al. (2024a) 提出了一个在远场和近场场景下皆通用的单用户 MIMO 通信系统阵列稀疏度选择策略。

对于单用户 MIMO 通信系统, 当接收信噪比满足 $\bar{P} \leq \frac{4}{N\bar{N}}$ 时, 如果以最大化有效自由度为目

的, 则最优阵列架构为 $\eta_{\text{min}} = 1$ 的紧凑 MIMO。当 $\bar{P} \geq \frac{4N}{N}$ 时, 稀疏 MIMO 是最大化有效自由度的最优选择。

当接收信噪比 SNR \bar{P} 位于区间 $\left[\frac{4}{N\bar{N}}, \frac{4N}{N} \right]$ 时, 最佳的阵列稀疏度决定于何时有效自由度满足 $\varepsilon \approx \frac{\sqrt{N\bar{N}\bar{P}}}{2}$ 。

2.4 信道容量

现有研究已经证实稀疏天线阵列有能力增强 MIMO 系统的信道容量。Amani et al. (2017) 研究了线性不规则稀疏天线阵列相较于规则天线阵列在毫米波 MIMO 场景中的潜在优势。假设发射机和接收机两侧的线性天线阵列相同, 且规则阵列和不规则阵列具有相等的孔径长度。通过仿真实验发现, 对于发射机和接收机之间特定的间距, 均匀天线阵列的信道容量存在衰减迹象。然而, 通过部署不规则稀疏天线阵列, 该部分衰减能够被弥补, 同时显著改善信道容量。Wu et al. (2017) 基于互质线性阵列、嵌套线性阵列和稀疏圆形阵列, 提出了互质圆柱阵列、嵌套圆柱阵列和稀疏嵌套圆柱阵列, 并模拟了大规模 MIMO 场景下的上行信道容量。仿真实验证明, 相比于传统均匀圆柱阵列, 三种新型稀疏圆柱阵列都可以在较少物理天线的情况下增加信道容量。

2.5 通信问题与解决方案

在通信领域中, 倘若天线阵列阵元间距大于传输信号的半波长, 会产生栅瓣。栅瓣会导致信号能量向期望方向 (主瓣) 之外的角度辐射, 进而造成不同程度的能量泄漏。同时, 在移动通信系统中, 两个互相位于对方栅瓣区域的通信用户会遭受严重的 IUI。因此, 对于稀疏 MIMO, 考虑到其阵元间距大于半波长的固有特性, 栅瓣是进行稀疏 MIMO 通信研究时所面临的必然挑战。

Wang et al. (2023) 给出了均匀稀疏线阵角度域远场波束图的栅瓣分布规律。令 $0.5\pi\eta\Delta_\theta = n\pi$, $n = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm|\eta|$, 栅瓣的空间位置可以被获取。具体而言, 第 n 个栅瓣在远场波束图中的出现位置为 $\Delta_{sp, \theta} = \frac{2n}{\eta}$ 。

Li et al. (2024a) 对模块化线阵在远场波束图中的栅瓣分布进行了分析推导。由于模块化线阵的远场波束图式 (1) 可以表示为一个阵元数为 N , 间距为 Γ 个半波长的均匀稀疏阵列波束图与 M 元紧凑型线性阵列波束图的乘积, 模块化线阵的栅瓣

位置由 $\left| \frac{\sin(0.5\pi N\Gamma\Delta_\theta)}{N\sin(0.5\pi\Gamma\Delta_\theta)} \right|$ 决定。具体而言, 第 m 个栅瓣在远场波束图中的出现位置为

$$\Delta_{\text{Main}, \theta} = \frac{2m}{\Gamma}, \quad (2)$$

其中 $m = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm|\Gamma|$ 。同时, 对于近场波束聚焦图, 模块化线阵的栅瓣分布与其远场波束图分布相似, 皆可用式(2)表示。

现有研究对稀疏阵列波束图的栅瓣问题给出了合适的解决方案。大部分稀疏阵列栅瓣抑制是从改善感知性能角度出发, 以优化通信效益为目的的研究尚较少。Wang et al. (2023) 研究了基于远场模型下的稀疏阵列栅瓣问题, 并且稀疏阵列已被证明具有天然的高阶栅瓣抑制能力。图 7 假设了任意用户角度独立均匀分布在 $\theta \in [-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$, 对 $\theta_{\max} = 10^\circ, 30^\circ$ 和 60° 的空间频率差 Δ_θ 进行分析, 而任意两个用户之间的 Δ_θ 并非均匀分布。事实上, 任意两个用户 Δ_θ 的概率密度随着 $|\Delta_\theta|$ 增大而降低。由于 Δ_θ 的非均匀分布, 即使用户角度均匀分布, 稀疏阵列的高阶栅瓣也会被自然地排斥。具体而言, 当 $\theta_{\max} = 10^\circ$ 时, 空间频率差 Δ_θ 集中在 $|\Delta_\theta| < 0.36$ 的范围。在这个范围内, 只有主瓣才会对稀疏阵列造成严重的用户间干扰, 稀疏阵列不会受到栅瓣的影响。这一特性对于通信热点区域用户非常具有吸引力。在此基础上, Wang et al. (2023) 通过理论推导和仿真实验证明了在用户密集的通信热点区域, 均匀稀疏阵列能够取得比传统紧凑式阵列更好的通信性能。

在先前的工作中, 绝大多数是从远场均匀平面波 (UPW, uniform planar wave) 模型的稀疏阵列

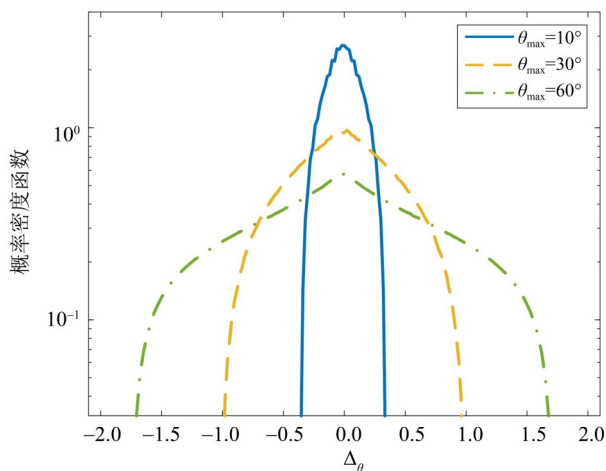


图 7 Δ_θ 的概率密度函数 (Wang et al., 2023)

Fig. 7 Probability density function of Δ_θ (Wang et al., 2023)

结构优化角度出发的。相比之下, 对于模块化超大规模 MIMO, 所有模块都是为了适应实际部署环境而提前部署的, 这导致阵列架构的灵活调整在实际中很难实现。同时, 远场 UPW 模型中的栅瓣抑制方法不适合用于近场模块化超大规模 MIMO 通信。为了解决由多用户模块化超大 MIMO 系统的栅瓣所造成的严重 IUI, Li et al. (2024a) 提出了一种基于贪婪算法的用户分组方法, 实现了通信和速率的最大值。该方法将位于对方栅瓣区域的通信用户组分配到不同的时频通信资源块, 由此抑制了栅瓣现象导致的用户间干扰, 并通过仿真实验证明了该方法的有效性。图 8 给出了使用近场最小均方误差 (MMSE) 波束形成方法的多径场景下接收信噪比 \bar{P}_r 和可实现总速率 R 之间的关系。可以观察到, 在相同接收信噪比的条件下, 新提出的用户间传输分组方法可以实现比随机分组方法大得多的、接近于后者 2 倍的通信总速率, 显著降低了栅瓣对通信速率造成的影响。同时, 相较于基于其他两种标准的用户分组算法, 新提出的用户分组方法在通信总速率上有较小提升。

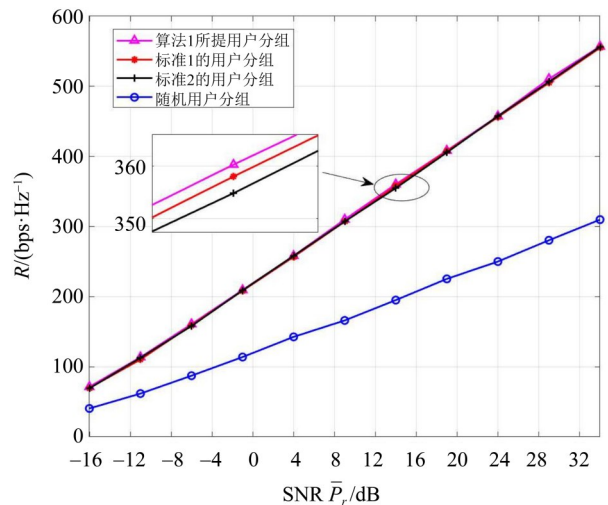


图 8 模块化超大 MIMO 通信总速率 (Li et al., 2024a)

Fig. 8 The sum rate achieved by modular XL-MIMO (Li et al., 2024a)

3 基于稀疏 MIMO 的无线感知

3.1 空间分辨率

对于雷达感知, 随着天线数量增加或阵列间距的扩展, 扩大的近场区域使得稀疏 MIMO 可以同时感知目标的角度和距离 (Wang et al., 2024b)。此外, 稀疏 MIMO 空间分辨率的提高, 有助于增强高密度用户群的 ISAC 性能、区分位置密集处的

感知目标, 其所获得的精密位置信息可以辅助无线通信性能提升。通信系统中, 为了实现发射端与接收端的波束匹配, 常常需要遍历所有可能情况, 而感知获得的精确位置信息能够大幅降低波束扫描的范围, 减少扫描开销。

3.2 感知自由度

在雷达感知系统中, 感知DOFs为同时可以识别的最大目标数量。对于传统紧凑式稀疏MIMO, 其可实现的感知自由度仅仅和阵元数量成正比。具体而言, 假设一个阵元数目为 N 的紧凑式均匀线阵, 使用传统的基于子空间的方法只能最多解析 $N-1$ 个不相关目标(Schmidt, 1986)。然而, 配备有最小冗余阵列、嵌套阵列和互质阵列等非均匀稀疏阵列架构的稀疏MIMO可以仅使用 M 个物理阵元实现 $O(M^2)$ 的自由度(Pal et al., 2010; Vaidyanathan et al., 2010)。

3.3 目标识别能力

互耦是一种阵列流型误差, 由天线阵元之间相互作用造成。这种相互作用可以不同的方式表现出来, 例如阵列的辐射模式、增益和指向性的变化, 以及元素之间相位关系的变化(Larmour et al., 2024)。互耦会对阵列的DOA估计造成误差。从感知角度, 稀疏阵列的大于半波长的内部阵元间距可以弱化电磁互耦的影响, 缓和电磁波的极化状态, 进而增强雷达感知系统的目标识别能力(Min et al., 2024)。Boudaher et al.(2016)比较了均匀线性阵列、最小冗余阵列、嵌套阵列和互质阵列在互耦情况下的到达角(DOA)估计性能。结果显示, 均匀线性阵列受互耦影响最大, 最小冗余阵列受互耦影响最小。

Wei et al.(2024)提出了广义增广多子阵嵌套阵GAMSNA-I及其变体GAMSNA-II。GAMSNA-I是通过分解嵌套阵列的密集均匀线性阵列部分并将其重新配置成多个部分, 使得感知自由度增加、阵元间互耦效应减弱。考虑到GAMSNA-I中存在密集的ULA, 对这部分进行进一步分解和重构得到了GAMSNA-II, 并发现GAMSNA-II在保持和GAMSNA-I相同的均匀自由度的同时显著降低了互耦效应, 使得目标识别能力得到了增强。

3.4 感知问题与解决方案

稀疏MIMO的栅瓣现象不仅会导致严重的IUI, 而且会造成雷达感知角度模糊问题。但是, 在雷达感知领域, 配备有非均匀稀疏阵列的稀疏

MIMO能够通过基于信号共轭相关差分或求和联合阵列, 形成连续虚拟阵元的虚拟孔径进而抑制栅瓣。许多优化稀疏MIMO感知效益的栅瓣问题解决方案已经被提出。Ganesan et al.(2020)考虑将条纹天线部署在房间的四面墙壁上, 这使得用户被更有效地分离。这种方法可以有效地弥补由于稀疏阵列的栅瓣导致的性能损失。Krivosheev et al.(2010)讨论了由相同或者相似子阵构成的稀疏阵列的栅瓣抑制方法, 包括相邻子阵相对位移、子阵间不同间距、子阵旋转等。另外, 阵列优化设计是抑制稀疏阵列栅瓣影响的重要方法。Cetinkaya et al.(2017)提出了一种二维稀疏MIMO的几何简单圆形阵列的拓扑阵列, 实现在近场和远场具有良好的旁瓣电平, 并且在期望的区域消除栅瓣。He et al.(2022)对一种混合模拟退火和粒子群优化算法的阵列设计方法进行了研究, 并以数值方法确定了最优的 4×4 稀疏MIMO阵列。该方法可以实现较低的峰值旁瓣电平比, 进而消除栅瓣的影响。

4 基于稀疏MIMO的ISAC

传统紧凑MIMO受限于其半波长的天线阵元间距, 通常布置在连续平台上。当阵元数量增加时, 其实际部署难度也同步增加。与之相反, 稀疏MIMO可以被灵活地设计为适应实际部署条件的架构。以模块化阵列为例, 模块化天线的阵元以模块化的方式以一定规则进行排列。每个模块由适度规模的均匀天线阵列组成, 相邻模块的间距由部署平台的结构决定(曾勇等, 2024)。

相比于传统紧凑式MIMO, 稀疏MIMO可以通过使用数量更少的物理天线阵元来实现相同大小的阵列物理总孔径。此外, 通过应用信号共轭原理构造虚拟差分或求和联合阵列, 稀疏MIMO可以较少物理阵元实现较大的虚拟阵列总孔径。这无疑减少了进行阵列配置时所需的硬件成本和日常运行所需的能源成本。Lou et al.(2020)验证了在大规模MIMO中, 以部分效益损失为代价, 稀疏阵列能够在大量减少所需的天线阵元数目的同时重构均匀平面阵列的波束图, 这为阵列成本降低和基站轻量化提供了思路。

如前所述, 稀疏MIMO具有灵活的架构设计潜能, 通过运用不同的架构设计方法进行阵列设计优化, 具有很强的环境适应能力。近年来, 粒

子群优化、凸优化、模拟退火算法被广泛运用于稀疏 MIMO 的几何架构设计。He et al.(2023)提出了一种两步粒子群优化算法对 MIMO 阵列进行稀疏优化,使其能够满足通信对于近场高速移动目标的高分辨率三维成像的要求。Feng et al.(2022)提出了一种粒子群优化和凸优化相结合的混合算法来进行稀疏 MIMO 雷达的架构设计,当主波束在期望区域扫描时,分别采用粒子群优化和凸优化交替优化阵列元素的位置和激励。仿真结果证实,与单独的粒子群算法相比,混合算法获得了

更低的峰值旁瓣电平。

5 结 语

稀疏 MIMO 作为一种具有前景的阵列架构,突破了半波长阵元间距的限制,在不增加天线数的同时,可以提供更高的空间分辨率和感知自由度等。本文介绍了几种稀疏阵列架构,从通信和感知视角讨论了稀疏 MIMO 所具有的优势以及面临的主要挑战。最后,从 ISAC 性能方面阐述了稀疏 MIMO 相比于紧凑型 MIMO 所具有的优势。

参考文献:

- 陈智,刘轲,李玲香,等,2024.太赫兹通信感知一体化技术综述[J].中国科学:信息科学,54(5):1215-1235.
- 曾勇,董珍君,王蕙质,等,2024.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,40(8):1377-1407.
- AMANI N, BENCIVENNI C, GLAZUNOV A A, et al, 2017. MIMO channel capacity gains in mm-wave LOS systems with irregular sparse array antennas [C]// IEEE APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications. Verona, Italy: 264-265.
- ASHKENAZY J, PERLMUTTER P, TREVES D, 1983. A modular approach for the design of microstrip array antennas[J]. IEEE T Antenn Propag, 31(1): 190-193.
- ASIF H M, ZHANG Y D, ABOUTANIOS E, 2023. ISAC system assisted by RIS with sparse active elements [J]. EURASIP J Adv Sig Pr, (1):1-22.
- BOHAGEN F, ORTEN P, OIEN G E, 2005. Construction and capacity analysis of high-rank line-of-sight MIMO channels [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans, LA, USA: 432-437.
- BOUDAHER E, AHMAD F, AMIN M G, et al, 2016. Effect of mutual coupling on direction-of-arrival estimation using sparse dipole arrays [C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Fajardo, PR, USA: 2189-2190.
- CETINKAYA H, KUEPPERS S, HERSCHEL R, et al, 2017. Near and far field focusing patterns for a 2D sparse MIMO array [C]// 11th European Conference on Antennas and Propagation. Paris, France: 461-464.
- CHEN C Y, VAIDYANATHAN P P, 2008. Minimum redundancy MIMO radars [C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Seattle, WA, USA: 45-48.
- FENG C, YE H, HONG H, et al, 2022. A hybrid algorithm for sparse antenna array optimization of MIMO radar [C] //IEEE Radio and Wireless Symposium. Las Vegas, NV, USA: 115-117.
- GANESAN U K, BJORNSON E, LARSSON E G, 2020. RadioWeaves for extreme spatial multiplexing in indoor environments [C]//54th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Pacific Grove, CA, USA: 1007-1011.
- HEATH R W J, LOZANO A, 2018. Foundations of MIMO Communication [M]. Cambridge University Press.
- HE X, ALISTARH C, PODILCHAK S K, 2022. Optimal MIMO sparse array design based on simulated annealing particle swarm optimization [C]// 16th European Conference on Antennas and Propagation. Madrid, Spain: 1-5.
- HE X, ZHAO K, ZHANG M, et al, 2023. Design of sparse MIMO array for imaging fuze [C]// Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference. Guilin, China:1-3.
- ITU, 2023. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond [P]. ITU Publications.
- KRIVOSHEEV Y V, SHISHLOV A V, 2010. Grating lobe suppression in phased arrays composed of identical or similar subarrays [C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham, MA, USA: 724-730.
- LARMOUR C, BUCHANAN N, FUSCO V, et al, 2024. Sparse array mutual coupling reduction [J]. IEEE Open J Antennas Propag, 5(1): 201-216.
- LI X, DONG Z, ZENG Y, et al, 2023. Near-field beam

- focusing pattern and grating lobe characterization for modular XL-array [C]//IEEE Global Communications Conference. Kuala Lumpur, Malaysia:4068–4073.
- LI X, DONG Z, ZENG Y, et al, 2024a. Multi-user modular XL-MIMO communications: Near-field beam focusing pattern and user grouping[J]. IEEE T Wirel Commun, 23(10):13766–13781.
- LI X, LU H, ZENG Y, et al, 2022. Near-field modeling and performance analysis of modular extremely large-scale array communications [J]. IEEE Commun Lett, 26(7): 1529–1533.
- LI X, MIN H, ZENG Y, et al, 2024b. Sparse MIMO for ISAC: New opportunities and challenges[EB/OL]. arXiv: 2406.12270.
- LIU C L, VAIDYANATHAN P P, 2016. Super nested arrays: Sparse arrays with less mutual coupling than nested arrays [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Shanghai, China:2976–2980.
- LIU F, CUI Y, MASOUIROS C, et al, 2022. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 40(6): 1728–1767.
- LOU M, JIN J, WANG H, et al, 2020. Applying sparse array in massive MIMO via convex optimization [C]//IEEE Asia-Pacific Microwave Conference. Hong Kong: 721–723.
- MILLER D A B, 2019. Waves, modes, communications, and optics: A tutorial[J]. Adv Opt Photon, 11(3):679–825.
- MIN H, FENG C, LI R, et al, 2024. Integrated sensing and communication with nested array: Beam pattern and performance analysis[EB/OL]. arXiv:2407.17039.
- MOFFET A, 1968. Minimum-redundancy linear arrays [J]. IEEE T Antenn Propag, 16(2):172–175.
- PAL P, VAIDYANATHAN P P, 2010. Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degrees of freedom[J]. IEEE T Signal Proces, 58(8): 4167–4181.
- PAULRAJ A J, GORE D A, NABAR R U, et al, 2004. An overview of MIMO communications—A key to gigabit wireless[J]. Proc IEEE, 92(2): 198–218.
- QIN S, ZHANG Y D, AMIN M G, 2017. DOA estimation of mixed coherent and uncorrelated targets exploiting coprime MIMO radar [J]. Digit Signal Process, 61: 26–34.
- SCHMIDT R, 1986. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE T Antenn Propag, 34(3): 276–280.
- SHI J, HU G, ZHANG X, et al, 2017. Sparsity-based two-dimensional DOA estimation for coprime array: From sum-difference coarray viewpoint [J]. IEEE T Signal Proces, 65(21): 5591–5604.
- VAIDYANATHAN P P, PAL P, 2010. Sparse sensing with co-prime samplers and arrays[J]. IEEE T Signal Proces, 59(2): 573–586.
- WANG H, FENG C, ZENG Y, et al, 2024a. Enhancing spatial multiplexing and interference suppression for near- and far-field communications with sparse MIMO [EB/OL]. arXiv: 2408.01956.
- WANG H, XIAO Z Z, ZENG Y, 2024b. Cramér-rao bounds for near-field sensing with extremely large-scale MIMO [J]. IEEE T Signal Proces, 72:701–717.
- WANG H, ZENG Y, 2023. Can sparse arrays outperform collocated arrays for future wireless communications? [C]// IEEE Globecom Workshops. Kuala Lumpur, Malaysia: 667–672.
- WEI S, ZHU G, SU Y, 2024. A novel sparse array configuration for direction of arrival estimation with increased uniform degrees of freedom and reduced mutual coupling[J]. Sensors, 24(3): 808.
- WU N, ZHU F, LIANG Q, 2018. Evaluating spatial resolution and channel capacity of sparse cylindrical arrays for massive MIMO [J]. IEEE Access, 5: 23994–24003.
- YANG M, SUN L, YUAN X, et al, 2018. A new nested MIMO array with increased degrees of freedom and hole-free difference coarray[J]. IEEE Signal Proc Let, 25(1): 40–44.
- YUAN S S A, HE Z, CHEN X, et al, 2021. Electromagnetic effective degree of freedom of an MIMO system in free space[J]. IEEE Antenn Wirel Pr, 21(3): 446–450.
- ZHANG J, WANG J, ZHANG Y, et al, 2024. Integrated sensing and communication channel: Measurements, characteristics, and modeling [J]. IEEE Commun Mag, 62(6):98–104.