基于稀疏阵列的 近场通信与感知方法



Sparse Array Enabled Communications and Sensing for Extremely Large–Scale Array

周聪/ZHOU Cong^{1,2},成洪樯/CHENG Hongqiang¹, 游昌盛/YOU Changsheng¹ (1.南方科技大学,中国 深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学,中国 哈尔滨 150001) (1. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China) DOI:10.12142/ZTETJ.202403003 网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240619.1102.006.html 网络出版日期: 2024-06-20 收稿日期: 2024-04-25

摘要:超大规模阵列的应用可以显著增加传输距离和提高频谱效率,克服路径损耗,从而为通信领域带来新的发展机遇。在超大规模阵列中用 户往往处于辐射近场区域,因此通信系统需要采用更为精准的球面波模型。然而,超大规模阵列面临硬件成本和能耗高以及信号处理算法复杂 等问题。为解决该问题,提出利用稀疏阵列构造超大规模阵列,赋能近场通感一体化。分别对稀疏阵列在远场和近场通信与感知中的关键问题 进行了深入分析,阐述了现有稀疏阵列应用的挑战,并提出未来稀疏阵列的研究方向。

关键词:稀疏阵列;超大规模阵列;近场通信;近场感知

Abstract: The application of extremely large-scale array can significantly increase transmission distance and enhance spectral efficiency, overcoming path loss and thus bringing new development opportunities to communications. With users potentially located in the near-field region of the base station equipped with an extremely large-scale array, a more accurate spherical wave model needs to be adopted. However, extremely large-scale array faces challenges such as high hardware costs, energy consumption, and complex signal processing algorithms. To address this issue, the sparse array is used to construct extremely large-scale array, enabling integrated sensing and communication. An indepth analysis of the key issues of sparse arrays in both far-field and near-field communication and sensing is conducted. The challenges of existing sparse array applications are discussed, and then future research directions for sparse arrays are presented.

Keywords: sparse array; extremely large-scale array; near-field communication; near-field sensing

引用格式: 周聪, 成洪樯, 游昌盛. 基于稀疏阵列的近场通信与感知方法 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(3): 10−14. DOI: 10.12142/ ZTETJ.202403003

Citation: ZHOU C, CHENG H Q, YOU C S. Sparse array enabled communications and sensing for extremely large-scale array [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(3): 10–14. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403003

5G的成功商业化,学术界和工业界的目光聚焦在 6G的功能性探索。一方面,为了进一步提供更可靠更 高速率的通信服务,6G需要更大的带宽,因此毫米波和太 赫兹频段成为未来移动通信系统的关键备选频段^[1-2];另一 方面,网络感知已被国际电信联盟列举为6G的典型场景, 这意味着定位和活动识别等应用在6G中将得到支持,大大 释放了移动通信网络的性能。以上两点均促使多天线技术向

着超大规模阵列演进,以提供更高的天线增益来对抗毫米波 和太赫兹频段的路径损耗,以及更高的感知分辨率以提升 6G 网络的感知精度^[3]。另外,超大规模阵列的引入促使通信 范式发生根本性的改变,使得传统的远场平面波假设不再成 立,信道建模需要更为精确的近场球面波模型。在近场中, 超大规模阵列导出的波束具有聚焦特性,提供了新的距离自 由度,使得通信中传统的空分多址演进为位分多址^[4]。传统 远场感知只能估计用户的角度,而近场则可以感知用户的位 置,从而提升了感知的维度。

然而,基于传统稠密阵列的超大规模阵列也面临诸多挑

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFB2905100)

战。一方面,稠密阵列的天线和射频链路的数量众多,不可 避免地导致了单基站的硬件成本和能量消耗的大幅提升,这 对于6C移动网络的部署是不可接受的。另一方面,由于超 大规模阵列信道矩阵的高维度,球面波参数的估计面临计算 量巨大的挑战。

一种有前景的解决方案是在超大规模阵列的背景下使用 稀疏阵列替代稠密阵列^[5]。一般来说,稀疏阵列包括稀疏均 匀线性阵列、互质阵列、嵌套阵列和最小冗余阵列。其中, 稀疏均匀线性阵列是天线间距大于半载波波长的均匀线性阵 列,而互质阵列由两个具有不同间距且间距互质的均匀线性 子阵交叉组成。嵌套阵列是由两个均匀线性子阵前后嵌套组 成。一般来说第一级嵌套子阵天线互耦性高,而最小冗余阵 列是基于阵元位置差最小冗余的准则进行设计的, 需要通过 穷举或优化手段或者相应阵列构型,没有系统化设计方法。 因此,本文对稀疏阵列的探讨主要聚焦于稀疏均匀线性阵列 和互质阵列。稀疏阵列有着诸多好处,在相同天线数的情况 下,由于更大的孔径,稀疏阵列能够提高比稠密阵列更多的 感知和通信自由度。另外,相同孔径的前提下,稀疏阵列的 天线数和射频链路的数量远远小于稠密阵列,降低了硬件成 本和功耗。因此,在天线技术向着超大规模阵列的演进过程 中,稀疏阵列将作为6G通感一体需求背景下的关键备选 技术。

1 稀疏阵列远场通感场景

1.1 远场通信

稀疏阵列在远场区域的多个方向上存在栅瓣问题,导致 多用户通信系统中用户间干扰严重。在多天线技术朝着超大 规模阵列演进之前,阵列的天线数一般较少,阵列的波束宽 度大,栅瓣在整个空间中占据很大比例,致使用户间干扰发 生概率大。因此,远场条件下,稀疏阵列的研究主要聚焦于 提升感知自由度,尤其是实现同时估计数量比天线数多的用 户的到达角,这对于密集阵列来说是难以实现的。

WANG H. Z.¹⁰等首先详细讨论了稀疏均匀线性阵列在远 场的波束图与栅瓣的分布,证明了当用户密集分布时,稀疏 均匀线性阵列的多用户和速率有可能超过同等天线数的稠密 阵列。这是因为当用户在小空间角区域内密集分布时,用户 间互相位于彼此的主瓣,避免了栅瓣的干扰。而主瓣波束宽 度与孔径成反比,在相同天线数的条件下,稀疏均匀线性阵 列远小于稠密阵列,使得稀疏阵列下用户间干扰减缓。这为 稀疏阵列在未来6G高密度用户分布的场景提供了潜在应用 的可能。然而,当用户分布相互分散时,由于严重的用户间 干扰,稀疏均匀线性阵列的性能将极具下降。我们将在近场 部分指出,由于近场波束聚焦效应,稀疏阵列的栅瓣区域将 大大减少,这缓解了多用户通信系统的用户间干扰。

1.2 远场感知

互质阵列的远场感知方法大致分为基于子阵列分解的 波达角估计方法和基于虚拟子阵列的波达角估计方法。基 于子阵列分解的波达角估计方法要求分别对两个均匀子阵 列进行波达角估计。传统的超分辨波达角估计算法主要有 多重信号分类(MUSIC)算法和旋转不变子空间(ESPRIT) 算法,它们都是基于特征结构的子空间算法,对于传统阵 列,要求阵列间距小于半波长,以避免出现角度模糊问题。 由于互质阵两个子阵的间距均大于半波长,因此对单个子 阵列采用传统的超分辨的波达角估计算法时,会出现多余 旁瓣。文献[7]指出,在两个稀疏均匀子阵列分别获得的波 达角方向估计结果中,由于子阵列间距互质的特性,有且 仅有一个相同或者相近的谱峰,即为真实的互质阵列波达 角方向估计结果。单用户估计结果如图1(a)所示。然 而,在这种方法中,互质数组被分解为两个子数组进行独 立计算,虽然易于实现,但是该类算法只利用了子阵列接 收信号的自相关信息,并没有利用不同子阵列的互相关信 息,因此可识别的信源数受限于阵元数较少的子阵列的阵 元数,导致感知自由度的减小。该类方法在分辨率和计算 复杂度方面优于传统采用均匀阵列的波达角方向估计算法, 实现方法简单、易操作,适用于目标数量有限且对估计精 确度要求较高的应用场景。

接着, P. PAL 等在文献[8]中提出了一种基于虚拟子阵 的波达角估计方法。该方法通过对接收信号的协方差矩阵进 行向量化和数据重构,生成一个虚拟阵列接收到的单快拍信 号,其虚拟阵列的孔径和阵元数量远远大于实际阵列,因此 具有比实际阵列更高的自由度。多用户估计结果如图1(b) 所示。由于生成的虚拟信号是高度相关的,因此需要对信号 进行空间平滑处理。然而,空间平滑技术会导致连续自由度 减半,从而显著降低阵列的检测性能。在平滑过程中,该方 法忽略了虚拟阵列中的非连续部分,未充分利用其信息。为 了解决这一问题,文献[9]采用了阵列插值的方法来构建虚 拟均匀线性阵列,以充分利用非均匀虚拟阵列中的所有虚拟 传感器。这种方法提高了互质阵列的自由度。此外,基于虚 拟阵列信号稀疏重建的方法能够综合利用互质阵列的不同部 分,不仅完整利用了互质阵列的全部自由度,还能提高波达 角估计的精度。



▲图1 两种远场感知算法示意图

2 稀疏阵列近场通感场景

2.1 近场通信

与远场不同的是,近场的波束聚焦效应使得稀疏阵列在 近场通信中的应用更近一步。ZHOU C. 等在文献[10]中详细 分析了近场下稀疏均匀线性阵列的波束图,指出其主瓣与栅 瓣的波束宽度和深度,如图2(a)所示。值得注意的是, 稀疏均匀的栅瓣在近场下仍有聚焦效应,是主瓣在对应栅瓣 方向的等效复制。因此,与远场相比,栅瓣区域更小,用户 位于互相栅瓣的概率低,这使得稀疏阵列在近场通信中的应 用成为可能。为了进一步抑制栅瓣的强度, 文献[10]还提出 一种基于互质阵列的拓展互质阵列,即多个子互质阵列的周 期延拓,并给出了所设计的拓展互质阵列的栅瓣分布,及其 波束宽度、深度和强度。这种拓展互质阵列在稀疏度相同的 前提下,可以将均匀稀疏阵列的栅瓣强度降低3dB,但是会 引入额外的栅瓣,这是由两个子阵列及其共有天线元素所产 生,其波束图如图2(b)所示。通过理论分析,在用户全 空间均匀分布时,两种稀疏阵列的用户间干扰均得到不同程 度的缓解。而在一些极端条件下,如用户密集分布,用户同 向分布等条件下,两种稀疏阵列的多用户通信和速率的表现 均远优于稠密阵列,这是因为两种稀疏阵列的主瓣宽度和深 度均明显小于相同天线数的稠密阵列。在图3中,我们对比 了太赫兹条件下用户密集分布时稀疏线性均匀阵列与稠密均 匀阵列性能。仿真参数具体包括:载波频率为300 GHz,用 户数为3,用户分布距离区间为[20,30]m,角度区间为[-2°, 2°], 天线个数为257, 稀疏线性均匀阵列的稀疏度为3, 噪 声功率为-70 dBm。从图 3 可知,由于更窄的主瓣,稀疏线



▲图2 近场稀疏阵列波束图

性均匀阵列的用户间干扰小,和速率显著高于同等条件下的 稠密均匀阵列。



▲图3 稀疏线性均匀阵列与稠密均匀阵列性能对比

进一步地,考虑到少量天线的稀疏阵列即有巨大孔径而 不利于现实基站实际部署的事实,文献[5]提出了基于多子 阵列设计的稀疏阵列以降低稀疏阵列的相对孔径。研究结果 表明,基于多子阵列设计的稀疏阵列的距离估计的克拉美劳 界小于稠密阵列,意味着其感知精度更高。另外,从通信自 由度的角度来看,由于更大的孔径,基于多子阵列设计的稀 疏阵列的虚拟独立数据流的个数要显著高于稠密阵列。这些 都意味稀疏阵列在6G通感一体的背景下有着广泛的应用 前景。

2.2 近场感知

对于均匀阵列,空间信源定位的基本理论和算法已有很 多研究成果。文献[7]证明了信号子空间与噪声子空间在近 场域的正交性仍然成立,将远场的MUSIC算法推广至近场, 提出了信源参数估计中的二维 MUSIC 算法。该方法精度高 但是需要对二维全局空域进行搜索,因此计算量巨大。为 此, 文献[11]改进了传统的MUSIC算法, 提出了降维MUSIC 算法,可以在没有二维谱峰搜索的情况下实现波达角估计, 实现角度和距离估计的一对一匹配。此外,将定位问题分解 为单独的波达角和距离估计问题,可以显著降低搜索复杂 度。然而,源的波达角和范围不能直接分离。为了解决这个 问题, 文献[12]利用阵列的对称性, 只提取接收信号协方差 矩阵的副对角线元素,将波达角和距离估计问题解耦,并通 过多个一维网格搜索解决定位问题。虽然易于实现,但是该 类算法只利用了协方差的副对角线元素,因此可识别的信源 数只有阵元数量的一半。文献[13]通过构造一种对称子阵列 结构,通过将均匀线性阵列划分为两个对称的子阵列,将远

场ESPRIT算法推广到近场。另外,文献[14]提出一种基于二 阶统计量的近场信源定位算法,避免了谱峰搜索,但仍需多 次矩阵分解操作。然而,以上文献都基于LoS信道的假设, 有关近场NLOS环境的信源定位问题仍是难点。

相比于均匀阵列信源定位,互质阵在不增加阵列天线数 量的情况下,可以估计更多的信源位置。但是有效利用互质 阵列的虚拟孔径需要采用复杂的信号处理算法,如基于压缩 感知和协方差矩阵重建算法等。这些算法通常计算复杂度较 高,特别是在处理大规模数据时。目前,互质阵的近场信源 定位研究正处于起步阶段,相关的研究较少。文献[15]对互 质阵列接收到的数据进行预处理,建立只包含角度参数的离 网格模型,通过迭代方法得到入射信号的到达方向估计,之 后通过固定估计的角度,构建了距离参数离网格模型,通过 迭代方法得到距离估计。但是由于没有将整个接收信号协方 差矩阵解耦,因此无法利用虚拟子阵列所提供的高自由度。 如何解耦整个协方差矩阵的波达角和距离,而不只是提取一 部分元素,成为近场互质阵信源定位亟待解决的问题。

3 稀疏阵列未来工作展望

尽管稀疏阵列在近场中面对稠密阵列在通信和感知上都 有着显著优势,但其仍存在诸多问题亟待解决。首先,稀疏 阵列与稠密阵列对比的基础是相同天线数的情况,相同孔径 的条件下,稀疏阵列的优势只集中于能耗和硬件成本。其 次,当前针对稀疏阵列的设计在通信和感知两方面是割裂 的,通信追求栅瓣的抑制,感知则寻求阵列的自由度最大化 以同时估计更多的用户。最后,当前针对稀疏阵列的通信与 感知主要集中于窄带通信系统,而移动通信的宽带系统中存 在诸多窄带系统没有的问题,如波束斜视等现象。因此,基 于以上分析,我们给出几点未来稀疏阵列的研究方向:

 1)探究稀疏阵列在宽带系统中的波束斜视现象,考虑 宽带系统中由于波束斜视而导致的不同子载波生成栅瓣的分 布,设计新的宽带近场通信系统的波束管理方法。

2)考虑到超大规模阵列的高维度,传统的信道估计方法复杂度过高,波束训练成为一种高效的信道信息获取方法。如何利用稀疏阵列的感知能力进一步降低波束训练的开销,如先通过稀疏阵列的高分辨率感知获取用户准确的角度估计,再通过少量的导频符号估计近场的距离,以此重构近场用户的角度和距离参数。

3)近场信源定位算法需要进行多维空域搜索,计算复杂度高,并且搜索粒度也会直接影响估计精度,限制了其在实际中的运用。因此,在近场中设计低复杂度、参数自动匹配和超高分辨率的信源定位方法尤为重要。

4)打破固定阵列结构设计,实时调整优化阵列构型 (如可移动天线),折中考虑通信栅瓣抑制和感知自由度,设 计通感一体化阵列结构与信号处理算法,最大程度地提升无 线通信资源的利用率。

4 结束语

稀疏阵列采用较少的天线数形成大孔径天线阵列将助力 6G 近场通信与感知的发展,从而有效降低基站侧的硬件成 本和能耗。在本文中,我们详细阐述了稀疏阵列的基本概 念,及其在远近场中的应用,分析了现有稀疏阵列的基本概 感知中的研究进展,并对未来近场稀疏阵列的研究方向进行 展望。本文的研究将助力超大规模阵列的演进,推动稀疏阵 列在近场通信中的应用,为实现 6G 通感的愿景提供技术 支撑。

参考文献

- [1] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2019, 14(3): 28–41. DOI: 10.1109/ MVT.2019.2921208
- [2] SAAD W, BENNIS M, CHEN M Z. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems [J]. IEEE network, 2020, 34(3): 134–142. DOI: 10.1109/ MNET.001.1900287
- [3] UDAYAKUMAR E, KRISHNAVENI V. A review on interference management in millimeter-wave MIMO systems for future 5G networks [C]//Innovations in Electrical and Electronics Engineering. Springer, 2020: 715-721.10.1007/978-981-15-2256-7_65
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUROS 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. DOI: 10.1109/ JSAC.2022.3156632
- [5] YANG S J, LYU W T, ZHANG Z P, et al. Enhancing near-field sensing and communications with sparse arrays: potentials, challenges, and emerging trends [EB/OL]. [2024-03-25]. https:// arxiv.org/abs/2309.08681
- [6] WANG H Z, ZENG Y. Can sparse arrays outperform collocated arrays for future wireless communications? [EB/OL]. [2024–03– 25]. http://arxiv.org/abs/2307.07925
- [7] ZHOU C W, SHI Z G, GU Y J, et al. DECOM: DOA estimation with combined MUSIC for coprime array [C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. IEEE, 2013: 1–5. DOI: 10.1109/WCSP.2013.6677080
- [8] PAL P, VAIDYANATHAN P. Coprime sampling and the music algorithm [C]//Proceedings of Digital Signal Processing and Signal Processing Education Meeting (DSP/SPE). IEEE, 2011: 289–294. DOI: 10.1109/DSP–SPE.2011.5739227
- [9] ZHOU C W, GU Y J, FAN X, et al. Direction-of-arrival estimation for coprime array via virtual array interpolation [J]. IEEE

transactions on signal processing, 2018, 66(22): 5956-5971. DOI: 10.1109/TSP.2018.2872012

- [10] ZHOU C, YOU C S, ZHANG H D, et al. Sparse array enabled near-field communications: beam pattern analysis and hybrid beamforming design [EB/OL]. [2024-03-25]. http://arxiv.org/abs/ 2401.05690
- [11] ZHANG X F, CHEN W Y, ZHENG W, et al. Localization of nearfield sources: a reduced-dimension MUSIC algorithm [J]. IEEE communications letters, 2018, 22(7): 1422–1425. DOI: 10.1109/ LCOMM.2018.2837049
- [12] LIU G H, SUN X Y. Efficient method of passive localization for mixed far-field and near-field sources [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2013, 12: 902–905. DOI: 10.1109/ LAWP.2013.2273451
- [13] ZHI W, CHIA M Y W. Near-field source localization via symmetric subarrays[C]//2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing–ICASSP'07. IEEE, 2007, 2: 121–1124
- [14] ABED-MERAIM K, HUA Y. 3-D near field source localization using second order statistics[C]//Conference Record of the Thirty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 1997, 2: 1307–1311
- [15] TIAN Y, WANG X H, JIN X, et al. Near-field source location estimation algorithm based on coprime array [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2022: 1–5. DOI: 10.1109/ICSPCC55723.2022.9984352

作者简介

周聪,南方科技大学访问学生,哈尔滨工业大学 在读博士研究生;主要研究方向为近场通信、稀 疏阵列与无人机通信等。



成洪檣,南方科技大学在读硕士研究生;主要 研究方向为超大规模阵列通信与稀疏阵列近场 感知等。



游昌盛,南方科技大学工学院副研究员、博士生 导师;主要研究方向为智能反射面通信、超大规 模阵列通信、边缘计算与边缘智能等。