

文章编号:1004-9037(2014)04-0578-06

基于四元数和增广矩阵束的 MIMO 雷达角度估计算法

李小波 梁 浩 崔 琛

(合肥电子工程学院,合肥,230037)

摘要:通过研究多输入多输出(Multiple input and multiple out, MIMO)雷达的角度估计算法,基于收发共址的十字阵 MIMO 雷达系统,将四元数理论应用到 MIMO 雷达角度中,提出了一种新的参数估计算法。通过构造四元数模型,结合增广矩阵束(Matrix enhancement and matrix pencil, MEMP)方法构造增广矩阵,并证明该矩阵的秩等于目标总数,且不受目标相干性的影响,结合 ESPRIT 算法实现了对 MIMO 相干目标的角度估计。算法无需谱峰搜索,能够实现参数的自动配对,同时降低了运算复杂度。仿真实验进一步验证了算法的有效性。

关键词:多输入多输出雷达;四元数;增广矩阵束;相干目标

中图分类号: TN959

文献标志码: A

Angle Estimation in Bistatic MIMO Radar Based on Quaternion and MEMP

Li Xiaobo, Liang Hao, Cui Chen

(Electronic Engineering Institute, Hefei, 230037, China)

Abstract: The angle estimation algorithms of multiple input and multiple out (MIMO) radar are studied. Based on cross array in monostatic MIMO radar, a new algorithm for parameter estimation is proposed by employing quaternion theory to angle estimation of MIMO radar. Through the construction of quaternion model, the enhancement matrix, whose rank is equal to the number of targets and has no relations with the coherency of the targets, can be got combining with matrix enhancement and matrix pencil (MEMP) algorithm. Then the two-dimensional angle of coherent targets can be estimated combining with ESPRIT algorithm. This algorithm, avoiding peak searching which consumes much time and realizing angle estimation of coherent targets with automatic pairing, has a lower computation complexity and is more applicable in practice. Simulation results verify that the proposed algorithm is effective.

Key words: multiple input and multiple out radar; quaternion; matrix enhancement and matrix pencil; coherent targets

引 言

多输入多输出(Multiple input and multiple out, MIMO)雷达是一种新体制雷达^[1],具有诸多优点和广泛应用领域,引起了国内外军事界和学术界的极大关注。它采用多个天线同时发射线性独立波形,并使用多个天线接收目标反射信号,通过匹配滤波器可以将来自不同发射天线的信号分离,构成多个独立发射、接收通道,进而在接收端形成

虚拟阵列,扩展了接收阵列的孔径,提高了各项参数估计性能和空间分辨率。双基地 MIMO 雷达的收发阵元不在同一区域,较传统雷达在目标检测、参数估计精度、杂波抑制等方面具有显著优势^[1-3]。

近年来,四元数在量子力学、刚体力学等方面得到了广泛的应用,引起了诸多学者的关注。它在阵列信号处理、谱分析、空间定位方面的应用也成为新的研究对象。文献[4]通过建立四元数模型,利用二维谱峰搜索估计出相应的收发角度。文献[5]基于四元数的模型,通过奇异值分解实现了二

维谐波频率参数的估计。而在 MIMO 雷达中的应用文献[6]通过传统数据模型构造四元数矩阵,提出了基于四元数的求根-多重信号分类的 MIMO 雷达角度估计算法,通过求根运算,实现参数估计和配对,但需要分别对收发角度进行求根运算,存在配对组合问题,同时,当目标间存在相关性时,参数估计性能会随着相关性的增大而下降。针对以上不足及存在的问题,本文基于收发共址的十字阵 MIMO 雷达系统,将四元数理论应用到 MIMO 雷达中,提出了一种新的参数估计算法。

1 信号模型

考虑窄带信号,目标处于远场且为点目标。MIMO 雷达系统由水平面内 X 轴上的线阵,即 M 个发射天线和 Y 轴上的线阵即 N 个接收天线组成,收发阵列的中心重合且位于原点 O ,如图 1 所示。阵元间距均为半个波长 $d_t = d_r = 1/2\lambda$ 。系统同时发射 M 个线性独立的波形 $s_m \in C^{L \times 1}, m=1, 2, \dots, M$, 其中 L 为一个脉冲周期内的采样点数。发射信号 $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T$ 正交独立。假设空间 K 个远场点目标,则经过匹配滤波后十字阵[7]的 MIMO 雷达输出信号为

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{a}(\theta_1, \varphi_1) \otimes \mathbf{b}(\theta_1, \varphi_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_K, \varphi_K) \otimes \mathbf{b}(\theta_K, \varphi_K)] \boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中: θ_k, φ_k 为空间第 k 个目标对应的发射角和接收角; $\boldsymbol{\eta}(t) = [\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_K(t)]^T \in C^{D \times 1}$, $\eta_k(t) = \beta_k e^{j2\pi f_k t}$, f_k 为多普勒频率, β_k 为反射幅度,由雷达散射截面(Radar cross section, RCS)决定。 $\mathbf{n}(t)$ 为零均值高斯噪声向量。发射信号导向矢量和接收信号导向矢量为

$$\mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k) = [1, \exp(j2\pi d_t \cos(\theta_k) \cos(\varphi_k)/\lambda), \dots, \exp(j2\pi(M-1)d_t \cos(\theta_k) \cos(\varphi_k)/\lambda)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{b}(\theta_k, \varphi_k) = [1, \exp(j2\pi d_t \sin(\theta_k) \cos(\varphi_k)/\lambda), \dots, \exp(j2\pi(N-1)d_t \sin(\theta_k) \cos(\varphi_k)/\lambda)]^T \quad (3)$$

假设在 J 个脉冲内, $\mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k), \mathbf{b}(\theta_k, \varphi_k)$ 保持

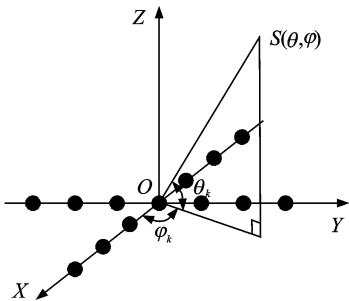


图 1 十字阵列结构

Fig. 1 Cross array structure

不变,则式(1)即可变为

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\boldsymbol{\Gamma} + \mathbf{N} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \varphi_1) \otimes \mathbf{b}(\theta_1, \varphi_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_K, \varphi_K) \otimes \mathbf{b}(\theta_K, \varphi_K)]$, $\mathbf{N} \in C^{MN \times J}$ 为噪声矩阵, $\boldsymbol{\Gamma} = [\boldsymbol{\eta}(1), \boldsymbol{\eta}(2), \dots, \boldsymbol{\eta}(J)] \in C^{K \times J}$ 。

2 四元数模型

2.1 四元数基本知识

如果一个数可以表示为

$$q = a + bi + cj + dk \quad a, b, c, d \in \mathbf{R} \quad (5)$$

其中 i, j, k 代表虚部符号,如果定义 $ij = -ji = k$, $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, $jk = -kj = i$, $ki = -ik = j$, 则称 q 为 Hamilton 四元数,任意一个四元数可以被唯一的表示为两个虚数,即 $q = a + ib + (c + id)j$ 。

2.2 构造四元数模型

无噪声时,式(4)中 \mathbf{X} 的第 $((n-1)M+m)$ 行为

$$\mathbf{x}_{m,n} = \sum_{k=1}^K \boldsymbol{\eta}_k \exp(i(\pi(m-1)\cos(\theta_k)\cos(\varphi_k) + \pi(n-1)\sin(\theta_k)\cos(\varphi_k))) \quad (6)$$

其中 $\boldsymbol{\eta}_k$ 为 $\boldsymbol{\Gamma}$ 的第 k 行。按照四元数的运算规则定义: $r_1(\tau, \zeta) = E[\mathbf{x}_{m+\tau, n+\zeta} \mathbf{x}_{m,n}^H]$, 则有

$$r_1(\tau, \zeta) = \sum_{k=1}^K \boldsymbol{\eta}_k \boldsymbol{\eta}_k^H \exp(i(\pi\tau\cos(\theta_k)\cos(\varphi_k) + \pi\zeta\sin(\theta_k)\cos(\varphi_k))) \quad (7)$$

如果令 $2r(\tau, \zeta) = [r_1(\tau, \zeta) + r_1(\tau, -\zeta)] - [r_1(\tau, \zeta) - r_1(\tau, -\zeta)]k$, 即得

$$r(\tau, \zeta) = \sum_{k=1}^K s_k \exp(i\pi\tau\cos(\theta_k)\cos(\varphi_k)) \cdot \exp(j\pi\zeta\sin(\theta_k)\cos(\varphi_k)) \quad (8)$$

其中 $s_k = \boldsymbol{\eta}_k \boldsymbol{\eta}_k^H$ 。

3 基于四元数的 MEMP 的 MIMO 雷达角度估计算法

3.1 矩阵束的构造

根据式(8)构造增广矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0 & \mathbf{R}_1 & \cdots & \mathbf{R}_{M-P} \\ \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 & \cdots & \mathbf{R}_{M-P+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}_{P-1} & \mathbf{R}_P & \cdots & \mathbf{R}_{M-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} r(m, 0) & r(m, 1) & \cdots & r(m, N-Q) \\ r(m, 1) & r(m, 2) & \cdots & r(m, N-Q+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(m, Q-1) & r(m, Q) & \cdots & r(m, N-1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\mathbf{R}_m \in \mathbf{C}^{Q \times (N-Q+1)}$ 为 Hankel 矩阵。将式(8)代入(10)可得

$$\mathbf{R}_m = \mathbf{V}_L \mathbf{S} \Phi_u^m \mathbf{V}_R \quad (11)$$

为了表示方便,定义 $u_k = \exp(j\pi \cos(\theta_k) \cos(\varphi_k))$, $v_k = \exp(j\pi \sin(\theta_k) \cos(\varphi_k))$, 则

$$\mathbf{V}_L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ v_1 & v_2 & \cdots & v_K \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (v_1)^{Q-1} & (v_2)^{Q-1} & \cdots & (v_K)^{Q-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & s_K \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_R = \begin{bmatrix} 1 & v_1 & \cdots & (v_1)^{N-Q} \\ 1 & v_2 & \cdots & (v_2)^{N-Q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & v_K & \cdots & (v_K)^{N-Q} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Phi_u = \text{diag}(u_1, u_2, \dots, u_K) \quad (13)$$

将式(11)代入(9)得

$$\mathbf{R} = \mathbf{B}_L \mathbf{S} \mathbf{B}_R = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_L \\ \mathbf{V}_L \Phi_u \\ \vdots \\ \mathbf{V}_L \Phi_u^{P-1} \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{S} [\mathbf{V}_R \quad \Phi_u \mathbf{V}_R \quad \cdots \quad \Phi_u^{M-P} \mathbf{V}_R] \quad (14)$$

文献[8]证明了利用增广矩阵束方法估计 K 个目标的条件: $M-K+1 \geq P \geq K+1$, $N-K+1 \geq Q \geq K+1$, 显然, 在满足该条件的情况下 $\text{rank}(\mathbf{R}) = K$, 也就是说无论目标之间是否存在相关性, 总能保证矩阵 \mathbf{R} 的秩等于目标个数, 而不受信号的相关性的影响, 即利用构造的矩阵 \mathbf{R} 能够达到“解相关”的目的, 从而实现对目标的角度估计。对构造的矩阵 \mathbf{R} 进行特征分解, 则可得到对应的信号子空间 \mathbf{U}_S 和噪声子空间 \mathbf{U}_N 。

3.2 旋转不变因子的提取

对矩阵 \mathbf{R} 进行奇异值分解得

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_S \mathbf{D}_S \mathbf{V}_S^H + \mathbf{U}_N \mathbf{D}_N \mathbf{V}_N^H \quad (15)$$

式中: $\mathbf{U}_S, \mathbf{D}_S$ 为包含信号子空间的 K 个主特征向量和主特征值; $\mathbf{U}_N, \mathbf{D}_N$ 为噪声子空间对应的特征矢量与特征值。

根据以上分析, 结合 ESPRIT 算法, 令 $\mathbf{B}_L =$

$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{L1} \\ \mathbf{B}_{L2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{L1} \\ \mathbf{B}_{L1} \Phi_u \end{bmatrix}$, 其中 $\mathbf{B}_{L1}, \mathbf{B}_{L2}$ 分别为 \mathbf{B}_L 的前 $(P-1) \times Q$ 行和后 $(P-1) \times Q$ 行, 即 $\mathbf{B}_{L1} = \mathbf{B}_L(1:(P-1)Q, :)$ 。根据子空间旋转不变原 $\mathbf{B}_{L2} = \mathbf{B}_L(Q+1:PQ, :)$

理可知: \mathbf{B}_L 与 \mathbf{U}_S 张成相同的信号子空间, 因此存在唯一的非奇异矩阵 $\mathbf{T} \in \mathbf{C}^{K \times K}$, 使得 $\mathbf{B}_L \mathbf{T} = \mathbf{U}_S$ 。

令 $\mathbf{U}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{S1} \\ \mathbf{U}_{S2} \end{bmatrix}$, $\mathbf{U}_{S1}, \mathbf{U}_{S2}$ 分别为 \mathbf{U}_S 的前 $(P-1) \times Q$ 行和后 $(P-1) \times Q$ 行, 则可得 $\mathbf{B}_{L1} \mathbf{T} = \mathbf{U}_{S1}, \mathbf{B}_{L2} \mathbf{T} = \mathbf{U}_{S2}$ 。所以

$$\mathbf{T}^{-1} \Phi_u \mathbf{T} = \mathbf{U}_{S1}^{-1} \mathbf{U}_{S2} \quad (16)$$

令 $\mathbf{B}_L = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_K]$, 则 $\mathbf{b}_l = [1, u_l, \dots, u_l^{P-1}]^T \otimes [1, v_l, \dots, v_l^{Q-1}]^T$ 。对 \mathbf{B}_L 进行变化得到 $\hat{\mathbf{B}}_L = [\hat{\mathbf{b}}_1, \dots, \hat{\mathbf{b}}_K]$, 其中 $\hat{\mathbf{b}}_l = [1, v_l, \dots, v_l^{Q-1}]^T \otimes [1, u_l, \dots, u_l^{P-1}]^T$, 即存在矩阵 \mathbf{H} (由 0 和 1 构成, 具体结构见文献[9]), 使得 $\hat{\mathbf{B}}_L = \mathbf{H} \mathbf{B}_L$, 定义 $\mathbf{U}_{SH} = \mathbf{H} \mathbf{U}_S$,

则得 $\mathbf{U}_{SH} = \mathbf{H} \mathbf{U}_S = \mathbf{H} \mathbf{B}_L \mathbf{T} = \hat{\mathbf{B}}_L \mathbf{T}$ 。令 $\hat{\mathbf{B}}_L = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{B}}_{L1} \\ \hat{\mathbf{B}}_{L2} \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{B}}_{L1} \\ \hat{\mathbf{B}}_{L1} \Phi_v \end{bmatrix}$, $\mathbf{U}_{SH} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{SH1} \\ \mathbf{U}_{SH2} \end{bmatrix}$ 。其中 $\hat{\mathbf{B}}_{L1}, \mathbf{U}_{SH1}$ 和 $\hat{\mathbf{B}}_{L2}, \mathbf{U}_{SH2}$ 分别为 $\hat{\mathbf{B}}_L, \mathbf{U}_{SH}$ 的前 $(Q-1) \times P$ 行和后 $(Q-1) \times P$ 行; $\Phi_v = \text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_K)$; 所以 $\hat{\mathbf{B}}_{L1} \mathbf{T} = \mathbf{U}_{SH1}, \hat{\mathbf{B}}_{L2} \mathbf{T} = \mathbf{U}_{SH2}$ 。即

$$\mathbf{T}^{-1} \Phi_v \mathbf{T} = \mathbf{U}_{SH1}^{-1} \mathbf{U}_{SH2} \quad (17)$$

3.3 收发角度配对算法^[10]

对 $\mathbf{U}_{S1}^{-1} \mathbf{U}_{S2}$ 进行 SVD 分解可得

$$\mathbf{U}_{S1}^{-1} \mathbf{U}_{S2} = \mathbf{W} \Phi_u \mathbf{W}^{-1} \quad (18)$$

如果 Φ_u 有不同的 β_k (不存在重根), 则 \mathbf{T}^{-1} 和 \mathbf{W} 都包含 $\mathbf{U}_{S1}^{-1} \mathbf{U}_{S2}$ 线性无关的特征向量, 那么存在一个满秩的对角矩阵 \mathbf{G} 使得 $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{W} \mathbf{G}^{[10]}$ 。所以可得

$$\Phi_v = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{U}_{SH1}^{-1} \mathbf{U}_{SH2} \mathbf{W} \quad (19)$$

显然, Φ_u, Φ_v 对角线上相同位置的元素自动的完成配对。

如果 Φ_u 存在相同的 β_k (存在重根), 则 \mathbf{T}^{-1} 中对应相同特征值的特征向量与 $\mathbf{W}^{[10]}$ 中的对应向量线性相关, 此时存在: $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{W} \bar{\mathbf{G}}$ 。 $\bar{\mathbf{G}} = \text{diag}\{\bar{\mathbf{G}}_1, \dots, \bar{\mathbf{G}}_K\}$ 是一个块对角矩阵, 且 $\bar{\mathbf{G}}_k (k=1, \dots, K)$ 对应不同的特征值, 阶数等于对应特征值的重数。则结合式(17)可得

$$\mathbf{T}^{-1} \Phi_v \mathbf{T} = \mathbf{W} \bar{\mathbf{G}} \Phi_v \bar{\mathbf{G}}^{-1} \mathbf{W}^{-1} = \mathbf{U}_{SH1}^{-1} \mathbf{U}_{SH2} \quad (20)$$

即

$$\bar{\mathbf{G}} \Phi_v \bar{\mathbf{G}}^{-1} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{U}_{SH1}^{-1} \mathbf{U}_{SH2} \mathbf{W} \quad (21)$$

令 $\Phi_v = \text{diag}\{\Phi_v^1, \Phi_v^2, \dots, \Phi_v^K\}$, 其中 Φ_v^k 阶数、位置与 $\bar{\mathbf{G}}_k$ 对应, 则

$$\bar{\mathbf{G}} \Phi_v \bar{\mathbf{G}}^{-1} = \text{diag}\{\bar{\mathbf{G}}_1 \Phi_v^1 \bar{\mathbf{G}}_1^{-1}, \bar{\mathbf{G}}_2 \Phi_v^2 \bar{\mathbf{G}}_2^{-1}, \dots,$$

$$\bar{G}_K \Phi_v^k \bar{G}_K^{-1} \} \quad (22)$$

令 $\Phi_k = \bar{G}_k \Phi_v^k \bar{G}_k^{-1}$, 对于 Φ_v 的单特征值 $\Phi_v^k = \Phi_k$ 为标量, 因此 Φ_u^k 与对应的 Φ_v^k 完成自动配对, 通过式(23)即可求得对应的 $(\theta_k, \varphi_k) (k=1, 2, \dots, K)$ 。

$$\theta_k = \arccos \left[\sqrt{\left(\frac{1}{\pi} \angle(\Phi_{u,k}) \right)^2 + \left(\frac{1}{\pi} \angle(\Phi_{v,k}) \right)^2} \right]$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{\angle(\Phi_{v,k})}{\angle(\Phi_{u,k})} \quad (23)$$

至此, 将基于四元数的 MEMP 的 MIMO 雷达角度估计算法的步骤总结如下:

- (1) 通过 3.2 节所述, 将 MIMO 雷达数据模型转成含噪四元数模型, 得到式(8), (10)的 \mathbf{R}_m ;
- (2) 通过 \mathbf{R}_m 来构造增广矩阵 \mathbf{R} ;
- (3) 对构造的增广矩阵 \mathbf{R} 进行特征分解, 则可得到对应的信号子空间 \mathbf{U}_s ;
- (4) 利用 3.2 节方法提取旋转不变因子 Φ_v , Φ_u , 并利用式(23)分别求出已经配对的收发角度。

3.4 角度估计的 CRB

根据文献[11], 可以得到双基地 MIMO 雷达的 CRB 表示式

$$\text{CRB} = \frac{\sigma^2}{2J} \{ \text{Re}[\mathbf{D}^H \mathbf{\Pi}_A^\perp \mathbf{D} \odot \hat{\mathbf{P}}^T] \}^{-1} \quad (24)$$

其中 $\mathbf{D} = \left[\frac{\partial a_1}{\partial \theta_1}, \frac{\partial a_2}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial a_K}{\partial \theta_K}, \frac{\partial a_1}{\partial \varphi_1}, \frac{\partial a_2}{\partial \varphi_2}, \dots, \frac{\partial a_K}{\partial \varphi_K} \right], a_k$

为 \mathbf{A} 的第 k 列, $\hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \hat{P}_s & \hat{P}_s \\ \hat{P}_s & \hat{P}_s \end{bmatrix}, \hat{P}_s = \frac{1}{J} \sum_{t=1}^J \boldsymbol{\eta}(t)$
 $\boldsymbol{\eta}(t), \mathbf{\Pi}_A^\perp = \mathbf{I}_{MN} - \mathbf{A}(\mathbf{A}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}$ 。

4 仿真实验

假设 MIMO 雷达的发射和接收阵元数目分别为 $M=10, N=10$, 阵元间隔都为 $d_t = d_r = \frac{\lambda}{2}$, 利用

多相码作为雷达发射信号。

4.1 算法有效性验证(实验 1)

假设空中存在 $P=3$ 个目标源, 且各目标的位置分别为 $(\theta_1, \varphi_1) = (0^\circ, 40^\circ), (\theta_2, \varphi_2) = (-15^\circ, 20^\circ), (\theta_3, \varphi_3) = (20^\circ, 60^\circ)$ 。 $P=Q=6$, 信噪比 $\text{SNR} = 5$ dB。图 2 为目标相干时的估计结果; 图 3 为目标非相干时的估计结果; 图 4 为目标相干与非相干混合时的估计结果。其中图 2~4 中(a), (b)分别为 50 次 monte-carlo 实验发射角和接收角的估计结果; (c)为 100 次 monte-carlo 实验角度估计的星座图。假设空中存在 $P=3$ 个相干与非相干混合目标源, 且各目标的位置分别为 $(\theta_1, \varphi_1) = (-30^\circ, 50^\circ), (\theta_2, \varphi_2) = (30^\circ, 50^\circ), (\theta_3, \varphi_3) = (50^\circ, 30^\circ)$, 相应的 (u_k, v_k) 分别为 $(0.5567, -0.3214), (0.5567, 0.3214), (0.5567, 0.6634)$, 显然 $u_1 = u_2 = u_3 = 0.5567$ 共享相位, 其余条件不变。图 5 为 100 次 monte-carlo 实验角度估计的星座图。

由图 2~5 可以看出, 无论是相干目标, 还是非相干目标, 抑或相干与非相干混合目标, 本文算法均能够准确地进行角度估计。这是由于本文算法构造的矩阵不受目标相关性的影响, 无论目标源相干与否, 均能保证矩阵的秩等于目标源个数, 很好的实现了“解相干”, 同时在出现共享相位时, 不会出现“角度兼并”的现象^[12]。

4.2 算法估计性能(实验 2)

信噪比为 $-15 \sim 20$ dB 变化时(每 5 dB 做 100 次 monte-carlo 实验), 其余条件与实验 1 相同, 比较本文算法与文献[6]算法角度估计的 RMSE, 仿 CRB, 性能更优; 改变阵元数, 其余条件不变, 比较本文算法角度估计 RMSE 与阵元数之间的关系, 仿真结果如图 7 所示结果如图 6 所示, 可以看出与文献的 Root-Music 算法相比, 本文算法的 RMSE

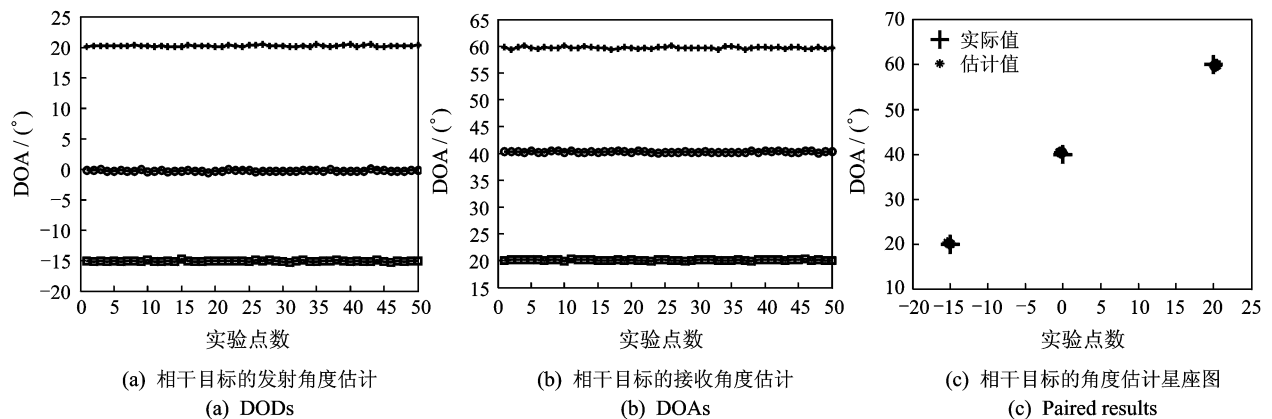


图 2 对相干目标的角度估计结果
 Fig. 2 Results of angle estimation for coherent targets

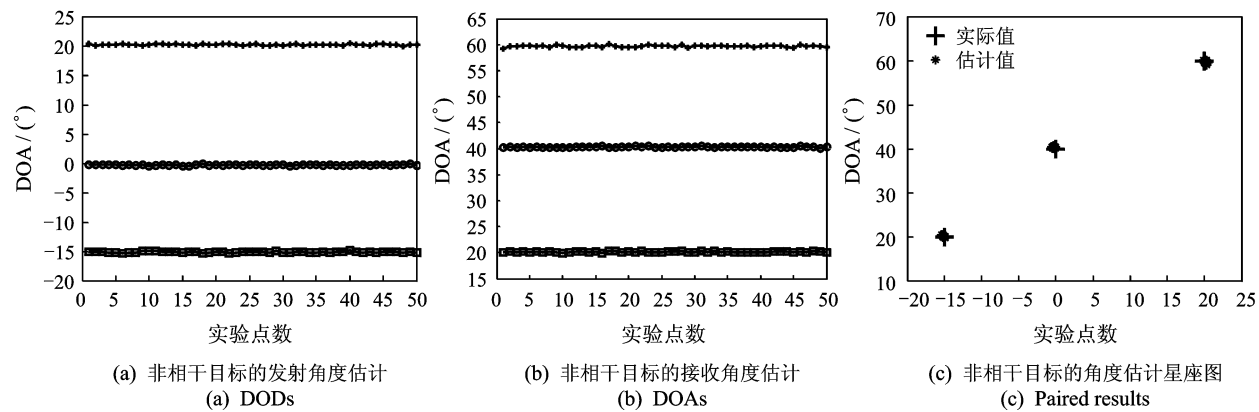


图 3 对非相干目标的角估计结果

Fig. 3 Results of angle estimation for incoherent targets

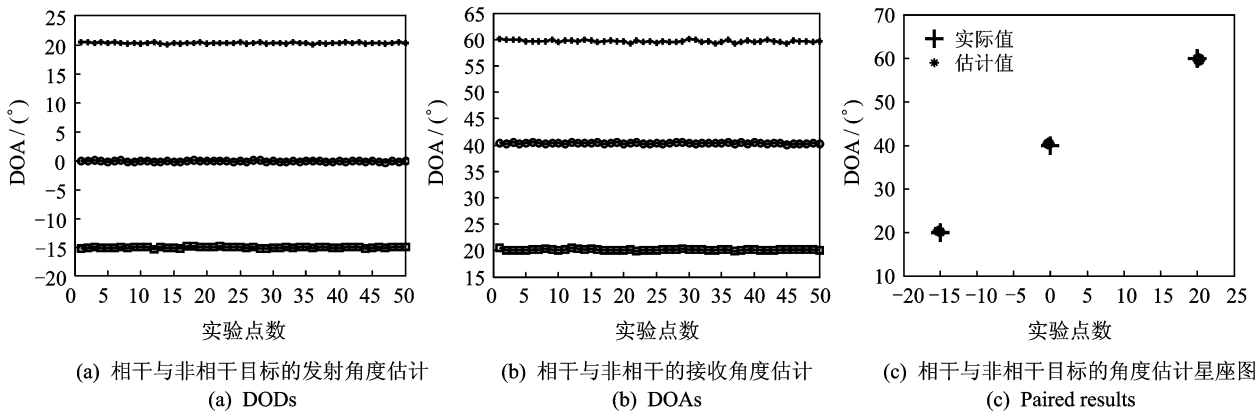


图 4 对相干与非相干目标的角估计结果

Fig. 4 Results of angle estimation for coherent and incoherent targets

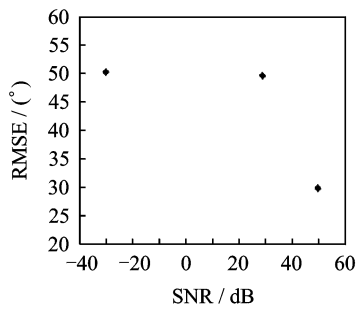


图 5 本文算法角度估计的星座图

Fig. 5 Paired results of angle estimation of our method

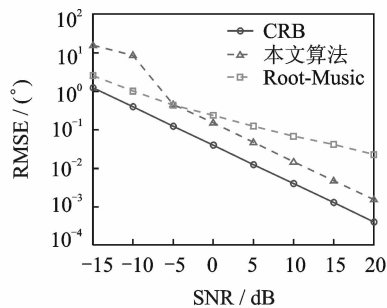


图 6 本文算法与文献算法角度估计的 RMSE

Fig. 6 RMSE of angle estimation of our method and references' method

更接近于;改变快拍数,其余条件不变,比较本文算法角度估计的 RMSE 与快拍数之间的关系,仿真结果如 8 所示。显然由图 7,8 可得随着阵元数和快拍数的增多,分集增益增强,估计性能得到提升。

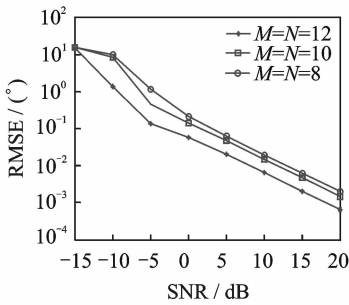


图 7 本文算法角度估计的 RMSE 随阵元数的变化

Fig. 7 RMSE of angle estimation versus the different numbers of array

5 结束语

十字型阵列可以获取更多的空间目标信息,具有阵列结构简单、抗误差等众多优点。本文基于收发共址构成的十字阵 MIMO 雷达系统,将四元数理论应用到 MIMO 雷达中,提出了一种新的参数估计

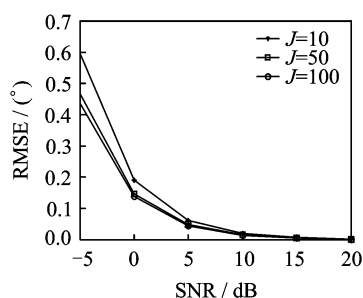


图 8 本文算法角度估计的 RMSE 随快拍数的变化
Fig. 8 RMSE of angle estimation versus the different numbers of snapshot

算法。通过构造四元数模型,结合增广矩阵束方法得到的矩阵的秩等于目标总数,而不受目标相干性的影响,实现了对 MIMO 的相干目标的角度估计。仿真实验表明:本文算法无需谱峰搜索和参数的额外配对,且参数估计性能优于文献算法。因此提高了 MIMO 雷达在面临信号多径传播问题等复杂环境中的工作性能,更利于实际中的推广和应用。

参考文献:

[1] Fishler E, Haimovich A, Blum R S, et al. Spatial diversity in radar-models and detection performance [J]. IEEE Trans on Signal Process, 2006, 54(3): 823-838.

[2] Yan Haidong, Li Jun, Liao Guisheng. Multi-target identification and localization using bistatic MIMO radar systems[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008, 2008:1-8.

[3] Li Jian, Stoica P. MIMO radar with collocated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5):106-114.

[4] Wang F, Wang S X, Wu Y G. 2-D DOA estimation in the presence of Gaussian noise with quaternion [C]//Ellison, IEEE2005 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, MAPE. Beijing, China: IEEE Press, 2005:8-12.

[5] 汪飞,王树勋,陈巧霞. 基于 Hamilton 四元数矩阵奇异值分解的二维谐波频率参量估计[J]. 电子学报, 2007,35(12):2441-2445.

Wang Fei, Wang Shuxun, Chen Qiaoxia. Parameter estimation of two - dimensional harmonic frequency

based on the singular value decomposition of Hamilton quaternion matrix[J]. Acta Electronica Sinica, 2007,35(12):1441-2445.

[6] 李建峰,张小飞,汪飞. 基于四元数的 Root-MUSIC 的双基地 MIMO 雷达中角度估计算法[J]. 电子与信息学报,2012,34(5):300-304.

Li Jianfeng, Zhang Xiaofei, Wang Fei. Quaternion root-MUSIC algorithm for angle estimation in bistatic MIMO radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012,34(5):300-304.

[7] 吴海浪,张小飞,冯高鹏,等. 十字阵的单基地 MIMO 雷达中低复杂度的二维 DOA 估计算法[J]. 数据采集与处理,2012,27(2):156-161.

Wu Hailang, Zhang Xiaofei, Fei Gaopeng, et al. Two-dimensional DOA estimation algorithm for monostatic MIMO radar based on cross array with low complexity[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012,27(2):156-161.

[8] Wang Y, Chen J W, Liu Z. Comment s on estimation of frequencies and damping factors by two-dimensional ESPRIT type methods[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005,53(8):3348-3349.

[9] Hua Y. Estimating two-dimensional frequencies by matrix enhancement and matrix pencil [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(9): 2267-2280.

[10] Chen F J, Wong R K, KOK S. ESPRIT-Like two-dimensional DOA estimation for coherent signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010,46(3):1477-1483.

[11] Chen F J, KOK C C, Kwong S. Estimation of 2-dimensional frequencies using modified matrix pencil method[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007,55(2):718-724.

[12] Stoica P, Nehorai A. Performance study of conditional and unconditional direction-of-arrival estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1990,38(10):1783-1795.

作者简介:李小波(1970-),男,副教授,研究方向:高速信号处理,E-mail: Lhmailhappy@163.com;梁浩(1987-),男,博士研究生,研究方向:MIMO 雷达技术;崔琛(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向:雷达信号处理。