

# 多种均匀圆阵阵型的波达方向估计性能分析

周爽<sup>1,2</sup>, 周莉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京, 100192;  
2. 中国科学院大学计算机科学与技术学院, 北京, 100499)

**摘要** 均匀圆阵具有二维波达方向估计能力、适用于跨频段场景以及易于架设的特点, 广泛应用于民用、军事、天文探测等领域。针对某电子侦察任务 0.8~6 GHz 频率范围二维高分辨率测向需求, 开展均匀圆阵阵列模型的优化设计和波达方向估计性能比较分析, 从而确定均匀圆阵的最优阵型。首先介绍无心圆阵和中心圆阵模型结构, 理论推导圆阵阵列形式对测向的影响, 并通过多重信号分类算法进行仿真实验, 对不同信噪比、采样快拍数、半径波长比的情况下无心 7 圆阵、无心 8 圆阵、无心 9 圆阵、中心 8 圆阵、中心 9 圆阵、中心 10 圆阵等 6 种阵列模型的测向精度进行比较, 并结合波束宽度、分辨率等性能指标进行综合分析, 结果表明在 0.8~6 GHz 频带的高精度二维测向需求下, 中心 8 圆阵为最佳测向阵型。

**关键词** 波达方向估计; 均匀圆阵; 多重信号分类算法; 中心圆阵; 无心圆阵

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.02.006

**中图分类号** TN971.4+5 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)02-0046-09

## Performance Analysis of Direction of Arrival Estimation under Different Uniform Circular Arrays

ZHOU Shuang<sup>1,2</sup>, ZHOU Li<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100192, China; 2. School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101499, China)

**Abstract** The uniform circular array being capable of two-dimensional direction of arrival (DOA) estimation, suitable for wideband scenarios, and easy to deploy, the widely application is made in civilian, military, and astronomical detection fields. In response to the need for two-dimensional high-resolution DOA estimation in the frequency range of 0.8 to 6 GHz, optimization design and comparative analysis of the DOA estimation performance of uniform circular array models based on the multiple signal classification (MUSIC) algorithm are conducted to determine the optimal array configuration. The structures of the non-centered circular array and the centered circular array models are introduced. The theoretical influence of circular array forms on direction-finding is derived. The simulation experiments are conducted by using the MUSIC algorithm. The DOA estimation accuracy of five array models, including non-centered 7-circu-

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 中国科学院重点实验室基金(E32213A01S, E16505B31)

作者简介: 周爽(1999—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士生, 研究方向为星载无线总线技术、星上信息智能处理等。E-mail: zhouhuang@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 周莉(1986—), 女, 山东烟台人, 副研究员, 博士, 研究方向为航天器综合电子、星上信息智能处理等。E-mail: zhouli@nssc.ac.cn

**引用格式:** 周爽, 周莉. 多种均匀圆阵阵型的波达方向估计性能分析[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(2): 46-54. ZHOU Shuang, ZHOU Li. Performance Analysis of Direction of Arrival Estimation under Different Uniform Circular Arrays[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(2): 46-54.

lar array, non-centered 8-circular array, non-centered 9-circular array, centered 8-circular array, centered 9-circular array, and centered 10-circular array, under different signal-to-noise ratios (SNR), sampling rates, and radius-to-wavelength ratios, is compared. A comprehensive analysis is conducted with performance indicators such as beamwidth, resolution, and others simultaneously. The results show that for high-precision two-dimensional DOA estimation requirements in the 0.8 to 6 GHz frequency band, the centered 8-circular array achieves very good results in the direction-finding performance.

**Key words** direction of arrival (DOA) estimation; uniform circular arrays; multiple signal classification (MUSIC) algorithm; centered circular array; non-centered circular array

开展辐射源测向技术研究可以有效支持军事、国防、海事、救援等领域,具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。辐射源测向技术根据信号是否由己方发出可分为主动测向和被动测向<sup>[3]</sup>,主动测向容易暴露己方位置,当前测向系统大多采用被动测向。被动测向通过天线阵列直接捕获分析对方的辐射源信号实现测向,将多个天线等传感器排列在空间各个位置组成传感器阵列,利用阵列对空间信号进行接收处理。常用的被动测向方法包括比幅测向、多普勒测向、干涉仪测向、空间谱测向等方法<sup>[4-5]</sup>,其中空间谱测向凭借高灵敏度、高精度、二维测向、多源测向、超分辨等性能得到了广泛应用,其主要原理是通过计算信号在空间各个方向上的能量分布得到空间谱,因此也称为波达方向(direction of arrival, DOA)估计<sup>[6-8]</sup>。

当前 DOA 估计应用最成熟的阵列模型是均匀线阵(uniform linear array, ULA),此外还有均匀圆阵(uniform circular array, UCA)、十字阵列、均匀矩形阵列等<sup>[9]</sup>。但是线阵模型阵元之间互耦干扰较为严重,容易对接收信号产生影响,且线阵只能进行偏离阵列轴线的方位角估计,提供 180°方向信息,但实际应用当中则常常需要进行三维空间的角度估计。均匀圆阵可以提供 360°全方位的方位角和俯仰角信息<sup>[10]</sup>,实现二维波达方向估计,且对称结构使得每个阵元的特性相同,能够有效降低阵元间的互耦效应,为每个方向上的信号提供相似的估计精度和分辨率,因此也得到了广泛应用<sup>[11-12]</sup>。

均匀圆阵根据圆阵中心是否包含阵元、圆环阵为单层或者多层也有所差异,文献[13]分析了不同圆阵阵列模型,并从方向图的角度通过仿真对比了不同圆阵结构的测向性能,得出了与单层圆阵相比多层圆阵确实可以降低副瓣,但主瓣宽度不理想的结论。文献[14~15]分析了水平和竖直放置均匀圆阵的角度模糊特性,推导了影响 2 种圆阵的分辨率、方位估计的因素,并给出竖直放置的圆阵性能高于水平放置的结论。文献[16]从方向图的角度仿真对比了单圆环和双圆环的测向性能。文章[17]仿真分析了不同阵元数在相同半径下的测向精度,以及信

噪比、快拍数对测向分辨力的影响。在实际工程应用中,对天线阵型进行设计时除了对上述参数进行考虑外,还需要考虑跨频程测向时的圆阵半径、中心和无心圆阵性能进行对比,从而确定均匀圆阵的最优阵型。

本文面向某电子侦察任务 0.8~6 GHz 频率范围二维高分辨率测向需求,开展基于 MUSIC 算法的均匀圆阵阵列模型的优化设计和 DOA 估计性能比较分析,从而确定均匀圆阵的最优阵型。论文首先介绍无心圆阵和中心圆阵的理论模型,并推导出无心圆阵和中心圆阵的阵列数量对测向精度的影响,然后介绍了多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法的实现流程,基于 MUSIC 算法对比不同信噪比、采样快拍数、半径波长比条件下无心 7 圆阵、无心 8 圆阵、无心 9 圆阵、中心 8 圆阵、中心 9 圆阵、中心 10 圆阵等 6 种阵列模型的测向精度进行仿真计算,最后通过实验结果对比,确定均匀圆阵的最优阵型。

## 1 均匀圆阵模型

根据均匀圆阵的圆心是否存在阵元将模型分为无心圆阵和中心圆阵。

### 1.1 无心圆阵阵列模型

无心均匀圆阵信号模型如图 1 所示,设  $M$  个阵元平均分布在半径为  $R$  的圆环上,空间中有一远场窄带信号打入均匀圆阵,其中  $\theta$  为方位角,  $\varphi$  为俯仰角。

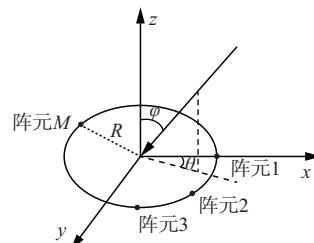


图 1 无心圆阵阵列模型

Fig. 1 Non-centered circular array model

将阵元中心设为参考点,则参考点的信号为:

$$s(t) = u(t) e^{j(\omega_0 t + \varphi(t))} \quad (1)$$

设阵元  $m$  相对于参考点的传播延迟为  $\tau_m$ , 则阵元  $m$  处接收到的信号为:

$$s(t - \tau_m) = u(t - \tau_m) e^{j(\omega_0(t - \tau_m) + \varphi(t - \tau_m))} \quad (2)$$

由于信号为远场窄带信号, 在延迟较短的情况下可以认为信号幅度和相位几乎不变, 则有:

$$s(t - \tau_m) = u(t) e^{j(\omega_0(t - \tau_m))} = s(t) e^{-j\omega_0 \tau_m} \quad (3)$$

令  $\gamma_m = 2\pi m/M$ , 则阵元  $m$  的位置坐标可以表示为  $p_m = [R \cos \gamma_m, R \sin \gamma_m, 0]$ , 信号的入射方向为  $\mathbf{v} = -[\sin \varphi \cos \theta, \sin \varphi \sin \theta, \cos \varphi]$ , 故传播延迟  $\tau_m$  可以表示为:

$$\tau_m = \frac{p_m \mathbf{v}^T}{c} = -\frac{R}{c} \sin \varphi \cos (\theta - \gamma_m) \quad (4)$$

令  $\beta = 2\pi/\lambda$ , 其中  $\lambda$  为波长, 则有:

$$\psi_m = \omega_0 \tau_m = -\beta R \sin \varphi \cos (\theta - \gamma_m) \quad (5)$$

设第  $m$  个阵元上的背景噪声为加性高斯白噪声  $n_m$ ,  $x_m$  为第  $m$  个阵元上接收到的信号, 即:

$$x_m = s(t) e^{-j\psi_m} + n_m(t) \quad (6)$$

若空间中有  $k$  个波长为  $\lambda$  的非相干远场窄带信号  $s_1, s_2, \dots, s_k$  分别从不同角度  $(\theta_1, \varphi_1), (\theta_2, \varphi_2), \dots, (\theta_k, \varphi_k)$  入射到圆阵上, 则有:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\psi_1(\theta_1, \varphi_1)} & e^{-j\psi_1(\theta_2, \varphi_2)} & \dots & e^{-j\psi_1(\theta_k, \varphi_k)} \\ e^{-j\psi_2(\theta_1, \varphi_1)} & e^{-j\psi_2(\theta_2, \varphi_2)} & \dots & e^{-j\psi_2(\theta_k, \varphi_k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\psi_M(\theta_1, \varphi_1)} & e^{-j\psi_M(\theta_2, \varphi_2)} & \dots & e^{-j\psi_M(\theta_k, \varphi_k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

则阵列接收到的数据模型可表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{A} = \{a(\theta_1, \varphi_1), a(\theta_2, \varphi_2), \dots, a(\theta_k, \varphi_k)\}$  为阵列流型导向矩阵;  $\mathbf{S}$  为信号源矢量;  $\mathbf{N}$  为噪声。

## 1.2 中心圆阵阵列模型

中心圆阵阵列结构在无芯圆阵的基础上, 在圆环的中心即参考点上存在阵元  $x_0$ , 若圆环上均匀存在  $M$  个阵元, 此时阵元数为  $M+1$ 。依旧将阵元中心设为参考点, 参考点接收的信号依旧表示为:

$$s(t) = u(t) e^{j(\omega_0 t + \varphi(t))} \quad (9)$$

参考点信号传播延迟为 0, 其他阵元相对于参

考点的传播延迟与无芯圆阵相同, 接收到的信号  $s(t - \tau_m)$  相同, 第  $m$  个阵元上接收到的信号  $x_m$  相同。

若空间中有  $k$  个波长为  $\lambda$  的非相干远场窄带信号  $s_1, s_2, \dots, s_k$  分别从不同角度  $(\theta_1, \varphi_1), (\theta_2, \varphi_2), \dots, (\theta_k, \varphi_k)$  入射到圆阵上, 则有:

$$\begin{bmatrix} x_0(t) \\ x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{-j\psi_1(\theta_1, \varphi_1)} & e^{-j\psi_1(\theta_2, \varphi_2)} & \dots & e^{-j\psi_1(\theta_k, \varphi_k)} \\ e^{-j\psi_2(\theta_1, \varphi_1)} & e^{-j\psi_2(\theta_2, \varphi_2)} & \dots & e^{-j\psi_2(\theta_k, \varphi_k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\psi_M(\theta_1, \varphi_1)} & e^{-j\psi_M(\theta_2, \varphi_2)} & \dots & e^{-j\psi_M(\theta_k, \varphi_k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_0(t) \\ s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0(t) \\ n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_M(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

则阵列接收到的数据模型可表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (11)$$

## 1.3 阵列形式对测向的影响

有效选取阵列形式可以避免测向模糊。对于无芯圆阵, 阵元数  $M$  满足大于等于 5, 但不等于 6 的整数时, 二维空间谱中不出现伪峰<sup>[18]</sup>。中心圆阵也满足此理论。设中心圆阵圆环上阵元数量为  $M$ , 推论如下:

假定  $(\theta_1, \varphi_1)$  与  $(\theta_2, \varphi_2)$  对应的导向矢量相同, 则有:

$$a(\theta_1, \varphi_1) = a(\theta_2, \varphi_2) \quad (12)$$

中心圆阵存在中心阵元  $x_0$ , 则有:

$$[1, e^{j\beta R \sin \varphi_1 \cos (\theta_1 - \gamma_m)}] = [1, e^{j\beta R \sin \varphi_2 \cos (\theta_2 - \gamma_m)}] \quad (13)$$

进而有:

$$e^{j\beta R \sin \varphi_1 \cos (\theta_1 - \gamma_m)} = e^{j\beta R \sin \varphi_2 \cos (\theta_2 - \gamma_m)} \quad (14)$$

考虑到周期性, 有下式成立:

$$\beta R \sin \varphi_1 \cos (\theta_1 - \gamma_m) = \beta R \sin \varphi_2 \cos (\theta_2 - \gamma_m) + 2\pi l_m \quad (15)$$

式中:  $l_m$  为整数。整理可得:

$$2\pi l_m = \beta R (\sin \varphi_1 \cos (\theta_1 - \gamma_m) - \sin \varphi_2 \cos (\theta_2 - \gamma_m)) = \beta R [x_m \cos \gamma_m + y_m \sin \gamma_m] \quad (16)$$

式中:

$$\begin{cases} x = \sin \varphi_1 \cos \theta_1 - \sin \varphi_2 \cos \theta_2 \\ y = \sin \varphi_1 \sin \theta_1 - \sin \varphi_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (17)$$

则有:

$$2\pi l_m = \beta R \sqrt{x^2 + y^2} (\sin \epsilon \cos \gamma_m - \cos \epsilon \sin \gamma_m) = \beta R \sqrt{x^2 + y^2} \sin(\epsilon + \gamma_m) \quad (18)$$

式中:

$$\begin{cases} \sin \epsilon = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \cos \epsilon = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (19)$$

则有:

$$2\pi l_{m+1} = \beta R \sqrt{x^2 + y^2} \sin(\epsilon + \gamma_{m+1}) \quad (20)$$

对比可得:

$$\frac{2\pi l_{m+1}}{2\pi l_m} = \frac{\beta R \sqrt{x^2 + y^2} \sin(\epsilon + \gamma_{m+1})}{\beta R \sqrt{x^2 + y^2} \sin(\epsilon + \gamma_m)} \quad (21)$$

则有:

$$\frac{l_{m+1}}{l_m} = \frac{\sin(\epsilon + \gamma_{m+1})}{\sin(\epsilon + \gamma_m)} = \frac{\sin(\epsilon + \gamma_m + \frac{2\pi}{M})}{\sin(\epsilon + \gamma_m)} = \cot\left(\frac{2\pi}{M}\right) + \cot(\epsilon + \gamma_m) \sin\left(\frac{2\pi}{M}\right) \quad (22)$$

等式左边为有理数,等式右边当  $M$  等于或者大于 6 时为无理数,方程无解,阵列流型线性无关,则无伪峰出现,此时中心圆阵阵元数量为  $M+1$ 。

此外,无心圆环阵阵元数  $M$  为奇数时的精度高于为偶数时<sup>[19]</sup>,此结论同样适用于中心圆阵,外层圆环上的阵元数量为奇数时,性能也将优于阵元数量为偶数时。

## 2 天线阵列形式的设计与性能分析

天线阵列的阵元数越多,天线布阵、接收机硬件和软件处理设计越复杂,需要综合考虑。另外,圆阵外层阵元数量为偶数,相位信息对称,根据相位可以实现实数化,简化计算。阵列半径增大可以降低阵元间的互耦效应,提高测向精度和分辨率,但过大会产生测向模糊,一般情况下阵列半径和波长的比设置为 0.5。但对于跨频程的半径设计,需要进行计算仿真,进行性能比较。实际应用时半径波长比也是需要考虑的关键参数。

本文面向某电子侦察任务 0.8~6 GHz 频率范围二维高分辨率测向需求,根据上文理论推导,并考虑到成本、系统实现复杂度等因素,可行的天线阵列形式有无心 7 圆阵、无心 8 圆阵、无心 9 圆阵、中心 8 圆阵(即中心阵元+圆环 7 阵元)、中心 9 圆阵(即中心阵元+圆环 8 阵元)、中心 10 圆阵(即中心阵元+圆环 9 阵元)6 种阵列模型。需求中 0.8~6 GHz 的测向频段,频差为 7.5 倍,在阵元半径不变的情况下,对应的半径波长比也有 7.5 倍之差。因此,除了需要通过测向性能对比确定阵列模型外,还需要增加天线阵列的不同半径波长比的性能比较,确定阵列模型的半径。本文拟采用经典空间谱测向算法 MUSIC 算法<sup>[20-23]</sup>对上述天线阵列性能进行仿真分析。

2.1 仿真实验设计

本文设计的仿真实验采用 MUSIC 算法实现 DOA 估计,谱峰搜索时方位角搜索范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ ,俯仰角的搜索范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ ,方位角和俯仰角的步进角度都为  $1^\circ$ ,并利用 UV 平面绘制二维空间谱。每次实验随机产生不同角度信号,通过蒙特卡洛实验得到的均方根误差来衡量测向精度。设  $N$  为实验次数, $\theta'$  为方位角估计值, $\theta$  为方位角真实值, $\varphi'$  为俯仰角估计值, $\varphi$  为俯仰角真实值,测向性能比较采用的为信号测角的均方根误差(root mean square error, RMSE),包括信号方位角的均方根误差和俯仰角的均方根误差。具体定义如式(23)和式(24)所示。

### 2.1 仿真实验设计

信号方位角的均方根误差为:

$$\text{RMSE}_\theta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\theta' - \theta)^2} \quad (23)$$

俯仰角的均方根误差为:

$$\text{RMSE}_\varphi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\varphi' - \varphi)^2} \quad (24)$$

### 2.2 性能分析

#### 2.2.1 信噪比对测向精度的影响

对比不同信噪比下 6 种阵列的测向精度,每次实验时固定信源数量为 1,信源方向随机产生,阵元半径波长比为 0.5,采样快拍数为 256,信噪比从 -10 dB 步进到 20 dB,每种阵列模型在此信噪比下进行 100 次实验,方位角和俯仰角的测向精度随信噪比的变化实验结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随着信噪比的提高,6 个阵列结构测向角度的均方根误差均有所降低,测向精度提高。在实验条件一致的情况下,无论从阵元数量相等的角度还是从外层圆环上阵元数量为奇数的角度进行比较,都可以得出中心圆阵的测向精度高于无心圆阵的结论,尤其在信噪比较低的情况下对比效果更加明显,由此可见,中心阵元对测向精度有重要影响。在 3 种无心阵列中,测向精度最好的阵型是无心 9 圆阵,最差的是无心 8 圆阵,由此可见,在阵列结构相同的情况下,外层圆环阵元数量为奇数

的阵型测向效果会高于阵元数量为偶数的阵型,同时将无心 7 圆阵和无心 9 圆阵相比,二者圆环上阵元数都为奇数,从结果可以看出无心 7 圆阵与无心 9 圆阵比测向精度较差,说明阵元数量的增加会改善测向性能。在 3 种中心圆阵结构中,在信噪比较高的情况下阵列测向精度差别不大,在信噪比较低的情况下圆环上阵元数量为奇数的情况下测向效果较好。

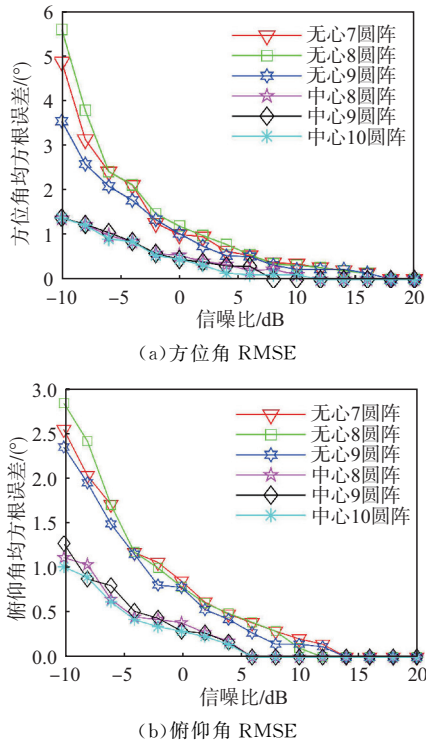


图 2 6 种圆阵的测向精度随信噪比的变化

Fig. 2 Variation of direction-finding accuracy with SNR for six circular arrays

### 2.2.2 采样快拍数对测向精度的影响

对比不同采样快拍数下 6 种阵列的测向精度,每次实验时固定信源数量为 1,信源方向随机产生,阵元半径波长比为 0.5,信噪比为 0 dB,对比采样快拍数为 64、128、256、512、1 024 情况下的测向精度,进行 100 次实验,方位角和俯仰角的测向精度随采样快拍数变化的实验结果如图 3 所示。

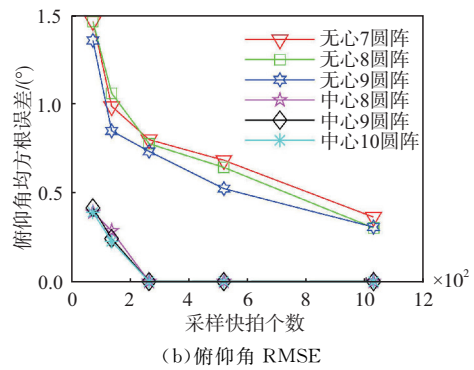
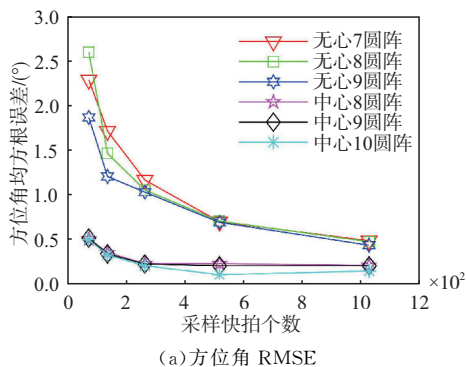


图 3 6 种圆阵的测向精度随采样快拍数的变化

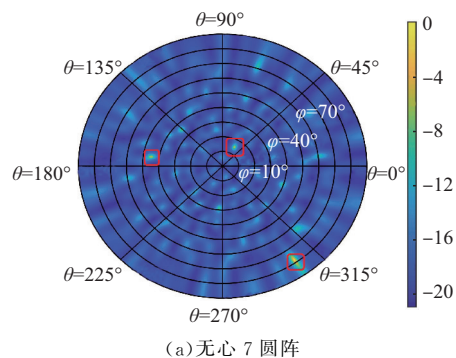
Fig. 3 Variation of direction-finding accuracy with sampling snapshot numbers for six circular arrays

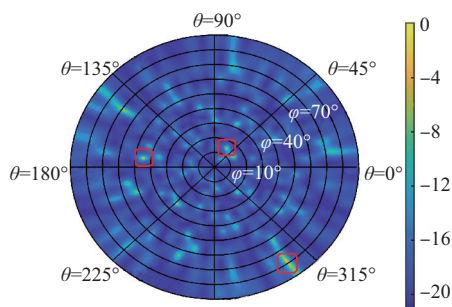
从图 3 可以看出,随着采样快拍数的增加,6 种阵列测向角度的均方根误差都有所降低。并且可以明显看出中心圆阵的测向精度要远高于无心圆阵。且在快拍数高于 256 的情况下,中心圆阵的测向精度一直保持在较低的范围,而无心圆阵结构的测向精度稳定性较差。

### 2.2.3 半径波长比对测向精度的影响

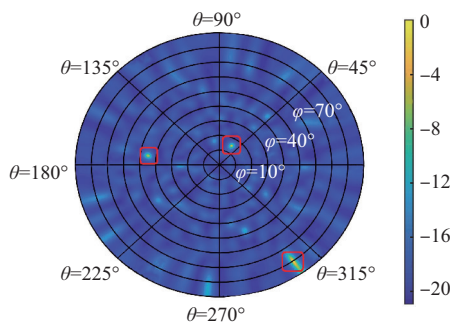
阵列半径增大可以降低阵元间的互耦效应,提高测向精度和分辨率,但过大会产生测向模糊,一般情况下阵列半径和波长的比设置为 0.5。

实验时信源数量设置为 3,为了展示测向效果,指定 3 个信源的入射方位角分别为  $[60^\circ, 172^\circ, 305^\circ]$ ,俯仰角分别为  $[15^\circ, 45^\circ, 80^\circ]$ ,半径波长比设置为 3.75,信噪比为 0 dB,采样快拍数为 256。6 种圆阵结构的 UV 空间谱如图 4 所示,其中红色框图指向 3 个信源,其余谱峰皆为伪峰,可以看出此时波束宽度较低,测向指向性较好,无心 9 圆阵、中心 8 圆阵、中心 10 圆阵具备较好的测向效果。但是无心 7 圆阵、无心 8 圆阵和中心 9 圆阵存在较多的伪峰,且伪峰功率较高,容易造成测向失败。由此验证出外层圆环上的阵元数量为奇数时测向效果好于为偶数的理论,可以更好地避免伪峰出现。

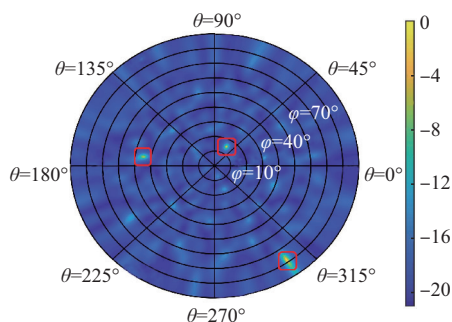




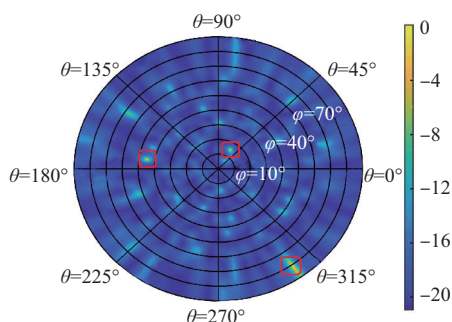
(b) 无芯 8 圆阵



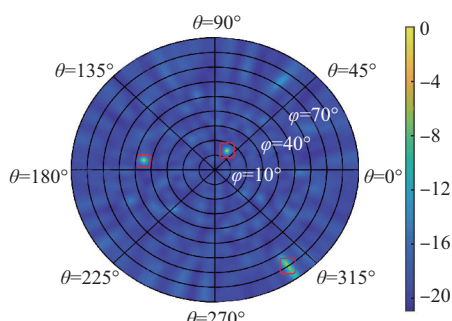
(c) 无芯 9 圆阵



(d) 中心 8 圆阵



(e) 中心 9 圆阵



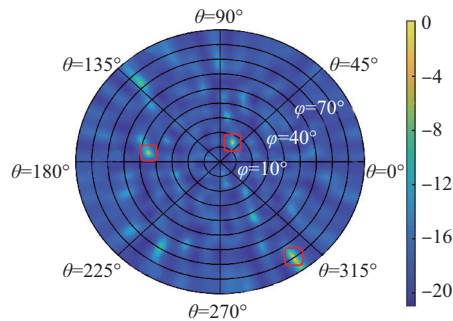
(f) 中心 10 圆阵

图 4 半径波长比为 3.75 时 6 种阵列结构的空间谱

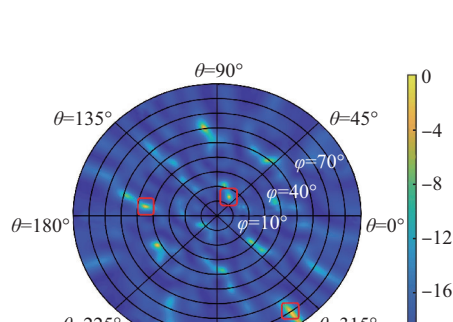
Fig. 4 Spatial spectra of six circular arrays with a radius-to-wavelength ratio of 3.75

半径波长比设置为 3,其余条件不变,6 种圆阵结构的 UV 空间谱如图 5 所示,可以看出在半径波长比为 3 时无芯 7 圆阵、无芯 8 圆阵和中心 9 圆阵的测向性能依旧没有很大的改善,存在较多的伪峰。此时阵列半径依旧很大,可以产生测向模糊。

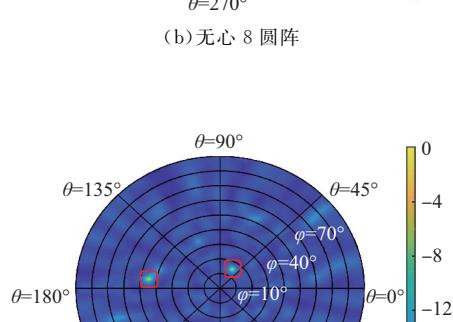
半径波长比设置为 0.3,其余条件不变,对比 6 种圆阵结构的 UV 空间谱如图 6 所示,可以看出此时 6 种结构的测向指向性都变差,原因在于测向分辨率与阵列孔径成正比,降低阵列孔径会使得测向分辨率变差,此时阵列间会有较强的互耦效应,但同时也会减少测向模糊问题,因此几乎没有伪峰。从图 6 可以看出此时主瓣波束宽度较大,测向指向力变差,测向误差较大。但相对来说无芯 9 圆阵、中心 8 圆阵、中心 10 圆阵的谱峰更加尖锐、分辨率更高。



(a) 无芯 7 圆阵



(b) 无芯 8 圆阵



(c) 无芯 9 圆阵

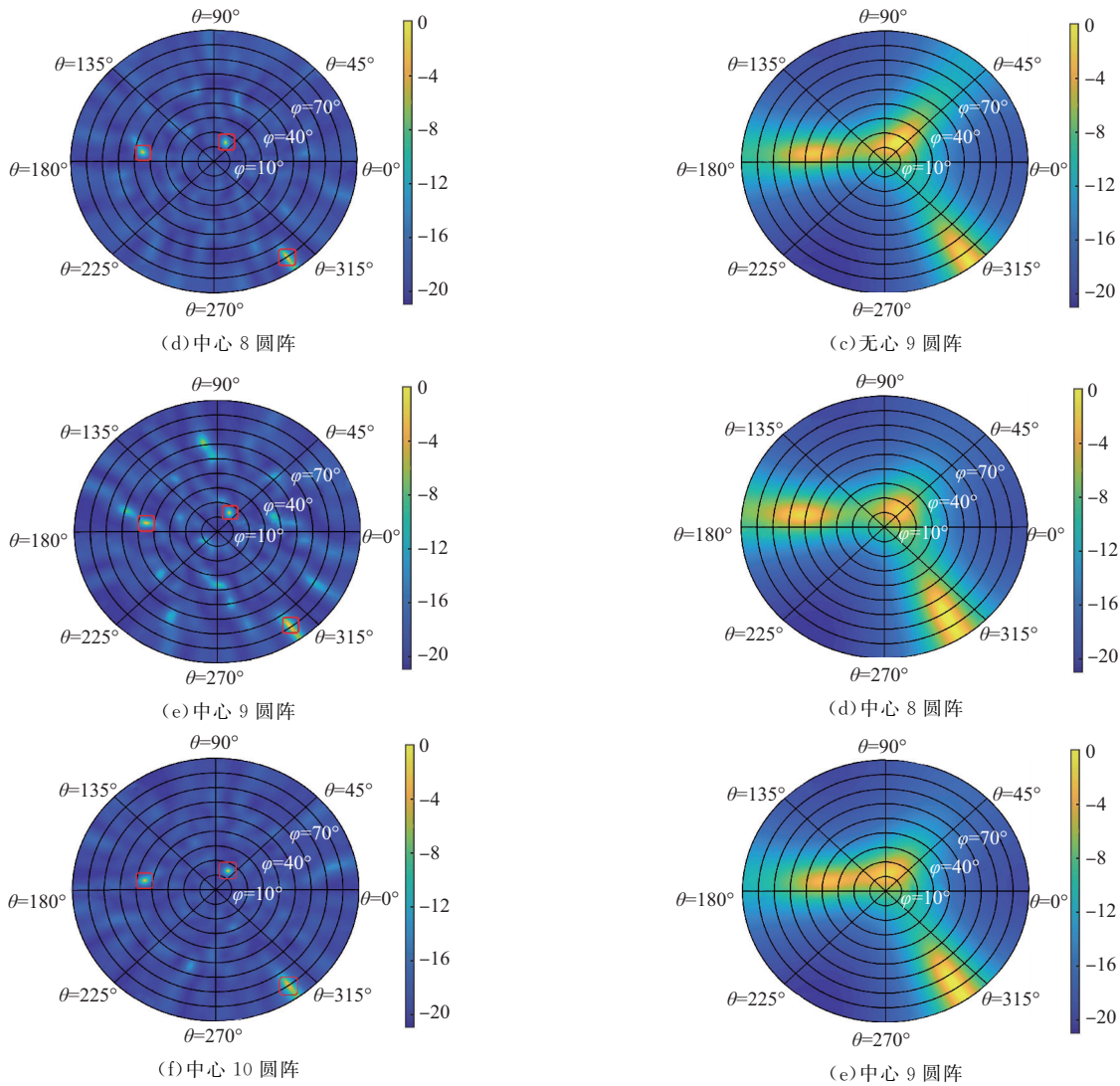


图 5 半径波长比为 3 时 6 种圆阵的空间谱

Fig. 5 Spatial spectra of six circular arrays with 3 radius-to-wavelength

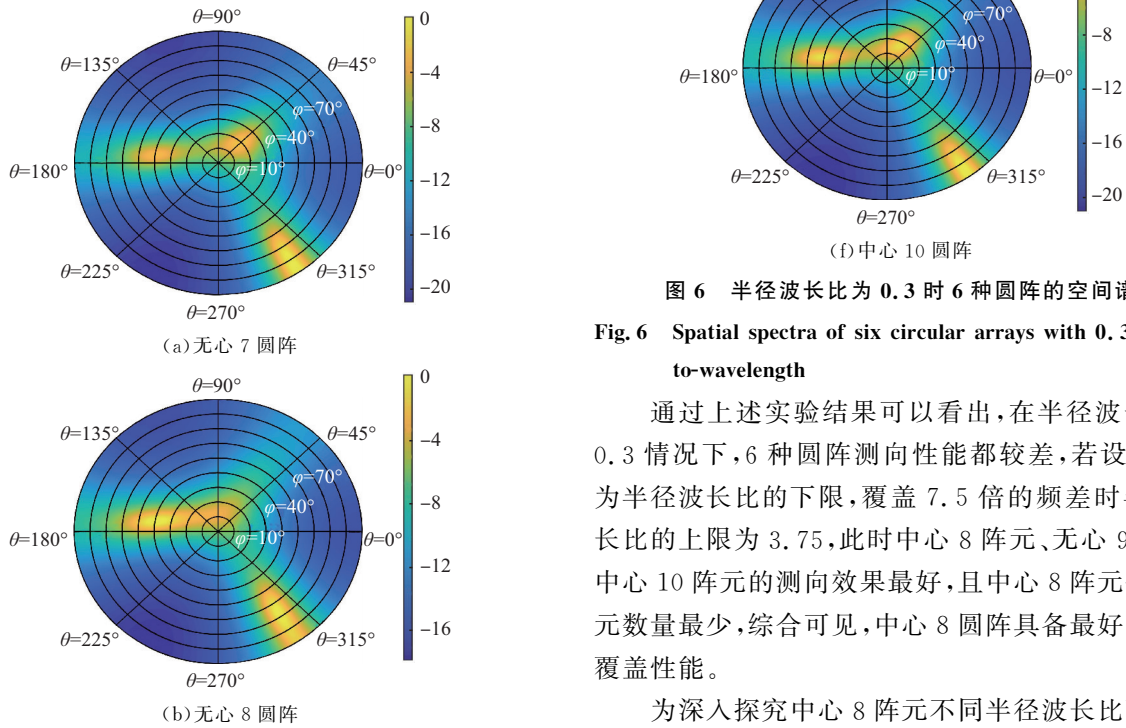


图 6 半径波长比为 0.3 时 6 种圆阵的空间谱

Fig. 6 Spatial spectra of six circular arrays with 0.3 radius-to-wavelength

通过上述实验结果可以看出,在半径波长比为 0.3 情况下,6 种圆阵测向性能都较差,若设置 0.5 为半径波长比的下限,覆盖 7.5 倍的频差时半径波长比的上限为 3.75,此时中心 8 阵元、无心 9 阵元、中心 10 阵元的测向效果最好,且中心 8 阵元使用阵元数量最少,综合可见,中心 8 圆阵具备最好的频带覆盖性能。

为深入探究中心 8 阵元不同半径波长比下的测

向精度,并设置合适的阵元半径,进行如下实验:固定信源数量为 1,信噪比为 0 dB,对比采样快拍数为 128,在每个半径波长比下进行 100 次实验,方位角和俯仰角的测向精度变化如图 7 所示。

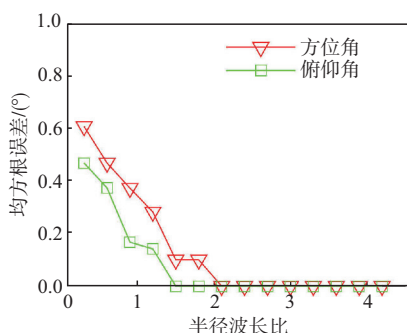


图 7 中心 8 圆阵测向精度随半径波长比的变化

Fig. 7 Variation of direction-finding accuracy with radius-to-wavelength ratio in the centered 8-circular array

从图 7 可以看出,当半径波长比为 0.3 时,测向误差较大。随着半径波长比的增大,测向误差减小,此时主瓣波束尖锐,但是圆半径过大会导致副瓣增多。经过综合考虑,半径波长比可以选择 0.5~3.75 m,以覆盖 0.8~6 GHz(对应波长为 0.375~0.05 m)的频差,此时阵列半径可以设置为最长波长的一半,即 0.187 5 m。

### 3 结语

本文基于均匀圆阵分析了无心圆阵和中心圆阵阵列形式对测向的影响,通过 MUSIC 算法仿真对比得出中心 8 圆阵在信噪比、采样快拍数、信号频率范围、成本等影响因素下为最佳测向阵型,可以满足二维测向需求,并为均匀圆阵 DOA 估计提供了理论基础。但是中心 8 圆阵外层圆环数量为奇数时,相位信息不对称,难以根据相位实现实数化,给基于 FPGA 等系统实现 DOA 估计增加了困难,这也是目前需要重点研究的方向。

### 参考文献

[1] 张洪顺,王磊. 无线电监测与测向定位[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社,2011.  
ZHANG H S, WANG L. Radio Monitoring and Direction Finding and Positioning[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2011. (in Chinese)

[2] TUNCER T E, FRIEDLANDER B. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation[M]. Amsterdam: Academic Press, 2009.

[3] 甘露. 通信信号测向与分析技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

GAN L. Studies on Technologies of Direction-of-Arrival Estimation and Analysis Communication Signals [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)

[4] 朱进勇,王立冬. 被动测向技术综述[J]. 飞航导弹, 2016(3): 75-79.  
ZHU J Y, WANG L D. Overview of Passive Direction Finding Technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(3): 75-79. (in Chinese)

[5] LIU W, HAARDT M, GRECO M S, et al. Twenty-Five Years of Sensor Array and Multichannel Signal Processing: A Review of Progress to Date and Potential Research Directions[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2023, 40(4): 80-91.

[6] 王永良,陈辉,彭应宁,等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
WANG Y L, CHEN H, PENG Y N, et al. Theory and Algorithm of Spatial Spectrum Estimation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

[7] ERANTI P K, BARKANA B D. An Overview of Direction-of-Arrival Estimation Methods Using Adaptive Directional Time-Frequency Distributions[J]. Electronics, 2022, 11(9): 1321.

[8] FRIEDLANDER B. Antenna Array Manifolds for High-Resolution Direction Finding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(4): 923-932.

[9] TIAN Y, HUANG Y H, ZHANG X X, et al. A Robust Algorithm for DOA Estimation of Coherent Sources with UCA[J]. The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), 2022: 692-701.

[10] 倪柳柳,陈辉,倪萌钰,等. 均匀圆阵主特征矢量分析解相干算法[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(3): 58-65.  
NI L L, CHEN H, NI M Y, et al. Uniform Circular Array Decoherence Algorithm Based on Principal Eigenvector Analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(3): 58-65. (in Chinese)

[11] 张紫晗. 基于低成本软件无线电的测向系统设计[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2022.  
ZHANG Z H. Design of Direction Finding System Based on Low Cost Software Radio[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)

[12] LIN M Y, TIAN Y, ZHANG X X, et al. Parameter Estimation of Frequency-Hopping Signal in UCA Based on Deep Learning and Spatial Time-Frequency Distribution[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 7460-7474.

[13] 夏添,谢俊好. 电子侦察中圆形天线阵列配置方式仿

- 真分析[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2011, 23(3): 310-314.
- XIA T, XIE J H. On the Pattern of Circular Antenna Array Configuration in Electronic Reconnaissance[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2011, 23(3): 310-314. (in Chinese)
- [14] 吴垚, 陈辉. 两种均匀圆阵角度模糊特性分析[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(2): 91-96.
- WU Y, CHEN H. Analysis of Angle Ambiguity Characteristics of Two Types of Uniform Circular Arrays [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2011, 25(2): 91-96. (in Chinese)
- [15] 吴垚, 陈辉. 两种均匀圆阵特性对比分析研究[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(1): 62-66, 71.
- WU Y, CHEN H. Comparison and Analysis of Characteristics of Two Different Uniform Circular Arrays [J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(1): 62-66, 71. (in Chinese)
- [16] 张林. 导航天线分析与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- ZHANG L. Analysis and Design of Navigation Antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [17] 芦伟东. 基于均匀圆阵的短波测向性能分析[J]. 中国无线电, 2022(7): 41-43.
- LU W D. Performance Analysis of Short Wave Direction Finding Based on Uniform Circular Array [J]. China Radio, 2022(7): 41-43. (in Chinese)
- [18] 常城. 基于均匀圆阵的 DOA 估计及其 FPGA 实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- CHANG C. DOA Estimation and Its FPGA implementation Based on UCA[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [19] 束威荣, 何炳发, 高铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- SHU X R, HE B F, GAO T. Phased Array Radar Antennas[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [20] SCHMIDT R. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [21] XU K J, XING M D, CUI Y, et al. How to Determine an Optimal Noise Subspace? [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20: 3500304.
- [22] 田航. MUSIC 算法性能研究综述[J]. 科技资讯, 2019, 17(27): 5-6.
- TIAN H. Overview of MUSIC Algorithm Performance Research [J]. Science & Technology Information, 2019, 17(27): 5-6. (in Chinese)
- [23] BUTT U M, KHAN S A, ULLAH A, et al. Towards Low Latency and Resource-Efficient FPGA Implementations of the MUSIC Algorithm for Direction of Arrival Estimation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021, 68(8): 3351-3362.

(编辑: 徐楠楠)