

多输入多输出电磁矢量阵列雷达的 DOD 和 DOA 联合估计

王克让, 贺亚鹏, 朱晓华*

南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要: 研究一种基于电磁矢量传感器阵列的多输入多输出(MIMO)雷达目标波离角(DOD)和波达角(DOA)的联合估计算法。提出了一种新型 MIMO 雷达系统,发射阵列采用常规阵元,而接收阵列采用电磁矢量传感器,在此基础上,算法首先利用矢量传感器的内在结构特点结合子空间旋转不变性质获得目标 DOA 预估计,随后采用最佳加权子空间拟合算法对 DOD 和 DOA 分别进行一维搜索,即可获得目标角度的高精度估计,并讨论了阵列结构对目标 DOD 和 DOA 精度的影响。与已有算法相比,该算法适用于不规则阵列结构,且具有无需配对和二维搜索等特点。仿真验证了算法的有效性,其估计精度与 CRB 界接近。

关键词: MIMO 雷达; 电磁矢量传感器; DOD 估计; DOA 估计; 子空间拟合

中图分类号: V243.2; TN953.5 **文献标识码:** A

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达^[1]是近几年兴起的一种新体制雷达,受到国内外学者广泛关注。MIMO 雷达利用多个天线同时发射多路正交信号并实现阵列接收,比传统的相控阵雷达有着潜在的优势^[2]。已有文献证明 MIMO 雷达系统较单天线发射雷达系统具有更高的系统自由度^[1],这些额外的自由度可以对抗目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)闪烁,增强目标空间分辨力和参数识别能力,提高目标检测性能^[1-4]。

双基地 MIMO 雷达被广泛用于多目标定位和识别^[5-9],发射和接收阵列采用均匀线阵,通过对接收信号的处理可获得目标的波离角(Direction of Departure, DOD)和波达角(Direction of Arrival, DOA)。文献[5]利用 Capon 算法二维搜索实现对多目标的定位,文献[9]提出一种基于噪声子空间的二维多重信号分类(Multiple Signal

Classification, MUSIC)估计算法实现对多目标的 DOD 和 DOA 估计,算法充分利用 MIMO 雷达波形分集和空间分集的优势,相对于传统的阵列雷达而言能够显著提高其估计性能。但是上述算法都需要进行二维搜索,运算量巨大。文献[6]提出了一种基于信号子空间旋转不变信号参数估计(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique, ESPRIT)算法避免二维搜索,降低了运算量,但同时不可避免地增大了角度估计误差,文献[7]利用降维变换进一步降低了 ESPRIT 算法的运算量,然而 ESPRIT 算法只适用于发射和接收阵列为均匀线阵的情况,且需要额外的配对算法。上述所有算法均要求阵元间距不大于半波长,以避免测角模糊问题。

电磁矢量传感器(Electromagnetic Vector Sensor, EVS)自从 Compton 教授^[10]提出以来,由于其能够同时感应信号在空域和极化域的信息而

收稿日期:2011-05-13; 退修日期:2011-06-22; 录用日期:2011-08-04; 网络出版时间:2011-08-15 17:16

网络出版地址:www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110815.1716.002.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110815.1716.002

基金项目:南京理工大学自主科研专项计划(2010ZYTS082)

* 通讯作者. Tel.:025-84315126 E-mail: zhx@mail.njust.edu.cn

引用格式:王克让,贺亚鹏,朱晓华.多输入多输出电磁矢量阵列雷达的 DOD 和 DOA 联合估计[J].航空学报,2011,32(12):2287-2292. Joint DOD and DOA estimation for MIMO radar with electromagnetic vector sensors[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(12): 2287-2292.

获取比传统标量传感器更多的信息,备受研究人员的关注,并且涌现大量研究成果^[10-12]。而基于EVS构成的矢量阵列信号处理算法与传统标量传感器阵列算法相比具有新的特点和独特的优势,也正成为阵列信号处理领域新的研究热点^[13-16]。

MIMO雷达和电磁矢量传感器结合可以充分利用波形分集和极化分集,进一步提高MIMO系统辨识力,但针对该体制MIMO雷达相关算法还未深入研究。本文研究一种双基地MIMO雷达系统多目标联合DOD和DOA估计算法,MI-MO雷达发射采用常规正交波形,而接收采用成对正交的电偶极子阵列接收。其主要思想为:首先利用矢量传感器特性结合子空间旋转不变性质获得DOA预估计,然后采用最佳子空间拟合算法进行一维搜索获得目标DOD高精度估计,在已知DOA预估计情况下在特定范围内搜索获得DOA的高精度估计。本算法比传统二维MUSIC算法具有更低的计算复杂度,更高的估计精度。

1 双基地矢量阵MIMO雷达系统模型

1.1 信号模型

双基地MIMO雷达由 M 个线性发射阵元和 N 个线性接收阵元组成。发射和接收阵元都沿 x 轴放置,每个接收阵元由一对空间独立正交的电偶极子传感器组成,电偶极子分别对准 x 轴和 z 轴。 K 个目标分布在 xOz 平面, (ϕ_k, θ_k) 表示第 k 个目标相对发射阵元的DOD和相对接收阵元的DOA。那么单一的接收矢量传感器指向目标 k 时的单位矢量为

$$\mathbf{u}_k = [\sin \theta_k \quad \cos \theta_k]^T \quad (1)$$

式中:“ T ”为转置符号。假设发射阵元发射 M 个正交窄带信号 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \quad s_2(t) \quad \cdots \quad s_M(t)]^T$,那么接收阵元沿 x 轴和 z 轴信号经过匹配滤波后分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_x(t) &= [\sin \theta_1 \mathbf{a}_t(\phi_1) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_1) \\ &\quad \sin \theta_2 \mathbf{a}_t(\phi_2) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_1) \quad \cdots \\ &\quad \sin \theta_K \mathbf{a}_t(\phi_K) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_K)] \mathbf{b}(t) + \\ &\quad \mathbf{n}_x(t) = \mathbf{A}_x \mathbf{b}(t) + \mathbf{n}_x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_z(t) &= [\cos \theta_1 \mathbf{a}_t(\phi_1) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_1) \\ &\quad \cos \theta_2 \mathbf{a}_t(\phi_2) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_2) \quad \cdots \\ &\quad \cos \theta_K \mathbf{a}_t(\phi_K) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_K)] \mathbf{b}(t) + \end{aligned}$$

$$\mathbf{n}_z(t) = \mathbf{A}_z \mathbf{b}(t) + \mathbf{n}_z(t) \quad (3)$$

式中: \otimes 为Kronecker积。

发射阵列导向矢量 $\mathbf{a}_t(\phi_k)$ 为

$$\mathbf{a}_t(\phi_k) = [e^{-j2\pi/\lambda d_1 \sin \phi_k} \quad e^{-j2\pi/\lambda d_2 \sin \phi_k} \quad \cdots \quad e^{-j2\pi/\lambda d_M \sin \phi_k}]^T \quad (4)$$

式中: λ 为发射信号波长; d_m ($m=1, 2, \dots, M$)为第 m 个发射阵元的位置。

接收阵列导向矢量 $\mathbf{a}_r(\theta_k)$ 为

$$\mathbf{a}_r(\theta_k) = [e^{-j2\pi/\lambda \Delta_1 \sin \theta_k} \quad e^{-j2\pi/\lambda \Delta_2 \sin \theta_k} \quad \cdots \quad e^{-j2\pi/\lambda \Delta_N \sin \theta_k}]^T \quad (5)$$

式中: Δ_n 为第 n ($n=1, 2, \dots, N$)个接收阵元的位置。

$$\mathbf{b}(t) = [b_1(t) \quad b_2(t) \quad \cdots \quad b_K(t)]^T \quad (6)$$

式中: $b_k(t) = \beta_k e^{j2\pi f_k t}$, β_k 和 f_k 分别为目标 k 的幅度和多普勒频率。

$\mathbf{n}_x(t)$ 和 $\mathbf{n}_z(t)$ 为独立复加性高斯白噪声,方差分别为 σ^2 ,表示为

$$\mathbf{n}_x(t) = [n_{x,1}(t) \quad n_{x,2}(t) \quad \cdots \quad n_{x,MN}(t)]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{n}_z(t) = [n_{z,1}(t) \quad n_{z,2}(t) \quad \cdots \quad n_{z,MN}(t)]^T \quad (8)$$

假设目标DOD和DOA参数 (ϕ_1, θ_1) , (ϕ_2, θ_2) , \dots , (ϕ_K, θ_K) 互不相同,其多普勒频率 $f_1 \neq f_2 \neq \dots \neq f_K$,此时接收信号为非相关信号。令 $\mathbf{y}(t) = [\mathbf{y}_x^T(t) \quad \mathbf{y}_z^T(t)]^T$,接收数据协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{y}(t)\mathbf{y}^H(t)\} \quad (9)$$

式中:“ H ”表示共轭转置。对式(9)特征分解得

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}_s \mathbf{D}_s \mathbf{E}_s^H + \mathbf{E}_n \mathbf{D}_n \mathbf{E}_n^H \quad (10)$$

式中: \mathbf{D}_s 和 \mathbf{D}_n 为 \mathbf{R} 的信号子空间和噪声子空间特征值对角矩阵,维数分别为 $K \times K$ 和 $(2MN - K) \times (2MN - K)$; \mathbf{E}_s 和 \mathbf{E}_n 为 \mathbf{R} 的信号子空间和噪声子空间的正交矩阵维数分别为 $2MN \times K$ 和 $2MN \times (2MN - K)$ 。在 L 次快拍下, $\mathbf{y}(t)$ 的协方差矩阵为

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{y}(t_l) \mathbf{y}^H(t_l) = \hat{\mathbf{E}}_s \hat{\mathbf{D}}_s \hat{\mathbf{E}}_s^H + \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\mathbf{D}}_n \hat{\mathbf{E}}_n^H \quad (11)$$

1.2 二维MUSIC算法

文献[9]提出一种二维MUSIC算法,其空间

谱函数为

$$f(\phi, \theta) = 1 / \{ [\mathbf{a}_x^H(\phi, \theta) \quad \mathbf{a}_z^H(\phi, \theta)] \mathbf{E}_n \cdot \mathbf{E}_n^H [\mathbf{a}_x^H(\phi, \theta) \quad \mathbf{a}_z^H(\phi, \theta)]^H \} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{a}_x^H(\phi, \theta) = \sin \theta \mathbf{a}_t(\phi) \otimes \mathbf{a}_r(\theta)$, $\mathbf{a}_z^H(\phi, \theta) = \cos \theta \mathbf{a}_t(\phi) \otimes \mathbf{a}_r(\theta)$ 。

二维 MUSIC 算法必须对式(12)非线性代价函数进行二维搜索获得 K 个目标 DOD 和 DOA 角度高精度估计值 (ϕ_k, θ_k) , $k=1, 2, \dots, K$, 然而该算法二维搜索运算量巨大, 且为了估计角度不模糊, 需满足发射阵元间距 $d \leq \lambda/2$ 和接收阵元间距 $\Delta \leq \lambda/2$ 。

1.3 ESPRIT 算法

ESPRIT 算法^[6]通过信号子空间 \mathbf{E}_s 来获得目标 DOD 和 DOA。ESPRIT 算法无需二维搜索, 克服了上述 MUSIC 算法运算量过大的问题。该算法要求发射和接收阵列为线性均匀阵列, 令发射阵列的第 1 个阵元到第 $M-1$ 个阵元对应的信号子空间为 $\mathbf{E}_{s,t1}$, 发射阵列的第 2 个阵元到第 M 个阵元对应的信号子空间为 $\mathbf{E}_{s,t2}$, 根据子阵间的旋转不变性有: $\mathbf{E}_{s,t2} = \mathbf{E}_{s,t1} \mathbf{T}_t^{-1} \Phi_t \mathbf{T}_t$, 其中 \mathbf{T}_t 为唯一 $K \times K$ 维非奇异矩阵, Φ_t 为 $K \times K$ 维对角矩阵, 其第 (k, k) 个元素为 $e^{-j2\pi/d \sin \phi_k}$, d 为两邻近发射阵元间距。因此, 对 $\mathbf{E}_{s,t1}^+ \mathbf{E}_{s,t2}$ 特征值分解即可得到 K 个目标的 DOD 参数, 其中 $+$ 表示伪逆。

同理目标的 DOA 参数也可以通过上述方法获得。接收阵列的第 1 个阵元到第 $N-1$ 个阵元对应的信号子空间为 $\mathbf{E}_{s,r1}$, 接收阵列的第 2 个阵元到第 M 个阵元对应的信号子空间为 $\mathbf{E}_{s,r2}$, 根据子阵间的旋转不变性有: $\mathbf{E}_{s,r2} = \mathbf{E}_{s,r1} \mathbf{T}_r^{-1} \Phi_r \mathbf{T}_r$, 其中 \mathbf{T}_r 为唯一 $K \times K$ 维非奇异矩阵, Φ_r 为 $K \times K$ 维对角矩阵, 其第 (k, k) 元素为 $e^{-j2\pi/\Delta \sin \theta_k}$, Δ 为两邻近接收阵元间距。对 $\mathbf{E}_{s,r1}^+ \mathbf{E}_{s,r2}$ 特征值分解, 即可得到 K 个目标的 DOA 参数。

但是上述 ESPRIT 算法要求发射和接收阵元必须均匀等间隔, 不适用于非均匀阵列。为了避免相位模糊, ESPRIT 同样要求发射阵元间距 $d \leq \lambda/2$ 和接收阵元间距 $\Delta \leq \lambda/2$, 另外对 DOD 和 DOA 估计结果还需要额外的配对算法。

2 联合 ESPRIT 和子空间拟合算法

算法的主要思想为: 利用矢量传感器内在特

性, 结合子空间旋转不变思想, 首先粗估计出目标 DOA 参数, 随后利用最优加权子空间拟合算法进行一维搜索获得高精度 DOD 估计, 最后在已知 DOA 预估计基础上, 在适当的范围内再次搜索获得 DOA 高精度估计, 这样就避免上述已有算法^[6,9]的缺点。根据式(2)和式(3), 矩阵 \mathbf{A}_x 和 \mathbf{A}_z 重写为:

$$\mathbf{A}_x = \mathbf{B} \Phi_x = \mathbf{B} \text{diag}(\sin \theta_1, \sin \theta_2, \dots, \sin \theta_K) \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_z = \mathbf{B} \Phi_z = \mathbf{B} \text{diag}(\cos \theta_1, \cos \theta_2, \dots, \cos \theta_K) \quad (14)$$

式中:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{a}_t(\phi_1) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_1) \quad \mathbf{a}_t(\phi_2) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_2) \quad \dots \quad \mathbf{a}_t(\phi_K) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_K)] \quad (15)$$

根据式(13)和式(14), 有

$$\mathbf{A}_x = \mathbf{A}_z \Phi = \mathbf{A}_z \text{diag}(\tan \theta_1, \tan \theta_2, \dots, \tan \theta_K) \quad (16)$$

式(16)表明矩阵束 $\{\mathbf{A}_x, \mathbf{A}_z\}$ 的广义特征值等于矩阵 Φ 对角元素, 也就是 DOA 的正切函数。式(16)与 ESPRIT 算法子空间的旋转不变性类似, 这里可以利用 ESPRIT 算法实现对目标 DOA 的估计。令 $\mathbf{E}_{s,a1}$ 为式(10)中信号子空间 \mathbf{E}_s 的前 MN 行, $\mathbf{E}_{s,a2}$ 为 \mathbf{E}_s 的后 MN 行, 那么有

$$\mathbf{E}_{s,a2} = \mathbf{E}_{s,a1} \mathbf{T}^{-1} \Phi \mathbf{T} \quad (17)$$

式中: \mathbf{T} 为唯一 $K \times K$ 维非奇异矩阵。假设 η_k 为 $\mathbf{E}_{s,a1}^+ \mathbf{E}_{s,a2}$ 第 k 个特征值, 则第 k 个目标的 DOA 预估计值为

$$\hat{\theta}_k^{\text{ini}} = \arctan \eta_k \quad (18)$$

应当说明, 这里的 ESPRIT 算法不同于 1.3 节中的 ESPRIT 算法, 这里只是借用 ESPRIT 算法的子空间旋转不变思想, 只与目标有关, 与阵列结构无关。换言之, 本算法对阵列没有任何要求, 不要求两子阵具有旋转不变性, 也不要求相邻阵元间距小于等于半波长。

得到 K 个目标 DOA 预估计结果 $\{\hat{\theta}_k^{\text{ini}}, k=1, 2, \dots, K\}$ 后, 再利用最优加权子空间拟合算法进行一维搜索实现对目标的 DOD 估计。与对应的第 k 个目标 DOD 估计为

$$\hat{\phi}_k = \max \text{tr} \{ \mathbf{P}_a(\phi, \hat{\theta}_k^{\text{ini}}) \hat{\mathbf{E}}_s \mathbf{W} \hat{\mathbf{E}}_s^H \} \quad (19)$$

式中:

$$\mathbf{P}_a(\phi, \theta) = \mathbf{a}(\mathbf{a}^H \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^H \quad (20)$$

$$\mathbf{W} = (\hat{\mathbf{D}}_s - \hat{\sigma}^2 \mathbf{I}) \hat{\mathbf{D}}_s^{-1} \quad (21)$$

$$\mathbf{a}(\phi, \theta) = [\mathbf{a}_x^H(\phi, \theta) \quad \mathbf{a}_z^H(\phi, \theta)]^H \quad (22)$$

式中: $\mathbf{a}_x(\phi, \theta)$ 和 $\mathbf{a}_z(\phi, \theta)$ 如式(12)所示, 噪声方差 $\hat{\sigma}^2$ 可通过矩阵 \mathbf{D}_n 对角线元素均值估计。由于目标 DOD 和 DOA 参数 $(\phi_1, \theta_1), (\phi_2, \theta_2), \dots, (\phi_K, \theta_K)$ 互不相同, 因此在获得了 $\hat{\theta}_k^{\text{ini}}$ 的情况下估计 $\hat{\phi}_k$ 只需要在 $\phi_k \in [-\pi/2, \pi/2]$ 内一维搜索。同时为了避免测角模糊, 要求发射阵元间距不大于半波长。

在获得 K 个目标 DOD $\{\hat{\phi}_k, k=1, 2, \dots, K\}$ 的估计值后, 用类似方法, 通过式(23)一维搜索获得第 k 个目标的 DOA:

$$\hat{\theta}_k = \max \text{tr} \{ \mathbf{P}_a(\hat{\phi}_k, \theta) \hat{\mathbf{E}}_s \mathbf{W} \hat{\mathbf{E}}_s^H \} \quad (23)$$

在获得先验知识 $\{\hat{\theta}_k^{\text{ini}}, k=1, 2, \dots, K\}$ 情况下, 为了降低运算量, 只需要在 $\theta_k \in [\hat{\theta}_k^{\text{ini}} - \Delta\theta, \hat{\theta}_k^{\text{ini}} + \Delta\theta]$ 范围内搜索, $\Delta\theta$ 为适当选择的一个较小角度。在这种情况下接收阵列阵元间距不限于半波长, 只要阵元间距满足 $\Delta \leq (\lambda\pi)/(4\Delta\theta)$ 即可, 因此可通过适当扩大相邻阵元间距来增加接收阵列孔径提高 DOA 估计精度。同时上述算法可以实现 $\hat{\phi}_k$ 和 $\hat{\theta}_k$ 自动配对而不需要额外的算法。

3 计算机仿真

本节通过蒙特卡罗仿真与已有的 ESPRIT^[6] 和二维 MUSIC^[9] 算法及克拉美罗界 (Cramer-Rao Bound, CRB)^[7] 进行对比, 验证所提算法的有效性。假设 2 个等功率非相关目标分别位于 $(\phi_1, \theta_1) = (5^\circ, 11^\circ), (\phi_2, \theta_2) = (14^\circ, 21^\circ)$, 发射和接收阵列分别为均匀线阵, 噪声为零均值、空时非相关高斯白噪声。定义估计性能为第 1 个目标的估计均方根误差, 次数为 500 次独立蒙特卡罗仿真。

图 1 为本文算法和传统算法的目标 DOD、DOA 估计误差随信噪比 (SNR) 变化曲线, 信噪比从 0 dB 变化到 40 dB, 步进单位 5 dB。发射和接收阵元数 $M=N=6$, 快拍数取 31。针对本文算法设置接收阵列阵元间距 $\Delta=2\lambda$, 其余算法接收阵列阵元间距 $d=0.5\lambda$ 。从图中可知, 本文算法估计精度要高于其余算法, 并且估计性能相当接近 CRB。

图 2 为本文算法和传统算法的目标 DOD、DOA 估计误差随快拍数变化曲线, 快拍数从 10 次到 40 次, 信噪比为 10 dB, 其余条件同上实验。

从图中可看出, 本文算法在低快拍下也具有相当优越的性能, 并且随着快拍数的增多, 其估计精度不断提高。

图 3 为不同发射阵元和接收阵元数目下算法的估计误差随信噪比变化曲线。发射和接收阵元数分别为: $M=5, N=7; M=7, N=6; M=9, N=$

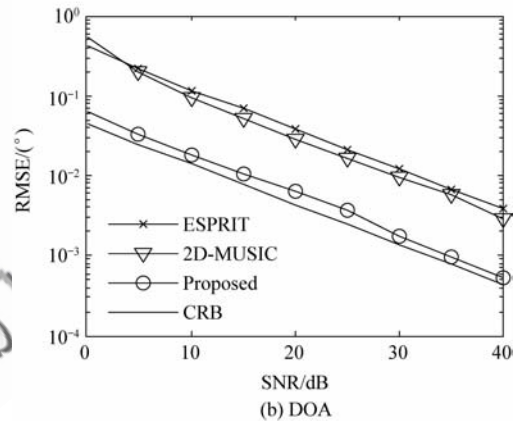
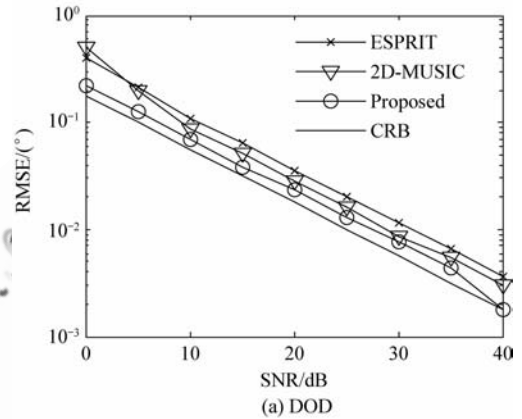
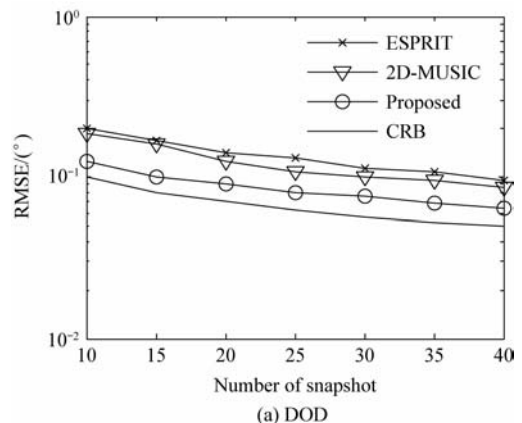


图 1 DOD 和 DOA 估计均方根误差随信噪比变化曲线 ($M=N=6$, 快拍数为 31)

Fig. 1 RMSE of DOD and DOA estimation vs SNRs ($M=N=6$, number of snapshots is 31)



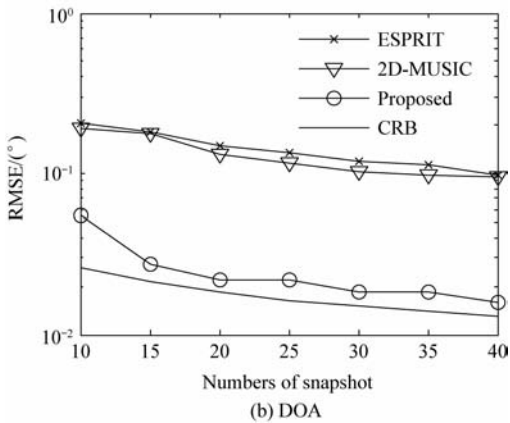


图2 DOD和DOA估计均方根误差随快拍数变化曲线 ($M=N=6$, $\text{SNR}=10$ dB)

Fig. 2 RMSE of DOD and DOA estimation vs snapshots ($M=N=6$, $\text{SNR}=10$ dB)

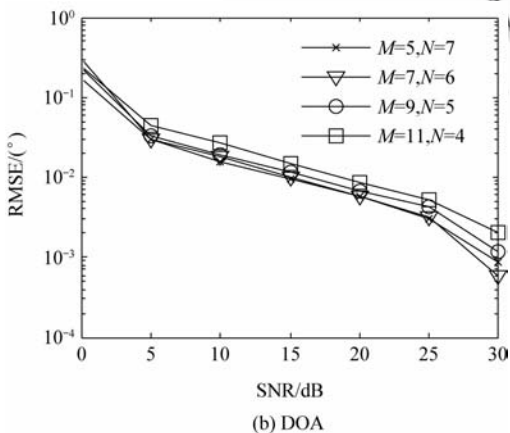
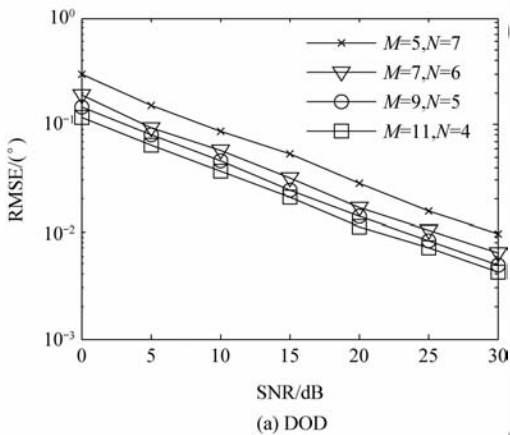


图3 在不同发射接收阵元数下DOD和DOA估计均方根误差随信噪比变化曲线(快拍数为31)

Fig. 3 RMSE of DOD and DOA estimation vs SNRs with different transmitting and receiving sensors (number of snapshots is 31)

5; $M=11$, $N=4$ 。由于每个电偶极子由2个标量传感器组成,因此上述4种配置下发射接收总阵元数 $M+2N=19$ 。仿真中发射阵元间距和接收阵元间距 $d=\Delta=0.5\lambda$ 。由图可知,随着接收阵元的减少DOA估计性能几乎保持不变,而随着发射阵元的增加DOD估计性能提高。后种现象比较直观,发射阵元数越多,DOD估计性能会越来越好。对于DOA估计,其性能主要取决于阵列孔径,而上述4种配置下的阵列孔径保持不变。

4 结论

提出一种适用于矢量传感器双基地MIMO雷达多目标DOD和DOA联合估计算法。采用常规阵列发射,电矢量传感器阵列接收。该算法首先利用矢量传感器固有特性估计目标DOA,然后再利用一维最优加权子空间拟合算法依次实现DOD和DOA搜索。本算法具有以下优点:①可用于不规则阵列(线性不等距阵列);②对接收阵列约束较少,不限制于半波长;③无需二维搜索,较低的运算量;④无需额外的配对算法;⑤具有较高的估计精度。

同时在仿真中发现,双基地MIMO雷达DOD估计性能会随着发射阵元数增多越来越好,而DOA估计性能取决于阵列的孔径大小。

参考文献

- [1] Li J, Stoica P. MIMO radar with colocated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 106-114.
- [2] Xu L, Li J, Stoica P. Target detection and parameter estimation for MIMO radar systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(3): 927-939.
- [3] Li J, Stoica P, Xu L, et al. On parameter identifiability of MIMO radar[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(12): 968-971.
- [4] Tajar A, Jajamovich G H, Wang X, et al. Optimal joint target detection and parameter estimation by MIMO radar [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1): 127-145.
- [5] Yan H D, Li J, Liao G S. Multitarget identification localization using bistatic MIMO radar systems[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008, 8(2): 1-8.
- [6] Duofang C, Baixiao C, Guodong Q, et al. Angle estimation using ESPRIT in MIMO radar[J]. IET Electronics Letters, 2008, 44(12): 770-771.

- [7] Zhang X, Xu D. Low-complexity ESPRIT-based DOA estimation for colocated MIMO radar using reduced-dimension transformation [J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(4): 283-284.
- [8] Bencheikh M L, Wang Y. Joint DOD-DOA estimation using combined ESPRIT-MUSIC approach in MIMO radar [J]. *IET Electronics Letters*, 2010, 46(15): 1081-1083.
- [9] Zhang X, Xu L Y, Xu L. Direction of departure (DOD) and direction of arrival (DOA) estimation in MIMO radar with reduced-dimension MUSIC [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(12): 1161-1163.
- [10] Compton R T, Jr. The tripole antenna: an adaptive array with flail polarization flexibility [J]. *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, 1981, 29(6): 944-952.
- [11] Nehorai A, Kwok-Chiang H, Tan B T G. Minimum-noise-variance beamformer with an electromagnetic vector sensor [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(3): 601-618.
- [12] Hyung-Rae P, Jian L, Hong W. Polarization-space-time domain generalized likelihood ratio detection of radar targets [J]. *Signal Processing*, 1995, 41(2): 153-164.
- [13] Kainam T W, Zoltowski M D. Self-initiating MUSIC-based direction finding and polarization estimation in spatio-polarizational beamspace [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(8): 1235-1245.
- [14] Nehorai A, Paldi E. Vector-sensor array processing for electromagnetic source localization [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(2): 376-398.
- [15] He J, Jiang S, Wang J, et al. Direction finding in spatially correlated noise fields with arbitrarily-spaced and far-separated subarrays at unknown locations [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(3): 278-284.
- [16] Xu Y, Liu Z, Wong K T, et al. Virtual-manifold ambiguity in HOS-based direction-finding with electromagnetic vector-sensors [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(4): 1291-1308.

作者简介:

王克让(1983—) 男,博士研究生。主要研究方向:阵列信号处理, MIMO 雷达信号处理。

Tel: 025-84315126

E-mail: wangkerang@gmail.com

朱晓华(1966—) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:雷达系统理论与技术、雷达信号理论与应用、高速实时数字信号处理等。

Tel: 025-84315126

E-mail: zxh@njust.edu.cn

Joint DOD and DOA Estimation for MIMO Radar with Electromagnetic Vector Sensors

WANG Kerang, HE Yapeng, ZHU Xiaohua*

School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract: A joint direction of departure (DOD) and direction of arrival (DOA) estimation algorithm for multiple input and multiple output (MIMO) radar with electromagnetic vector sensors is proposed. A novel bistatic MIMO radar system with multiple transmitting sensors and multiple receiving electromagnetic vector sensors is introduced. The proposed algorithm uses the internal structure features of the vector sensors and the subspace rotation invariance to obtain the initial DOA, and then an optimal weighted subspace fitting algorithm is employed to implement a one-dimensional search to get the DOD and DOA estimations in succession. The impact of array geometry on the estimation accuracy of the DOD and DOA is discussed. The proposed algorithm is suitable for irregular array geometry, and requires no parameter pairing nor two-dimensional searching. Simulations show the effectiveness of the algorithm, and the estimation accuracy is close to that of the CRB.

Key words: MIMO radar; electromagnetic vector sensor; DOD estimation; DOA estimation; subspace fitting

Received: 2011-05-13; **Revised:** 2011-06-22; **Accepted:** 2011-08-04; **Published online:** 2011-08-15 17:16

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110815.1716.002.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20110815.1716.002

Foundation item: NUST Research Funding (2010ZYTS028)

* **Corresponding author.** Tel.: 025-84315126 E-mail: zxh@mail.njust.edu.cn