

# TR MIMO 雷达低空目标 DOA 估计算法

刘梦波, 胡国平, 韩昊鹏

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 为解决雷达对低空目标角度估计精度不高的问题,提出一种基于时间反转(TR)多输入多输出(MIMO)雷达的低空目标波达方向估计算法。该算法先利用 TR 技术的聚焦性能,获得回波信号矩阵;然后根据 MIMO 雷达波形的分集特性,推导出 TR MIMO 雷达的虚拟阵列形式;再通过行列复用,采用双向空间平滑(FBSS)算法解相干,有效地提高了低空目标的 DOA 估计精度。实验仿真结果表明:在信噪比为  $-10$  dB 的条件下,该算法比传统 MIMO 雷达 DOA 估计算法的均方根误差平均减少了  $0.3^\circ$ 。

**关键词** DOA 估计;低空目标;MIMO 雷达;时间反转;双向空间平滑

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.06.009

**中图分类号** TN953 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)06-0053-06

## DOA Estimation Algorithm of TR MIMO Radar under Low Altitude

LIU Mengbo, HU Guoping, HAN Haopeng

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** To solve the problem of too large angle estimation error for radar under low altitude condition, a DOA estimation algorithm for low altitude target based on TR MIMO radar is proposed. Firstly, The focusing performance of TR technology is used in the proposed algorithm, obtaining the echo signal matrix. According to the waveform diversity of MIMO radar, The virtual subarrays of TR MIMO radar is deduced. Then, we perform rows and columns reuse and apply FBSS algorithm to remove the coherence, effectively improving the DOA estimation accuracy for low altitude target. The simulation results verify the validity of the method. The simulation results show that the RMSE of the proposed algorithm is reduced by an average of  $0.3$  degree compared with the conventional MIMO radar when the SNR is  $-10$  dB.

**Key words:** DOA estimation; low altitude; MIMO radar; time reversal FBSS

在低空环境下<sup>[1-3]</sup>,雷达接收信号包括目标直达信号和地(海)面多径反射信号,由于信号夹角过小,造成了雷达角度估计精度的急剧下降。因此,低空环境下的目标角度跟踪是现代雷达探测所面临的难点问题之一。多输入多输出(Multi-input Multi-output, MIMO)雷达<sup>[4-5]</sup>系统采用天线阵元分集和

正交的信号波形,通过利用回波信号虚拟阵列,能够提高雷达探测的总体性能。相比于普通相控阵雷达,在抗干扰能力、测向精度、抗反辐射导弹能力、覆盖范围、目标检测、反隐身等<sup>[6-8]</sup>方面具有独特的性能优势。

近几年来,广大学者已经对低空条件下 MIMO

**收稿日期:** 2018-05-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61601504)

**作者简介:** 刘梦波(1994—),男,江苏徐州人,硕士生,主要从事 TR MIMO 雷达 DOA 估计研究。E-mail: 619736846@qq.com

**引用格式:** 刘梦波,胡国平,韩昊鹏. TR MIMO 雷达低空目标 DOA 估计算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(6): 53-58. LIU Mengbo, HU Guoping, HAN Haopeng. DOA Estimation Algorithm of TR MIMO Radar under Low Altitude[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6): 53-58.

雷达的角度估计展开了深入研究。其中,文献[9]通过改进的最大似然算法估计目标角度,克服了二维搜索,减小了计算量,提高了低空目标估计精度,但相比其它高分辨算法精度仍有不足。文献[10]采用天线收发共置的 MIMO 雷达探测低空目标,利用回波信号虚拟子阵对偶特性进行行列复用,最后通过双向平滑技术解相干,提高了波达方向(Direction of Arrival, DOA)估计精度,但阵列结构受到了一定限制。文献[11]通过 TR 技术聚集了多路径的散射能量,极大地提高了低空环境下的 DOA 估计精度。时间反转(Time Reversal, TR)<sup>[12-13]</sup>起源于光学研究,通过相位共轭,实现光信号的能量聚焦,将其应用于雷达探测<sup>[14-17]</sup>能够提高雷达的估计性能。

本文通过分析低空环境下 DOA 估计的特点,提出了一种基于 TR MIMO 雷达的低空目标 DOA 估计方法。

## 1 信号模型

### 1.1 多径条件下的 MIMO 雷达信号模型

为发挥 MIMO 体制的灵活性,本文以单基地 MIMO 雷达为例,天线采用收发分置模式,见图 1,在低空多径环境下,MIMO 雷达不同于传统相控阵雷达,需要考虑 4 条信号路径。

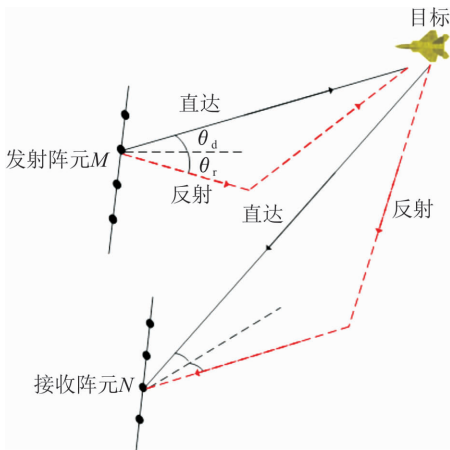


图 1 低空环境下 MIMO 雷达接收信号模型

Fig. 1 The received signal model of MIMO radar under low altitude environment

假设 MIMO 雷达为均匀线阵排布,天线之间间隔为  $d$ (为方便计算, $d$  可取半波长),发射端共有  $M$  个阵元,接收信号的阵元数为  $N$ 。在此模型中,发射和接收阵列间距较近,所以发射角和接收角(包括地面反射角)可近似相等,其中直达波夹角和反射波夹角分别为  $\theta_d$  和  $\theta_r$ 。此时发射端发射的信号矩阵可表示为:

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T \quad (1)$$

由于 MIMO 雷达波形分集特性,则  $M$  个阵元发射的信号之间相互正交,即:  $\int s_i(t)s_j(t)dt = \sigma_s^2 \delta_{ij}$ , 其中  $\sigma_s^2$  为发射信号功率, $i = j$  时  $\delta_{ij}$  等于 1, 否则为 0。

则接收到的目标的信号为:

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{a}_t^T(\theta_d) + \epsilon \mathbf{a}_t^T(\theta_r)] \mathbf{s}(t) = [1 \quad \epsilon][\mathbf{a}_t(\theta_d) \quad \mathbf{a}_t(\theta_r)]^T \mathbf{s}(t) \quad (2)$$

式中:地面反射系数  $\epsilon = \rho e^{j2\pi \frac{\Delta R}{\lambda}}$  的  $2\pi \frac{\Delta R}{\lambda}$  为相位差,取决于反射信号和直达信号的路程差, $\rho$  为复数;发射端直达信号和多径信号的导向矢量  $\mathbf{a}_t(\theta_d) = [1, 2, \dots, e^{-j\pi(M-1)\sin\theta_d}]^T$ ,  $\mathbf{a}_t(\theta_r) = [1, 2, \dots, e^{-j\pi(M-1)\sin\theta_r}]^T$ 。

MIMO 雷达接收到的信号矩阵为:

$$\mathbf{X}(t) = [\mathbf{a}_r(\theta_d) + \epsilon \mathbf{a}_r(\theta_r)] \alpha \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t) = \alpha [\mathbf{a}_r(\theta_d) \quad \mathbf{a}_r(\theta_r)] \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\omega}^T [\mathbf{a}_t(\theta_d) \quad \mathbf{a}_t(\theta_r)]^T \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) = \alpha \mathbf{B} \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{A}^T \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

式中: $\alpha$  为目标反射系数,服从高斯分布,其均值是 0, 方差为  $\sigma^2$ ;  $\boldsymbol{\omega} = [1 \quad \epsilon]$ ;  $\mathbf{n}(t)$  为接收端高斯白噪声;接收端直达信号和反射信号的导向矢量分别为  $\mathbf{a}_r(\theta_d) = [1, 2, \dots, e^{-j\pi(N-1)\sin\theta_d}]^T$ ,  $\mathbf{a}_r(\theta_r) = [1, 2, \dots, e^{-j\pi(N-1)\sin\theta_r}]^T$ 。

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_t(\theta_d) \quad \mathbf{a}_t(\theta_r)] \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{a}_r(\theta_d) \quad \mathbf{a}_r(\theta_r)] \quad (5)$$

### 1.2 多径条件下 TR MIMO 雷达信号模型

根据文献[18]中 TR MIMO 雷达角度估计方法,可做如下处理:①将式(3)的信号矩阵取共轭并且时间反转;②进行能量归一化,再次发射出去。则再次发射的信号为  $\tau \mathbf{X}^*(-t)$ , TR MIMO 接收到的信号矩阵为:

$$\mathbf{Y}(t) = \tau \alpha \mathbf{A} \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{X}^*(-t) + \mathbf{W}(t) = \tau |\alpha|^2 \mathbf{A} \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A}^H \mathbf{s}^*(-t) + \tau \alpha \mathbf{A} \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{n}^*(-t) + \mathbf{W}(t) = \tau |\alpha| \mathbf{A} \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A}^H \mathbf{s}^*(-t) + \mathbf{V}(t) \quad (6)$$

$$\tau = \sqrt{\int \|\mathbf{s}(t)\|^2 dt / \int \|\mathbf{X}(t)\|^2 dt} \quad (7)$$

式中: $(\cdot)^*$  为取矩阵共轭; $\mathbf{W}(t)$  为均值为 0, 方差为  $\sigma^2 \mathbf{I}_M$  的高斯白噪声; $\mathbf{V}(t)$  为累积噪声,根据文献[10]可知,由于时间反转的聚焦作用, $\mathbf{V}(t)$  可近似为高斯白噪声。

## 2 本文算法

根据文献[18]可知,为得到 TR MIMO 雷达的虚拟子阵,需对接收端的信号矩阵进行匹配滤波:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= E[\mathbf{Y}(t)\mathbf{s}^T(-t)] = \\ \tau|\alpha|^2 \mathbf{A}\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A}^H E[\mathbf{s}^*(-t)\mathbf{s}^T(-t)] + \\ E[\mathbf{V}(t)\mathbf{s}^T(-t)] = \\ \tau|\alpha|^2 \mathbf{A}\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A}^H + \mathbf{V} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{V}$ 是一个 $M \times M$ 维的噪声矩阵,其每一个元素都服从高斯分布,且互不相关。

由于虚拟矩阵 $\mathbf{Y}$ 的各列所对应的导向矢量满足平移不变的特性,因此可以提取 $\mathbf{Y}$ 的每列,作为单个子阵的接收信号。则 $\mathbf{Y}$ 的第 $i$ 列可以表示为:

$$\mathbf{Y}_{ci} = \tau|\alpha|^2 \mathbf{A}\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \mathbf{C}_i + \mathbf{V}_{ci} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{C}_i = \boldsymbol{\omega}^H [e^{j\pi(i-1)\sin\theta_d} \quad e^{j\pi(i-1)\sin\theta_r}]^T$ ,  $i=1, 2, \dots, M$ ;  $\mathbf{V}_{ci}$ 是噪声矩阵 $\mathbf{V}$ 的第 $i$ 列。

根据公式(9), $\mathbf{Y}_{ci}$ 的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{ci} = E[\mathbf{Y}_{ci}\mathbf{Y}_{ci}^H] =$$

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \mathbf{Q}_{ci} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A}^H + E[\mathbf{V}_{ci}\mathbf{V}_{ci}^H] \quad (10)$$

式中: $\mathbf{Q}_{ci} = E[|\tau|^2 |\alpha|^4 \mathbf{C}_i \mathbf{C}_i^H]$ ; 噪声矢量的协方差矩阵为 $E[\mathbf{V}_{ci}\mathbf{V}_{ci}^H]$ 。

为去除目标的相干性,定义矩阵 $\mathbf{J}_M$ 为 $M \times M$ 维变换矩阵,则:

$$\mathbf{J}_M = \begin{bmatrix} 0 & & 1 \\ & \ddots & \\ 1 & & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中只有反对角线上的数值为1,其它数均为0。

因此 $\mathbf{Y}_{ci}$ 的反向协方差矩阵可表示为:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{ci} = \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{ci}^* \mathbf{J}_M \quad (12)$$

为实现双向空间平滑,利用 $\mathbf{Y}_{ci}$ 的反向协方差矩阵和协方差矩阵做平均处理:

$$\mathbf{R}_{ci-FB} = \frac{1}{2}(\mathbf{R}_{ci} + \tilde{\mathbf{R}}_{ci}) = \frac{1}{2}(\mathbf{R}_{ci} + \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{ci}^* \mathbf{J}_M) \quad (13)$$

同理,由于 $\mathbf{Y}$ 的第 $k$ 行和第 $k+1$ 行也满足上述性质,则可以表示为:

$$\mathbf{Y}_{rk} = \tau|\alpha|^2 \mathbf{C}_k \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A}^H + \mathbf{V}_{rk} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{C}_k = [e^{-j\pi(k-1)\sin\theta_d} \quad e^{-j\pi(k-1)\sin\theta_r}] \boldsymbol{\omega}$ ,  $k=1, 2, \dots, M$ ;  $\mathbf{V}_{rk}$ 是噪声矩阵 $\mathbf{V}$ 的第 $k$ 行。

根据公式(14), $\mathbf{Y}_{rk}$ 的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{rk} = E[\mathbf{Y}_{rk}\mathbf{Y}_{rk}^H] =$$

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \mathbf{Q}_{rk} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B}^* \boldsymbol{\omega}^* \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A}^H + E[\mathbf{V}_{rk}\mathbf{V}_{rk}^H] \quad (15)$$

式中: $\mathbf{Q}_{rk} = E[|\tau|^2 |\alpha|^4 \mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k]$ , 而噪声矢量的协方差矩阵为 $E[\mathbf{V}_{rk}\mathbf{V}_{rk}^H]$ 。

因此 $\mathbf{Y}_{rk}$ 的反向协方差矩阵可表示为:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{rk} = \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{rk}^* \mathbf{J}_M \quad (16)$$

对其进行双向空间平滑得:

$$\mathbf{R}_{rk-FB} = \frac{1}{2}(\mathbf{R}_{rk} + \tilde{\mathbf{R}}_{rk}) = \frac{1}{2}(\mathbf{R}_{rk} + \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{rk}^* \mathbf{J}_M) \quad (17)$$

然后计算 $M$ 个 $\mathbf{R}_{ci-FB}$ (或者 $\mathbf{R}_{rk-FB}$ )的均值:

$$\mathbf{R}_{c-FB} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{R}_{ci-FB} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M (\mathbf{R}_{ci} + \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{ci}^* \mathbf{J}_M) \quad (18)$$

$$\mathbf{R}_{r-FB} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \mathbf{R}_{rk-FB} = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^M (\mathbf{R}_{rk} + \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{rk}^* \mathbf{J}_M) \quad (19)$$

根据式(18)或式(19),进行特征分解得到信号和噪声子空间,利用多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)算法,通过谱峰搜索能够实现TR MIMO 雷达低空目标 DOA 估计。

为充分利用TR MIMO 雷达虚拟矩阵的数据信息,对其进行行列复用可得:

$$\mathbf{R}_{MFB} = \frac{1}{2}(\mathbf{R}_{c-FB} + \mathbf{R}_{r-FB}) =$$

$$\frac{1}{4M} \sum_{i=1}^M (\mathbf{R}_{ci} + \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{ci}^* \mathbf{J}_M) + \frac{1}{4M} \sum_{k=1}^M (\mathbf{R}_{rk} + \mathbf{J}_M \mathbf{R}_{rk}^* \mathbf{J}_M) \quad (20)$$

分析式(20)可知,相比于未经数据复用的算法,本文算法的估计性能受到 $\mathbf{R}_{ci}$ 和 $\mathbf{R}_{rk}$ 的影响。由式(10)和式(15)可知, $\mathbf{R}_{ci}$ 和 $\mathbf{R}_{rk}$ 的信号部分(右边第1项)全部来源于样本 $\mathbf{Y}(l)$ 完全相等,不能够提高算法的估计精度;设 $\mathbf{G}_{ci} = \mathbf{V}_{ci}\mathbf{V}_{ci}^H$ ,  $\mathbf{G}_{rk} = \mathbf{V}_{rk}\mathbf{V}_{rk}^H$ ,可知, $\mathbf{V}_{ci}$ 的第 $j$ 个数和 $\mathbf{V}_{rk}$ 的第 $i$ 个数相等, $\mathbf{G}_{ci}$ 与 $\mathbf{G}_{rk}$ 仅存在一个元素相同。所以,本文算法可以提高对噪声协方差阵的计算精度,从而提高雷达的角度估计性能。

实际中,为实现本文算法,具体操作如下:

1)在低空环境下,根据MIMO 雷达的信号模型,构造TR MIMO 雷达多径信号模型;

2)为得到TR MIMO 虚拟阵列,对 $\mathbf{Y}(t)$ 进行匹配滤波,即 $\mathbf{Y} = E[\mathbf{Y}(t)\mathbf{s}^T(-t)]$ ;

3)分别提取虚拟阵列 $\mathbf{Y}$ 的列子阵 $\mathbf{Y}_{ci}$ 和行子阵 $\mathbf{Y}_{rk}$ ,计算其协方差阵 $\hat{\mathbf{R}}_{ci}$ 与 $\hat{\mathbf{R}}_{rk}$ ,即 $\hat{\mathbf{R}}_{ci} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{Y}_{ci}(l) \cdot \mathbf{Y}_{ci}^H(l)$ ,  $\hat{\mathbf{R}}_{rk} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{Y}_{rk}(l) \mathbf{Y}_{rk}^H(l)$ ,其中, $L$ 为采样次数;

4)利用式(20)求得双向平滑和样本复用后的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{MFB}$ ;

5)分解协方差矩阵 $\mathbf{R}_{MFB}$ ,利用MUSIC 算法估计目标角度。

### 3 仿真实验

为了检验算法有效性,本文对MIMO 雷达虚拟阵列、TR MIMO 雷达虚拟阵列和本文算法分别利用双向平滑和前向平滑(TR MIMO 子阵阵元数选7, MIMO 子阵阵元数选5)进行仿真对比。实验中,MI-MO 天线为均匀线阵排布,天线之间间隔半波长,发射端信号相互正交,发射天线 $M=10$ ,接收天线 $N=8$ ,采样数 $L=200$ ,采用 $0.01^\circ$ 的角度搜索间隔,进行300次 Monte Carlo 仿真。设直达信号和反射信号的仰角分别为 $\theta_1=1^\circ, \theta_2=-1^\circ$ ,反射系数 $\epsilon=0.8e^{j\frac{160^\circ}{180^\circ}\pi}$ 。

### 3.1 算法有效性检验

图2是采用本文算法、TR MIMO 虚拟子阵、MIMO 虚拟子阵双向平滑算法的空间谱估计。其中选取信噪比 SNR=20 dB。

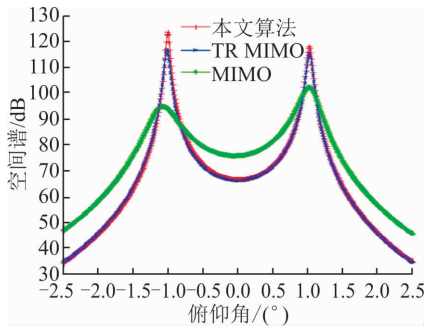


图2 本文算法的 DOA 估计空间谱

Fig. 2 The spatial spectrum of the proposed algorithms

从图中可以看出,3种算法在信噪比较高的情况下都可以较为准确地估计出俯仰角的多径目标。但是相比于传统的 MIMO 雷达,TR MIMO 雷达的谱线的峰值更高,表现出 TR 技术良好的聚焦性能。对比本文算法和未经行列复用的 TR MIMO 算法,可知,本文算法的估计精度更高。

### 3.2 不同 SNR 条件下,前向和双向平滑的估计精度对比

图3分别是3种算法前向和双向空间平滑的角度估计均方根误差变化,其中,信噪比的范围为-10 dB~30 dB。

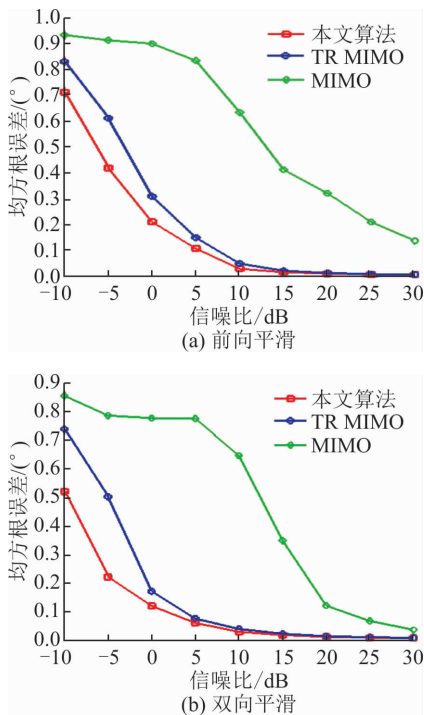


图3 不同 SNR 时 3 种算法的 RMSE

Fig. 3 The RMSE of the three algorithms when the different SNR(FBSS)

从图中可知,TR MIMO 虚拟子阵低空目标的 DOA 估计精度较高,其主要原因是 TR MIMO 雷达具有良好的聚焦性能,充分利用了多径信号数据,且当  $M > N$  时可获得更大的接收虚拟孔径,增大了系统自由度。在信噪比较低时,本文算法相对于未经行列复用的 TR MIMO 雷达估计算法有更高的估计精度,在高信噪比时 2 种算法估计性能相差无几。双向平滑较前向平滑具有更好的估计性能,主要是因为双向平滑具有更少的孔径损失。

### 3.3 不同快拍数条件下,前向和双向平滑的估计精度对比

图4为 SNR=10 dB,快拍数的范围为 20~290 时采用前向和双向空间平滑估计的均方根误差变化,从图中可知,本文算法的估计性能更好且随快拍数的增多不断提升;相比于传统 MIMO 雷达,TR MIMO 雷达在低快拍下仍有良好的性能。

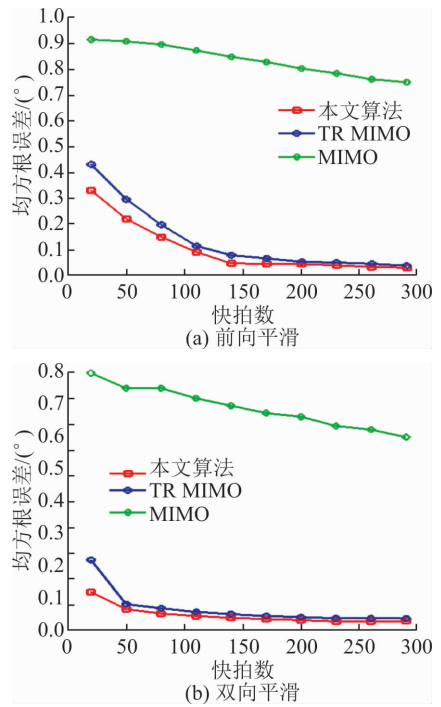


图4 不同快拍数时 3 种算法 RMSE

Fig. 4 The RMSE of the three algorithms when the different snapshots(FBSS)

### 3.4 不同发射阵元数、接收阵元数条件下,算法估计精度对比

图5是3种算法随不同发射阵元变化的均方误差仿真图,其 SNR=0 dB,接收阵元  $N=8$ 。图8是3种算法随不同接收阵元变化的均方误差仿真图,其 SNR=0 dB,发射阵元  $M=8$ 。

从图5(a)中可知,在发射阵元数增大时本文算法的精度不断提高,主要因为发射阵元数决定了 TR MIMO 雷达虚拟孔径的大小,更多的发射阵元数能够提高 TR MIMO 雷达自由度,从而提高估计

精度。但是 MIMO 雷达虚拟阵列是  $N \times M$  矩阵,发射阵元数的增大只能增大虚拟子阵的样本数量,并不能直接扩大雷达孔径,所以性能提高幅度小。当发射阵元数为 6 时,TR MIMO 雷达虚拟阵列的估计精度低于 MIMO 雷达的估计精度,是因为此时 TR MIMO 雷达的虚拟孔径小于 MIMO 雷达孔径。由图 5(b)可知,在接收阵元数增大时,TR 技术的聚焦性能增强,增大了 MIMO 的虚拟孔径,3 种算法的估计精度不断提高,主要由于接收阵元数增加。

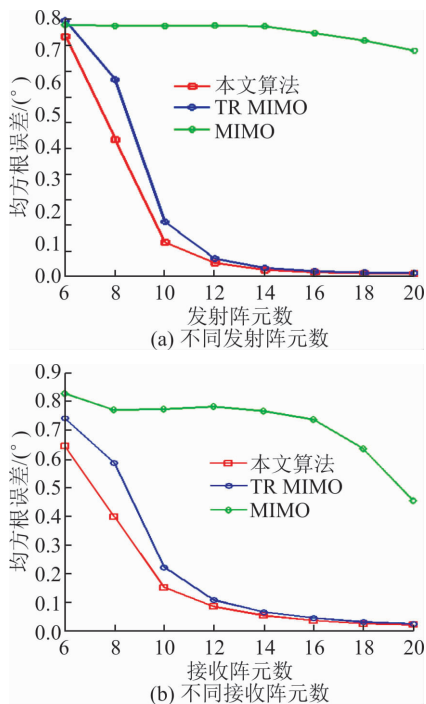


图5 不同阵元数条件下的 DOA 估计性能(双向平滑)

Fig. 5 DOA estimation performance with different number of arrays(FBSS)

## 4 结语

本文将时间反转技术用于天线分置的 MIMO 雷达中,结合虚拟子阵行列复用思想,提出了一种有效的 TR MIMO 雷达低空目标 DOA 估计方法。算法充分利用了 TR 技术的聚焦性能和 MIMO 雷达的分集特性,极大地提高了低空多径情况下的目标角度估计精度。

## 参考文献(References):

[1] 李涛护,高保生. 一种改进对称波束的低仰角闭环跟踪算法[J]. 无线电工程,2014,44(8): 31-33.  
LI T H, GAO B S. A Closed-Loop Tracking Algorithm for Low Altitude Target by Improved Symmetric Beam[J]. Radio Engineering, 2014, 44(8): 31-33. (in Chinese)

[2] BIALER O, RAPHAELI D, WEISS A J. Maximum-

likelihood Direct Position Estimation in Dense Multipath[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2069-2079.

[3] LUO Y, WANG Y Q, WU S L, et al. Multipath Effects on Vector Tracking Algorithm for GNSS Signal [J]. Science China: Information Sciences, 2014, 57(10): 1-13.

[4] BEKKERMAN I, TABRIKIAN J. Target Detection and Localization Using MIMO Radars and Sonars[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(10): 3873-3883.

[5] 谢荣. MIMO 雷达角度估计算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.  
XIE R. Research on MIMO Radar Angle Estimation Algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)

[6] YANG H S, CHUN J W. An Improved Algebraic Solution for Moving Target Localization in Non-coherent MIMO Radar Systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(1): 258-270.

[7] XU J, LIAO G. Joint Range and Angle Estimation Using MIMO Radar with Frequency Diverse Array[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(13): 3396-3410.

[8] 陈浩文,黎湘,庄钊文. 一种新兴的雷达体制—MIMO 雷达[J]. 电子学报,2012,40(6):1190-1198.  
CHEN H W, LI X, ZHUANG Z W. A Rising Radar System: MIMO Radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1190-1198. (in Chinese)

[9] 吴向东,赵永波,张守宏,等. 一种 MIMO 雷达低角跟踪环境下的波达方向估计新方法[J]. 西安电子科技大学学报,2008,35(5):793-798.  
WU X D, ZHAO Y B, ZHANG S H, et al. New Method for DOA Estimation for the MIMO Radar in Low Angle Tracking Environment[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(5): 793-798. (in Chinese)

[10] 汪安戈,胡国平,周豪,等. MIMO 雷达双向空间平滑的多径目标 DOA 估计算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(3):44-48.  
WANG A G, HU G P, ZHOU H, et al. DOA Estimation Algorithm for Multi-Path Target of MIMO Radar Based on FBSS[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 44-48. (in Chinese)

[11] JIN Y, MOURA J, N. O'DONOUGHUE. Time Reversal Adaptive Waveform in MIMO Radar [C]//In Proceedings of 2010 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Sydney: IEEE, 2010: 741-744.

[12] 杨伏洲,王海燕,申晓红,等. 基于时间反转的非均匀线列阵超指向性阵元分布模型[J]. 上海交通大学学

报,2013,47(12):1907-1917.

YANG F Z, WANG H Y, SHEN X H, et al. Super-Directional Element Distribution Model of NLA Based on TR[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(12): 1907-1917. (in Chinese)

- [13] 吴索路, 欧阳缮, 张海如. 基于时间反转的探地雷达多目标成像算法研究[J]. 微波学报, 2015, 31(5): 51-54.  
WU S L, OUYANG S, ZHANG H R. Multi-target Imaging Algorithm Based on Time Reversal for Ground Penetrating Radar Data[J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(5): 51-54. (in Chinese)
- [14] FOROOZAN F, ASIF A, JIN Y. Cramér-Rao Bounds for Time Reversal MIMO Radars with Multipath[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic System, 2016, 52(1): 137-154.
- [15] MOHAMMAD H, SAJJADIEN S, ASIF A. Compressive Sensing Time Reversal MIMO Radar: Joint Direction and Doppler Frequency Estimation[J]. IEEE

Signal Processing Letters, 2015, 22(9): 1283-1287.

- [16] 蒋艳英, 欧阳缮, 晋良念, 等. 时间反转在 UWB-MIMO 雷达中的应用[J]. 桂林电子科技大学学报, 2013, 33(3): 173-176.  
JIANG Y Y, OU Y S, JIN L N, et al. Time Reversal Detection in UWB MIMO Radar[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2013, 33(3): 173-176. (in Chinese)
- [17] FOROOZAN F, ASIF A. Time Reversal MIMO Radars for Estimation of Velocity and Direction[C]//In Proceedings of IEEE Statistical Signal Processing Workshop. Ann Arbor: IEEE, 2012: 860-863.
- [18] FOROOZAN F, ASIF A, BOYER R. Time Reversal MIMO Radar: Improved CRB and Angular Resolution Limit[C]//IEEE International Conference on Acoustics, 2013: 4125-4129.

(编辑: 徐敏)

\*\*\*\*\*  
(上接第 7 页)

- [15] 胡晓磊, 王辉, 乐贵高, 等. 二次燃烧对燃气弹射载荷和内弹道影响数值研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(6): 776-781.  
HU X L, WANG H, LE G G, et al. Influence of Secondary Combustion on the Load and Internal Trajectory of Gas-Ejection Launcher[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(6): 776-781. (in Chinese)
- [16] 李仁凤, 乐贵高, 马大为. 燃烧产物特性对燃气弹射内弹道与载荷的影响研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(2): 245-252.  
LI R F, LE G G, MA D W. The Influence of Combustion Product Properties on Gas-Ejection Interior Ballistic and Load Characteristics [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(2): 245-252. (in Chinese)
- [17] 牛钰森. 自弹式发射内弹道流场特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
NIU Y S. Research on Internal Ballistic Flow Filed Characteristics of Self-Eject Launch [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 李仁凤, 乐贵高, 马大为, 等. 壁面障碍物对燃气弹射流场和内弹道的影响[J]. 固体火箭技术, 2016, 39(3): 444-450.  
LI R F, LE G G, MA D W, et al. Influence of Tube-Wall Obstacles on Flow Field of Gas-Ejection and Internal Trajectory [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(3): 444-450. (in Chinese)
- [19] GUESSAB A, ARIS A, BOUNIF A. Simulation of

Turbulent Piloted Methane Non-Premixed Flame based on Combination of Finite-Rate /Eddy-Dissipation model[J]. Mechanics, 2013, 19(6): 657-664.

- [20] LUAN Y T, CHYOU Y P, WANG T. Numerical Analysis of Gasification Performance via Finite-Rate Model in a Cross-Type Two-Stage Gasifier [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(2): 558-566.
- [21] 冯喜平, 李海波, 唐金兰, 等. 采用不同气相燃烧模型模拟含硼燃气扩散燃烧过程[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(4): 474-480.  
FENG X P, LI H B, TANG J L, et al. Numerical Simulation on Boron-Based Gas Diffusion Combustion by Different Gaseous Combustion Models[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(4): 474-480. (in Chinese)
- [22] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A New  $k-\epsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [23] 李恩义, 乐贵高, 马大为, 等. 低温燃气弹射内弹道影响因素的数值研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1296-1306.  
LI E Y, LE G G, MA D W, et al. Numerical Study on Factors of Interior Ballistic for Low-Temperature Gas-Ejection[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1296-1306. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)