

一种改进的知识辅助MIMO雷达空时自适应处理方法

侯静^{*①} 胡孟凯^② 王子微^①

^①(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

^②(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘要: 针对机载多输入多输出(MIMO)雷达杂波抑制问题, 该文提出一种改进的基于知识辅助的空时自适应信号处理算法(KA-STAP)。根据杂波在空时2维平面的先验分布离线构造杂波子空间, 以此替代基于扁长椭球波函数(PSWF)估计的杂波子空间, 避免了复杂运算。仿真结果表明, 所提方法不仅能减小运算量, 还能获得更深的零陷以及更优的旁瓣性能。

关键词: MIMO雷达; 知识辅助; 空时自适应处理; 杂波子空间

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)04-0795-06

DOI: 10.11999/JEIT180557

An Improved Knowledge-aided Space-time Adaptive Signal Processing Algorithm for MIMO Radar

HOU Jing^① HU Mengkai^② WANG Ziwei^①

^①(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

^②(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Focusing on the clutter suppression problem of the airborne Multiple Input Multiple Output (MIMO) radar, an improved method based on Knowledge-Aided Space-Time Adaptive signal Processing (KA-STAP) algorithm is proposed. The clutter subspace is constructed offline according to the prior distribution of the clutter in the space-time plane, to replace that of estimation based on the Prolate Spheroidal Wave Function (PSWF), so that complex operations are avoided. Simulation results show that the proposed approach can not only reduce the computational complexity, but can obtain deeper notch and better side-lobe performance.

Key words: MIMO radar; Knowledge-aided; Space-Time Adaptive Processing (STAP); Clutter subspace

1 引言

MIMO雷达及其空时自适应信号处理(STAP)近年来得到了学者的广泛关注^[1-5]。MIMO雷达相比于传统的相控阵雷达有很多优势, 它只需要少量天线, 通过在各天线发射正交信号, 并在接收端相应地进行匹配来分离各发射信号分量, 从而获得较多的自由度, 进而可以提高雷达抑制杂波的能力并改善雷达对机动目标的检测性能。相应地, MIMO雷达STAP也成为当下研究的热点。但是与相控阵STAP一样, 要想获得最优权向量, MIMO雷达STAP同样需要对高维协方差矩阵进行估计和求逆^[6], 这大大制约了它的发展。通过学者们的不懈努力, 近年来, 主分量法(PC), 互谱尺度法(CSM), 多

级维纳滤波(MWF)等降维STAP方法相继被提出^[7-11], 有效地解决了STAP处理面临的大计算量、收敛性问题。

但这些降维方法却都要面临特征值分解的问题, 在此基础上, 离线构造杂波子空间的方法被提出。文献^[12,13]利用扁长椭球波函数(PSWF)估计杂波子空间, 从而避免通过特征值分解来估计杂波子空间, 可以大大减少MIMO雷达降维STAP算法的计算量。但该方法存在两个问题: 第一, 由于杂波子空间是根据杂波信号模型离线构造的, 是一种理想的杂波子空间, 是非杂波自适应的, 因此如果杂波模型存在误差, 该方法的性能将明显下降; 第二, PSWF本身的构造比较复杂, 也需要进行特征值分解, 这带来一定的计算量。

在此基础上, 学者们提出了知识辅助的STAP方法^[14-16], 其中文献^[16]提出了一种利用扁长椭球波函数(PSWF)估计的杂波子空间作为先验知识约束的方法, 解决了问题一, 提升了STAP的稳健性,

收稿日期: 2018-06-06; 改回日期: 2018-12-11; 网络出版: 2018-12-26

*通信作者: 侯静 jhou0825@nwpu.edu.cn

基金项目: 航空科学基金(2016ZC53033)

Foundation Item: The Fund of Aeronautics Science (2016ZC53033)

但问题二仍然存在,即扁长椭球波函数(PSWF)较难构造,求解时要面临特征值分解的问题,计算量较大。文献[17]提出的根据杂波在空时2维平面的先验分布离线构造杂波子空间的方法是一种能够快速估计杂波子空间的方法,该方法不需要特征值分解,因而计算量较小。因此,本文提出利用该方法离线构造杂波子空间,并将其作为先验知识约束,改进知识辅助的STAP方法,可以在减小运算量的同时改善旁瓣性能。

2 机载MIMO雷达杂波模型

本文采用的机载MIMO雷达模型如图1所示。假设发射阵列和接收阵列都是均匀直线阵,阵元数分别为 M 和 N ,阵元间距分别为 d_T 和 d_R ,并假设雷达载机飞行高度为 h ,并以速度 v_a 沿 x 轴方向匀速直线飞行。杂波散射单元方位角为 θ ,俯仰角为 φ ,且雷达工作波长为 λ ,脉冲重复周期为 T 。在一个相干处理间隔(CPI)内,发射阵列的 M 个发射阵元同时辐射相互正交的脉冲串波形且每个脉冲串由 K 个脉冲组成。将接收阵列的每个接收阵元匹配滤波得到的数据进行排列,可以得到如式(1)的 $MNK \times 1$ 维杂波和噪声向量

$$\mathbf{y} = \int_0^\pi \rho(\theta) \mathbf{s}(f_s, f_d) d\theta + \mathbf{v} \quad (1)$$

其中, $\rho(\theta) \sim N^c(0, \sigma_\theta^2)$ 为杂波散射系数,服从均值为零,方差为 σ_θ^2 的复高斯分布; $f_s = \frac{1}{\lambda} d_R \cos \theta \cos \varphi$ 为归一化空间频率, $f_d = 2 \frac{1}{\lambda} v T \cos \theta \cos \varphi$ 为归一化多普勒频率; $MNK \times 1$ 维空时2维导向矢量可表示为

$$\mathbf{s}(f_s, f_d) = \mathbf{a}_D(f_d) \otimes \mathbf{a}_T(f_s) \otimes \mathbf{a}_R(f_s) \quad (2)$$

它是 $K \times 1$ 维多普勒导向矢量 $\mathbf{a}_D(f_d)$, $M \times 1$ 维发射

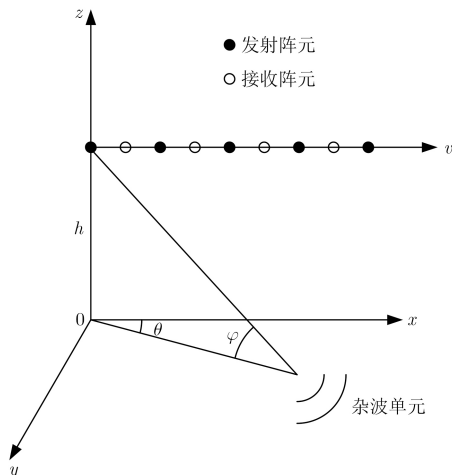


图1 机载MIMO雷达系统结构

导向矢量 $\mathbf{a}_T(f_s)$ 和 $N \times 1$ 维接收导向矢量 $\mathbf{a}_R(f_s)$ 的Kronecker积,它们可分别表示为

$$\mathbf{a}_D(f_d) = [1 \ e^{j2\pi f_d} \ \dots \ e^{j2\pi(K-1)f_d}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{a}_T(f_s) = [1 \ e^{j2\pi f_s \alpha} \ \dots \ e^{j2\pi(M-1)f_s \alpha}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{a}_R(f_s) = [1 \ e^{j2\pi f_s} \ \dots \ e^{j2\pi(N-1)f_s}]^T \quad (5)$$

其中, $\alpha = d_T/d_R$, $\mathbf{v} \sim N^c(0, \sigma_v^2 \mathbf{I})$ 为 $MNK \times 1$ 维高斯白噪声向量。

3 知识辅助的STAP方法

3.1 知识辅助的STAP优化问题描述

由文献[14],知识辅助的STAP方法可以通过式(6)优化问题进行描述

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{W}} E[|\mathbf{W}^H \mathbf{X}|^2] \\ \text{s.t. } \mathbf{W}^H \mathbf{s} = 1 \\ \mathbf{W}^H \mathbf{R}_c \mathbf{W} \leq \delta_d \\ \mathbf{W}^H \mathbf{W} \leq \delta_L \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中, \mathbf{X} 为接收的数据样本, \mathbf{s} 为 $MNK \times 1$ 维的目标信号的空时导向矢量, \mathbf{R}_c 为基于先验知识的杂波协方差矩阵,约束 $\mathbf{W}^H \mathbf{R}_c \mathbf{W} \leq \delta_d$ 使优化问题的解(近似)正交于 \mathbf{R}_c , δ_L 为白噪声增益。

上述优化问题的最优解为

$$\mathbf{W} = \frac{(\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{R}_{KA})^{-1} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H (\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{R}_{KA})^{-1} \mathbf{s}} \quad (7)$$

其中, \mathbf{R}_{KA} 为先验的协方差矩阵, \mathbf{R}_{XX} 为估计的杂波协方差矩阵。

3.2 基于PSWF的杂波子空间的构造

文献[16]提出了杂波子空间的知识约束,同时利用接收数据样本和估计的杂波子空间知识。其基本思想是对扁长椭球波函数(PSWF)进行非均匀采样得到一组基向量

$$\mathbf{U}_c = (u_0 \ u_1 \ \dots \ u_{r_c-1}) \quad (8)$$

其中, r_c 为杂波秩,而 \mathbf{U}_c 则是利用PSWF估计的杂波子空间。对PSWF非均匀采样得到的基向量不一定满足正交性,所以要对 \mathbf{U}_c 进行正交化,得到正交的基矢量 $\mathbf{Q}_c = (q_0 \ q_1 \ \dots \ q_{r_c-1})$ 。

由文献[14],知识辅助的STAP方法的最优解为

$$\mathbf{W} = \frac{(\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{R}_{KA})^{-1} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H (\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{R}_{KA})^{-1} \mathbf{s}} \quad (9)$$

其中, \mathbf{R}_{KA} 为先验的协方差矩阵, \mathbf{R}_{XX} 为估计的杂波协方差矩阵。

所以最终求得的最优权向量为

$$\mathbf{W} = \frac{(\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{Q}_c \mathbf{Q}_c^H)^{-1} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H (\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{Q}_c \mathbf{Q}_c^H)^{-1} \mathbf{s}} \quad (10)$$

然而PSWF本身较难构造,往往需要进行特征值分解的运算,且非均匀采样后往往还要进行正交化运算来保证正交性,计算量较大。为解决上述问题,本文提出一种根据杂波在空时2维平面的先验分布离线构造杂波子空间作为约束矩阵的基于KA-STAP方法。

4 基于先验分布杂波子空间构造的KA-STAP方法

由式(1),可求得杂波协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_c = \int_0^\pi \sigma_\theta^2 \mathbf{s}(f_s, f_d) \mathbf{s}^H(f_s, f_d) d\theta \quad (11)$$

令 Θ 表示杂波子空间,则式(11)说明 Θ 可由同一距离环上方位角 $\theta \in [0, \pi]$ 的所有杂波点源对应的空时导向矢量张成,即

$$\Theta = \text{span}\{\mathbf{s}(f_s, f_d) : f_d(\theta) = \beta f_s(\theta), \theta \in [0, \pi]\} \quad (12)$$

其中, $\beta = 2v_a T / d_R$ 。令 $\omega_s = 2\pi f_s$ 并将式(3)一式(5)代入式(2)展开,得到导向矢量 $\mathbf{s}(f_s, f_d)$ 的分量形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(f_s, f_d) &= \left[1, e^{j\omega_s}, \dots, e^{j(N-1)\omega_s}, e^{j\alpha\omega_s}, \dots, \right. \\ &\quad \left. e^{j[(N-1)+\alpha(M-1)]\omega_s}, e^{j\beta\omega_s}, \dots, \right. \\ &\quad \left. e^{j[(N-1)+\alpha(M-1)+\beta(K-1)]\omega_s} \right]^T \\ &= \mathbf{E} \left[1, e^{j\omega_s}, e^{j2\omega_s}, \dots, \right. \\ &\quad \left. e^{j[N-1+\alpha(M-1)+\beta(K-1)]\omega_s} \right]^T \quad (13) \end{aligned}$$

其中, $MNK \times [N + \alpha(M-1) + \beta(K-1)]$ 维矩阵 \mathbf{E} 的第 i 行第 j 列元素为

$$e_{i,j} = \begin{cases} 1, & i = (k-1)MN + (m-1)N + n, \\ & j = n + \alpha(m-1) + \beta(k-1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, K$ 。即对于 \mathbf{E} 的第 $(k-1)MN + (m-1)N + n$ 行, 只有第 $n + \alpha(m-1) + \beta(k-1)$ 列的元素为1, 其余元素全为0, 因此 \mathbf{E} 是列正交矩阵。式(14)说明 Θ 中 $\mathbf{s}(f_s, f_d)$ 均可由矩阵 \mathbf{E} 的 $N + \alpha(M-1) + \beta(K-1)$ 个正交列向量线性组合而成, 因此 \mathbf{E} 的列空间就是杂波子空间, 且杂波自由度为

$$r = N + \alpha(M-1) + \beta(K-1) \quad (15)$$

此结论与文献[4]中式(20)的结果一致。进一步将 \mathbf{E} 矩阵的列向量进行归一化得到矩阵 \mathbf{E}_c , 即得到了杂波子空间的一组标准正交基。则有

$$\mathbf{E}_c = (e_0 \ e_1 \ \dots \ e_{r-1}) \quad (16)$$

所以由式(7)可以求得最优权向量为

$$\mathbf{W} = \frac{(\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{E}_c \mathbf{E}_c^H)^{-1} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^H (\mathbf{R}_{XX} + \mathbf{E}_c \mathbf{E}_c^H)^{-1} \mathbf{s}} \quad (17)$$

利用PSWF估计杂波子空间的方法需要进行特征值分解, 可以通过MATLAB中的dpsss函数实现, 而本文方法相较于利用PSWF估计杂波子空间的方法, 避免了特征值分解, 只需要进行简单的矩阵变换, 所以使运算更加简单, 计算量更小。

5 仿真实验

仿真参数设置为: 载机速度 $v_a = 150$ m/s, 高度 $h = 9$ km, 波长 $\lambda = 0.3$ m, 脉冲数 $K = 32$, 脉冲周期 $T = 5 \times 10^{-4}$ s, 发射阵元数为 $M = 4$, 阵元间距为 $d_T = 1.2$ m, 接收阵元数为 $N = 8$, 阵元间距为 $d_R = \lambda/2 = 0.15$ m, 单元杂噪比CNR为60 dB。仿真模拟中假设检测方向始终为载机正侧视方向, 即归一化空间频率为0。实验所用计算机配置为: CPU为Core-i5, 主频2.4 GHz, 运行内存4 GB。

5.1 运算时间

在通过PSWF构造约束矩阵时, PSWF的求解较繁琐, 一般要通过特征值分解来计算, 运算量较大, 而本文方法则十分简便。图2给出了两种方法运行时间的对比, 可以看出, 本文方法的运行时间仅为原方法的1/10, 说明本文方法确实计算量更小。

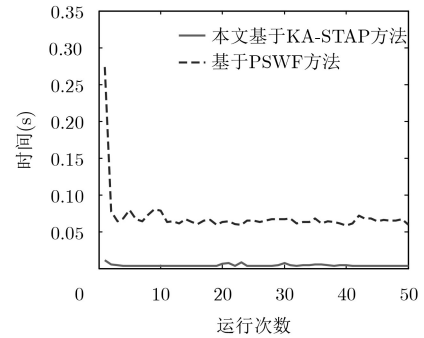


图2 运算时间

5.2 自适应空域方向图

仿真中根据杂波散射方向确定归一化多普勒频率为0.25。也就是说为了抑制杂波, 空域方向图需要在此处形成零陷, 零陷深度的需求与杂波强度有关, 杂波越强, 则要求零陷越深, 从而更好地抵消杂波。图3给出了两种方法的自适应空域方向图, 其中期望信号的归一化多普勒频率为0.25, 可见两种方法均可以自适应的在杂波处形成方向图零陷, 且零陷比较深, 但是本文方法的零陷更深, 能达到-163.2 dB, 比原方法提高约10 dB, 且旁瓣更低, 比原方法低了约20 dB。进一步从应用指标分析, 对于雷达检测系统来说, 副瓣降低、零陷深度增加

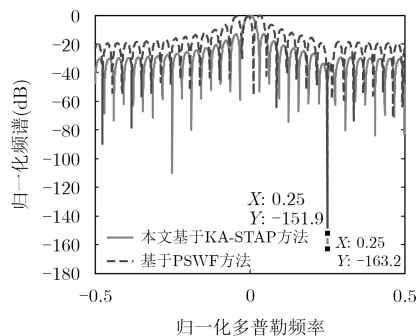


图3 自适应空域方向图

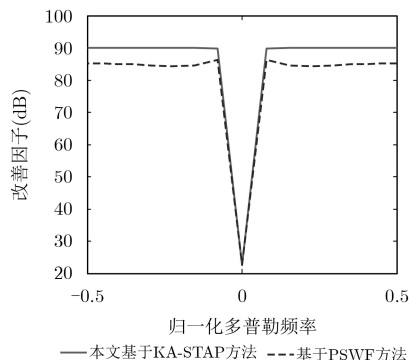


图4 改善因子曲线

带来的效益则是可以更好地抑制杂波，从而提高信噪比，进而提高目标检测概率。

5.3 改善因子曲线

STAP处理器的性能通常用改善因子(IF)来衡量，其定义为处理器输出端与输入端信号杂波噪声比(SCNR)之比。图4给出了两种方法的IF对比图，可见本文方法性能更好，提高了约5 dB。

5.4 稳健性分析

5.4.1 幅相误差的影响

通过以上对比分析可以看出，在理想情况下，本文基于KA-STAP方法要优于基于PSWF的原方法。为了分析算法的稳健性，本文在不同幅相误差的情况下对两种方法的改善因子曲线进行了对比。图5分别给出了在幅相扰动误差为-50 dB, -40 dB, -30 dB, -20 dB情况下两种方法改善因子曲线的对

比结果。通过对比可以发现不同幅相误差的影响下，本文方法均要优于原方法，这说明了本算法对幅相误差有较好的稳健性。

5.4.2 杂波起伏的影响

本文主要讨论杂波子空间约束下的KA-STAP算法，通过以上分析可知，在理想情况下，本文基于KA-STAP方法取得了比原方法更好的效果，说明先验杂波知识可以较好地匹配杂波。当存在杂波内部起伏时，实际上代表了一定程度的知识不匹配，本文方法的性能会有一定程度的下降。这是因为在无杂波起伏时杂波能量全部落在构造的正交基中，有杂波起伏时，杂波内部起伏造成了杂波子空间的扩大，杂波能量只有部分落在正交基中，因而只能抑制一部分杂波，从而造成性能的下降。

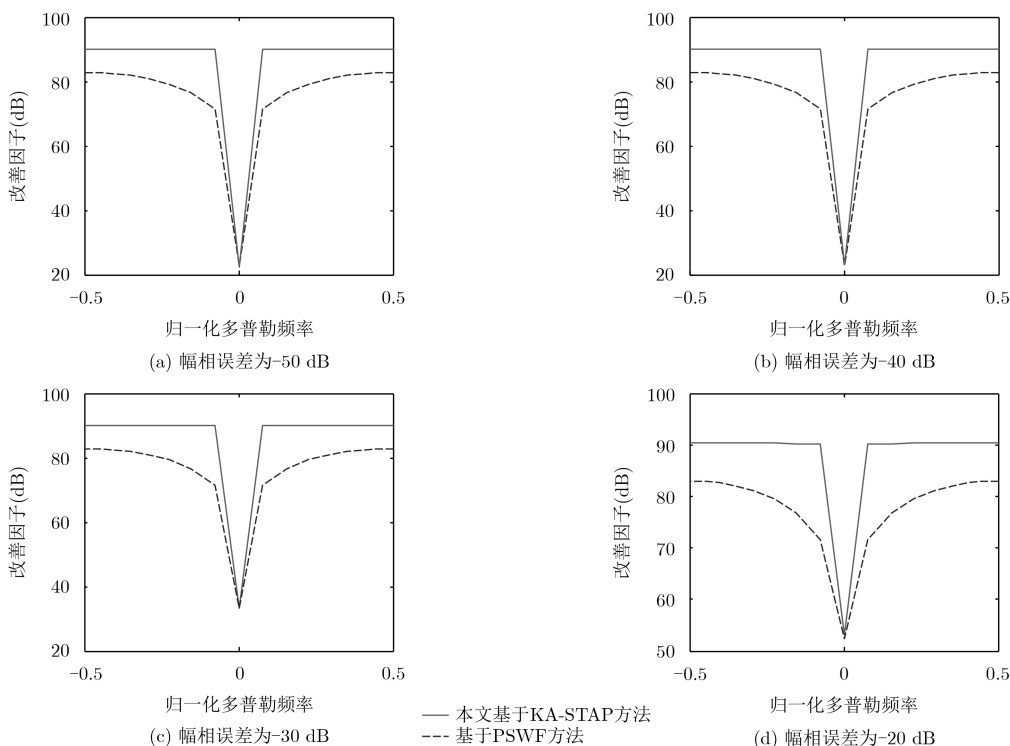


图5 幅相误差的影响

为了进一步分析算法的性能,本文对不同杂波起伏情况下算法的表现进行了仿真分析。图6分别给出了本文方法和原方法在不同杂波起伏情况下的改善因子曲线。Br表示杂波的相对带宽,用于衡量

杂波起伏造成的杂波脊的展宽程度。可以发现随着杂波起伏程度的增加,两种方法的性能都会有一定程度的下降,但本文方法均优于原方法,这说明了本算法对杂波起伏有较好的稳健性。

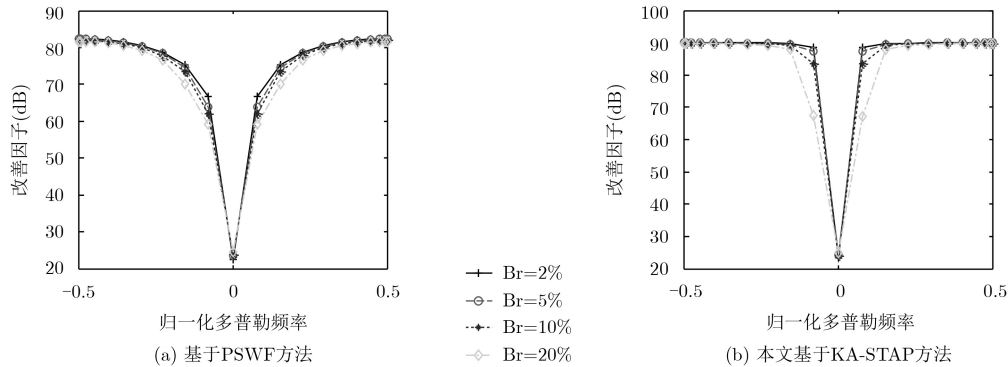


图6 杂波起伏的影响

通过以上对比分析可以看出,本文方法不仅减小了计算量,而且对旁瓣性能以及改善因子性能都有所改善,同时对幅相误差和杂波起伏都有较好的稳健性。

6 结束语

在理想模型条件下,MIMO雷达杂波的空时2维分布轨迹是先验已知的,即可以离线构造杂波子空间,基于这一思想,本文针对知识辅助的STAP算法构造知识约束矩阵部分,提出了一种利用MIMO雷达杂波先验分布构造杂波子空间的改进的基于知识辅助的空时自适应信号处理(KA-STAP)方法。仿真结果表明,通过杂波先验分布知识构造约束矩阵的KA-STAP方法相比于基于PSWF构造约束矩阵,计算量更小,且在目标杂波处具有更深的零陷及更低的旁瓣。虽然在幅相误差和杂波起伏的影响下,本文方法的性能有一定程度的下降,但是均比原方法表现得更好,这说明了本文方法的稳健性。本文的后续工作将围绕如何快速估计与实际样本较为接近的杂波子空间作为知识约束矩阵这一问题继续展开。

参考文献

- [1] BRENNAN L E and REED I S. Theory of adaptive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(2): 237–252. doi: [10.1109/TAES.1973.309792](https://doi.org/10.1109/TAES.1973.309792).
- [2] WEN Cai, PENG Jinye, ZHOU Yan, *et al.* Enhanced three-dimensional joint domain localized STAP for airborne FDA-MIMO radar under dense false-target jamming scenario[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(10): 4154–4166. doi: [10.1109/JSEN.2018.2820905](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2820905).
- [3] MECCA V F, RAMAKRISHNAN D, and KROLIK J L. MIMO radar space-time adaptive processing for multipath clutter mitigation[C]. *Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Signal Processing*, Waltham, USA, 2006: 249–253. doi: [10.1109/SAM.2006.1706131](https://doi.org/10.1109/SAM.2006.1706131).
- [4] WANG Ting, ZHAO Yongjun, HUANG Jie, *et al.* A reduced-rank STAP algorithm for simultaneous clutter plus jamming suppression in airborne MIMO radar[C]. *2017 18th International Radar Symposium (IRS)*, Prague, The Czech Republic, 2017: 1–10. doi: [10.23919/IRS.2017.8008095](https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008095).
- [5] FENG Weike, ZHANG Yongshun, and HE Xingyu. Clutter rank estimation for reduce-dimension space-time adaptive processing MIMO radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(2): 238–239. doi: [10.1109/JSEN.2016.2632308](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2632308).
- [6] REED I S, MALLETT J D, and BRENNAN L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, 10(6): 853–863. doi: [10.1109/TAES.1974.307893](https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307893).
- [7] CHEN Cheng, HE Junjie, YUAN Zeshi, *et al.* Robust STAP for MIMO radar based on direct data domain approach[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017: 1–9. doi: [10.1155/2017/6967130](https://doi.org/10.1155/2017/6967130).
- [8] BRIGUI F, BOIZARD M, GINOLHAC G, *et al.* New low-rank filters for MIMO-STAP based on an orthogonal tensorial decomposition[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1208–1220. doi: [10.1109/TAES.2017.2776679](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2776679).
- [9] 王珽, 赵拥军, 赵闯. 基于发射波束域-三迭代的机载MIMO雷达STAP方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(5): 1034–1040. doi: [10.11999/JEIT150741](https://doi.org/10.11999/JEIT150741).

WANG Ting, ZHAO Yongjun, and ZHAO Chuang.

- Airborne MIMO radar STAP method based on transmit beamspace-tri-iterative algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(5): 1034–1040. doi: [10.11999/JEIT150741](https://doi.org/10.11999/JEIT150741).
- [10] GERLACH K and PICCIOLO M L. Airborne/spacebased radar STAP using a structured covariance matrix[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(1): 269–281. doi: [10.1109/TAES.2003.1188909](https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1188909).
- [11] GUERCI J R, GOLDSTEIN J S, and REED I S. Optimal and adaptive reduced-rank STAP[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 647–661. doi: [10.1109/7.845255](https://doi.org/10.1109/7.845255).
- [12] CHEN Chunyang, and VAIDYANATHAN P P. MIMO radar space-time adaptive processing using prolate spheroidal wave functions[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(2): 623–635. doi: [10.1109/TSP.2007.907917](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.907917).
- [13] 翟伟伟, 张弓, 刘文波. 基于杂波子空间估计的MIMO雷达降维STAP研究[J]. *航空学报*, 2010, 31(9): 1824–1831.
ZHAI Weiwei, ZHANG Gong, and LIU Wenbo. Study of reduced-rank STAP based on estimation of clutter subspace for MIMO radar[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(9): 1824–1831.
- [14] BEFGIN J S, TEIXEIRA C M, TECHAU P M, *et al.* Improved clutter mitigation performance using knowledge-aided space-time adaptive processing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 487–494. doi: [10.1109/TAES.2006.248194](https://doi.org/10.1109/TAES.2006.248194).
- [15] STOICA P, LI Jian, XU Min, *et al.* On using a priori knowledge in space-time adaptive processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6): 437–444. doi: [10.1109/TSP.2007.914347](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.914347).
- [16] 陆达, 张弓. 知识辅助的机载MIMO雷达降秩STAP算法[J]. *数据采集与处理*, 2012, 27(4): 429–435. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2012.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2012.04.006).
LU Da and ZHANG Gong. Knowledge-aided reduced-rank STAP algorithm for airborne MIMO radar[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2012, 27(4): 429–435. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2012.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2012.04.006).
- [17] 吕晖, 冯大政, 和洁, 等. 一种简化的机载MIMO雷达杂波特征相消器[J]. *航空学报*, 2011, 32(5): 866–872.
LÜ Hui, FENG Dazheng, HE Jie, *et al.* A simplified eigencanceler for airborne MIMO radar clutter suppression[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(5): 866–872.
- 侯 静: 女, 1984年生, 讲师, 主要研究方向为雷达信号处理、信息融合等.
- 胡孟凯: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理、智能信息处理等.
- 王子微: 女, 1993年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、自适应信号处理等.