

DOI: 10.7652/xjtuxb202002018

L型结构的互质阵列二维波达方向估计

杨旭东¹, 刘鲁涛¹, 李利²

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 150001, 哈尔滨;

2. 海军大连舰艇学院信息系统系, 116018, 辽宁大连)

摘要: 针对雷达 L 型均匀阵列因阵元间距太小导致无法在实际中摆放的问题,提出了一种 L 型互质阵列协方差重构二维波达方向(2D-DOA)估计算法。首先将 L 型互质阵列 2D-DOA 问题分解为两个子阵的 1D-DOA 问题,再根据互质阵列的位置,确定对应的虚拟均匀阵列,由于虚拟均匀阵列具有半正定(PSD)、低秩、托普利兹的结构特点,因而根据互质阵列接收数据的协方差矩阵,构造一个优化过程重构虚拟均匀阵列的协方差矩阵;然后利用 MUSIC 算法完成两个 1D-DOA 估计;最后利用配对算法对估计的一维角度进行配对。仿真实验表明,与 L 型均匀阵列 MUSIC 算法和 L 型互质阵列 SS-MUSIC 算法相比,在信噪比大于 0 dB、快拍数大于 50 的条件下,所提算法的方向角和俯仰角均方根误差最小,均低于 0.8° ,可分辨角度最小间距为 5° ,证明了所提算法在估计精度和分辨力方面的优越性。

关键词: 二维 DOA 估计;L 型互质阵列;矩阵重构;配对

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0144-07

A Method for Estimating 2D Direction of Arrival Based on Coprime Array with L-Shaped Structure

YANG Xudong¹, LIU Lutao¹, LI Li²

(1. College of Information and Telecommunication, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Department of Information System, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China)

Abstract: A novel method for estimating 2-dimensional direction of arrival (2D-DOA) based on matrix reconstruction of L-shaped coprime array is proposed to deal with the problem that the L-shaped uniform linear array (ULA) of radars cannot be used in practical application because of the small distance between the adjacent elements. Firstly, the virtual ULA is determined according to the position of the coprime array. Since the virtual ULA has the characteristics of semi-positive definite (SPD), low rank and Toeplitz structure, optimization is conducted to reconstruct a virtual ULA covariance matrix based on the covariance matrix of the data received by the coprime array. Then, the MUSIC algorithm is applied to estimate two 1D angles. Finally, the pair matching method is used to match estimated 1D angles. Simulation results and comparisons with L-shaped ULA MUSIC algorithm and L-shaped coprime array SS-MUSIC algorithm show that when the signal-to-noise ratio is greater than 0 dB and the number of snapshots is greater than 50, the RMSE of the proposed algorithm is less than 0.8° and the

收稿日期: 2019-06-14。 作者简介: 杨旭东(1993—),男,硕士生;刘鲁涛(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61571149,61801482)。

网络出版时间: 2019-11-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191121.2042.004.html>

smallest spacing of discernable angles is 5° , which illustrates the superiority of the proposed algorithm in both estimation accuracy and resolution.

Keywords: 2D-DOA estimation; L-shaped coprime array; matrix reconstruction; pair matching

二维波达方向(2D-DOA)估计是阵列信号处理的一个重要研究方向,在雷达、声纳、移动通信系统等众多领域中发挥着重要作用^[1-2],因而受到研究者的广泛关注。研究表明,在平行均匀阵列、矩形阵列、圆阵等阵列几何形状中,L阵列可以实现更高的DOA估计精度^[3]。

根据L阵列的结构特征,工程中通常将L阵列2D-DOA估计问题分解为两组一维DOA估计,再通过配对算法得到无模糊的方位角和俯仰角。对L阵列2D-DOA估计的研究主要分为以下几个方面:①阵列几何结构;②估计精度更高的DOA估计算法;③对估计的方位角和俯仰角进行配对。文献[4]提出了一种基于空间投影角度配对的L阵列二维DOA估计算法,并且通过Root-MUSIC算法减少计算量。文献[5]提出了一种L阵列下基于传播算子的二维DOA估计算法,避免了对协方差矩阵的特征分解,无需谱峰搜索。文献[6]提出了一种适用于低信噪比和小快拍环境的2D-DOA估计新方法,只需1D谱峰搜索,所估计的角度参数可实现自动配对。以上方法中的L阵列都是由两个垂直均匀阵列构成,然而,当入射信号波长较小时,阵元间距也会相应变得很小,这将限制L型均匀阵列在实际中的应用。此外阵元间距越小,阵元间的互耦现象^[7]也会越严重,降低估计精度。最近,最小冗余阵列(MRA)^[8]、嵌套阵列^[9]、互质阵列^[10]等稀疏阵列因其能够提供更大的阵列孔径、提升阵列自由度(DOFs)、降低互耦效应等优点引起了研究者的兴趣,提出的算法中的L阵列是由两个垂直互质阵列构成。研究者提出了许多基于互质阵列DOA估计的算法。文献[11]应用空间平滑技术来解决信号协方差矩阵向量化后出现的信号相干问题,提出了SS-MUSIC算法。文献[12]通过核范数最小化对互质阵列进行插值填充,实现了可估计信号数的提升,提高了分辨力效果。文献[13]提出了一种利用低秩矩阵去噪的方法实现了对互质阵列DOA估计。文献[14]总结了近年来提出的3种重构算法,可以实现互质阵列协方差矩阵重构,进而实现DOA估计。针对L阵列二维DOA估计角度问题,主要算法有EigVector^[15]、CCM^[16]、PSCM^[17]和代价函数算法^[18]等,本文提出的算法采用代价函数算法对两组

一维角度进行配对。

本文在对两个一维互质阵列进行DOA估计时,提出了一种互质阵列协方差重构DOA估计算法,根据互质阵列对应的虚拟均匀阵列协方差矩阵具有的半正定(PSD)、低秩、托普利兹等结构特点,构造了一个优化过程来重构虚拟均匀阵列的协方差矩阵;接下来利用子空间类算法完成1D-DOA估计;然后利用配对算法对估计的两组1D角度配对;最后根据角度对应关系计算方位角和俯仰角。

1 信号模型

互质阵列由两个均匀阵列构成,其中一个子阵包含 $2M$ 个阵元,阵元间距为 Nd (其中 N 为阵元数, d 表示信号半波长 $\lambda/2$),另一个子阵包含 N 个阵元,阵元间距为 Md 。具体结构如图1所示。 M 、 N 为两个互质的正整数,不失一般性,假设 $M < N$ 。因为互质性,所以在将两个均匀阵列并排摆放时,除了0位置阵元外,其他位置处没有重合的阵元,这样就构成了一个阵元数为 $2M+N-1$ 的互质阵列,如图2所示。为了表示方便,将互质阵列位置表示为 $zd, z \in S, S$ 表示如下

$$S \in \{Mn \mid 0 \leq n \leq N-1\} \cup \{Nm \mid 0 \leq m \leq 2M-1\} \tag{1}$$

L型互质阵列由两个垂直的互质阵列构成,其天线坐标模型如图3所示。假设 K 个远场,不相关窄带信号从方向 $(\theta_k, \phi_k)/(\alpha_k, \beta_k), k=1, 2, \dots, K$,入射到L型互质阵列上,其中 θ_k, φ_k 分别表示入射信号的方位角和俯仰角 $(\theta_k \in [0, 2\pi], \varphi_k \in [0, \frac{\pi}{2}])$,

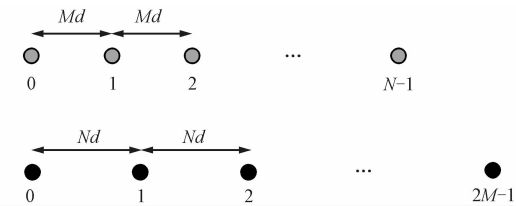


图 1 两个均匀阵列

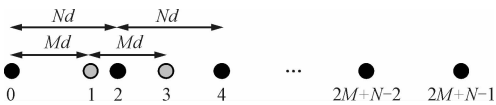


图 2 互质阵列结构

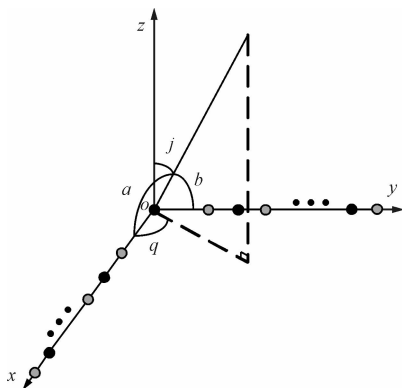


图3 L型互质阵列信号模型

α_k, β_k 分别表示入射信号与 x, y 轴夹角。 θ_k, φ_k 和 α_k, β_k 之间的几何关系为

$$\begin{cases} \cos \alpha_k = \sin \varphi_k \cos \theta_k \\ \cos \beta_k = \sin \varphi_k \sin \theta_k \end{cases} \quad (2)$$

以坐标原点 o 处的阵元为参考阵元,那么 x, y 轴上的互质阵列接收信号可分别表示为

$$\begin{cases} x(t) = \mathbf{A}(\alpha)s(t) + \mathbf{n}_x(t) \\ y(t) = \mathbf{A}(\beta)s(t) + \mathbf{n}_y(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T \\ \mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_M(t)]^T \end{cases} \quad (4)$$

$\mathbf{A}(\alpha), \mathbf{A}(\beta)$ 分别表示 x, y 轴阵列流形矢量矩阵; $\mathbf{n}_x(t), \mathbf{n}_y(t)$ 表示均值为 0、方差为 σ_n^2 的空时高斯白噪声,且与信号互不相关。 $\mathbf{a}(\alpha_i) = [1, \dots, e^{-j\pi z_{2M+N-1} \sin(\alpha_i)}]^T (z_i \in S)$ 为对应角度 α_i 的导向矢量。 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ 表示入射信号向量,其中 $s_i(t) (i=1, 2, \dots, K)$ 为均值为 0, 方差为 σ_i^2 的高斯随机信号。那么入射信号向量的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_s = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)] = \text{diag}[\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_K^2] \quad (5)$$

式中: $\sigma_i^2, i=1, 2, \dots, K$ 为入射信号能量。 x 轴互质阵列输出 $\mathbf{x}(t)$ 的协方差矩阵可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} &= E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \sum_{i=1}^K \sigma_i^2 \mathbf{a}(\alpha_i) \mathbf{a}^H(\alpha_i) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{2M+N-1} = \\ &\mathbf{A} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_K^2 \end{bmatrix} \mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{2M+N-1} = \\ &\mathbf{A} \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{2M+N-1} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{I}_{2M+N-1}$ 是一个 $(2M+N-1) \times (2M+N-1)$ 单位矩阵。然而,由于有限快拍数的限制,不能得到理想情况下的 $\mathbf{R}_{xx}$, 因此在实际中,通过使用快拍数为 J 的接收数据 $\mathbf{x}(t)$ 的最大似然估计(ML)得到协

方差矩阵

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{J} \sum_{t=1}^J \mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t) \quad (7)$$

2 矩阵重构算法

定义一个对应互质阵列的均匀阵列(CP-UULA)如下:假设 S 为互质阵列阵元位置集合,其单位为信号半波长, V 为包含 S 的最小均匀阵列,因此,可以将互质阵列中的阵元看作是 CP-UULA 中的有效阵元。

假设由 CP-UULA 接收到的信号为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_V(t) &= \sum_{i=1}^K \mathbf{a}_V(\theta_i) s_i(t) + \mathbf{n}(t) = \\ &\mathbf{A}_V(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{A}_V(\boldsymbol{\theta})$ 为 CP-UULA 的阵列流形矢量; $\mathbf{a}_V(\theta_i)$ 为对应入射角度 θ_i 的导向矢量。那么,接收信号协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_V = E[\mathbf{x}_V(t) \mathbf{x}_V^H(t)] = \mathbf{A}_V \mathbf{R}_s \mathbf{A}_V^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{|V|} \quad (9)$$

式中, $|V|$ 表示集合 V 中阵元个数。

接着,根据互质阵列位置 S 定义一个二进制采样矩阵 $\mathbf{B} \in \mathbf{C}^{(2M+N-1) \times |V|}$, $\mathbf{B}$ 的每行仅有一个位置为 1,表示 CP-UULA 对应互质阵列阵元的有效状态。因此,互质阵列接收信号可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{B} \mathbf{x}_V = \mathbf{B} \mathbf{A}_V(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{s}(t) + \mathbf{B} \mathbf{n}(t) \quad (10)$$

协方差矩阵可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} &= E[\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)] = \\ &\mathbf{B} \mathbf{A}_V \mathbf{R}_s \mathbf{A}_V^H \mathbf{B}^H + \mathbf{B} \sigma_n^2 \mathbf{I}_{|V|} \mathbf{B}^H = \mathbf{B} \mathbf{R}_V \mathbf{B}^H \end{aligned} \quad (11)$$

从式(11)可以看到,互质阵列的协方差矩阵为 CP-UULA 阵列的一个子阵。

矩阵重构算法的主要思想是从互质阵列协方差矩阵中重构 CP-UULA 阵列协方差矩阵。在无噪声,快拍数为无限大的理想情况下,一个均匀阵列接收信号的协方差矩阵具有半正定、埃尔米特、托普利兹、低秩等结构特点。因此,进行一个优化过程来求解一个对应 CP-UULA 阵列协方差矩阵的半正定、低秩、托普利兹矩阵,其由矩阵 $\mathbf{B}$ 采样得到的子矩阵与互质阵列协方差矩阵相近。优化算法为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{xx} &= \arg \min_{\mathbf{R} \in \mathbf{C}^{|V| \times |V|}} \frac{1}{2} \|\hat{\mathbf{R}}_{xx} - \mathbf{B} \mathbf{R} \mathbf{B}^H\|_F^2 + \mu \text{rank}(\mathbf{R}), \\ \text{s. t. } &\mathbf{R} \succeq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: μ 是一个正则项参数,能够平衡秩正则项和数据拟合项; $\mathbf{R}$ 为具有托普利兹、埃尔米特性质的复数矩阵。然而,式(12)是一个 NP 难问题,因此可通过迹代替秩来进行凸松弛,从而得到

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{xx} = \arg \min_{\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{|V| \times |V|}} \frac{1}{2} \|\hat{\mathbf{R}}_{xx} - \mathbf{B}\mathbf{R}\mathbf{B}^H\|_F^2 + \mu \text{tr}(\mathbf{R}) \\ \text{s. t. } \mathbf{R} \succeq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)能够通过凸优化工具^[19]求解。

至此,得到了与互质阵列对应的虚拟均匀阵列 CP-U LA 的协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ 。然后,利用子空间类方法,例如 MUSIC^[20] 算法进行 DOA 估计。MUSIC 算法空间谱表示为

$$\mathbf{P}(\alpha) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\alpha)\mathbf{U}_n\mathbf{U}_n^H\mathbf{a}(\alpha)}, \alpha \in \mathcal{D} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{a}(\alpha) \in \mathbb{C}^{|V|}$ 为 CP-U LA 的阵列导向向量; $\mathcal{D}$ 为谱峰搜索角度范围; $\mathbf{U}_n$ 是对应 $|V| - K$ 个最小特征值的特征向量构成的噪声子空间。

通过找到式(14)中最大值对应的角度得到入射信号与 x 轴夹角 $\hat{\alpha}$ 。相应地,由 y 轴接收到的数据 $y(t)$ 可以得到入射信号与 y 轴夹角 $\hat{\beta}$ 。通过文献[18]中的配对算法对估计出的 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ 进行配对,令 $\mathbf{z} =$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{a}(\alpha, \beta)\mathbf{s} + \mathbf{w}_{xy}, \text{ 具体计算步骤如下。}$$

$$(1) \mathbf{R}\mathbf{z}\mathbf{z}^H \triangleq E\{\mathbf{z}\mathbf{z}^H\} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_1 \in \mathbb{C}^{K \times 2|S|}, \mathbf{G}_2 \in \mathbb{C}^{(2|S| - K) \times 2|S|}.$$

(2) 计算

$$\hat{\Pi} \triangleq \hat{\mathbf{Q}}(\mathbf{I}_{2|S|-K} - \hat{\mathbf{P}}^H(\hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{P}}^H + \mathbf{I}_K)^{-1}\hat{\mathbf{P}})\hat{\mathbf{Q}}^H \quad (15)$$

式中: $\hat{\mathbf{P}} = (\hat{\mathbf{G}}_1\hat{\mathbf{G}}_1^H)^{-1}\hat{\mathbf{G}}_1\hat{\mathbf{G}}_2^H$; $\hat{\mathbf{Q}} = [\hat{\mathbf{P}}^T, -\mathbf{I}_{2|S|-K}]^T$ 。

(3) 计算代价函数

$$f(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \mathbf{a}^H(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) \hat{\Pi} \mathbf{a}(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$$

找到代价函数前 K 个最小值对应的角度组合即为配对后的 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ 。

(4) 通过式(2)中的角度对应关系得到配对后的方位角 $\hat{\theta}$ 和俯仰角 $\hat{\varphi}$ 。

将提出的算法总结如下:

步骤 1 根据 x, y 轴接收数据 $x(t), y(t)$ 计算相应的协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{xx}, \hat{\mathbf{R}}_{yy}$;

步骤 2 根据式(13), 计算 x, y 轴对应的 CP-U LA 的协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{xx}, \tilde{\mathbf{R}}_{yy}$;

步骤 3 使用 MUSIC 算法估计得到与 x, y 轴夹角 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$;

步骤 4 根据步骤 1~步骤 3 中的配对算法对 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ 进行匹配;

步骤 5 根据式(2)中的对应关系, 得到对应的方位角 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\varphi}$ 。

3 仿真实验

采用 Matlab 仿真实验来检验本文互质阵列协方差重构算法的性能, 并与 L 型均匀阵列 MUSIC 算法和 L 型互质阵列 SS-MUSIC 算法进行比较。实验采用 $M=2, N=3$ 的 L 型互质阵列结构, 阵元数为 $2 \times (2M+N-1)-1=11$, x, y 轴阵元分别位于单位为半波长的整数集 $S=\{0, 2, 3, 4, 6, 9\}$, 协方差重构算法的正则化参数设置为: $\mu=2.5 \times 10^{-3}/(\log T)^2 \log(2M+N-1)^{[14]}$ 。L 型均匀阵列 x, y 轴阵元分别位于单位为半波长的整数集 $S=\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, 阵元总数与 L 型互质阵列相同。

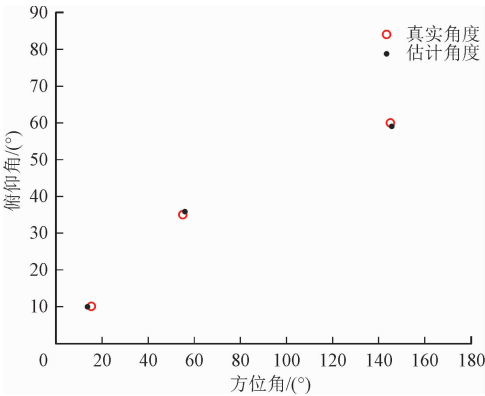
实验 1 图 4a 中入射信号方位角 $\theta=(15^\circ, 55^\circ, 145^\circ)$, 俯仰角 $\varphi=(10^\circ, 35^\circ, 60^\circ)$ 。图 4b 中入射信号方向角 $\theta=(50^\circ, 65^\circ, 125^\circ, 145^\circ)$, 俯仰角 $\varphi=(20^\circ, 65^\circ, 45^\circ, 50^\circ)$ 。图 4c 中入射信号方向角 $\theta=(20^\circ, 50^\circ, 65^\circ, 125^\circ, 145^\circ)$, 俯仰角 $\varphi=(5^\circ, 20^\circ, 65^\circ, 45^\circ, 50^\circ)$ 。实验中信号之间互不相关, 附加噪声为高斯白噪声, 且与入射信号互不相关。信噪比 $R_{SN}=10$ dB, 快拍数 $J=500$ 。进行 10 次蒙特卡罗实验, 估计性能如图 4 所示。从图 4 可以看出, 本文算法可以精确地估计出入射信号角度, 可以估计更多的信号。

实验 2 实验仿真均方根误差随信噪比和快拍数 S 的变化情况。均方根误差定义为

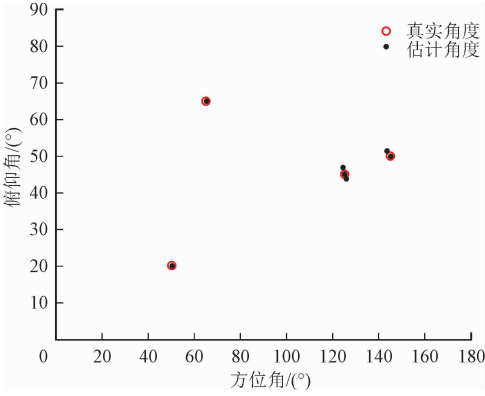
$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{L} \frac{1}{K} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (\hat{\theta}_{k,l} - \theta_k)^2 + \sum_{k=1}^K (\hat{\varphi}_{k,l} - \varphi_k)^2} \quad (16)$$

式中: $\hat{\theta}_{k,l}, \hat{\varphi}_{k,l}$ 表示第 l 次蒙特卡罗实验估计的第 k 个信号的方位角和俯仰角; L 代表蒙特卡罗实验次数。3 个信号的方位角 $\theta=(15^\circ, 35^\circ, 125^\circ)$, 俯仰角 $\varphi=(10^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$, 信号之间互不相关。每个信噪比和快拍数下进行 500 次蒙特卡罗实验。图 5a 为快拍数均方根误差随信噪比变化曲线, 图 5b 为信噪比为 5 dB 时均方根误差随快拍数的变化曲线。

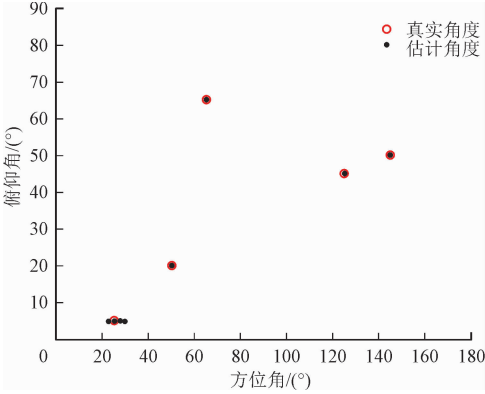
由图 5a 和图 5b 的仿真结果可以看到: 3 种算法的角度估计均方误差均随着信噪比和快拍数的增加而减小; 在相同的信噪比和快拍数的情况下, 本文算法的估计精度明显高于其他两种算法。对于 $M=2, N=3$ 的互质阵列, 本文算法重构出的虚拟均匀阵列的阵列孔径为 10, SS-MUSIC 算法只能利用互质阵列差分共阵中的连续阵元, 其虚拟均匀阵列的阵列孔径为 8, 均匀阵列的阵列孔径为 6, 而 DOA 估计精度与阵列孔径成正比, 因此, 本文算法具有更



(a)L 型均匀阵列 MUSIC 算法 ($K=3$)

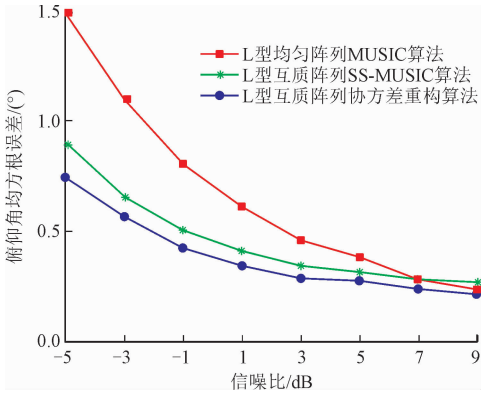


(b)L 型互质阵列 SS-MUSIC 算法 ($K=4$)

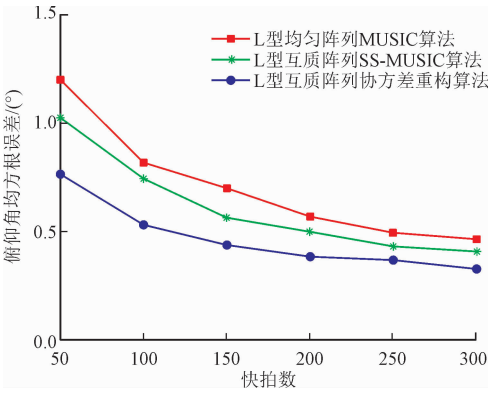


(c)L 型互质阵列协方差重构算法 ($K=5$)

图 4 3 种算法的二维角度分布比较



(a)随信噪比变化情况



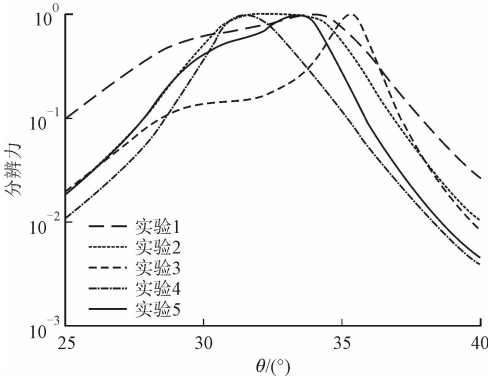
(b)随快拍数变化情况

图 5 3 种算法的二维角均方根误差随信噪比和快拍数的变化情况

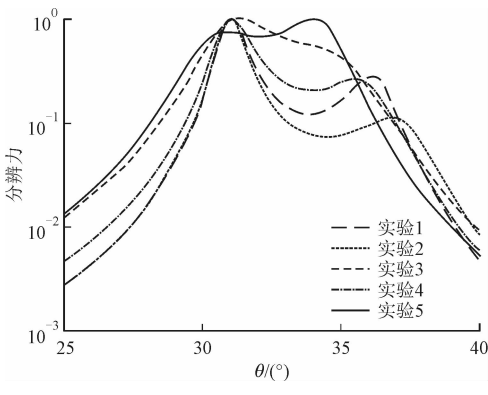
高的估计精度。

实验 3 通过估计两个相近的 α 角来验证本文算法在分辨力方面的性能。假设互不相关的人射信号与 x 轴方向夹角 $\alpha=(30^{\circ}, 35^{\circ})$, 信噪比设为 10 dB, 快拍数 $S=500$ 。图 6 给出了 5 次独立实验的仿真结果。

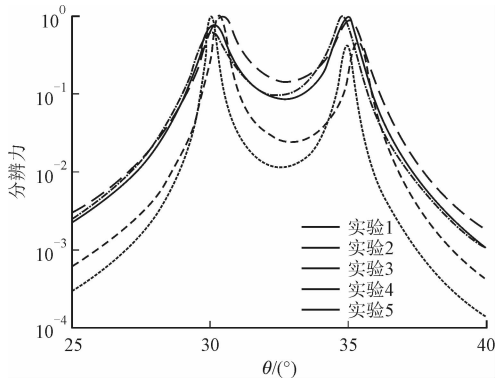
从图 6 的仿真结果可知, L 型均匀阵列 MUSIC 算法不能有效估计出这两个角度, L 型互质阵列 SS-MUSIC 虽然分辨力有所提高, 但是仍不能完全估计出这两个角度, 而本文算法能够准确估计出这



(a)L 型均匀阵列 MUSIC 算法



(b)L 型互质阵列 SS-MUSIC 算法



(c)L型互质阵列协方差重构算法

图6 3种算法的分辨力比较

两个入射角度,说明本文算法对相近信号具有更好的分辨能力,其得益于虚拟均匀阵列带来的阵列孔径扩展,因为阵列孔径越大,DOA估计的分辨力越高。

4 结 论

本文提出了一种基于矩阵重构的L型互质阵列2D-DOA估计算法。首先定义了与互质阵列对应的虚拟均匀阵列CP-ULA;接着,根据理想情况下均匀阵列接收信号的协方差矩阵具有半正定、低秩、埃尔米特、托普利兹的结构特点,构造了一个优化问题来求解CP-ULA阵列对应的协方差矩阵;然后利用MUSIC算法分别对信号与 x 、 y 轴夹角 α 、 β 进行DOA估计;最后利用配对算法对估计出的 $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$ 进行配对,并且利用 α 、 β 和方位角、俯仰角之间对应关系得到 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\varphi}$ 。仿真实验结果证明了本文算法的有效性,并且通过与L型均匀阵列算法的比较,说明了本文算法在可估计信号数量和估计精度上的优越性。

参考文献:

- [1] ZOLTOWSKI M D, HAARDT M, MATHEWS C P. Closed-form 2-D angle estimation with rectangular arrays in element space or beamspace via unitary ESPRIT [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(2): 316-328.
- [2] RAMOS J, MATHEWS C P, ZOLTOWSKI M D. FCA-ESPRIT: a closed-form 2D angle estimation algorithm for filled circular arrays with arbitrary sampling lattices [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(1): 213-217.
- [3] HUA Y, SARKAR T K, WEINER D D. An L-shaped array for estimating 2-D directions of wave arrival [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 39(2): 143-146.
- [4] 刘永旭, 杨光, 周彬. 基于子空间投影角度配对的L阵列二维DOA估计算法 [J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(4): 11-15.
LIU Yongxu, YANG Guang, ZHOU Bin. An L-shaped 2-D direction of arrival estimation based on subspace projection pair matching [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2016, 31(4): 11-15.
- [5] 黄殷杰. L阵列中二维DOA估计算法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 18-24.
- [6] 景小荣, 刘雪峰. L阵列的二维DOA估计方法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(1): 24-29.
JING Xiaorong, LIU Xuefeng. Method of two-dimensional DOA estimation for L-shaped array [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2016, 28(1): 24-29.
- [7] LIU C L, VAIDYANATHAN P P. Super nested arrays: linear sparse arrays with reduced mutual coupling: part II High-order extensions [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(15): 3997-4012.
- [8] MOFFET A. Minimum-redundancy linear arrays [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1968, 16(2): 172-175.
- [9] PAL P, 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.
- [10] VAIDYANATHAN P P, PAL P. Sparse sensing with co-prime samplers and arrays [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(2): 573-586.
- [11] PAL P, VAIDYANATHAN P P. Coprime sampling and the music algorithm [C]//2011 Digital Signal Processing and Signal Processing Education Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 289-294.
- [12] LIU Chunlin, VAIDYANATHAN P P, PAL P. Coprime coarray interpolation for DOA estimation via nuclear norm minimization [C]//2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 2639-2642.
- [13] PAL P, VAIDYANATHAN P P. A grid-less approach to underdetermined direction of arrival estimation via low rank matrix denoising [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(6): 737-741.

(下转第188页)