一种由流体天线阵列赋能的到达方向估计方法：端射效应抑制

任佳骥、田野、刘柏杨、吴拓、刘伟、黄启杰，
IEEE会士、唐健辉，IEEE会士、陆贵文，IEEE终身会士

arXiv:2512.18981v1 [eess.SP] 22 Dec 2025

摘要——到达方向（DOA）估计是一项关键的感知技术，有望在未来智能化、泛在化的通信系统中发挥重要作用。尽管已有许多成熟的超分辨率算法，固定天线阵列固有的端射效应问题仍未得到充分解决。本文提出了一种由流体天线组成的新型阵列架构。通过利用天线位置的空间可重构性，对阵列导向矢量进行等效调制，并将其与经典的多重信号分类算法相结合，该方法实现了高精度的到达方向估计。仿真结果表明，即使在极具挑战性的端射区域，所提方法仍能实现出色的估计性能。

索引词——到达方向（DOA）估计、流体天线（FA）、端射效应。

I. 引言

到达方向（DOA）估计是实现第六代（6G）及后续无线通信系统空间感知能力的核心赋能技术。通过以高角度精度解析电磁波传播路径，该技术为智能化、泛在化通信基础设施提供关键支持。其代表性应用涵盖多个领域：6G太赫兹通信中的大规模多输入多输出（MIMO）波束成形、用于自动驾驶车辆导航的毫米波雷达感知，以及物联网（IoT）生态系统中的分布式传感器定位 [1], [2], [3]。为满足日益严格的为满足这些新兴应用场景对到达方向估计精度的性能要求，当前系统必须迫切克服传统天线阵列固有的基本物理限制。

传统固定天线阵列存在固有的端射效应，这对到达方向估计施加了根本性的物理限制。当入射角接近端射区域（例如，$[80°, 90°]$）时，导向矢量对角度变化的敏感度会显著降低，导致空间分辨能力急剧恶化 [4]。因此，在此类条件下，大多数DOA算法无法保证有效的信源分辨率或可靠的估计精度。

针对固定阵列，已有许多成熟的到达方向估计技术。其中，多重信号分类（MUSIC）算法凭借其超分辨率能力和可处理的计算复杂度，得到了广泛应用。然而，MUSIC 本质上无法克服端射效应，导致实际方向查找的有效视场（FoV）受到限制。尽管此后出现了各种 MUSIC 衍生算法（例如，实值 MUSIC [5], 根MUSIC [6]），但这些变体主要致力于优化计算复杂度，在估计精度方面并未全面优于经典 MUSIC。重要的是，没有任何一种算法能够突破端射效应带来的物理限制。

端射效应的缓解方法主要分为三类。第一类是扩大阵列孔径：既可以通过增加天线数量构建大规模阵列，也可以设计稀疏阵列以获得较大的等效虚拟孔径 [7], [8]。尽管大规模阵列能够通过改善导向矢量特性，在一定程度上缓解端射效应，但根本问题依然存在，并持续影响到达方向估计性能，尤其是在极端角度下。第二类是导向矢量映射技术（例如，流形分离技术 [9]），将物理阵列转换为更适于信号处理的虚拟均匀线阵。虽然这种方法可以规避端射效应，且适用于任意物理配置，但针对特定阵列几何结构需要定制映射矩阵，而且在复杂场景下实现精确映射仍面临计算上的挑战。第三类是协同设计方法，通过联合优化阵列配置与算法，消除特定场景下的端射效应（例如，[10], [11]）。然而，

（通讯作者：田野和唐健辉。）

本研究部分获得了中国浙江省自然科学基金项目（项目编号：LY23F010004）以及宁波市自然科学基金项目（项目编号：2024J232）的资助。K. F. Tong 和刘柏杨的研究工作由香港都会大学教职员研究启动基金资助，项目编号为：FRSF/2024/03。吴拓的研究工作由香港特别行政区研究资助局卓越学科领域计划资助，项目编号为 AoE/E-101/23-N。Y. Tian 和 J. Ren 任职于中国宁波市宁波大学电气工程与计算机科学学院，邮编 315211（电子邮箱：tianfield@126.com；2311100053@nbu.edu.cn）。B. Liu 和 K. F. Tong 任职于中国香港特别行政区香港都会大学科学与技术学院（电子邮箱：{byliu,ktong}@hkmu.edu.hk）。T. Wu 和 K.-M. Luk 任职于香港城市大学太赫兹与毫米波国家重点实验室及电子工程系（电子邮箱：{tuowu2, eekmluk}@cityu.edu.hk）。W. Liu 任职于中国香港九龙香港理工大学电气与电子工程系（电子邮箱：wliu.eee@gmail.com）。K.-K. Wong 任职于英国伦敦大学学院电子与电气工程系（邮编 WC1E 6BT），同时任职于韩国首尔 03722 延世大学延世前沿实验室及集成技术学院（电子邮箱：kai-kit.wong@ucl.ac.uk）。

此类方法依赖固定的阵列几何结构，泛化能力有限，而且通常需要额外的硬件支持。总之，现有解决方案在可扩展性、计算复杂度或泛化能力方面均存在固有局限。

近年来，流体天线系统（FAS） [12]–[15],作为天线技术的一项革命性进展，凭借灵活的可重构性和动态适应能力应运而生，为无线定位开辟了新机遇。传统的固定位置天线（FPA）阵列中，单元位置始终固定；与之不同，广义的流体天线（FA）框架涵盖多种技术，包括电子可切换阵列、可重构超表面和空间分布式天线像素，这些技术无需物理移动导电流体，即可实现功能灵活性。通过对空间辐射单元进行动态控制，流体天线系统有效拓展了空间自由度（DoF），形成超越传统天线阵列物理限制的虚拟孔径。这种可重构性使FA阵列能够动态调节阵列流形特性，从根本上规避端射效应问题。

本文提出了一种创新的FA阵列辅助策略，可全面抑制端射效应。其核心创新在于通过以下方式，在可重构物理阵列与虚拟平面阵列之间建立动态阵列流形映射：(i) 预先设定避开端射区域的虚拟等效角；(ii) 沿 y轴动态调整阵列单元的空间位置；(iii) 建立导向矢量等效条件，以实现可靠的到达方向估计。当满足流形等效条件时，系统利用虚拟阵列的流形精确估计预设虚拟角，并通过所建立的映射关系恢复真实到达方向。该方法从根本上避免了MUSIC算法在端射区域内性能下降，同时保持计算效率，且无需使用可重构FA单元以外的额外硬件。

II. 信号模型

我们考虑一种经典信号模型，其中有 L 个非相干窄带信号入射到阵列上。在二维（2-D）方位角-俯仰角模型下，第 ℓ个信号的入射角表示为（θ_ℓ， ϕ_ℓ），其中 θ表示方位角， ϕ 表示俯仰角。离散时刻 t 的接收数据建模为

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad t \in [0, T-1], \tag{1}$$

其中， T 表示快拍数，且

$$\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \ldots, y_N(t)]^T, \tag{2}$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \ldots, s_L(t)]^T, \tag{3}$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \ldots, n_N(t)]^T, \tag{4}$$

其中， N表示阵列中的阵元总数。假设加性噪声 $\mathbf{n}(t)$ 服从白高斯分布，并且在统计上与源信号相互独立。阵列流形矩阵 A 通过将导向矢量按列拼接而成，表示为

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \phi_1), \cdots, \mathbf{a}(\theta_L, \phi_L)], \tag{5}$$

导向矢量 $\mathbf{a}(\theta_\ell, \phi_\ell)$由阵列几何结构决定。对于部署在 x-z 平面上的传统均匀平面阵列（UPA），其导向矢量可明确表示为

$$\mathbf{a}_{\mathrm{UPA}}(\theta, \phi) = [1, \ldots, e^{j2\pi d(n_x \cos\theta\cos\phi + n_z \sin\phi)/\lambda}, \ldots, e^{j2\pi d((N_x-1)\cos\theta\cos\phi + (N_z-1)\sin\phi)/\lambda}]^T, \tag{6}$$

其中， λ 表示载波波长， $d = \lambda/2$ 表示阵元间距。 N_x 和 N_z 分别表示沿 x轴和 z轴排列的天线阵元数目，其中 $N = N_x \times N_z$。

为克服传统固定阵列的局限性，我们考虑一种由流体天线（FA）支持的阵列架构，其中每个天线单元都可以沿 y轴动态移动，同时在笛卡尔坐标系中保持其 x轴和 z 轴坐标不变。令 d_n表示第 n个天线相对于x-z 平面的位移。导向矢量中沿 y轴的空间相移分量表示为

$$\mathbf{a}_y(\theta, \phi) = [e^{j2\pi d_1(\sin\theta\cos\phi)/\lambda}, \ldots, e^{j2\pi d_N(\sin\theta\cos\phi)/\lambda}]^T. \tag{7}$$

因此，FA阵列的导向矢量建模为

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = \mathbf{a}_{\mathrm{UPA}}(\theta, \phi) \odot \mathbf{a}_y(\theta, \phi), \tag{8}$$

其中， $\odot$ 表示哈达玛积。

与固定阵列相比，FA阵列能够通过动态的 y 轴位移实现导向矢量的可重构性。这一独特能力通过自适应调整阵列拓扑，在端射区域构造有意设置的非线性相位梯度，专门克服传统端射模糊的局限，从而提升到达方向估计中的角分辨率和空间判别能力。

III. 所提方法

A. 多重信号分类回顾

根据式（1）中的信号模型，样本协方差矩阵计算如下

$$\mathbf{R} = \frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T-1} \mathbf{y}(t)\mathbf{y}^H(t) = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_n, \tag{9}$$

其中，$\mathbf{R}_s$ 和 $\mathbf{R}_n$ 分别表示信号和噪声的协方差矩阵。

对 R 进行特征值分解（EVD）可得

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_s\mathbf{\Sigma}_s\mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n\mathbf{\Sigma}_n\mathbf{U}_n^H, \tag{10}$$

其中，第一和第二个分量分别对应信号子空间和噪声子空间。这里， $\mathbf{\Sigma}_s \in \mathbb{C}^{L\times L}$和 $\mathbf{\Sigma}_n \in \mathbb{C}^{(N-L)\times(N-L)}$ 是由最大的 L 个特征值和其余特征值组成的对角矩阵，

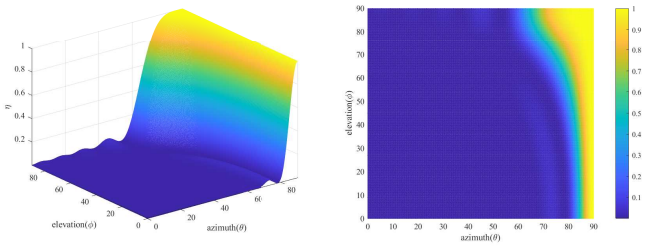

图1：均匀平面阵列中不同角度对的导向矢量相关性对比，其中（θ_{true}，ϕ_{true}）固定为（86°，86°）。

分别。$\mathbf{U}_s \in \mathbb{C}^{N\times L}$ 和 $\mathbf{U}_n \in \mathbb{C}^{N\times(N-L)}$ 包含相应的特征向量。

利用阵列流形向量与噪声子空间之间固有的正交性，可在空间谱函数的 L 个局部最大值点处获得到达方向估计结果$\hat{}\,\hat{}$（θ_ℓ，ϕ_ℓ）。

$$P(\theta,\phi)=\frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta,\phi)\mathbf{U}_n\mathbf{U}_n^H\mathbf{a}(\theta,\phi)}. \tag{11}$$

B. 端射效应

在MUSIC算法中，当搜索角与真实到达方向一致时，空间谱中会出现显著峰值。然而，随着入射角接近端射区域，导向矢量对角度变化的敏感度会显著降低，导致空间分辨能力急剧恶化。这一现象使MUSIC算法难以在真实角度附近产生可区分的谱峰。

为说明这一问题，以 10×10 均匀平面阵列为例。固定端射区域内的入射角，导向矢量相关性定义为

$$\eta=\frac{1}{N^2}|\mathbf{a}^H(\theta,\phi)\mathbf{a}(\theta_{\text{true}},\phi_{\text{true}})|^2. \tag{12}$$

如图1所示，对应于亮黄色区域角度对所构造的导向矢量与真实导向矢量之间具有极高的相关性。这表明，在多重信号分类空间谱中，真实角度附近难以实现有效的角分辨率。尽管增加天线数量可以在一定程度上缓解端射效应，但以更高硬件成本换来的性能提升仍然有限。即使采用 10×10 均匀平面阵列（UPA）——其本身就是一种大规模天线配置——端射区域的分辨率退化仍然十分显著。

C. 流体天线阵列赋能的阵列等效与到达方向估计

本小节介绍利用流体天线阵列解决端射效应的核心方法。根据式（6）、（7）和（8）给出的导向矢量，我们提取相位参数，并去除整数倍的 2π，得到

$$\mathbf{\Phi}=\frac{\cos\theta\cos\phi}{\lambda}\mathbf{d}_x+\frac{\sin\phi}{\lambda}\mathbf{d}_z+\frac{\sin\theta\cos\phi}{\lambda}\mathbf{d}_y, \tag{13}$$

其中，位置向量定义为

$$\mathbf{d}_x=d[\underbrace{0,\ldots,0}_{N_z},1,\ldots,1,\ldots,(N_x-1),\ldots,(N_x-1)]^T, \tag{14}$$

$$\mathbf{d}_z=d[\underbrace{0,1,\ldots,(N_z-1)}_{N_x},\ldots,0,1,\ldots,(N_z-1)]^T, \tag{15}$$

$$\mathbf{d}_y=[d_1,d_2,\ldots,d_N]^T. \tag{16}$$

同样，根据（6），UPA导向矢量的相位参数为

$$\mathbf{\Phi}_{\text{UPA}}=\frac{\cos\theta\cos\phi}{\lambda}\mathbf{d}_x+\frac{\sin\phi}{\lambda}\mathbf{d}_z. \tag{17}$$

比较（13）和（17），流体天线阵列通过引入额外的自由度增强了传统架构，这些自由度来自 y轴控制。具体而言，当入射波来自端射区域时，UPA固定的导向矢量配置会在物理层面延续端射效应。相比之下，流体天线阵列会动态调整各阵元在 y轴上的位置（参数$\mathbf{d}_y$），从而构造出与虚拟入射角对应的等效导向矢量。

设真实入射角表示为（θ_t,ϕ_t），虚拟入射角表示为（θ_v,ϕ_v）。为实现导向矢量等价 $\mathbf{a}(\theta_t,\phi_t)=\mathbf{a}_{\text{UPA}}(\theta_v,\phi_v)$，位置调整参数 $\mathbf{d}_y$ 必须满足

$$\mathbf{d}_y=\frac{\mathbf{d}_x(\cos\theta_v\cos\phi_v-\cos\theta_t\cos\phi_t)+\mathbf{d}_z(\sin\phi_v-\sin\phi_t)}{\sin\theta_t\cos\phi_t}. \tag{18}$$

当满足条件（18）时，可将 FA 阵列配置为等效于观测虚拟入射角（θ_v，ϕ_v）的均匀平面阵列（UPA）。该虚拟入射角可自由选择，以避开端射区域。在实际的到达方向估计中，流程包括：(i) 根据（18）调整天线位置，(ii) 在不同位置采集信号，以及 (iii) 使用经典 MUSIC 算法并结合公式（6）、（9）、（10）和（11）进行到达方向估计。如果成功估计出预设的虚拟角度，则可通过已建立的映射关系恢复真实到达方向。完整流程总结于 算法 1。

注1：尽管所提出的方法理论上能够处理任意入射角，但其主要用于处理端射区域内的角度。在实际实现中，建议首先采用传统MUSIC算法进行初步估计，以确定是否有角度落入端射区域。若确认存在，则应根据这一粗略估计设计动态调整的搜索网格，以减轻阵列重构操作的计算负担。

备注2：在该算法中，必须对每种阵列配置下的接收信号执行谱峰搜索，以验证预设虚拟角度（θ_v,ϕ_v）是否能够被准确估计。如果采用完整的二维全局搜索策略，计算开销将高得难以接受。需要强调的是，仅需在预设虚拟角度邻域内进行局部搜索，这样既能显著降低计算复杂度，又能保持估计精度。

算法1：FA阵列的到达方向估计

输入：预设虚拟入射角 (θ_v, ϕ_v)

输出：估计的DOA对 $(\hat{\theta}_\ell, \hat{\phi}_\ell)$，$\ell = 1, \ldots, L$

对 $\theta \in$ 搜索网格进行遍历
  针对 $\phi \in$ 搜索网格执行
    计算 $\mathbf{d}_y$ 使用（18）得到 $\{\mathbf{d}_y^k\}_{k=1}^K$;
  end
结束
根据轨迹 $\{\mathbf{d}_y^k\}_{k=1}^K$ 配置阵列;
获取接收信号 $\{\mathbf{y}_k(t)\}_{k=1}^K$ 在每个配置中;
对每个 $\mathbf{y}_k(t) \in \{\mathbf{y}_k(t)\}_{k=1}^K$ **do**
  计算协方差矩阵并进行特征值分解;
  使用 (6) 构造虚拟均匀平面阵列导向矢量;
  使用 (11) 进行谱峰搜索，以获得主峰 $(\bar{\theta}_k, \bar{\phi}_k)$;
  计算估计误差 $\epsilon_k = \sqrt{(\bar{\theta}_k - \theta_v)^2 + (\bar{\phi}_k - \phi_v)^2}/\sqrt{2}$;
结束
找出对应于最小的 L 个值的索引在 $\{\epsilon_k\}_{k=1}^K$ 中;
返回二维到达方向对 $\{(\hat{\theta}_\ell, \hat{\phi}_\ell)\}_{\ell=1}^L$

IV. 数值仿真

本节通过全面的仿真评估所提算法的到达方向估计性能。除非另有说明，仿真参数配置如下：阵列初始部署为均匀平面阵列，阵元在 x-z 平面内以半波长间距排列。每个可重构天线单元均可重构，并能够沿 y轴方向自由移动。采用一个包含64个阵元的阵列（沿 x轴方向和 z轴方向各有8个阵元）接收来自 $(86°, 86°)$ 的 $L = 1$ 窄带信号。入射信号建模为具有500个快拍的高斯随机过程。等效虚拟入射角设为 $(30°, 30°)$。为进行对比评估，我们考虑以下基准算法和性能基准：基于子空间的算法（包括二维多重信号分类[16] 和ESPRIT [17]）、基于压缩感知的正交匹配追踪算法 [18], 以及克拉美-罗下界（CRLB）´。采用从500次相互独立的蒙特卡罗试验中获得的到达方向估计成功分辨概率（PoSR）和均方根误差（RMSE）作为性能指标。RMSE定义为RMSE $= \frac{1}{L}\sum_{\ell=1}^{L}\sqrt{\mathbb{E}\left[((\hat{\theta}_\ell - \theta_\ell)^2 + (\hat{\phi}_\ell - \phi_\ell)^2)/2\right]}$。

第一个仿真评估了不同算法的到达方向估计性能随信噪比（SNR）的变化，结果如图2所示。可以观察到，随着信噪比升高，所有算法的均方根误差（RMSE）均有所降低，并且在高信噪比条件下都能实现令人满意的角度估计性能。所提方法的估计精度与经典的MUSIC算法非常接近，并趋近于克拉美-罗下界。在传统算法仍然适用的条件下，所提方法保持了相当的估计精度

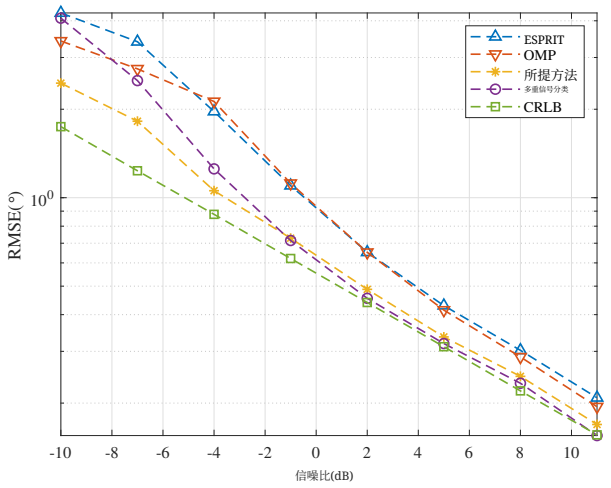

图 2：到达方向估计的均方根误差随信噪比的变化。

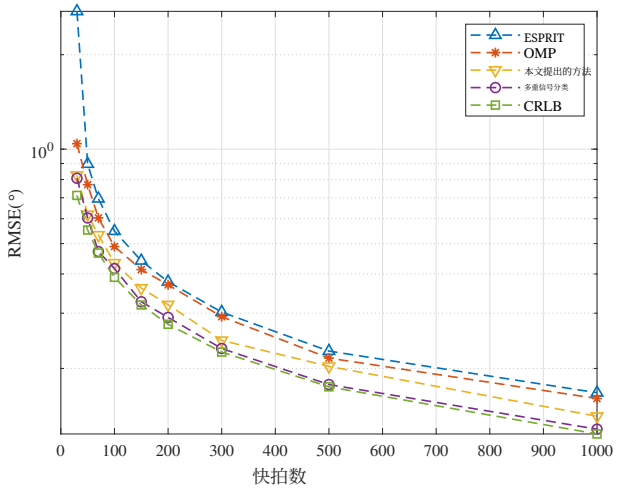

图 3：信噪比为 = 10 dB 时，均方根误差随快拍数 T 的变化。

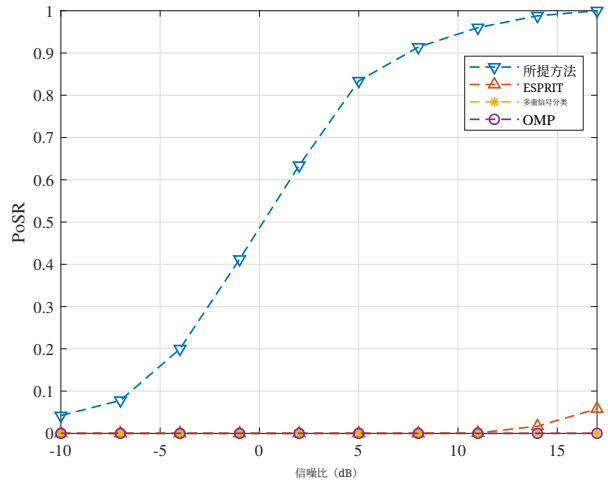

图 4：到达方向估计的成功分辨概率随信噪比的变化。

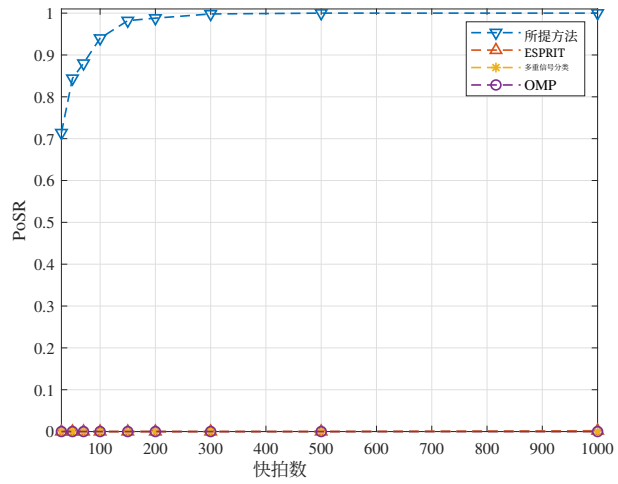

图5：成功分辨概率随快拍数 T的变化，信噪比为 = 10 dB。

且性能没有明显下降。此外，在低信噪比区域，所提算法表现出明显的性能优势，进一步验证了其有效性。

第二组仿真研究快拍数与到达方向估计性能之间的关系，信噪比固定为 10 dB。如图 3所示，即使快拍数较少，所提算法也能实现低于 1° 的角分辨率。随着快拍数增加，均方根误差持续降低，最终达到 0.1°量级的估计精度。

第三组仿真验证所提算法分辨紧密间隔信源的能力。引入第二个入射信源，其方向为 $(81^\circ,\ 85^\circ)$，与第一个信源形成 5°的角间隔。从图 4可以看出，即使在高信噪比条件下（例如，信噪比= 10 dB），当两个或更多信源位于端射区域时，基准算法几乎完全无法处理这类情况，成功分辨概率接近于零。相比之下，所提算法的多信源分辨成功率随信噪比提高而稳步上升，在信噪比 100% 时达到估计成功率 = 17dB。

图 5 展示了信噪比固定为 10 dB 时各算法的成功分辨概率。可以观察到，随着快拍数增加，基准算法的成功分辨概率始终为零，没有任何改善。相比之下，所提算法的成功分辨概率随着快拍数增加而持续上升，当快拍数达到 300 时，估计成功率达到 100%。结果表明，使用可重构阵列实现稳健角度估计仅需适量的信号快拍，从而显著降低数据量需求。

V. 结论

本文提出了一种基于FA阵列的到达方向估计算法，用于缓解端射效应导致的性能下降。通过充分利用流体天线的灵活可重构性，实现了阵列导向矢量的等效映射，从而有效抑制了端射效应的影响。仿真结果验证了所提方法对来自端射区域的信号源进行分辨的准确性和有效性。与传统算法相比，所提方法表现更优，尤其是在端射区域内存在紧密间隔信源的复杂场景中。未来的工作将聚焦于将该方法扩展到更复杂的阵列几何结构，并研究流体天线系统实际应用中的限制。

参考文献

[1] S. Kim 等，“面向 6G 太赫兹通信的视觉辅助定位与波束聚焦”，IEEE J. Sel. Areas Commun.，第 42 卷，第 9 期，第 2503-2519 页，2024 年 9 月。[2] M. Zawish 等，“AI 与 6G 进军元宇宙：基础、挑战与未来研究趋势 ”，IEEE Open J. Commun. Soc.，第 5 卷，第 730-778 页，2024 年。[3] J. Wang、Y. -C. Liang 和 S. Sun，“多用户多物联网设备协作无线电：一种面向蜂窝物联网的新型海量接入方案”，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 23 卷，第 9 期，第 11876-11889 页，2024 年 9 月。[4] A. J. Weiss 和 M. Gavish，“利用插值阵列和 ESPRIT 进行方向查找”，IEEE Trans. Signal Process.，第 39 卷，第 6 期，第 1473-1478 页，1991 年 6 月。[5] F. -G. Yan、M. Jin、S. Liu 和 X. -L. Qiao，“采用实值 MUSIC 基于任意阵列几何结构高效进行方向估计”，IEEE Trans. Signal Process.，第 62 卷，第 6 期，第 1548-1560 页，2014 年 3 月。[6] M. Wagner、Y. Park 和 P. Gerstoft，“非均匀线阵的无网格到达方向估计与根 MUSIC”，IEEE Trans. Signal Process.，第 69 卷，第 2144-2157 页，2021 年 3 月。[7] X. Lai、X. Zhang、W. Liu 和 J. Li，“利用移动发射和接收阵列增强 MIMO雷达到达方向估计的稀疏性：从合成互质阵列的角度出发”，IEEE Trans. Signal Process.，第 72 卷，第 4022-4036 页，2024 年 8 月。[8] J. Chu、Z. Zhang、Y. Huang 和 T. Su，“线阵运动的二维到达方向估计探索：均匀与稀疏圆周运动”，IEEE Trans. Signal Process.，第 72 卷，第 4115-4131 页，2024 年。[9] F. Belloni、A. Richter 和 V. Koivunen，“通过流形分离对任意阵列结构进行到达方向估计”，IEEE Trans. Signal Process.，第 55 卷，第 10 期，第 4800-4810 页，2007 年 10 月。[10] V. Dakulagi，“在到达方向估计性能与计算复杂度之间实现权衡的新方法”，IEEE Commun. Lett.，第 25 卷，第 4 期，第 1183-1186 页，2021 年 4 月。[11] W. Ma、L. Zhu 和 R. Zhang，“通过天线位置优化增强无线感知的可移动天线”，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 23 卷，第 11 期，第 16575-16589 页，2024 年 11 月。[12] T. Wu 等，“赋能 6G 的流体天线系统：原理、应用与研究方向。” arXiv 预印本，arXiv:2412.03839，2024 年。[13] T. Wu、Y. Tian、J. Tang、K. Zhi、M. Elkashlan、K.-F. Tong、N. Al-Dhahir、C.-B. Chae、M. C. Valenti、G. K. Karagiannidis 和 K.-M. Luk，“可扩展流体天线系统：阵列信号处理的新范式”，arXiv 预印本，arXiv:2508.10831，2025 年。[14] H. Xu、T. Wu、Y. Tian、M. Jin、W. Liu、Q. Guo、M. Elkashlan、M. C. Valenti、C.-B. Chae、K.-F. Tong 和 K.-K. Wong，“未来属于流体：利用稀疏流体天线革新到达方向估计”，arXiv 预印本，arXiv:2508.10826，2025 年。[15] H. Xu、T. Wu、Y. Tian、K. Zhi、W. Liu、B. Liu、H. C. So、N. Al-Dhahir、K.-F. Tong、C.-B. Chae 和 K.-K. Wong，“时限移动条件下基于流体天线的到达方向估计”，arXiv 预印本，arXiv:2508.10820，2025 年。[16] Y. Chen、L. Yan、C. Han 和 M. Tao，“太赫兹超大规模MIMO系统的毫度级到达方向估计与跟踪”，IEEE Trans. Wireless Commun.，第 21 卷，第 2 期，第 869-83 页，2022 年 2 月。[17] Y. Xiang、Y. Gao、X. Yang、S. Kang 和 M. Shao，“一种面向MIMO-OFDM通感一体化系统的基于ESPRIT的移动目标感知方法”，IEEE Commun. Lett.，第 27 卷，第 12 期，第 3205-3209 页，2023 年 12 月。[18] K. Aghababaiyan、V. Shah-Mansouri 和 B. Maham，“面向混合非均匀阵列的高精度基于正交匹配追踪的到达方向估计方案”，IEEE Commun. Lett.，第 24 卷，第 2 期，第 354-357 页，2020 年 2 月。