

稀疏多极化阵列设计研究进展与展望

悦亚星^① 李天宇^① 周成伟^{①③} 袁 鑫^② 史治国^{*①③}

^①(浙江大学信息与电子工程学院 杭州 310027)

^②(西湖大学工学院 杭州 310024)

^③(浙江省协同感知与自主无人系统重点实验室 杭州 310015)

摘要: 相较于稀疏标量阵列和均匀多极化阵列,稀疏多极化阵列由于其可感知信号的极化状态、避免极化失配以及增加阵列自由度、减小互耦效应与降低硬件成本等优点,对其进行系统性研究具有重要的应用价值和理论指导意义。稀疏多极化阵列的设计较之于稀疏标量阵列的设计更加多样化,因其不仅与天线阵元位置有关,还与天线阵元极化种类和阵元指向等因素有关。该文首先对近年来该领域内相关研究进行归纳总结,从非均匀稀疏、均匀稀疏、混合均匀与非均匀稀疏3种稀疏方式出发,介绍和探究了主流稀疏多极化阵列结构优化方式,然后从基于深度学习的稀疏多极化阵列优化设计、稀疏多极化多输入多输出(MIMO)雷达、稀疏极化频率分集阵(PFDA)雷达和稀疏PFDA-MIMO雷达、稀疏多极化智能超表面以及稀疏多极化阵列在家居智能通信和工业物联网等复杂室内场景下的应用等方面对未来的发展方向进行了展望。

关键词: 稀疏多极化阵列; 多输入多输出雷达; 多极化智能超表面; 极化频率分集阵; 智能通信; 工业物联网

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2023)02-0312-20

DOI: 10.12000/JR22206

引用格式: 悦亚星, 李天宇, 周成伟, 等. 稀疏多极化阵列设计研究进展与展望[J]. 雷达学报, 2023, 12(2): 312–331. doi: 10.12000/JR22206.

Reference format: YUE Yaxing, LI Tianyu, ZHOU Chengwei, *et al.* Research progress and prospect of sparse diversely polarized array design[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(2): 312–331. doi: 10.12000/JR22206.

Research Progress and Prospect of Sparse Diversely Polarized Array Design

YUE Yaxing^① LI Tianyu^① ZHOU Chengwei^{①③} YUAN Xin^② SHI Zhiguo^{*①③}

^①(College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

^②(School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China)

^③(Key Laboratory of Collaborative Sensing and Autonomous Unmanned Systems of Zhejiang Province, Hangzhou 310015, China)

Abstract: As compared with sparse scalar arrays and uniform diversely polarized arrays, sparse diversely polarized arrays show respectively advantages of possessing the ability of sensing the polarization state of source signals, avoiding polarization mismatch and increasing the degrees of freedom, reducing mutual coupling, decreasing hardware cost, *etc.* Therefore, the comprehensive research on sparse diversely polarized array is of great importance in both theory and realistic applications. The design architecture of sparse diversely polarized arrays, which are related not only to the location of the array elements, but also to the dipole/loop type,

收稿日期: 2022-10-14; 改回日期: 2022-12-01; 网络出版: 2022-12-20

*通信作者: 史治国 shizg@zju.edu.cn

*Corresponding Author: SHI Zhiguo, shizg@zju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0126300), 国家自然科学基金(61901413, U21A20456, 62271414), 工业控制技术国家重点实验室自主课题(ICT2022A02), 浙江大学教育基金会启真人才基金, 杭州未来科技城5G开放实验平台

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2018YFE0126300), The National Natural Science Foundation of China (61901413, U21A20456, 62271414), The Research Project of the State Key Laboratory of Industrial Control Technology (ICT2022A02), Zhejiang University Education Foundation Qizhen Scholar Foundation, The 5G Open Laboratory of Hangzhou Future Sci-Tech City

责任编辑: 朱圣棋 Corresponding Editor: ZHU Shengqi

orientation, and polarization states of the antenna elements, are more diverse than those of sparse scalar arrays. This paper summarizes the relevant researches in this field in recent years, introduces and explores the mainstream sparse diversely polarized array structure optimization approaches from three aspects: non-uniformly sparse, uniformly sparse and mixed uniformly and non-uniformly sparse. Then the future development of sparse diversely polarized arrays is discussed in terms of deep learning-based optimization approach, sparse Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) diversely polarized array, sparse Polarimetric Frequency Diverse Array (PFDA) radar and sparse PFDA-MIMO radar, sparse polarimetric reconfigurable intelligent surface, and the application of sparse diversely polarized array in complex indoor scenes, such as smart communications in house and Industrial Internet of Things.

Key words: Sparse diversely polarized array; Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar; Polarimetric reconfigurable intelligent surface; Polarimetric Frequency Diverse Array (PFDA); Smart communications; Industrial Internet of Things (IIOT)

1 引言

多极化阵列具有联合处理信号空域和极化域信息的能力,在信号处理、通信和工业互联网等领域有着广泛应用^[1-9]。近年来,为降低阵元间互耦效应、扩展阵列孔径和降低硬件成本,突破奈奎斯特采样速率的稀疏结构阵列引起了学术界和工业界的广泛关注^[10-17]。然而现有稀疏阵列设计背景下相关研究大多聚焦于阵列的空域稀疏性,综合考虑阵列空域稀疏特性以及多极化特性的相关研究缺少系统性论述。另外,电磁波是一种矢量信号,未综合考虑上述因素会导致由于极化失配而出现信号处理方法的非稳健性问题^[18-21]。因此,对多极化阵列进行合理化稀疏配置的稀疏多极化阵列设计的重要性不言而喻。本文对稀疏多极化阵列设计的相关研究进展进行深入调研,并对未来的发展方向进行展望。

现有稀疏多极化阵列的相关研究主要包括基于常见稀疏单极化阵列向多极化阵列的推广^[22,23],涵盖常见的几种稀疏阵列(如嵌套阵(Nested Array, NA)和互质阵^[10,24-27])向稀疏多极化阵列的一维和二维推广,相关研究依然有较大的局限性。文献^[28]还利用了多极化阵列特有的“矢量叉积”特性,该特性可以使得稀疏多极化阵列的设计方式更加多样化。然而现有对深度融合“矢量叉积”特性进行稀疏多极化阵列设计的研究相对较为缺乏,且现有相关工作缺少系统性地对稀疏多极化阵列设计方法的论述总结。基于上述问题,本文拟对稀疏多极化阵列结构的优化设计问题进行调研,从阵列的非均匀、均匀、混合均匀与非均匀的稀疏配置方式入手,深入探究不同稀疏多极化阵列的配置方式,并简要讨论基于所设计阵列的二维波达方向(Direction-of-Arrival, DOA)与极化参数的多维参数联合估计方法。

随着近年来深度学习技术^[29-31]的快速发展,基

于深度学习实现阵列的合理化稀疏配置也受到了广泛关注。稀疏阵列的阵元选择可被认为是组合问题或凸优化问题,能通过搜索或贪婪算法求解,但 these 方法在阵元数增加的情况下算法的计算复杂度也随之上升。近年来随着计算设备运算效率的大幅提高和深度学习技术的日益成熟,基于深度学习对阵元进行最佳选择成为一大研究热点。多极化阵列的合理化稀疏配置是一个系统性的复杂优化问题,其面临着合理化稀疏配置和合理化极化配置两大难题,因而可以依托先进的深度学习技术实施最佳的阵型选择,该方面的研究在未来稀疏多极化阵列的优化设计方面尤为重要。

从应用角度出发,稀疏多极化多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达也将是稀疏多极化阵列未来的一大重要研究方向。MIMO雷达凭借其在高目标分辨精度、改善雷达截面积(Radar Cross Section, RCS)闪烁效应和抗干扰能力等方面的优势,成为目前一大热点。MIMO雷达还采用了波形分集技术^[32],可以生成更大的虚拟阵列孔径和更高的阵列自由度,因此在角度估计领域备受青睐。但传统MIMO雷达在未来可能大规模应用的场景下,将面临系统成本高、阵元间耦合效应强、接收信号时出现的极化失配影响信号处理性能等问题,若采用稀疏多极化MIMO雷达则能很好地改善这些问题。然而,相关研究还十分有限,稀疏多极化MIMO雷达在未来具有广阔的发展前景。

此外,稀疏多极化频率分集阵列(Polarimetric Frequency Diverse Array, PFDA)雷达和稀疏PFDA-MIMO雷达也具有良好的发展前景。频率分集阵列(Frequency Diverse Array, FDA)雷达作为一种新型雷达,其相比于传统相控阵雷达,可以生成与距离、角度、时间和频率增量有关的波束方向图,为雷达对距离域的目标探测提供支持,融合了

FDA和MIMO体制优势的FDA-MIMO雷达更是受到广泛关注。但目前传统FDA雷达和FDA-MIMO雷达相关研究同样面临系统成本高、阵元间耦合效应强、接收信号时出现极化失配影响信号处理性能等问题,稀疏PFDA雷达和稀疏PFDA-MIMO雷达将是极具潜力的解决方案。

作为另外一个科学前沿,稀疏多极化智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)也称稀疏多极化智能反射超表面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)在电磁领域展现出了巨大潜力,可为稀疏多极化阵列设计研究注入新的活力。传统对电磁波极化特性调控的方法是直接调控天线的极化方式,这种方法的缺点在于一旦设计并制备完成天线后难以对其进行修改,而极化可重构技术的出现让实时调控超表面处电磁波极化特性成为可能。由极化可重构超表面单元组成的多极化RIS可被PIN二极管^[33]、电控开关^[34,35]或石墨烯^[36]对其极化方式进行编程控制。但传统超表面阵列的超表面阵元之间以及对多种特性进行调控的单元之间可能存在由于间距较近导致的耦合效应,因此对其阵元进行合理化稀疏布置是必要的。考虑到大规模应用的因素,为减小阵列功耗、提升不同极化配置方式下阵列自由度和改善阵列性能,将稀疏多极化阵列设计应用于稀疏多极化RIS研究中具有极大潜在价值。

最后,将稀疏多极化阵列应用于家居智能通信和工业物联网等复杂室内场景中也将是一个极具应用前景的研究方向。在室内环境已经成为当今无线通信主要应用场景的前提下,研究室内无线通信高效性和稳定性的影响因素,并寻找改善室内无线通信性能的方法已成为未来新一代信息技术的重要研究课题。除了优化通信资源、改善建筑布局和建筑材料,研究人员更多地将目光投向了增设或改进室内通信硬件,如直接铺设阵列或将阵列嵌入建筑材料。具有轻量化、易集成、成本低等优点的稀疏多极化阵列在未来复杂室内通信场景中有望发挥重大作用。

本文总共分为4节,第1节概述了稀疏多极化阵列研究的重要性、现有的相关研究总结及未来发展

展望;第2节从多极化阵列的3种稀疏化方式出发分别介绍了现有的多极化阵列稀疏化方式及所提出的多极化阵列稀疏化方式;第3节对未来的5个发展方向进行阐述和展望,包括基于深度学习的稀疏多极化阵列优化设计、稀疏多极化MIMO雷达研究、稀疏PFDA雷达和稀疏PFDA-MIMO雷达研究、稀疏多极化智能超表面、稀疏多极化阵列在家居智能通信和工业物联网等复杂室内场景下的应用;第4节对全文工作进行总结。

2 稀疏多极化阵列设计研究

不同于稀疏标量阵列的稀疏化方式仅为位置上的优化,稀疏多极化阵列由于其阵元极化类型多样化(包含用来接收电场信号的偶极子阵元与接收磁场信号的磁环阵元,本文的偶极子和磁环分别指长度和半径相对较小的短偶极子($L/\lambda < 0.1$)和小磁环($2\pi(R/\lambda) < 0.1$),它们的尺寸分别小于电长偶极子和电大磁环,其中 L 和 R 分别指偶极子和磁环的长度与半径^[9])、阵元指向多样化和阵元位置多样化3种特点,因而拥有更加多样化的结构优化配置方法。阵元位置是3种多样化特点中最重要且显而易见的特点,本节基于该特点,从阵元位置的非均匀稀疏、均匀稀疏、混合均匀与非均匀稀疏3种方式出发,对现有稀疏多极化阵列结构优化设计方法进行总结和概述。表1总结了稀疏多极化阵列设计研究的技术背景、理论基础、设计种类和设置及约束方式。这里值得指出的是引言和表1中所述多极化阵列的“矢量叉积”性质(见公式(1)),主要适用于由3种极化方式的偶极子和3种极化方式的磁环组成的全电磁矢量传感器(Electromagnetic Vector Sensor, EMVS)阵列。特别的,由3种极化方式的偶极子组成的三正交偶极子或由3种极化方式的磁环组成的三正交磁环^[37]能够利用电场或磁场三分量的实部和虚部的矢量叉积,在已知极化相角正弦值或方位角余弦值的符号的条件下,实现二维DOA的估计,这可以认为是一种特殊的“矢量叉积”特性。另外,由两种极化方式天线构成的多极

表 1 稀疏多极化阵列设计研究的技术背景、理论基础、设计方法种类和设置及约束方式

Tab. 1 Technical background, theoretical basis, categorization of the configuration design, and setting/constraint approaches for sparse diversely polarized array

技术背景	理论基础	设计种类	设置及约束方式
1 均匀阵列阵元间互耦效应强	1 互质阵和嵌套阵等稀疏阵列设计准则	1 非均匀稀疏多极化阵列设计	1 以互质阵和嵌套阵等稀疏阵为基本稀疏约束方式,由不同极化方式的天线联合构建
2 均匀阵列自由度小		2 均匀稀疏多极化阵列设计	
3 均匀阵列硬件成本高	2 多极化阵列的矢量叉积性质	3 混合均匀与非均匀稀疏多极化阵列设计	2 等距地稀疏不同极化方式的天线
4 标量稀疏阵列无法感知信号极化信息			3 融合上述两种设置方式分别约束阵列的均匀部分与非均匀部分

化阵列(如同点正交磁环偶极子(Co-centered Orthogonal Loop and Dipole, COLD)阵列和交叉偶极子阵列)对应于二维矢量,因而无法利用“矢量叉积”性质;但由于其同样具有极化多样性,因而由两种极化方式天线构成的多极化阵列也可以感知极化信息。

(1) 非均匀稀疏多极化阵列设计

现有非均匀稀疏多极化阵列的相关研究主要基于常见稀疏标量阵(如互质阵、嵌套阵、超级嵌套阵和增广嵌套阵(Augmented NA, ANA))向多极化阵的简单推广,且大多应用于一维DOA和极化参数估计^[21],如文献^[22]提出的由嵌套阵和增广嵌套阵组成的一种稀疏多极化阵列(如图1所示),该阵列不仅实现了孔径扩展还避开了部分多极化阵元间的互耦效应。上述阵列的设计思路如下:①均以原点为起点沿 y 轴依次摆放轴向平行于 y 轴的理想嵌套阵偶极子阵元,以及沿 y 轴依次摆放轴向平行于 z 轴的增广嵌套阵偶极子阵元;②理想嵌套阵偶极子阵元和增广嵌套阵偶极子阵元的虚拟孔径尽量相等。

尽管图1所示阵列有上述优点,然而由于其仅在 y 轴有空域孔径且仅感知信号的二维极化域信息,使其损失了对二维DOA与极化参数无模糊估计的潜能。图2所示的嵌套EMVS阵列尽管也仅在 y 轴有空域孔径,然而其还可感知信号的六维极化域信息,可借助“矢量叉积”特性实现对二维DOA与极化参数的无模糊估计。矢量叉积特性可表述如下:记3个轴向分别与坐标轴平行的电偶极子和3个法线方向分别与坐标轴平行的磁偶极子对应的导向矢量分别为 $\mathbf{e}_m \in \mathbb{C}^{3 \times 1}$ 和 $\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^{3 \times 1}$,则电磁波的传播矢量可表示为 $\mathbf{e}_m$ 和 $\mathbf{h}_m^*$ 矢量叉积并归一化的结果:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_m &= \frac{\mathbf{e}_m \times \mathbf{h}_m^*}{\|\mathbf{e}_m\| \cdot \|\mathbf{h}_m^*\|} \\ &= -[\sin \phi_m \cos \theta_m, \sin \phi_m \sin \theta_m, \cos \phi_m]^T \quad (1) \end{aligned}$$

其中, θ_m 和 ϕ_m 分别是第 m 个接收信号的方位角和俯仰角,“ $\times$ ”表示矢量叉积运算,“ $*$ ”表示共轭运算,“ T ”代表转置运算,等号右边的负号与具

体的 $\mathbf{e}_m$ 和 $\mathbf{h}_m^*$ 表达方式有关(相关文献中的表达式中可能无负号^[38])。

上述嵌套EMVS阵列的设计思路为以EMVS阵元为基本单元在嵌套阵位置上进行配置,图2所示的两层嵌套EMVS阵列的第1层有 N_1 个EMVS阵元(阵元间距为 d_y),第2层有 N_2 个EMVS阵元(阵元间距为 $(N_1 + 1)d_y$)。图中红色(黑色、蓝色)短实线分别代表轴向分别平行于 $x(y, z)$ 轴的偶极子,红色(黑色、蓝色)(椭圆)分别代表法线方向分别平行于 $x(y, z)$ 轴的磁环。

虽然图2所示阵列拥有无模糊估计多维参数的潜能,但该阵列中紧凑的非正交磁环和偶极子会导致其存在较为严重的EMVS阵元内互耦效应,为解决上述问题,除了自校正方法^[39],现有发表文献给出了两种潜在的解决方案。一种解决EMVS阵元内互耦效应的思路为将共点的EMVS进行非共点拉伸,从而减小共点配置导致的较强互耦效应。文献^[28]给出了一种稀疏拉伸每个EMVS阵元的方法,具体如图3所示。为便于应用拉伸EMVS的“矢量叉积”性质,该稀疏拉伸EMVS阵列的稀疏拉伸方式为3个偶极子和3个磁环的中心均与 x 轴平行,轴向与 x 轴平行的偶极子和轴向与 y 轴平行的偶极子的距离为 Δ_{xy} ,轴向与 y 轴平行的偶极子和轴向与 z 轴平行的偶极子的距离为 Δ_{yz} ,法线方向与 x 轴平行的磁环和法线方向与 y 轴平行的磁环的距离为 Δ_{xy} ,法线方向与 y 轴平行的磁环和法线方向与 z 轴平行的磁环的距离为 Δ_{yz} 。

另一种解决EMVS阵元内互耦效应的思路为将成对的正交磁环和偶极子进行拉伸,该解决方案利用正交磁环和偶极子具有较小互耦效应的特点,还可基于正交磁环和偶极子的轴向拉伸以进一步减小互耦效应,并且还可利用正交磁环和偶极子实现信号水平极化分量和垂直极化分量的独立接收。受文献^[40]中平行多极化阵列设计方法的启发,文献^[18]给出了一种平行非共点稀疏COLD阵列如图4所示,该阵列的设计思路如下:①以成对的方式沿 z 轴拉伸偶极子和磁环天线;②偶极子和磁环天线

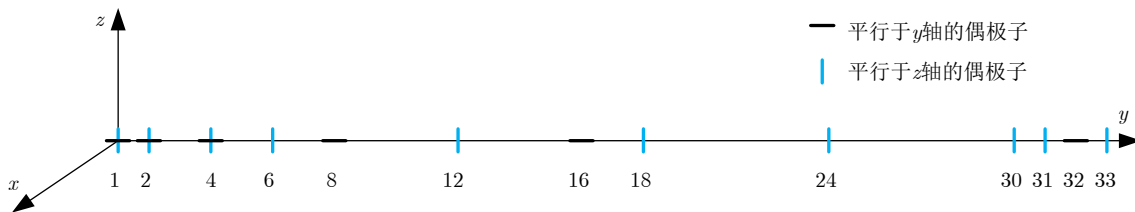


图1 由6个NA偶极子阵元(轴向平行于 y 轴)及10个偶极子ANA阵元(轴向平行于 z 轴)组成的稀疏多极化阵列结构示意图

Fig. 1 Sparse diversely polarized array composed of 6 NA dipoles (axial directions parallel to the y -axis) and 10 ANA dipoles (axial directions parallel to the z -axis)

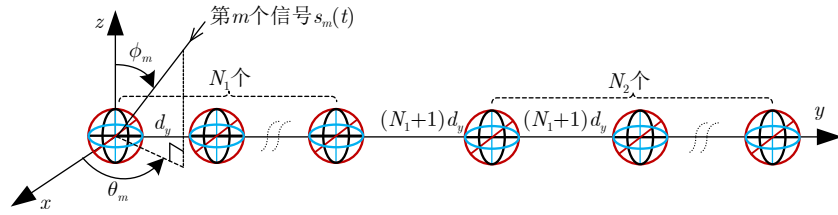


图 2 由两层嵌套EMVS阵列组成的稀疏多极化阵列结构示意图

Fig. 2 Sparse diversely polarized array composed of two-layer nested EMVS subarrays

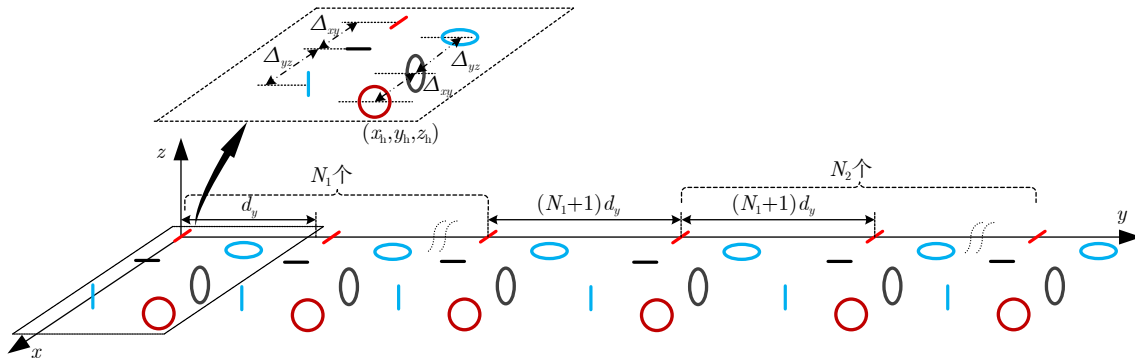


图 3 由两层嵌套稀疏拉伸EMVS阵列组成的稀疏多极化阵列结构示意图

Fig. 3 Sparse diversely polarized array composed of two-layer nested sparse stretched EMVS subarrays

的距离不大于半个信号波长, 以不至于引起二维 DOA 估计模糊; ③偶极子和磁环天线对在常见稀疏阵(如嵌套阵和增广嵌套阵等)位置上配置。

(2) 均匀稀疏多极化阵列设计

非均匀稀疏多极化阵列需要系统性地设计阵元位置, 而均匀稀疏多极化阵列的阵元位置为均匀稀疏布设, 因而优化设计过程相对简单, 实际中可应用EMVS、三正交偶极子和三正交磁环等多极化阵列的“矢量叉积”特性^[38,41], 对多极化阵列进行均匀性稀疏化配置。文献[42]给出了一种由EMVS以矩形结构均匀稀疏摆放构成的稀疏多极化阵列(如图5所示), 基于该阵列的稀疏性带来的阵列扩展孔径和共点EMVS的“矢量叉积”特性可实现无模糊的高精度多维参数估计。

尽管图5所示阵列在理想情况下拥有较高的多维参数估计精度, 然而与图2所示的稀疏多极化阵列类似, 图5所示阵列同样面临较强的EMVS阵元内互耦效应, 文献[43]给出了一种利用3种指向偶极子组成的具有更少阵元的空域分置交叉偶极子稀疏多极化阵列(如图6所示), 避免了紧凑的非正交磁环和偶极子导致的较强互耦效应, 继而可利用构建的阵列空间旋转不变性实现高精度的多维参数估计。

虽然图6所示阵列拥有较小的互耦效应, 但该阵列中共心配置的交叉偶极子在实际中存在由于制造中的非严格正交导致的互耦误差。文献[44,45]分别提出了一种拉伸L型稀疏多极化阵列和一种空域

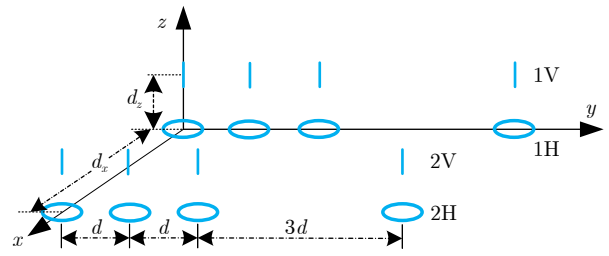


图 4 一种平行非共点稀疏COLD阵列结构示意图

Fig. 4 Parallel non-collocated sparse COLD array

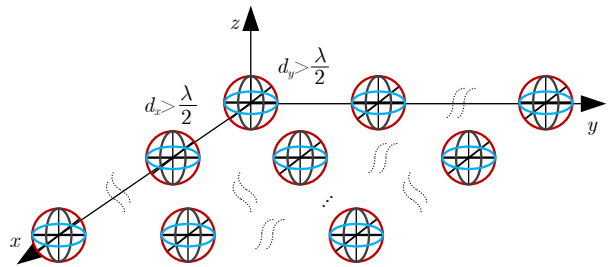


图 5 由EMVS构成的矩形稀疏多极化阵列结构示意图

Fig. 5 Rectangular sparse diversely polarized array constructed by EMVS

分置交叉偶极子稀疏矩形多极化阵列, 具体分别如图7和图8所示, 上述阵列由于其对所有偶极子进行拉伸和空域分置从而避免了潜在的互耦误差, 并且可基于该扩大孔径阵列的空间旋转不变性实现更高精度的多维参数估计。

尽管上述两种阵列有效避免了阵元共点配置导

致的互耦误差,但上述两种阵列未能对EMVS、三正交偶极子和三正交磁环等多极化阵列的“矢量叉积”特性进行有效发掘。为充分利用“矢量叉积”特性在多极化阵列中的潜力,下面给出了一种轴向平行多线性稀疏多极化阵列(如图9所示),该设计不仅可避免阵元共点配置导致的互耦误差,还可基于各子阵导引阵元带来的时延补偿,并充分利用“矢

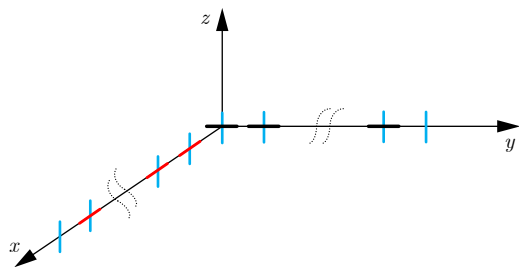


图6 由3种指向的偶极子组成的稀疏L型多极化阵列结构示意图

Fig. 6 Sparse L-shaped diversely polarized array composed of dipoles with three directions

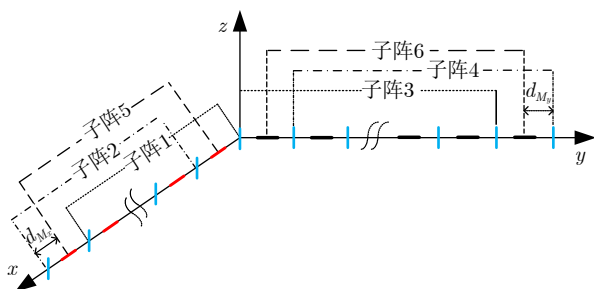


图7 拉伸L型稀疏多极化阵列结构示意图

Fig. 7 Stretched L-shaped sparse diversely polarized array

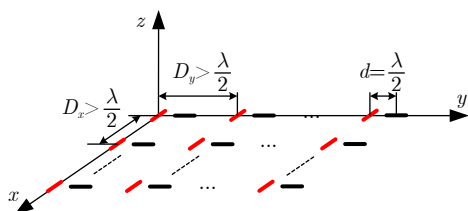


图8 空域分置交叉偶极子稀疏矩形多极化阵列结构示意图

Fig. 8 Sparse rectangular diversely polarized array composed of spatially distributed cross-dipoles

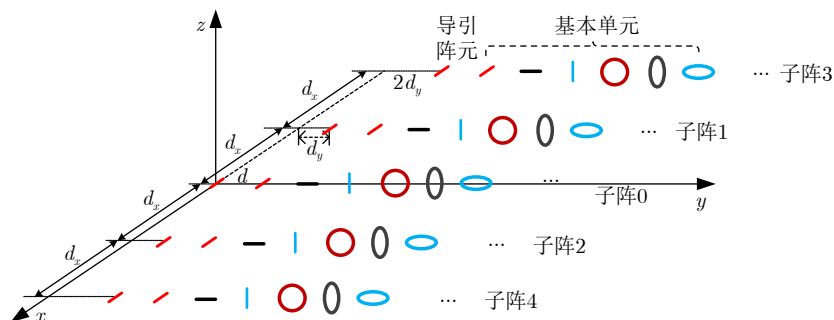


图9 轴向平移多线性稀疏多极化阵列结构示意图

Fig. 9 Axial translation multilinear sparse diversely polarized array

量叉积”特性,最终基于对各子阵间构造起来的虚拟旋转不变性实现多维参数的高精度无模糊估计。

(3) 混合均匀与非均匀稀疏多极化阵列设计

不同于单独研究多极化阵列的均匀或非均匀稀疏化配置设计方法,研究混合均匀与非均匀多极化阵列的联合稀疏配置可进一步丰富稀疏多极化阵列的稀疏化设计种类,并蕴含增加信号参数估计精度的潜力,下面分别给出混合均匀与非均匀稀疏多极化阵列的两种最基本配置方法:

① 以非均匀稀疏阵为子阵均匀稀疏摆放的混合稀疏多极化阵列

基于文献[38]给出的空域分置EMVS,图10给出了一种以空域分置EMVS(非均匀稀疏)为子阵均匀稀疏摆放构成的混合稀疏多极化阵列,由图可见基本单元的内部结构和最终稀疏化的阵列结构。可基于该阵列均匀稀疏子阵所构造的平移不变性实现有模糊的精估计,并利用空域分置EMVS的“矢量叉积”特性实现多维参数有模糊精估计的去模糊,最终实现多维参数的无模糊高精度估计。

② 以均匀稀疏阵为子阵非均匀稀疏摆放的混合稀疏多极化阵列

图11给出了本方案下的一种混合稀疏多极化阵列:首先在 x 轴等间距稀疏配置多极化子阵,接着以该多极化子阵为基本单元在 y 轴非均匀稀疏配置,图11中所示阵列以嵌套阵(第1层子阵数为3,第2层子阵数为2)的稀疏配置方式为例。可对所有的平行子阵接收数据进行平滑操作,进而虚拟构建为图12所示阵列对应的虚拟接收数据,然后基于该虚拟接收数据以及“矢量叉积”特性实现多维参数的高精度估计。

上述混合稀疏多极化阵列基于合理优化设计混合均匀与非均匀稀疏多极化阵列中的均匀稀疏和非均匀稀疏部分,利用了如阵列的对称、平行、所构造的虚拟多极化旋转不变等特性,可最终基于所设计阵列的接收数据并通过数据变换实现多参数的高精度估计。值得指出的是,稀疏多极化阵列的设计是一个全局统筹优化过程,需要系统性地从多角度

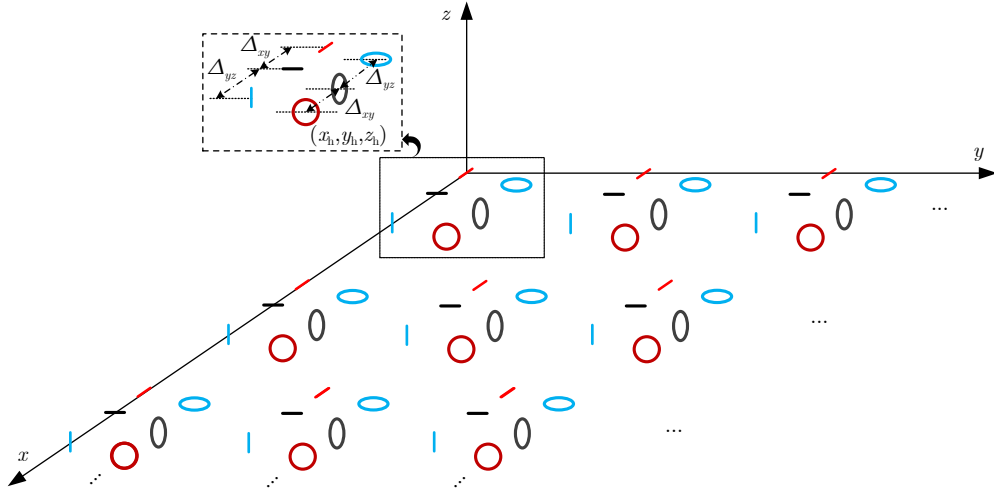


图 10 以非均匀稀疏阵为子阵均匀稀疏摆放的多极化阵列结构示意图

Fig. 10 Diversely polarized array composed of uniformly distributed non-uniform sparse subarrays

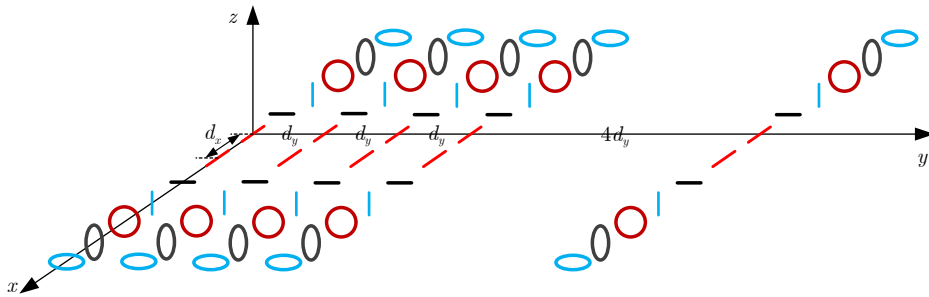


图 11 以均匀稀疏阵为子阵非均匀稀疏摆放的多极化阵列示意图

Fig. 11 Diversely polarized array composed of non-uniformly distributed uniform sparse subarrays

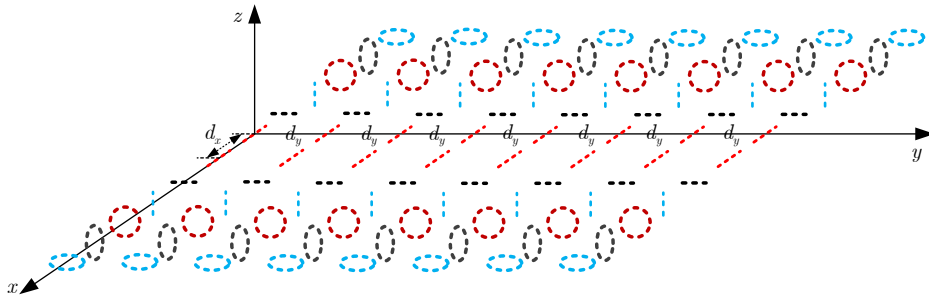


图 12 图11所对应的均匀配置多极化阵列示意图

Fig. 12 Uniformly distributed diversely polarized array corresponding to Fig. 11

综合考虑与评估,如角度分辨精度、多维参数估计精度、波束形成性能优劣和计算复杂度等。

3 未来展望

目前,稀疏多极化阵列的研究已经取得了大量成果,显示出十分广阔的前景。下述5个研究方向极具潜力成为稀疏多极化阵列未来研究的重要探索方向。

3.1 基于深度学习的稀疏多极化阵列优化设计研究

近年来随着深度学习技术的迅速发展,数据化

驱动的智能深度学习为稀疏多极化阵列优化设计研究提供了新的思路和有利的技术支持,尤其是在解决天线最优选择问题时,深度学习技术在性能优化和计算效率提升等方面展现出传统方法难以比拟的优势。

传统的稀疏阵列设计问题,可以认为是在给定天线阵元数量时,明确其最佳摆放位置或选取天线阵元的最佳子集问题。最佳的天线阵元选择可以获取更大的阵列物理孔径并实现更高的角度分辨精度^[46,47],因此优化天线阵元选择的重要性不言而喻。

喻。然而除了已经得到大量验证的嵌套阵、互质阵等少数阵型结构, 通常很难获得其他合理化稀疏配置的阵元位置闭式解。从算法角度看搜寻最优配置的稀疏阵列是一个随着阵元数增加而计算复杂度也增加的组合问题, 或是凸优化问题。采取组合优化和凸松弛算法, 可通过对具体目标函数求最值以获取最优子阵列^[46-48]。

但搜索类或贪婪算法在计算复杂度方面不具备优势, 因此基于深度学习的合理化稀疏阵列配置逐渐进入人们视野, 并被证明相比于传统方法具有更高的计算效率。如文献^[49,50]研究了基于深度学习的毫米波大规模MIMO系统的天线选择和混合波束形成器设计问题, 并设计了两个卷积神经网络以解决这两个分类问题, 所提出的卷积神经网络框架相比传统方法具有更好的性能。此外, 基于深度学习的稀疏阵列设计相关研究还包括: 文献^[51]构建了一个有源天线选择网络, 用于可重构智能超表面辅助通信的深度学习优化稀疏天线激活, 该网络利用概率采样理论来选择这些有源天线的最佳位置, 并进一步设计了基于深度学习的信道外推方案和波束搜索方案, 所提出的最优天线选择方案被证明优于一般均匀天线选择方案; 文献^[52]研究了一种基于增强深度学习的天线选择方法, 为DOA估计提供了一种稀疏线性阵列结构的选择方案, 与传统的深度学习方法相比, 该改进型方法通过约束组合集以保留无孔子阵列, 具有更优异的DOA估计性能。

前述基于深度学习技术的阵列优化设计研究极大地丰富了稀疏阵列设计方法的多样性并提高了效率和性能, 但所提方法均是用于稀疏标量阵列。稀疏多极化阵列的设计一方面面临着与稀疏标量阵列设计类似的问题, 即合理化稀疏配置; 另一方面还需要对天线阵元的极化方式进行最优化选择。考虑到稀疏多极化阵列设计的更加复杂性以及稀疏多极化阵列相较于稀疏单极化阵列在改善极化失配、进一步提高角度估计精度、提取更多极化信息的巨大优势和广阔应用前景, 基于深度学习技术对稀疏多极化阵列的稀疏方式和极化方式进行优化设计将是未来十分重要的一个研究方向。

3.2 稀疏多极化MIMO雷达研究

MIMO雷达相较于传统相控阵雷达存在着诸多技术进步, 深度融合稀疏多极化阵列在减小极化失配、提升阵列自由度、降低互耦效应、减小成本等方面拥有的优势(相较于稀疏标量阵列和均匀多极化阵列), 进而对稀疏多极化MIMO雷达的系统性研究具有广阔的应用前景。

21世纪初, 美国林肯实验室的Bliss和Forsythe^[53]首次将无线通信领域的MIMO理论引入雷达领域, 并提出MIMO雷达的概念。MIMO雷达由多个发射天线组成发射端、多个接收天线组成接收端, 并在发射端向目标发射正交信号, 在接收端接收目标反射的回波信号后经匹配滤波器组实现各路信号的分离。根据收发天线布置间距的大小可将MIMO雷达分为分布式MIMO雷达和集中式MIMO雷达。分布式MIMO雷达收发天线布置间距较大, 可从多个视角观测目标, 获得空间分集增益, 从而改善RCS闪烁效应。集中式和分布式MIMO雷达的各发射单元均可发射所设计的不同信号波形, 获得不同的波形分集增益, 在提升抑制杂波和抗干扰能力、提高测角精度和目标跟踪性能等方面具有显著优势。这些优势也吸引许多学者研究将MIMO雷达应用于波离方向(Direction-of-Departure, DOD)和DOA估计^[20,54-75]。

稀疏多极化MIMO雷达的研究也逐渐进入人们视野, 其发展脉络大致可以被总结如图13所示。最开始出现的均匀MIMO雷达较之相控阵雷达增加了波形分集技术, 处理数据时可以得到更大的虚拟天线孔径, 因而具有更高的自由度^[76]。相比于均匀MIMO雷达, 稀疏MIMO雷达能用较少的阵元获得相同的虚拟天线孔径, 在阵元数相同时具有更大的自由度, 并且能减小阵元间的互耦效应, 进而具有更强的角度分辨能力; 通过稀疏布置可在具有相同阵列孔径的情况下减少系统阵元数, 节省系统成本。此外, 相比于其他体制的雷达, 稀疏MIMO雷达采用稀疏布阵时能量利用率更高^[76]。因此, 近年来涌现出一些MIMO雷达合理化稀疏配置并将其用于提升角度估计性能的研究, 其中稀疏配置方式以最小冗

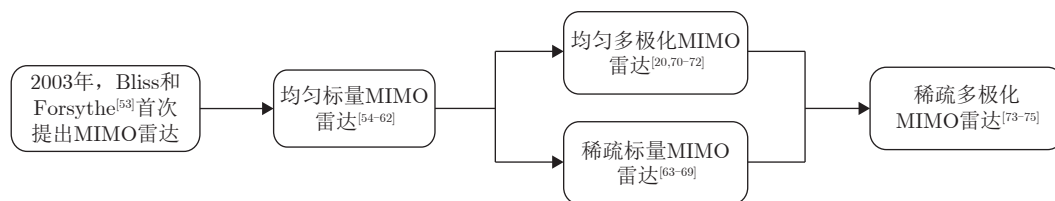


图 13 从传统MIMO雷达到稀疏多极化MIMO雷达的发展脉络

Fig. 13 Evolution from traditional MIMO radar to sparse diversely polarized MIMO radar

余阵列结构^[63,64]、嵌套阵列结构^[65,66]和互质阵列结构^[67,68]及它们的扩展形式^[69]为主。

上述有关MIMO雷达的研究均采用的是单极化天线,而采用多极化天线作为MIMO雷达的收发天线阵元,可以减小极化失配带来的影响,提高信号处理的稳健性,并且可感知信号的极化信息,因此多极化MIMO雷达^[70-72]受到了广泛关注,相关研究多采用均匀摆放的EMVS作为收发天线阵元。基于融合稀疏MIMO雷达和多极化天线的优势、进一步提升均匀多极化MIMO雷达性能的愿景,研究采用稀疏多极化天线作为收发天线阵元的稀疏多极化MIMO雷达成为极具吸引力的课题。目前已有的相关研究包括互质EMVS-MIMO雷达的二维DOD和二维DOA联合估计方法^[73]、双基地互质EMVS-MIMO雷达的传播算子方法^[74]和双基地稀疏EMVS-MIMO雷达的高分辨自匹配二维DOD和二维DOA估计方法^[75]等。上述所提到的多种类型MIMO雷达的主要优势和缺点总结如表2所示。

可以看出,稀疏多极化MIMO雷达具有多种技术的集成优势,主要包括以下几个方面:(1)提升自由度,在天线阵元数有限的情况下提高角度分辨精度;(2)降低互耦效应,减小互耦效应带来的角度估计精度损失;(3)在大规模应用的场景下,降低系统成本和硬件开销;(4)相比于单极化天线的雷达系统可以减少极化失配带来的角度估计精度损失,增加信号极化信息处理能力。而现有稀疏多极化MIMO雷达的相关研究不仅数量偏少,在稀疏配置和多极化配置的方式上也有很大的改进空间。因此,在不断优化相关技术性能并提高其稳定性和实用性的基础上,稀疏多极化MIMO雷达具有很好的应用前景,相关研究将成为一个重要发展方向。

3.3 稀疏PFDA雷达和稀疏PFDA-MIMO雷达研究

FDA雷达作为一种新型雷达,因其在探测目标距离方面的优势而受到了广泛关注,FDA-MIMO雷达融合了FDA和MIMO两大体制的优势,而稀疏PFDA-MIMO雷达还将兼具提升阵列自由度、降低互耦效应、减小极化失配、提高角度分辨精度和减小成本等优点,是极具潜力的一个发展方向。

传统的相控阵雷达只能提供与方位有关的波束方向图,因此无法直接通过其波束方向图对同一方位不同距离的目标进行分辨。为解决这一问题,美国空军实验室的Antonik等人^[77-81]于2006年首次提出了FDA的概念。与相控阵雷达相比,FDA雷达的主要优势在于,基于各阵元间存在的一个极小频率增量,生成与距离、角度、时间和频率增量有关的波束方向图,为雷达对目标距离域的探测提供支持,其相关研究也在通信领域得到一定应用^[82,83]。FDA雷达引入MIMO技术时则成为FDA-MIMO雷达^[84]。基本的FDA雷达存在距离-角度耦合问题,在进行角度分辨时容易产生估计模糊,而FDA-MIMO雷达通过增加阵列自由度能有效降低模糊。因此FDA-MIMO雷达可被用来区分距离模糊的目标信号^[85],以及用来追踪运动中的目标并对其进行DOD和DOA估计^[86-89]。

FDA雷达因具有距离-角度二维相关特性,在抑制传统相控阵难以抑制的主瓣干扰方面具有极大应用潜力。FDA-MIMO雷达在提升FDA雷达性能的同时也具有良好的抗干扰及抗主瓣欺骗式干扰能力^[90-92]。下面给出目前FDA-MIMO雷达抗主瓣欺骗式干扰的主要方法:首先是基于真实目标和假目标在距离维上差异的自适应波束形成抗干扰方法^[93],该方法依据目标测距结果和脉冲延迟数分别与回波信号主值距离和模糊次数的比较结果,对真、假目

表 2 标量与多极化MIMO雷达优缺点总结

Tab. 2 Summary of advantages and disadvantages of scalar and diversely polarized MIMO radars

MIMO雷达类型	主要优势	主要缺点
标量	均匀 ^[54-62] 生成虚拟阵列, 增加阵列孔径和自由度 ^[76] 最小冗余 ^[63,64] 1 进一步提升阵列孔径和自由度; 稀疏 ^[63,69] 2 减小阵元间互耦效应, 提高角 嵌套 ^[65,66] 度估计精度; 互质 ^[67,68] 3 降低系统成本	1 阵元间互耦效应降低估计精度; 2 系统成本较高 1 阵元位置求解较复杂; 2 缺少阵列孔径的一般表达式 存在间距较密阵元导致的互耦效应 差合阵存在孔洞 1 极化失配造成估计精度损失; 2 无法感知信号极化信息
多极化	均匀 ^[20,70-72] 减小极化失配, 提升角度估计精度, 增强极化信息处理能力 稀疏 ^[73-75] 生成虚拟阵列, 增加阵列孔径和自由度 1 进一步提升阵列孔径和自由度; 2 减小阵元间互耦效应, 提高角度估计精度; 3 降低系统成本	1 阵元间互耦效应降低估计精度; 2 系统成本较高 阵列的多极化合理配置仍是一大难点

标进行鉴别,随后通过进行发射距离频率补偿和自适应匹配滤波实现真、假目标的分离;在目标先验参数未知时,上述自适应波束形成抗干扰方法难以区分角度相同的真、假目标,有学者提出了基于盲源分离的抗干扰方法^[94],该方法能够分离出和目标角度相同的干扰,再基于目标和干扰的距离维差异对干扰进行抑制;此外,在目标先验参数未知时,自适应波束形成抗干扰方法还存在协方差矩阵重建较难的问题,有学者提出基于空间投影的抗干扰方法^[95],该方法根据一个主瓣接收区域的子空间构造出主瓣接收区域内的投影矩阵,并对主瓣方向的干扰目标样本进行挑选;但空间投影方法会出现在弱信号和低快拍情况下性能下降问题,因此有学者进一步提出了特征向量剔除抗干扰方法^[96],该方法在角度、距离约束范围内,对目标导向矢量进行约束,并求出目标导向矢量中与信号子空间具有最强相关特性的特征向量,随后在协方差矩阵中剔除这些特征向量,并基于对角加载技术改进协方差矩阵小特征值抖动带来的算法性能下降问题。FDA雷达以及FDA-MIMO雷达在提升目标分辨精度和抗干扰能力方面的优势使得二者逐渐成为研究热点,目前FDA雷达和FDA-MIMO雷达的发展呈现出稀疏化和多极化的趋势。

首先由于稀疏阵列相较于均匀阵列在提升阵列孔径和降低系统成本等方面的优势,以及FDA雷达空间和距离分辨率受阵列几何形状和频率偏移限制的因素,涌现出了许多稀疏FDA雷达或稀疏FDA-MIMO雷达的研究。文献^[97]提出了一种基于稀疏重建的多目标定位方法,该方法结合了互质FDA雷达的互质频率偏移,可以在天线数量和频率数量相同的情况下实现更多目标的定位,并被验证相比传统均匀FDA雷达具有更精确的角度定位分辨率;文献^[98]针对互质FDA雷达提出了基于双Toeplitz插值的DOA-距离联合估计方法;文献^[99]研究了稀疏FDA-MIMO雷达的优化设计,提出了FDA-MIMO雷达的一种稀疏变换形式,其和传统FDA-MIMO雷达相比在减少50%带宽和阵元数的情况下获得了相近的性能。稀疏FDA-MIMO雷达的另一大优势在于其可以提升FDA-MIMO雷达的抗干扰能力。传统均匀FDA-MIMO雷达的自由度受阵元数目的限制,因而其抗干扰能力受到了制约。稀疏FDA-MIMO雷达可以在相同阵元数的情况下提供更高的阵列自由度和更大的阵列孔径,进而分辨更多目标的真伪,从而采用更少的物理阵元和更低的硬件开销实现最大限度地抑制干扰的影响。阵元的稀疏布置还可以减小阵元间互耦效应带

来的影响,有利于FDA-MIMO雷达进一步发挥其抗干扰优势。将FDA和MIMO两种体制相结合已成为目前频率分集阵研究的一个主要发展方向,在引入稀疏阵列后,通过充分利用其距离-角度二维相关特性,稀疏FDA-MIMO雷达将在提升阵列自由度、目标估计精度和抗干扰能力方面发挥潜在的性能优势。

其次考虑到多极化阵列相较于单极化阵列在减小极化失配带来的信号处理性能损失及获取更多信号极化信息等方面的优势,涌现了一些PFDA-MIMO雷达的相关研究,如基于子空间类方法的DOA-距离-极化联合估计的算法研究^[100,101]。然而,目前还鲜有采用稀疏布阵的PFDA雷达或PFDA-MIMO雷达的相关公开文献,其相关研究呈现出了巨大的潜在价值。前述内容所提到多种FDA各有其独到的优势,下面给出现有主流FDA雷达相关方法的优势总结,如表3所示。

综上所述,深度融合FDA/FDA-MIMO雷达技术和稀疏多极化阵列优化技术,研究设计稀疏PFDA/PFDA-MIMO雷达可获得多种技术各自的潜在优势集合,至少包括以下几个方面:(1)可以区分距离模糊的目标信号,对运动中的目标进行角度估计;(2)相较于其他体制雷达具有更强的抗干扰能力;(3)在阵元数相同的情况下具有更高的阵列自由度和更大的阵列孔径;(4)可以减小阵元间互耦效应带来的精度损失,提升角度分辨精度;(5)降低系统成本和硬件开销;(6)减少极化失配带来的精度损失,进一步提高角度分辨精度。遗憾的是目前PFDA-MIMO雷达的相关研究尚且十分匮乏。基于上述讨论,稀疏多极化FDA/FDA-MIMO雷达或将成为频率分集阵中十分重要且很有前景的研究方向之一。

3.4 稀疏多极化智能超表面研究

超表面因其在电磁波特性控制和提高增益方面显著的优点,近年来受到越来越多的关注,尤其是RIS已经成为电磁领域一大研究热点。考虑到RIS大规模应用的因素,基于节省成本和改善性能的愿景,稀疏多极化RIS或将成为未来一大重要研究方向。

超表面于2011年被哈佛大学Cappaso课题组^[102]首次提出,可被认为是一种人工微结构材料——电磁超材料的二维形式。研究人员可通过设计超表面结构单元及排布对电磁波实现调控,且超表面具有低损耗、厚度薄、便于加工等特点,因此用于改善天线性能是其在电磁领域的主要应用之一。在宏观

表 3 FDA雷达、FDA-MIMO雷达和PFDA-MIMO雷达优点总结

Tab. 3 Summary of potential advantages of FDA radar, FDA-MIMO radar and PFDA-MIMO radar

类型	优势
FDA雷达 ^[77-81]	可获得时间、距离、角度相关的方向图
均匀FDA-MIMO雷达 ^[85-89]	1 可以区分距离模糊的目标信号; 2 具有抗主瓣干扰能力
FDA-MIMO雷达	1 具有更高阵列自由度和阵列孔径; 2 减小阵元间互耦效应带来的精度损失;
稀疏FDA-MIMO雷达 ^[98,99]	3 降低系统成本; 4 克服FDA-MIMO雷达的空间和距离分辨率受阵列几何形状和频率偏移的限制; 5 抗干扰个数增加, 抗干扰能力增强
PFDA-MIMO雷达 ^[100,101]	减少极化失配带来的精度损失, 进一步提升角度分辨精度, 增加极化信息感知能力

结构上, 超表面由多个单元沿横向周期或准周期排列, 与阵列天线类似^[103], 因此也引起了学术界对于利用超表面实现阵列天线性能越来越浓厚的兴趣^[104-106]。

然而, 传统超表面一旦被设计并制造则具有固定功能, 这限制了其适用范围。2014年, 崔铁军等人^[107]将“可重构”的概念引入超表面的领域, 利用数字编码代替等效媒质描述超材料, 首次提出可重构超材料的概念, 使人们可以实现对超材料表面电磁波特性的实时调控。这一概念一被提出就迅速成为研究热点。利用大量可重构超表面单元构成的超表面, 被称为RIS或IRS。RIS技术的出现使得对电磁波的电磁特性进行实时调控成为可能。

目前将RIS的反射单元用来调控入射电磁波相位的研究相对较多^[108-111], 但除此之外, 极化作为电磁波最重要的电磁特性之一也受到重点关注。传统的极化转换表面由特定几何形状的基本金属单元结构按照周期排列而成, 以固定方式转换入射电磁波的极化方式, 制备完成后无法调控其对电磁波的极化转换方式。多极化RIS^[112-116]则克服了这一问题, 研究人员发现可以通过PIN二极管^[83]、电控开关^[84,35]或石墨烯^[36]调控多极化RIS对入射波的极化方式进行转换, 使其在不同控制模式下分别产生不同极化方式的反射波。

目前关于各种RIS的应用已有诸多相关研究, RIS可以人为创造一个智能、可编程的无线传播环境, 提高接收器的信号接收质量, 因此被广泛应用于无线通信领域^[109,117-128]。此外还可以利用多RIS配合以实现更优的信号处理性能, 如文献^[129]研究的基于多RIS的无人机群高效DOA估计方法。随着RIS在多个领域越来越多的应用, 有学者考虑到大规模应用场景下的成本问题, 以及均匀RIS阵列的较高功耗和耦合效应等问题。为了在不影响性能的前提下减小功耗, 并尽可能避免超表面单元之间以及调控单元之间的耦合效应, 应该使用RIS中的部

分超表面单元而不是全部, 故稀疏RIS的优化设计研究显得尤为必要, 例如文献^[51]提出了基于深度学习的稀疏RIS天线单元选择方案。

同理, 多极化RIS的稀疏布阵在将来大规模应用场景下也是十分必要的, 但目前还鲜有相关研究, 利用多极化RIS进行稀疏优化设计的潜力还有待进一步发掘。图14和图15展示了两种不同类型的稀疏多极化RIS, 其中图14(a)、图14(b)和图15(a)、图15(b)分别展示了该稀疏多极化RIS中部分反射单元在不同控制指令下对同一种入射极化信号的不同反射方式, 即将线极化的入射信号分别反射为线极化和圆极化的信号。图中红色箭头代表入射、反射信号, 箭头上的平面正弦曲线和空间螺旋曲线分别表示信号的线极化方式和圆极化方式。

未来, 在不同的应用场景下, 如何优化稀疏多极化RIS的稀疏多极化优化配置方式并用于改善信号处理性能、降低系统成本, 将成为一个具有重大意义的研究课题, 相关研究具有很好的应用前景。

3.5 稀疏多极化阵列在家居智能通信和工业物联网等复杂室内场景下的应用

当前, 复杂室内环境下的通信已经成为无线通信的主要应用场景(如家居智能通信和工业物联网), 如何提升复杂室内环境下通信的性能和稳定性具有巨大的研究价值和现实意义, 而稀疏多极化阵列由于其在提升性能方面显著的优势, 以及轻量化、易集成、低成本等特点在其中将发挥不可忽视的作用。

在研究复杂室内环境下无线通信性能的成果中, 文献^[130,131]分析了不同建筑布局下室内无线通信性能的差异, 可为室内无线通信性能的预测和评估、通信资源优化等提供理论和技术支撑, 这方面的研究有望应用于未来民用建筑行业。除了上述侧重于建筑空间设计的研究之外, 有许多学者着眼于改善无线通信硬件以提升室内无线通信性能, 如增加室内基站或接入点数量^[132,133], 合理化铺设MIMO^[134]

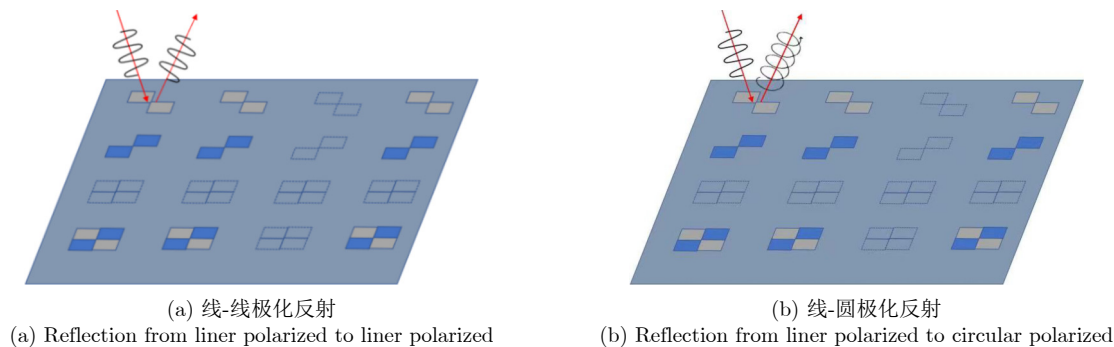


图 14 稀疏多极化RIS示意图(一种多极化配置方式)

Fig. 14 Sparse polarimetric RIS (one diversely polarized configuration)

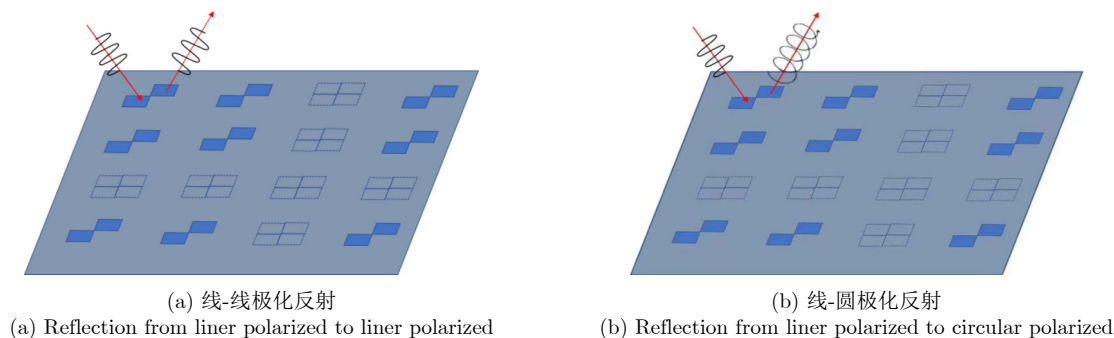


图 15 稀疏多极化RIS示意图(另一种多极化配置方式)

Fig. 15 Sparse polarimetric RIS (another diversely polarized configuration)

或RIS^[135]设备等。这样直接有效的方式目前看来是实际应用于提升室内无线通信性能的主流，但现有研究还未考虑到稀疏化与多极化布阵。稀疏多极化阵列与稀疏标量阵列相比具有提升对接收电磁波极化信息的处理能力等优势，与均匀多极化阵列相比在相同阵列孔径的前提下具有低硬件成本开销和低互耦等优势。因此，在未来可能大规模室内阵列天线铺设的场景下，阵列合理化的稀疏多极化配置显得很有必要。

以上所提到的通过增加硬件设备提升室内无线通信性能的方法虽直接而有效，但它们都需要额外占用室内空间，因此出于节省室内空间成本的考虑，研究人员开始关注将天线阵列集成于建筑材料内以提升室内无线通信效果，这就要求必须考虑到建筑材料的物理特性对无线通信性能的影响^[136,137]。文献^[138]提出一种系统分析与天线阵列集成的建筑材料的物理特性对无线通信性能影响的模型和分析方法，并指出天线阵列在建筑材料中的集成深度和墙体厚度对室内无线通信有很大的影响。通常建筑材料越薄、阵列集成深度越浅，无线通信性能就越好。而稀疏多极化阵列具有轻量化、易集成、低成本等特点，使得建筑师在设计阶段中权衡室内无线通信性能和阵列集成深度、墙体厚度等建筑结构时

拥有更多的设计自由度。但是，也需要考虑到，阵列的大面积稀疏化可能会导致建筑内无法容纳所设计的稀疏多极化阵列。因此对于建筑内稀疏多极化阵列的稀疏优化研究也十分重要，并且应当重点关注建筑可容纳的阵列体积这一约束条件，从而在一定阵列尺寸下尽可能发挥稀疏化布阵的优势。以上讨论表明，稀疏多极化阵列在复杂室内通信场景中有望发挥极其重要的作用。

4 结语

本文深入探讨和总结了非均匀、均匀和混合均匀与非均匀稀疏多极化阵列的优化配置方式，结合多极化阵列特有的“矢量叉积”特性，依据天线阵元位置、天线阵元间距和天线极化指向等可调因素给出了现有相关研究及系统性探讨。本文的研究对于多极化阵列结构系统性优化设计、充分利用信号的极化多样性、减小阵元间互耦、提高阵列自由度和保障参数估计的稳健性等方面尤为重要。随后，本文还给出了5个未来的发展展望，首先介绍了基于深度学习的稀疏阵列合理化配置的优势，给出了该领域的部分研究成果，并对未来利用深度学习技术进行稀疏多极化阵列合理化稀疏配置进行展望；其次简要介绍了MIMO雷达的优点和应用，列举了不同类型MIMO雷达的研究成果，总结了其主要优

势和缺点,并探讨了稀疏多极化MIMO雷达研究的重要性;随后简要介绍了FDA雷达及FDA-MIMO雷达的优点和应用,给出了不同类型FDA雷达和FDA-MIMO雷达研究成果,并展望了稀疏PFDA雷达和稀疏PFDA-MIMO雷达的相关研究;此外,还介绍了稀疏多极化RIS的相关研究与展望;最后,介绍了改善室内场景下无线通信性能的主要方法,对稀疏多极化阵列在家居智能通信和工业物联网等复杂室内场景下的应用前景进行展望。

本文的研究可为雷达信号处理和无线通信等领域的实际稀疏多极化阵列阵型优化设计提供理论支撑和技术保障,对完善稀疏阵列信号处理的相关方法 and 应用研究具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- [1] HE Jin, WANG Yijing, SHU Ting, *et al.* Polarization, angle, and delay estimation for tri-polarized systems in multipath environments[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(8): 5828–5841. doi: [10.1109/TWC.2022.3143834](#).
- [2] ZHU Dalin, CHOI J, and HEATH R W. Two-dimensional AoD and AoA acquisition for wideband millimeter-wave systems with dual-polarized MIMO[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(12): 7890–7905. doi: [10.1109/TWC.2017.2754369](#).
- [3] YUE Yaxing, XU Yougen, LIU Zhiwen, *et al.* Parameter estimation of coexisted circular and strictly noncircular sources using diversely polarized antennas[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(9): 1822–1825. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2849402](#).
- [4] WANG Zhanling, YIN Jiapeng, PANG Chen, *et al.* An adaptive direction-dependent polarization state configuration method for high isolation in polarimetric phased array radar[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(6): 3257–3272. doi: [10.1109/TAP.2020.3037704](#).
- [5] FRIEDLANDER B. Polarization sensitivity of antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(1): 234–244. doi: [10.1109/TSP.2018.2880708](#).
- [6] SHEN Shanpu, ZHANG Yujie, CHIU C Y, *et al.* A triple-band high-gain multibeam ambient RF energy harvesting system utilizing hybrid combining[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(11): 9215–9226. doi: [10.1109/tie.2019.2952819](#).
- [7] 庄钊文, 徐振海, 肖顺平, 等. 极化敏感阵列信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
ZHUANG Zhaowen, XU Zhenhai, XIAO Shunping, *et al.* Signal Processing of Polarization Sensitive Array[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [8] ZHAO Kang, LIU Zhiwen, SHI Shuli, *et al.* Polarimetric clutter nulling space-time adaptive processing[C]. The 2020 4th International Conference on Digital Signal Processing, Chengdu, China, 2020: 331–335. doi: [10.1145/3408127.3408145](#).
- [9] KHAN S and WONG K T. A six-component vector sensor comprising electrically long dipoles and large loops - To simultaneously estimate incident sources' directions-of-arrival and polarizations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(8): 6355–6363. doi: [10.1109/TAP.2020.2988980](#).
- [10] PAL P and VAIDYANATHAN P P. Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degrees of freedom[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(8): 4167–4181. doi: [10.1109/TSP.2010.2049264](#).
- [11] LIU Jianyan, ZHANG Yanmei, LU Yilong, *et al.* Augmented nested arrays with enhanced DOF and reduced mutual coupling[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(21): 5549–5563. doi: [10.1109/TSP.2017.2736493](#).
- [12] ZHOU Chengwei, GU Yujie, FAN Xing, *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](#).
- [13] ZHENG Wang, ZHANG Xiaofei, WANG Yunfei, *et al.* Padded coprime arrays for improved DOA estimation: Exploiting hole representation and filling strategies[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 4597–4611. doi: [10.1109/TSP.2020.3013389](#).
- [14] ZHENG Zhi, WANG Wenqin, KONG Yangyang, *et al.* MISC array: A new sparse array design achieving increased degrees of freedom and reduced mutual coupling effect[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(7): 1728–1741. doi: [10.1109/TSP.2019.2897954](#).
- [15] SHEN Qing, LIU Wei, CUI Wei, *et al.* Simplified and enhanced multiple level nested arrays exploiting high-order difference co-arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(13): 3502–3515. doi: [10.1109/TSP.2019.2914887](#).
- [16] FAN Xing, ZHOU Chengwei, GU Yujie, *et al.* Toeplitz matrix reconstruction of interpolated coprime virtual array for DOA estimation[C]. 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Sydney, NSW, Australia, 2017: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2017.8108559](#).
- [17] ZHOU Chengwei, SHI Zhiguo, GU Yujie, *et al.* Coarray interpolation-based coprime array DOA estimation via covariance matrix reconstruction[C]. 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal

- Processing, Calgary, AB, Canada, 2018: 3479–3483. doi: [10.1109/ICASSP.2018.8461721](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461721).
- [18] YUE Yaxing, ZHANG Zongyu, ZHOU Chengwei, *et al.* Closed-form two-dimensional DOA and polarization joint estimation using parallel non-collocated sparse COLD arrays[C]. 2022 IEEE 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, Trondheim, Norway, 2022: 16–20. doi: [10.1109/SAM53842.2022.9827803](https://doi.org/10.1109/SAM53842.2022.9827803).
- [19] TANG Mang, SHU Ting, HE Jin, *et al.* Direction-finding and polarization estimation with spread orthogonal loop and dipole arrays[J]. *Circuits, System, and Signal Processing*, 2021, 40(12): 6401–6415. doi: [10.1007/s00034-021-01776-9](https://doi.org/10.1007/s00034-021-01776-9).
- [20] YUE Yaxing, XU Yougen, and LIU Zhiwen. Manifold separation and polarimetric element space based parameter estimation for polarimetric monostatic MIMO radar[C]. CIE Radar Conference, Haikou, China, 2021: 573–577.
- [21] SI Weijian, ZENG Fuhong, QU Zhiyu, *et al.* Two-dimensional DOA estimation via a novel sparse array consisting of coprime and nested subarrays[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(6): 1266–1270. doi: [10.1109/LCOMM.2020.2979066](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2979066).
- [22] YANG Yunlong, HOU Yuguan, MAO Xingpeng, *et al.* Stokes parameters and DOA estimation for nested polarization sensitive array in unknown nonuniform noise environment[J]. *Signal Processing*, 2020, 175: 107630. doi: [10.1016/j.sigpro.2020.107630](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107630).
- [23] HAN Keyong and NEHORAI A. Nested vector-sensor array processing via tensor modeling[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(10): 2542–2553. doi: [10.1109/TSP.2014.2314437](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2314437).
- [24] SHI Zhiguo, ZHOU Chengwei, GU Yujie, *et al.* Source estimation using coprime array: A sparse reconstruction perspective[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(3): 755–765. doi: [10.1109/JSEN.2016.2637059](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2637059).
- [25] 周成伟, 郑航, 顾宇杰, 等. 互质阵列信号处理研究进展: 波达方向估计与自适应波束成形[J]. *雷达学报*, 2019, 8(5): 558–577. doi: [10.12000/JR19068](https://doi.org/10.12000/JR19068).
- ZHOU Chengwei, ZHENG Hang, GU Yujie, *et al.* Research progress on coprime array signal processing: Direction-of-Arrival estimation and adaptive beamforming[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(5): 558–577. doi: [10.12000/JR19068](https://doi.org/10.12000/JR19068).
- [26] ZHENG Hang, SHI Zhiguo, ZHOU Chengwei, *et al.* Coupled coarray tensor CPD for DOA estimation with coprime L-shaped array[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 1545–1549. doi: [10.1109/LSP.2021.3099074](https://doi.org/10.1109/LSP.2021.3099074).
- [27] SHEN Yifan, ZHOU Chengwei, GU Yujie, *et al.* Vandermonde decomposition of coprime coarray covariance matrix for DOA estimation[C]. 2017 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Sapporo, Japan, 2017: 1–5. doi: [10.1109/SPAWC.2017.8227643](https://doi.org/10.1109/SPAWC.2017.8227643).
- [28] YANG Minglei, DING Jin, CHEN Baixiao, *et al.* A multiscale sparse array of spatially spread electromagnetic-vector-sensors for direction finding and polarization estimation[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 9807–9818. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2799905](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2799905).
- [29] LECUN Y, BENGIO Y, and HINTON G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436–444. doi: [10.1038/nature14539](https://doi.org/10.1038/nature14539).
- [30] ZHOU Xingyue, YAN Yunde, and DUAN Rui. Deep learning based on striation images for underwater and surface target classification[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(9): 1378–1382. doi: [10.1109/LSP.2019.2919102](https://doi.org/10.1109/LSP.2019.2919102).
- [31] ZHOU Xingyue, YAN Yonghong, and YANG Kunde. A multi-feature compression and fusion strategy of vertical self-contained hydrophone array[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(21): 24349–24358. doi: [10.1109/JSEN.2021.3112164](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3112164).
- [32] 朱圣棋, 余昆, 许京伟, 等. 波形分集阵列新体制雷达研究进展与展望[J]. *雷达学报*, 2021, 10(6): 795–810. doi: [10.12000/JR21188](https://doi.org/10.12000/JR21188).
- ZHU Shengqi, YU Kun, XU Jingwei, *et al.* Research progress and prospect for the novel waveform diverse array radar[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(6): 795–810. doi: [10.12000/JR21188](https://doi.org/10.12000/JR21188).
- [33] TIAN Jianghao, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* A reconfigurable ultra-wideband polarization converter based on metasurface incorporated with PIN diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(13): 135105. doi: [10.1063/1.5067383](https://doi.org/10.1063/1.5067383).
- [34] 于惠存, 曹祥玉, 高军, 等. 一种宽带可重构反射型极化旋转表面[J]. *物理学报*, 2018, 67(22): 224101. doi: [10.7498/aps.67.20181041](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181041).
- YU Huicun, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Broadband reconfigurable reflective polarization converter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(22): 224101. doi: [10.7498/aps.67.20181041](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181041).
- [35] YU Huicun, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Design of a wideband and reconfigurable polarization converter using a manipulable metasurface[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(11): 3373–3381. doi: [10.1364/OME.8.003373](https://doi.org/10.1364/OME.8.003373).
- [36] MOLERO C, PALOMARES-CABALLERO Á, ALEX-AMOR A, *et al.* Metamaterial-based reconfigurable intelligent surface: 3D meta-atoms controlled by graphene structures[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021,

- 59(6): 42–48. doi: [10.1109/MCOM.001.2001161](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2001161).
- [37] WONG K T. Direction finding/polarization estimation-dipole and/or loop triad(s)[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 679–684. doi: [10.1109/7.937478](https://doi.org/10.1109/7.937478).
- [38] WONG K T and YUAN Xin. “Vector cross-product direction-finding” with an electromagnetic vector-sensor of six orthogonally oriented but spatially noncollocating dipoles/loops[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(1): 160–171. doi: [10.1109/TSP.2010.2084085](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2084085).
- [39] YUE Yaxing, XU Yougen, ZHUANG Junpeng, *et al.* Mutual coupling self-calibration for parameter estimation with vector antennas[C]. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing, Chongqing, China, 2019: 1–5. doi: [10.1109/ICSIDP47821.2019.9173012](https://doi.org/10.1109/ICSIDP47821.2019.9173012).
- [40] YUE Yaxing, XU Yougen, and LIU Zhiwen. Closed-form two-dimensional DOA and polarization estimation of coexisted circular and noncircular signals[C]. CIE Radar Conference, Haikou, China, 2021: 1556–1560.
- [41] GONG Xiaofeng, JIANG Jiacheng, LI Hui, *et al.* Spatially spread dipole/loop quint for vector-cross-product-based direction finding and polarisation estimation[J]. *IET Signal Processing*, 2018, 12(5): 636–642. doi: [10.1049/iet-spr.2017.0232](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2017.0232).
- [42] ZOLTOWSKI M D and WONG K T. ESPRIT-based 2-D direction finding with a sparse uniform array of electromagnetic vector sensors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(8): 2195–2204. doi: [10.1109/78.852000](https://doi.org/10.1109/78.852000).
- [43] 司伟建, 周炯赛, 曲志昱. 稀疏极化敏感阵列的波达方向和极化参数联合估计[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5): 1129–1134. doi: [10.11999/JEIT150840](https://doi.org/10.11999/JEIT150840).
SI Jianwei, ZHOU Jiongshai, and QU Zhiyu. Joint DOA and polarization estimation with sparsely distributed polarization sensitive array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(5): 1129–1134. doi: [10.11999/JEIT150840](https://doi.org/10.11999/JEIT150840).
- [44] 马慧慧, 陶海红. 稀疏拉伸式L型极化敏感阵列的二维波达方向和极化参数联合估计[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(4): 902–909. doi: [10.11999/JEIT190208](https://doi.org/10.11999/JEIT190208).
MA Huihui and TAO Haihong. Joint 2D-DOA and polarization parameter estimation with sparsely stretched l-shaped polarization sensitive array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(4): 902–909. doi: [10.11999/JEIT190208](https://doi.org/10.11999/JEIT190208).
- [45] ZHENG Guimei. Two-dimensional DOA estimation for polarization sensitive array consisted of spatially spread crossed-dipole[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(12): 5014–5023. doi: [10.1109/JSEN.2018.2820168](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2820168).
- [46] JOSHI S and BOYD S. Sensor selection via convex optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(2): 451–462. doi: [10.1109/TSP.2008.2007095](https://doi.org/10.1109/TSP.2008.2007095).
- [47] TOHIDI E, COUTINO M, CHEPURI S P, *et al.* Sparse antenna and pulse placement for colocated MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(3): 579–593. doi: [10.1109/TSP.2018.2881656](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2881656).
- [48] WANG Xiangrong, ABOUTANIOS E, and AMIN M G. Adaptive array thinning for enhanced DOA estimation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(7): 799–803. doi: [10.1109/LSP.2014.2370632](https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2370632).
- [49] ELBIR A M and MISHRA K V. Joint antenna selection and hybrid beamformer design using unquantized and quantized deep learning networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(3): 1677–1688. doi: [10.1109/TWC.2019.2956146](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2956146).
- [50] ELBIR A M and MISHRA K V. Deep learning design for joint antenna selection and hybrid beamforming in massive MIMO[C]. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, USA, 2019: 1585–1586. doi: [10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888753](https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888753).
- [51] ZHANG Shunbo, ZHANG Shun, GAO Feifei, *et al.* Deep learning optimized sparse antenna activation for reconfigurable intelligent surface assisted communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(10): 6691–6705. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3097726](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3097726).
- [52] WANDALE S and ICHIGE K. Design of sparse arrays via deep learning for enhanced DOA estimation[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2021, 2021(1): 17. doi: [10.1186/S13634-021-00727-5](https://doi.org/10.1186/S13634-021-00727-5).
- [53] BLISS D W and FORSYTHE K W. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: Degrees of freedom and resolution[C]. The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, Pacific Grove, USA, 2003: 54–59. doi: [10.1109/ACSSC.2003.1291865](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2003.1291865).
- [54] JIN Ming, LIAO Guisheng, and LI Jun. Joint DOD and DOA estimation for bistatic MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2009, 89(2): 244–251. doi: [10.1016/j.sigpro.2008.08.003](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2008.08.003).
- [55] ZHANG Xiaofei, XU Lingyun, XU Lei, *et al.* Direction of departure (DOD) and direction of arrival (DOA) estimation in MIMO radar with reduced-dimension MUSIC[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(12): 1161–1163. doi: [10.1109/LCOMM.2010.102610.101581](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2010.102610.101581).
- [56] YUE Yaxing, XU Yougen, and LIU Zhiwen. Two-

- dimensional direction-of-arrival estimation in monostatic MIMO radar[C]. 2021 4th International Conference on Information Communication and Signal Processing, Shanghai, China, 2021: 60–64. doi: [10.1109/ICICSP54369.2021.9611972](https://doi.org/10.1109/ICICSP54369.2021.9611972).
- [57] HASSANIEN A and VOROBYOV S A. Transmit energy focusing for DOA estimation in MIMO radar with colocated antennas[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(6): 2669–2682. doi: [10.1109/TSP.2011.2125960](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2125960).
- [58] BENCHEIKH M L, WANG Yide, and HE Hongyang. Polynomial root finding technique for joint DOA DOD estimation in bistatic MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(9): 2723–2730. doi: [10.1016/j.sigpro.2010.03.023](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.03.023).
- [59] LI Jianfeng, HE Yi, HE Lang, *et al.* DOD and DOA estimation for MIMO radar based on combined MUSIC and sparse Bayesian learning[C]. 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium-China (ACES), Nanjing, China, 2019: 1–2. doi: [10.23919/ACES48530.2019.9060555](https://doi.org/10.23919/ACES48530.2019.9060555).
- [60] BAIDOO E, HU Jurong, ZENG Bao, *et al.* Joint DOD and DOA estimation using tensor reconstruction based sparse representation approach for bistatic MIMO radar with unknown noise effect[J]. *Signal Processing*, 2021, 182: 107912. doi: [10.1016/j.sigpro.2020.107912](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107912).
- [61] LIU Yang, CHAI Jin, ZHANG Yinghui, *et al.* Low-complexity neural network based DOA estimation for wideband signals in massive MIMO systems[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2021, 138: 153853. doi: [10.1016/J.AEUE.2021.153853](https://doi.org/10.1016/J.AEUE.2021.153853).
- [62] MOLAEI A M, DEL HOUGNE P, FUSCO V, *et al.* Efficient joint estimation of DOA, range and reflectivity in near-field by using mixed-order statistics and a symmetric MIMO array[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(3): 2824–2842. doi: [10.1109/TVT.2021.3138251](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3138251).
- [63] CHEN Chunyang and VAIDYANATHAN P P. Minimum redundancy MIMO radars[C]. 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Seattle, USA, 2008: 45–48. doi: [10.1109/ISCAS.2008.4541350](https://doi.org/10.1109/ISCAS.2008.4541350).
- [64] HUANG Yan, LIAO Guisheng, LI Jun, *et al.* Sum and difference coarray based MIMO radar array optimization with its application for DOA estimation[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2017, 28(4): 1183–1202. doi: [10.1007/s11045-016-0387-2](https://doi.org/10.1007/s11045-016-0387-2).
- [65] ZHANG Yule, HU Guoping, ZHOU Hao, *et al.* DOA estimation of a novel generalized nested MIMO radar with high degrees of freedom and hole-free difference coarray[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 6622154. doi: [10.1155/2021/6622154](https://doi.org/10.1155/2021/6622154).
- [66] YANG Minglei, SUN Lei, YUAN Xin, *et al.* A new nested MIMO array with increased degrees of freedom and hole-free difference coarray[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2018, 25(1): 40–44. doi: [10.1109/lsp.2017.2766294](https://doi.org/10.1109/lsp.2017.2766294).
- [67] LIU Donglei, ZHAO Yongbo, and DONG Shuxian. A novel co-prime MIMO radar model for DOA estimation[J]. *Signal Processing*, 2022, 199: 108606. doi: [10.1016/j.sigpro.2022.108606](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108606).
- [68] ZHANG Fei, JI Chuantang, ZHANG Zijiang, *et al.* Non-circular signal DOA estimation based on coprime array MIMO radar[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2021(1): 99. doi: [10.1186/S13634-021-00806-7](https://doi.org/10.1186/S13634-021-00806-7).
- [69] SHI Junpeng, HU Guoping, ZHANG Xiaofei, *et al.* Sparsity-based DOA estimation of coherent and uncorrelated targets with flexible MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 5835–5848. doi: [10.1109/TVT.2019.2913437](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2913437).
- [70] WEN Fangqing, SHI Junpeng, and ZHANG Zijiang. Joint 2D-DOD, 2D-DOA, and polarization angles estimation for bistatic EMVS-MIMO radar via PARAFAC analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 1626–1638. doi: [10.1109/TVT.2019.2957511](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2957511).
- [71] DING Xueke, HU Ying, LIU Changming, *et al.* Coherent targets parameter estimation for EVS-MIMO radar[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4331. doi: [10.3390/rs14174331](https://doi.org/10.3390/rs14174331).
- [72] PONNUSAMY P, SUBRAMANIAM K, and CHINTAGUNTA S. Computationally efficient method for joint DOD and DOA estimation of coherent targets in MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2019, 165: 262–267. doi: [10.1016/j.sigpro.2019.07.015](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.07.015).
- [73] WANG Xianpeng, HUANG Mengxing, and WAN Liangtian. Joint 2D-DOD and 2D-DOA estimation for coprime EMVS-MIMO radar[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2021, 40(6): 2950–2966. doi: [10.1007/s00034-020-01605-5](https://doi.org/10.1007/s00034-020-01605-5).
- [74] YANG Yongqiang, RUAN Ningjun, HUANG Guanjuan, *et al.* A propagator method for bistatic coprime EMVS-MIMO radar[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 9954573. doi: [10.1155/2021/9954573](https://doi.org/10.1155/2021/9954573).
- [75] 谢前朋, 潘小义, 陈吉源, 等. 基于新型阵列的双基地电磁矢量传感器MIMO雷达高分辨角度参数估计[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(2): 270–276. doi: [10.11999/JEIT200130](https://doi.org/10.11999/JEIT200130).
- XIE Qianpeng, PAN Xiaoyi, CHEN Jiyuan, *et al.* High resolution angle parameter estimation for bistatic EMVS-MIMO radar based on a new designed array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(2): 270–276. doi: [10.11999/JEIT200130](https://doi.org/10.11999/JEIT200130).

- [76] 赵永波, 刘宏伟. MIMO雷达技术综述[J]. 数据采集与处理, 2018, 33(3): 389–399. doi: [10.16337/j.1004-9037.2018.03.001](https://doi.org/10.16337/j.1004-9037.2018.03.001).
ZHAO Yongbo and LIU Hongwei. Overview on MIMO radar[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2018, 33(3): 389–399. doi: [10.16337/j.1004-9037.2018.03.001](https://doi.org/10.16337/j.1004-9037.2018.03.001).
- [77] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, *et al.* Range-dependent beamforming using element level waveform diversity[C]. 2006 International Waveform Diversity & Design Conference, Lihue, USA, 2006: 1–6. doi: [10.1109/WDD.2006.8321488](https://doi.org/10.1109/WDD.2006.8321488).
- [78] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, *et al.* Frequency diverse array radars[C]. 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, USA, 2006: 3. doi: [10.1109/RADAR.2006.1631800](https://doi.org/10.1109/RADAR.2006.1631800).
- [79] WICKS M C and ANTONIK P. Frequency diverse array with independent modulation of frequency, amplitude, and phase[P]. US 7319427, 2008.
- [80] WICKS M C and ANTONIK P. Method and apparatus for a frequency diverse array[P]. US 7511665, 2009.
- [81] ANTONIK P. An investigation of a frequency diverse array[D]. [Ph. D. dissertation], University College London, 2009.
- [82] BASIT A, WANG Wenqin, NUSENU S Y, *et al.* FDA based QSM for mmwave wireless communications: Frequency diverse transmitter and reduced complexity receiver[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(7): 4571–4584. doi: [10.1109/TWC.2021.3060512](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3060512).
- [83] NUSENU S Y, SHAO Huaizong, PAN Ye, *et al.* Directional modulation with precise legitimate location using time-modulation retrodirective frequency diversity array for secure IoT communications[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(1): 1109–1119. doi: [10.1109/JSYST.2020.3010787](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3010787).
- [84] SAMMARTINO P F, BAKER C J, and GRIFFITHS H D. Frequency diverse MIMO techniques for radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 201–222. doi: [10.1109/TAES.2013.6404099](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6404099).
- [85] 许京伟, 朱圣棋, 廖桂生, 等. 频率分集阵雷达技术探讨[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 167–182. doi: [10.12000/JR18023](https://doi.org/10.12000/JR18023).
XU Jingwei, ZHU Shengqi, LIAO Guisheng, *et al.* An overview of frequency diverse array radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 167–182. doi: [10.12000/JR18023](https://doi.org/10.12000/JR18023).
- [86] SUN Yan, ZHENG Zhi, WANG Wenqin, *et al.* DOA estimation and tracking for FDA-MIMO radar signal[J]. *Digital Signal Processing*, 2020, 106: 102858. doi: [10.1016/j.dsp.2020.102858](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2020.102858).
- [87] XU Tengxian, WANG Xianpeng, HUANG Mengxing, *et al.* Tensor-based reduced-dimension music method for parameter estimation in monostatic FDA-MIMO radar[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3772. doi: [10.3390/rs13183772](https://doi.org/10.3390/rs13183772).
- [88] CUI Can, XU Jian, GUI Ronghua, *et al.* Search-free DOD, DOA and range estimation for bistatic FDA-MIMO radar[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 15431–15445. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2816780](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2816780).
- [89] LIU Yibin, WANG Chunyang, ZHENG Guimei, *et al.* Joint range and angle estimation of low-elevation target with bistatic meter-wave FDA-MIMO radar[J]. *Digital Signal Processing*, 2022, 127: 103556. doi: [10.1016/j.dsp.2022.103556](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103556).
- [90] 王文钦, 陈慧, 郑植, 等. 频控阵雷达技术及其研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 153–166. doi: [10.12000/JR18029](https://doi.org/10.12000/JR18029).
WANG Wenqin, CHEN Hui, ZHENG Zhi, *et al.* Advances on frequency diverse array radar and its applications[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 153–166. doi: [10.12000/JR18029](https://doi.org/10.12000/JR18029).
- [91] 陈阳, 田波, 王春阳, 等. FDA-MIMO抗干扰技术进展及前景展望[J]. 电光与控制, 2022, 29(8): 65–72. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2022.08.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2022.08.012).
CHEN Yang, TIAN Bo, WANG Chunyang, *et al.* Progress and prospect of FDA-MIMO anti-jamming technology[J]. *Electronics Optics Control*, 2022, 29(8): 65–72. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2022.08.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2022.08.012).
- [92] LAN Lan, XU Jingwei, LIAO Guisheng, *et al.* Suppression of mainbeam deceptive jammer with FDA-MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 11584–11598. doi: [10.1109/TVT.2020.3014689](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3014689).
- [93] 兰岚, 廖桂生, 许京伟, 等. FDA-MIMO雷达主瓣距离欺骗式干扰抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 997–1003. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.05.06](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.05.06).
LAN Lan, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Main-beam range deceptive jamming suppression approach with FDA-MIMO radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(5): 997–1003. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.05.06](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.05.06).
- [94] 高霞, 全英汇, 李亚超, 等. 基于BSS的FDA-MIMO雷达主瓣欺骗式干扰抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(9): 1927–1934. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2020.09.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2020.09.07).
GAO Xia, QUAN Yinghui, LI Yachao, *et al.* Main-lobe deceptive jamming suppression with FDA-MIMO radar based on BSS[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(9): 1927–1934. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2020.09.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2020.09.07).
- [95] 许京伟, 廖桂生, 张玉洪, 等. 波形分集阵雷达抗欺骗式干扰技术[J]. 电子学报, 2019, 47(3): 545–551. doi: [10.3969/j.issn.](https://doi.org/10.3969/j.issn.)

- 0372-2112.2019.03.005.
- XU Jingwei, LIAO Guisheng, ZHANG Yuhong, *et al.* On anti-jamming technique with waveform diverse array radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(3): 545–551. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2019.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2019.03.005).
- [96] 陈浩, 李荣锋, 戴凌燕, 等. 基于 FVE 法的 FDA-MIMO 雷达主瓣密集假目标干扰抑制[J]. 空军预警学院学报, 2018, 32(6): 397–401. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2018.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2018.06.002).
- CHEN Hao, LI Rongfeng, DAI Lingyan, *et al.* FDA-MIMO radar mainlobe dense false target jamming suppression based on feature vector eliminating[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2018, 32(6): 397–401. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2018.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2018.06.002).
- [97] QIN Si, ZHANG Y D, AMIN M G, *et al.* Frequency diverse coprime arrays with coprime frequency offsets for multitarget localization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 321–335. doi: [10.1109/JSTSP.2016.2627184](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2627184).
- [98] CAO Ruisong, LIU Shengheng, MAO Zihuan, *et al.* Doubly-Toeplitz-based interpolation for joint DOA-range estimation using coprime FDA[C]. 2021 IEEE Radar Conference, Atlanta, USA, 2021: 1–6. doi: [10.1109/RadarConf2147009.2021.9455275](https://doi.org/10.1109/RadarConf2147009.2021.9455275).
- [99] SEDIGHI S, SHANKAR B, MISHRA K V, *et al.* Optimum design for sparse FDA-MIMO automotive radar[C]. 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2019: 913–918. doi: [10.1109/IEEECONF44664.2019.9048834](https://doi.org/10.1109/IEEECONF44664.2019.9048834).
- [100] LI Binbin, BAI Weixiong, and ZHENG Guimei. Successive ESPRIT algorithm for joint DOA-range-polarization estimation with polarization sensitive FDA-MIMO radar[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 36376–36382. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2844948](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2844948).
- [101] LI Binbin, CHEN Hui, ZHENG Guimei, *et al.* Joint DOA-range-polarization estimation with polarization sensitive FDA-MIMO radar[C]. International Conference on Frontiers of Electronics, Information and Computation Technologies, Changsha, China, 2021: 22. doi: [10.1145/3474198.3478191](https://doi.org/10.1145/3474198.3478191).
- [102] YU Nanfang, GENEVET P, KATS M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333–337. doi: [10.1126/science.1210713](https://doi.org/10.1126/science.1210713).
- [103] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 可重构电磁超表面及其应用研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 206–219. doi: [10.12000/JR20137](https://doi.org/10.12000/JR20137).
- YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Recent advances in reconfigurable metasurfaces and their applications[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 206–219. doi: [10.12000/JR20137](https://doi.org/10.12000/JR20137).
- [104] YANG Wanchen, CHEN Si, CHE Wenquan, *et al.* Compact high-gain metasurface antenna arrays based on higher-mode SIW cavities[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(9): 4918–4923. doi: [10.1109/TAP.2018.2851659](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2851659).
- [105] NIE Niansheng, YANG Xuesong, CHEN Zhining, *et al.* A low-profile wideband hybrid metasurface antenna array for 5G and WiFi systems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 665–671. doi: [10.1109/TAP.2019.2940367](https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2940367).
- [106] YANG Wanchen, MENG Qian, CHE Wenquan, *et al.* Low-profile wideband dual-circularly polarized metasurface antenna array with large beamwidth[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(9): 1613–1616. doi: [10.1109/LAWP.2018.2857625](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2857625).
- [107] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, *et al.* Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218. doi: [10.1038/lsa.2014.99](https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99).
- [108] YANG Huanhuan, YANG Fan, CAO Xiangyu, *et al.* A 1600-element dual-frequency electronically reconfigurable reflectarray at X/Ku-band[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2017, 65(6): 3024–3032. doi: [10.1109/TAP.2017.2694703](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2694703).
- [109] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, *et al.* Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753–116773. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2935192](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935192).
- [110] GUAN Xinrong, WU Qingqing, and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface assisted secrecy communication: Is artificial noise helpful or not?[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 778–782. doi: [10.1109/LWC.2020.2969629](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2969629).
- [111] DI Boya, ZHANG Hongliang, SONG Lingyang, *et al.* Hybrid beamforming for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications: Achievable rates with limited discrete phase shifts[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1809–1822. doi: [10.1109/JSAC.2020.3000813](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000813).
- [112] LI Wenting, GAO S, CAI Yuanming, *et al.* Polarization-reconfigurable circularly polarized planar antenna using switchable polarizer[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(9): 4470–4477. doi: [10.1109/TAP.2017.2730240](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2730240).
- [113] MA Xiaoliang, PAN Wenbo, HUANG Cheng, *et al.* An active metamaterial for polarization manipulating[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(10): 945–949. doi: [10.1002/adom.201400212](https://doi.org/10.1002/adom.201400212).

- [114] CUI Jianhua, HUANG Cheng, PAN Wenbo, *et al.* Dynamical manipulation of electromagnetic polarization using anisotropic meta-mirror[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 30771. doi: [10.1038/srep30771](https://doi.org/10.1038/srep30771).
- [115] TAO Zui, WAN Xiang, PAN Baicao, *et al.* Reconfigurable conversions of reflection, transmission, and polarization states using active metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(12): 121901. doi: [10.1063/1.4979033](https://doi.org/10.1063/1.4979033).
- [116] ZHANG Meng, ZHANG W, LIU A Q, *et al.* Tunable polarization conversion and rotation based on a reconfigurable metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 12068. doi: [10.1038/s41598-017-11953-z](https://doi.org/10.1038/s41598-017-11953-z).
- [117] ELMOSSALLAMY M A, ZHANG Hongliang, SONG Lingyang, *et al.* Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(3): 990–1002. doi: [10.1109/TCCN.2020.2992604](https://doi.org/10.1109/TCCN.2020.2992604).
- [118] Alexandropoulos G C, Shlezinger N, and Del Hougne P. Reconfigurable intelligent surfaces for rich scattering wireless communications: Recent experiments, challenges, and opportunities[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(6): 28–34. doi: [10.1109/MCOM.001.2001117](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2001117).
- [119] HUANG Chongwen, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, *et al.* Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(8): 4157–4170. doi: [10.1109/TWC.2019.2922609](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2922609).
- [120] BJÖRNSON E, ÖZDOĞAN Ö, and LARSSON E G. Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(12): 90–96. doi: [10.1109/MCOM.001.2000407](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000407).
- [121] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, *et al.* Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2450–2525. doi: [10.1109/JSAC.2020.3007211](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007211).
- [122] HU Xiaoling, ZHONG Caijun, ZHANG Yu, *et al.* Location information aided multiple intelligent reflecting surface systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(12): 7948–7962. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3020577](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3020577).
- [123] LIN Shaoe, ZHENG Beixiong, ALEXANDROPOULOS G C, *et al.* Adaptive transmission for reconfigurable intelligent surface-assisted OFDM wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2653–2665. doi: [10.1109/JSAC.2020.3007038](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007038).
- [124] ZENG Ming, LI Xingwang, LI Gen, *et al.* Sum rate maximization for IRS-assisted uplink NOMA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 234–238. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3025978](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3025978).
- [125] ZUO Jiakuo, LIU Yuanwei, BASAR E, *et al.* Intelligent reflecting surface enhanced millimeter-wave NOMA systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(11): 2632–2636. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3009158](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3009158).
- [126] WU Qingqing and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394–5409. doi: [10.1109/TWC.2019.2936025](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2936025).
- [127] TANG Wankai, DAI Junyan, CHEN Mingzheng, *et al.* MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: System design, analysis, and implementation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2683–2699. doi: [10.1109/JSAC.2020.3007055](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007055).
- [128] WU Qingqing and ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106–112. doi: [10.1109/MCOM.001.1900107](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900107).
- [129] CHEN Peng, CHEN Zhimin, ZHENG Beixiong, *et al.* Efficient DOA estimation method for reconfigurable intelligent surfaces aided UAV swarm[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 743–755. doi: [10.1109/TSP.2022.3146791](https://doi.org/10.1109/TSP.2022.3146791).
- [130] ZHANG Jiliang, GLAZUNOV A A, YANG Wenfei, *et al.* Fundamental wireless performance of a building[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(1): 186–193. doi: [10.1109/MWC.121.2100244](https://doi.org/10.1109/MWC.121.2100244).
- [131] ZHANG Jiliang, GLAZUNOV A A, and ZHANG Jie. Wireless performance evaluation of building layouts: Closed-form computation of figures of merit[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(7): 4890–4906. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3074546](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3074546).
- [132] ANDREWS J G, ZHANG Xinchun, DURGIN G D, *et al.* Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification?[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(10): 184–190. doi: [10.1109/MCOM.2016.7588290](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7588290).
- [133] CALABUIG D, BARMPOUNAKIS S, GIMENEZ S, *et al.* Resource and mobility management in the network layer of 5G cellular ultra-dense networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(6): 162–169. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600293](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600293).
- [134] BUSARI S A, HUQ K M S, MUMTAZ S, *et al.* Millimeter-wave massive MIMO communication for future wireless systems: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys &*

- Tutorials*, 2018, 20(2): 836–869. doi: [10.1109/COMST.2017.2787460](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2787460).
- [135] ZENG Shuhao, ZHANG Hongliang, DI Boya, *et al.* Reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted wireless coverage extension: RIS orientation and location optimization[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 269–273. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3025345](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3025345).
- [136] PENA D, FEICK R, HRISTOV H D, *et al.* Measurement and modeling of propagation losses in brick and concrete walls for the 900-MHz band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(1): 31–39. doi: [10.1109/TAP.2003.808539](https://doi.org/10.1109/TAP.2003.808539).
- [137] ZHANG Jiliang, LIAO Xi, GLAZUNOV A A, *et al.* Two-ray reflection resolution algorithm for planar material electromagnetic property measurement at the millimeter-wave bands[J]. *Radio Science*, 2020, 55(3): e2019RS006944. doi: [10.1029/2019RS006944](https://doi.org/10.1029/2019RS006944).
- [138] ZHOU Yang, SHAO Yu, ZHANG Jiliang, *et al.* Wireless performance evaluation of building materials integrated with antenna arrays[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(4): 942–946. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3141390](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3141390).

作者简介

悦亚星，博士，助理研究员，主要研究方向为阵列信号处理、MIMO体制雷达与无线通信。

李天宇，本科，主要研究方向为阵列信号处理。

周成伟，博士，副研究员，主要研究方向为阵列信号处理、波达方向估计、波束成形。

袁鑫，博士，研究员，主要研究方向为计算成像和机器学习。

史治国，博士，教授，主要研究方向为信号处理及定位应用、物联网。

(责任编辑：于青)