

天线阵列结构对 DOA 估计准确性的影响分析

张元超

中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036

摘要: 在高分辨率测向和空间目标检测等应用场景下, 波达方向估计是阵列信号处理的重要研究课题。天线阵列结构的选择和设计对于提升 DOA 估计的准确度与分辨率具有关键意义。本文针对不同的天线阵列结构, 分析其对 DOA 估计准确性的影响机理。首先, 给出了具有典型几何形式的阵列信号接收模型; 其次, 讨论了互耦效应和阵元方向图等关键因素如何影响参数估计精度; 然后, 设计了在不同阵列结构下的数值仿真实验, 验证了在相同信噪比和快拍数条件下, 不同阵列布置策略的估计性能差异。结果表明, 合理的几何设计与互耦校正可显著提升 DOA 估计的稳健性与分辨力, 为工程实践中选取合适的阵列结构和算法提供参考。

关键词: 阵列结构; 波达方向; 互耦; 方向图; 估计准确度

Analysis of the Influence of Antenna Array Structure on the Accuracy of DOA Estimation

Zhang, Yuanchao

Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu, Sichuan, 610036, China

Abstract: In application scenarios such as high-resolution direction finding and spatial target detection, direction of arrival (DOA) estimation is an important research topic in array signal processing. The selection and design of the antenna array structure play a crucial role in improving the accuracy and resolution of DOA estimation. This paper analyzes the influence mechanism of different antenna array structures on the accuracy of DOA estimation. Firstly, an array signal reception model with typical geometric forms is presented. Secondly, how key factors such as the mutual coupling effect and the element pattern affect the parameter estimation accuracy is discussed. Then, numerical simulation experiments under different array structures are designed to verify the differences in the estimation performance of different array arrangement strategies under the same signal-to-noise ratio and number of snapshots. The results show that reasonable geometric design and mutual coupling correction can significantly enhance the robustness and resolution of DOA estimation, providing a reference for selecting appropriate array structures and algorithms in engineering practice.

Keywords: Array structure; Direction of arrival; Mutual coupling; Pattern; Estimation accuracy

DOI: 10.62639/sspis10.20250204

在现代无线通信、雷达侦测以及电子对抗系统中, 如何高精度地获取目标或干扰信号的空间角度信息十分关键。波达方向 (Direction of Arrival, DOA) 估计算法通过布设天线阵列并利用波束差异或子空间分解来获取入射角。阵列结构也决定了最终测向精度: 若几何布局或方向图设计不合理, 互耦与失配将使导向矢量偏离或分辨力下降。本文围绕不同阵列几何形状与校准策略进行统一分析, 并辅以数值实验, 为理解结构优化对 DOA 估计精度的影响提供参

一、阵列信号接收模型

(一) 基本数据模型

考虑一个由 M 个天线阵元组成的窄带阵列, 目标为估计 K 个远场源信号的入射角度 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K\}$ 。在阵列基带域采样后, 第 m 个阵元在第 l 次快拍下的接收信号可表示为:

$$y_m(l) = \sum_{k=1}^K a_m(\theta_k) s_k(l) + n_m(l),$$

其中 $a_m(\theta_k)$ 为第 m 个阵元对于方向 θ_k 的复数增益, s_k 为第 K 个源信号在第 l 次快拍

的幅度, $n_m(l)$ 为噪声。用矢量形式表示为:

$$y(l) = As(l) + n(l),$$

其中, $y(l) = [y_1(l), y_2(l), \dots, y_M(l)]^T$, $A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)]$ 为阵列流形矩阵, $s(l) = [s_1(l), s_2(l), \dots, s_K(l)]^T$, $n(l) = [n_1(l), n_2(l), \dots, n_M(l)]^T$

在理想情况下, $a(\theta)$ 仅与几何坐标和波长等常数相关。但若考虑阵列结构的复杂性 (如单元方向图、互耦), 该导向矢量会出现偏差或耦合因子, 导致传统方法在实际应用时精度下降。

(二) 阵列互耦效应

当阵元相互间距较小或信号频率较高时, 阵元之间会产生耦合, 从而在阵列流形矩阵中出现额外的耦合项。可将互耦矩阵 C 写成一个 $M \times M$ 维阵, 用以修正理想的导向矢量: $a_{actual}(\theta) = Ca_{ideal}(\theta)$

若 C 未被准确建模或估计, 后续利用 a_{ideal} 进行 DOA 处理会出现明显偏差。互耦系数可呈带状对称形式, 也可能随环境变化在一定区间随机分布, 分析和校正难度因阵列结构而异。

(三) 阵元方向图与单元取向

在许多理论研究中, 会将阵元视为全向振子, 然而实际上, 不同物理设计的天线在不同角度上增益和相位响应不相同, 即方向图具有方向性和

(稿件编号: IS-25-4-1011)

作者简介: 张元超 (1990-), 男, 汉, 四川宜宾, 硕士, 工程师, 研究方向: 电子对抗。

极化特性。此外, 单元在阵列坐标轴上的具体取向也可显著改变阵列在水平面或俯仰面上的接收效果, 使得某些方向上的信号增益更高或更低。这些因素都对 DOA 估计精度造成显著影响, 尤其在多源接近、信噪比较低的情况下, 更容易出现失效或估计偏差过大的现象。

二、天线阵列结构对 DOA 估计的影响机理

(一) 均匀线阵与圆阵

1. 均匀线阵

将 M 个阵元以固定间隔 $d = \frac{\lambda}{2}$ 均匀分布在一条直线上, 是最常见的阵列形式之一。在线阵中, 若信号位于阵列的法线方向 (正侧向) 附近, 则能获得较高的分辨力和较小的估计误差; 然而, 当入射信号角度偏离较大或需要覆盖较宽的仰角范围时, 线阵往往无法兼顾所有方向的高精度。这主要是由于线阵在一维结构上仅能提供有限的角度自由度。此外, 在多目标间距较近的情况下, 如果目标集中在同一侧面而又缺乏足够采样数和信噪比, 线阵可能出现分辨模糊。

2. 均匀圆阵

如果将 M 个阵元等距地绕圆周布置, 每两个相邻阵元之间的弧长约为 $\frac{\lambda}{2}$, 则可得到对方位角 ($0^\circ \sim 360^\circ$) 的环绕式覆盖。这种结构在地面或水平方向上的监测应用中优势显著: 圆阵能够较均匀地获取各方位入射信息, 提供无死角的角度感知。然而, 在俯仰方向的维度上, 若没有额外的上下层或垂直分布, 则分辨能力较为有限。在存在环形互耦的环境中, 互耦矩阵的带状特性可能较线阵更为复杂, 需要针对圆形排列下的互耦耦合进行建模和校正。总体而言, 均匀圆阵适用于方位覆盖需求高、俯仰相对稳定的场景, 可有效应对多目标同时来袭的方位检测要求。

3. 共形阵列结构

对于安装在飞机、导弹或其他曲面的载体上, 往往形成共形阵列。此时, 阵元的方向图存在明显个体差异。若无需单独测量每个阵元的幅相响应, 算法很可能面临更高的不确定性。同时, 共形阵列在俯仰角和方位角上具有更灵活的覆盖, 适用于高机动目标、全域监测等需求, 但需要更复杂的建模与参数估计策略。

(二) 共形阵列结构

在飞机、导弹或其它非平面载体表面部署天线阵元时, 难以维持单纯的直线或圆形排布, 往往形成共形阵列。与传统的线阵、平面阵相比, 共形阵列具有以下特点:

1. 阵元方向图个体差异

由于载体曲率和安装位置的不同, 每个阵元实际的辐射方向图可能都存在不一致的主瓣、旁瓣、极化特性等。这种差异使得阵列流形难以用统一的理想模型描述, 需要依据不同母线或不同曲面段的几何关系来建立更灵活的导向矢量表达。

2. 空间覆盖多样化

共形阵列可在俯仰角和方位角上实现更灵活

的覆盖, 同时利于在高速运动平台 (如机载、弹载) 上保证一定的空气动力学特性或隐身需求; 对于任务需求广泛的系统, 可以在同一个载体上部署多个子阵, 用于不同角度、不同波段的观测。

3. 建模和估计算法更复杂

相比线阵或圆阵, 共形阵列的 DOA 估计需要同时考虑曲面影响、方向图差异以及载体姿态变化。若无法准确测量和标定各阵元的幅相响应、安装偏差或极化耦合, 则会出现明显的模型失配。此外, 互耦关系可能不再是简单的带状结构, 需更高维度的约束才能加以近似或校正。这些都对估计算法的鲁棒性提出了更高要求。

(三) 互耦修正与阵元方向图校准

阵列互耦与阵元方向图差异是影响 DOA 估计精度的主要干扰因素, 尤其在高频、紧凑布阵或复杂载体环境下更加显著。为提升估计稳健性, 可从以下几个方面着手:

1. 互耦参数的测量与校正

通过实验测量或仿真手段构造互耦矩阵 C , 将其应用于实际导向矢量修正:

$$\mathbf{a}_{\text{actual}}(\theta) = \mathbf{C} \mathbf{a}_{\text{ideal}}(\theta)$$

若互耦系数随环境或温度变化, 可在系统运行过程中通过校正信号注入、在线递推估计等方式动态更新校正矩阵。

2. 阵元方向图标定

对每个天线单元或子阵单独测量其幅相响应 (离线标定) 并建立数据库, 用于在 DOA 估计时精准匹配导向矢量; 也可在系统中加入功分网络或天线切换模块进行在线标定。

当载体具有多变姿态或可变形结构时, 需考虑不同姿态下单元方向图的转换关系以及极化耦合效应, 建立多场景标定模型。

3. 子阵划分与自适应校准

对大规模阵列可划分为若干规模较小、耦合关系相对简单的子阵, 每个子阵内部先进行相对精准的互耦和方向图校准, 再在更高层面上进行子阵间协同处理。

采用自适应校准算法 (如迭代最小二乘、稀疏贝叶斯、或最优子空间估计) 对局部不确定性进行修正, 能在保持高分辨力的同时兼顾实时性。

三、仿真实验与结果分析

(一) 实验设置

为定量分析天线阵列结构差异对 DOA 估计的影响, 设计了三个组别的数值实验:

实验 1: 线阵对比圆阵

线阵: $M=10$, 阵元等间距 $d = \lambda/2$, 信源数 $K=2$, 信噪比从 0dB 到 25dB 不等。

圆阵: 同样 $M=10$, 半径满足相邻阵元间隔约 $\lambda/2$, 信号入射角度一致。

实验 2: 互耦扰动场景

在均匀线阵中引入一个带状对称的互耦矩阵, 并设互耦系数幅值与相位在一定范围内随机波动。

比较“无互耦校正”与“基于测量的互耦校正”

两种情况下的 DOA 估计均方根误差 (RMSE)。

实验 3: 方向图与倾斜取向

考虑半波振子单元在不同倾斜角下的方向图模型 (如 90° 和 45°)，观察在同样的信噪比与入射角布置时，音乐 (MUSIC) 算法或子空间估计得到的分辨率区别。

所有实验均采用蒙特卡罗 (MonteCarlo) 重复次数为 200 ~ 500 次，以均方根误差或空间谱分辨率峰值间隔来衡量 DOA 估计性能。

(二) 结果与分析

1. 线阵 vs 圆阵的估计精度

在相同信噪比下，圆阵在方位覆盖上更具均衡性，而线阵在正法线方向的分辨力表现出更高的精度。当入射信号接近阵列边缘方向时，线阵精度明显下降，而圆阵则保持相对稳定，但各俯仰角度的估计误差略有波动。

为直观比较两种阵列的估计性能，表 1 给出了在不同信噪比下，线阵与圆阵估计 DOA (以 RMSE 计) 的平均结果示例。此处假设两个信源间的角度间隔为 10° ，且其真实入射方位分别分布在 $(0^\circ \sim 180^\circ)$ 范围内。

表 1 线阵与圆阵在不同信噪比下的 DOA 估计结果 (单位: $^\circ$)

SNR(dB)	线阵 RMSE	圆阵 RMSE
0	5.12	4.85
5	2.94	2.56
10	1.68	1.42
15	1.09	0.98
20	0.65	0.59
25	0.38	0.35

由表中数据可见：

线阵在中高信噪比 ($\geq 10\text{dB}$) 时，若信号靠近正法线方向，估计精度可优于圆阵，但在低信噪比和较大方位覆盖需求时，圆阵在平均 RMSE 上更具优势。随着 SNR 提升，两种阵列的估计 RMSE 都明显下降，但圆阵由于整体方位覆盖均匀，RMSE 随 SNR 的降低趋势在大部分方位上更具稳定性。

2. 互耦扰动影响

若不考虑互耦校正，随着互耦系数波动增强，MUSIC、ESPRIT 等传统方法的 DOA 估计误差显著增大。在进行互耦参数拟合或校正后，RMSE 明显改善；当校正较为准确且信噪比高于 10dB 时，估计精度已接近无互耦的理想情形。为了更清晰地表征互耦校正的效果，表 2 给出了在不同幅值和相位波动范围内，“无校正”和“已校正”两种情况下的平均 RMSE。此处假设线阵阵元间距依旧为 $\lambda/2$ ，两个信源间角度间隔为 12° ，SNR 固定为 15dB 。

表 2 互耦扰动强度对 DOA 估计的影响 (单位: $^\circ$)

幅值波 ($\pm \Delta g$)	相位波 ($\pm \Delta p$)	无校正 RMSE	校正后 RMSE
0.05	5°	1.83	0.61
0.10	10°	2.36	0.68
0.15	15°	3.18	1.02
0.20	20°	4.02	1.23

可见，当互耦系数波动尚小 (幅值 0.05、

相位 5°) 时，校正后 RMSE 接近 0.6° ，而若无校正则达到 1.8° ；当互耦扰动较大 (幅值 ≥ 0.15 、相位 $\geq 15^\circ$) 时，如果依然不作校正处理，估计性能严重劣化；而适度校正 (如基于测量得到的 \mathbf{C} 矩阵) 可有效恢复精度。

3. 阵元方向图与倾斜取向

当半波振子倾斜 45° 摆放时，在某些方向上的接收增益会有所提升，对多波源相邻情形下的谱峰分离度有促进作用。若仰角范围较大，方向图差异也会导致不同方向上的估计性能差别明显。整体而言，有方向增益且摆放合适的阵列单元在分辨力上优于全向振子结构。表 3 比较了在 90° 和 45° 摆放下的平均分辨率 (假设有两个相邻源的真实角度间隔为 8° ，SNR 为 20dB)，这里用“峰值间隔判定”的平均估计误差衡量分辨率优劣。

表 3 不同倾斜取向下的分辨能力比较 (单位: $^\circ$)

倾斜角度	平均分辨率 (误差)
90°	2.35
45°	1.74

可以看出，当天线单元倾斜 45° 时，其有效方向增益可帮助在相邻源处生成更明显的空间谱峰，因而平均分辨误差相对于 90° 摆放减小了约 0.6° 。不过需要注意，倾斜取向亦可能增加阵列在其他方向的盲区或副瓣干扰，仍需根据实际情况求进行权衡。

四、结语

本文系统阐述了天线阵列结构对于 DOA 估计准确度的影响机理，并通过数值仿真实验对不同阵列几何、互耦校正以及阵元方向图特性进行对比。结果表明：(1) 阵列几何布局在很大程度上决定了 DOA 估计在不同角度范围内的分辨能力；(2) 互耦效应若不加以建模，会破坏导向矢量的理想性，使得算法在中高频段或紧凑天线布局时出现严重偏差；(3) 单元方向图与摆放方式影响各入射角度下的信号增益分布，适当的方向性设计可在多源相近或噪声水平较高的场景中提升分辨精度；(4) 工程中可通过互耦校正、离线标定以及子阵划分等手段增强阵列建模精度，从而在复杂环境下依然获得较好的 DOA 测向效果。

参考文献：

- [1] 廖勇, 谢平, 于爱民, 马弘舸. 带有扼流槽结构的共形波导缝隙阵列天线研究 [J]. 现代应用物理, 2023, 14 (04): 151-156.
- [2] 陈应春, 宋晓斐. 某球面阵列天线结构设计 [J]. 电子机械工程, 2022, 38 (05): 42-45.
- [3] 徐鹏颖, 蔺卡宾, 等. 阵列天线电磁-结构-热耦合理论: 现在与未来 [J]. 电子学报, 2022, 50 (12): 2817-2853.