

机载 MIMO 雷达杂波特征结构的空时自回归算法

赵 军^{1,2} 沈明威³ 朱岱寅¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016;

2. 空军第一航空学院, 河南信阳 464000; 3. 河海大学计算机与信息学院, 江苏南京 211000)

摘 要: 非均匀环境下, 机载 MIMO 雷达杂波不再满足独立同分布 (independently identically distributed, IID) 条件, 由于没有足够多的 IID 样本来估计杂波协方差矩阵, 从而导致传统的 STAP 方法性能急剧下降。本文研究了非均匀环境下机载 MIMO 雷达的杂波抑制问题, 将空时自回归算法 (Space time autoaggressive, STAR) 引入机载 MIMO 雷达, 降低训练样本数目, 减小运算量。针对 STAR 算法中参数确定复杂、易受训练样本数目不足影响的缺点, 提出了一种基于杂波特征结构的模型参数确定方法, 仿真结果表明, 该方法能在极小训练样本条件下, 有效确定模型参数, 实现杂波抑制, 适用于非均匀杂波环境。

关键词: 多输入多输出雷达; 空时自回归; 杂波抑制; 空时自适应处理

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)04-0393-06

Space Time Autoaggressive Method Based on Clutter Eigenstructure for Airborne MIMO Radar

ZHAO Jun^{1,2} SHEN Ming-wei³ ZHU Dai-yin¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China; 2. The First Aeronautical Institute of Air Force, Xinyang, Henan, 464000, China;

3. College of Computer & Information, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211000, China)

Abstract: The clutter distribution of an airborne multiple input and multiple output (MIMO) radar in non-homogeneous environment varies with ranges and samples in different range gates are not independently identically distributed vectors, so that the statistical space time adaptive processing (STAP) methods degrade heavily. A clutter suppression method for airborne MIMO radar in non-homogeneous environments is studied in this paper. Firstly, Space time autoaggressive (STAR) method is introduced to airborne MIMO radar for clutter suppression and then an AR model parameters estimation method for STAR is proposed to decrease the complexity of traditional method. Simulation results show the proposed method can estimate parameters exactly and rapidly with only few training samples and be fit for clutter suppression in non-homogeneous environments.

Key words: multiple input multiple output radar; space time autoaggressive; clutter suppression; space time adaptive processing

1 引言

机载雷达所面临的真实杂波环境往往是非均

匀的, 各距离单元的杂波不再满足独立同分布 (IID) 条件, 而传统的统计型 STAP 算法需要足够多 IID 样本估计协方差矩阵, 因此, 近年来对于非均匀

条件下样本数不足的问题提出了很多解决办法,典型的非统计型 STAP 方法主要包括:(1)直接数据域(DDD)算法^[1-2]; (2)结构化 STAP 方法^[3]; (3)参数化 STAP 方法^[4-7]。由于参数化的方法能在极少样本条件下获得良好的杂波抑制性能,与传统的 STAP 方法相比,参数化 STAP 方法更适合非均匀杂波环境,其主要代表有:参数化自适应匹配滤波(PAMF)法^[4]、空时自回归(STAR)法^[5-6]和协方差逆矩阵预测(PICM)法^[7]。PAMF 法假定杂波的空时分布服从 AR 模型,通过构造合理的空时滤波器,实现对杂波和干扰的抑制;STAR 法在 PAMF 法的基础上进行了改进,降低了模型的空域阶数,增加了匹配杂波子空间的自由度,对杂波的白化更彻底,对杂波抑制性能也有一定改善,但由于需要估计模型的二维参数,其参数估计的难度比 PAMF 法大得多。

MIMO 雷达^[8-10]是近年来国内外研究的热点,它利用多个发射天线同时辐射相互正交的信号,并在接收端对不同天线发射的信号进行分离,MIMO 雷达大体可分为两类:分布式 MIMO 雷达和密集式 MIMO 雷达。分布式 MIMO 雷达阵元间距较大,利用宽布的发射或接收天线实现空间分集,从而有效克服目标的 RCS 闪烁,提高雷达的检测及测角性能;密集式 MIMO 雷达阵元间距很小,利用波形分集扩展阵列孔径,不仅可以获得更高的角度分辨率,而且具有更多的自由度,能增强雷达杂波抑制能力。由于密集式 MIMO 雷达阵元间距较小,在相干处理间隔内得到的回波信号是相干的,同一个动目标的多普勒频率也是固定不变的,因此可以进行 STAP 处理。

本文将 STAR 算法引入到机载 MIMO 雷达的杂波抑制问题,针对 STAR 算法中参数估计运算复杂,受训练样本数目影响较大的不足,提出一种基于杂波自由度的参数估计方法,与原有方法相比,该算法能准确、快速地确定 MIMO-STAR 法中的模型参数,且计算过程与训练样本数目无关,适用于非均匀杂波环境。

2 机载 MIMO 雷达的杂波特性

2.1 信号模型

机载 MIMO 雷达阵列几何结构如图 1 所示,载机以速度 v 沿 Y 轴正方向飞行,发射天线和接收天线都为均匀线性阵列且第一个阵元重合,发射阵元

和接收阵元数目分别为 M 和 N , d_T 和 d_R 分别表示发射阵元间距和接收阵元间距,且 $d_R = \frac{\lambda}{2}$, λ 为雷达工作波长, M 个发射阵元同时发射相互正交的窄带信号,每个相干处理间隔内发射 K 个脉冲,脉冲重复频率为 f_r 。

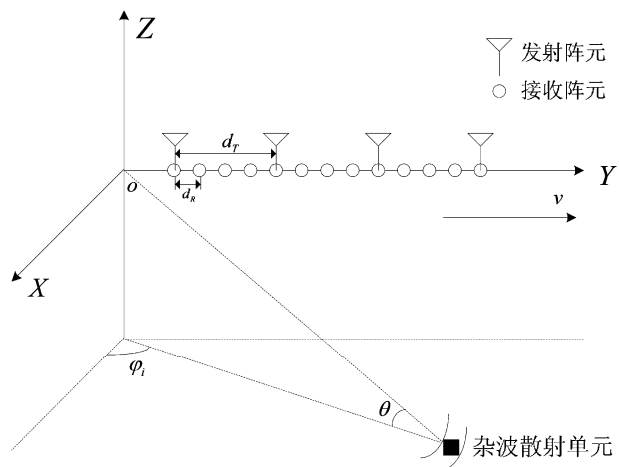


图1 机载 MIMO 雷达与杂波散射体几何关系图

Fig.1 Geometry of airborne MIMO radar and clutter scatterer

雷达的回波信号一般由目标信号 S 、杂波 C 、干扰 J 和噪声 n 等组成,给定某个距离单元,第 i 个杂波散射单元,第 n 个接收阵元的第 m 个匹配滤波器输出的第 k 个脉冲的采样数据为^[8]

$$x_i(m, n, k) = \sum_{i=1}^{N_c} A_i e^{j2\pi \left(m \frac{d_T}{\lambda} \cos \psi_i + n \frac{d_R}{\lambda} \cos \psi_i + k \frac{2v}{\lambda f_r} \cos \psi_i \right)} + n(m, n, k) \\ = \sum_{i=1}^{N_c} A_i e^{j2\pi \left(\left(n + m \frac{d_T}{d_R} \right) f_{s,i} + k f_{d,i} \right)} + n(m, n, k) \quad (1)$$

$m=0, 1, \dots, M-1, n=0, 1, \dots, N-1, k=0, 1, \dots, K-1, i=1, 2, \dots, N_c$, A_i 表示该杂波散射单元的幅值, N_c 为该距离单元内杂波散射单元的总数, $n(m, n, k)$ 为匹配滤波后的高斯噪声,其功率为 σ_n^2 。

式中

$$\begin{cases} f_{s,i} = \frac{d_R}{\lambda} \cos \psi_i \\ f_{d,i} = \frac{2v}{\lambda f_r} \cos \psi_i \end{cases} \quad (2)$$

分别表示第 i 个杂波散射单元归一化的空间频率和多普勒频率, $\cos \psi_i = \cos \theta \cos \varphi_i$, θ 和 φ_i 分别表示第 i 个杂波散射单元的仰俯角和方位角, ψ_i 为对应空间锥角。

当发射阵元间距等于接收阵元间距的 N 倍时, $d_T/d_R=N$, 令 $l=n+mN$, 上式可以化为

$$x(m, n, k) = \sum_{i=1}^{N_c} A_i e^{j2\pi(lf_{s,i} + kf_{d,i})} + n(m, n, k) \quad (3)$$

$l=0, 1, \dots, MN-1$ 。

由(3)式可知, 匹配滤波后的信号等价于阵元数为 MN , 间距为 $d = \frac{\lambda}{2}$ 的均匀线阵所接收的空时二维信号, 即由 M 个发射阵元, N 个接收阵元虚拟出了具有 MN 个等效阵元的均匀线阵, 使系统具有更多的自由度来对付杂波和干扰, 增加了机载雷达的杂波抑制能力, 图2给出了当 $M=5, N=6, K=8$ 时, 不同阵元间距条件下杂波特征谱比较, 式中 $\gamma = d_T/d_R$ 表示发射阵元间距与接收阵元间距之比。

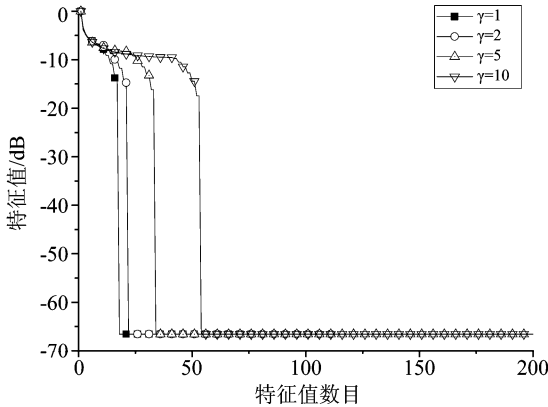


图2 不同阵元间距比的杂波特征谱

Fig. 2 Eigenspectrum comparison of airborne MIMO radar with different transmit/receive elements space ratio

由图2可以看出, 收发阵元间距比不同, 杂波特征谱不同, 文献[10]指出, MIMO 雷达的杂波自由度满足公式 $\rho = N + \gamma(M-1) + \beta(K-1)$, 其中 $\beta = \frac{2\nu}{d_r f_r}$ 。

3 基于参数估计的 MIMO-STAR 算法

3.1 MIMO-STAR 算法

机载 MIMO 雷达信号模型如 2.1 节, 对于第 k 个脉冲, N 个阵元 M 个匹配滤波器输出的杂波和干扰表示为一 $MN \times 1$ 维矢量

$$\mathbf{X}_i(k) = [x(1, k) \quad x(2, k) \quad \dots \quad x(MN, k)]^T \quad (4)$$

其中 $i = -L, \dots, -1, 1, \dots, L$, 表示第 i 个距离单元。

假定一次空时快拍数据服从时域阶数为 P , 空

域阶数为 Q 的矢量空时自回归模型, 即满足方程

$$\sum_{p=0}^{P-1} \mathbf{H}_p \mathbf{X}_i(t+p) = \mathbf{0} \quad (5)$$

$t=0, 1, \dots, K-P+1$, 式中 $\mathbf{H}_i$ 为 $Q \times MN$ 阶空时自回归系数矩阵。

记

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_0 \quad \mathbf{H}_1 \quad \dots \quad \mathbf{H}_{P-1}] \quad (6)$$

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i(1) & \dots & \mathbf{X}_i(K-P+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{X}_i(P) & \dots & \mathbf{X}_i(K) \end{bmatrix} \quad (7)$$

则(5)式可以写成

$$\mathbf{H} \mathbf{e}_i = \mathbf{0} \quad (8)$$

对于所有 N_s 个训练样本, 记样本矩阵 $\mathbf{E} = [\mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \dots \quad \mathbf{e}_{N_s}]$, 根据(8)式, $\mathbf{E}$ 满足方程

$$\mathbf{H} \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (9)$$

$\mathbf{H}$ 可以由矩阵 $\mathbf{E}$ 的零空间确定, 且 $\mathbf{H}$ 等于样本矩阵 $\mathbf{E}$ 的 Q 个小奇异值对应的左奇异矢量^[4]。

$\mathbf{H}$ 求出后, 可以用 $\mathbf{H}_0, \mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_{P-1}$ 构造矩阵白化滤波器

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 & \dots & \mathbf{H}_{P-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_0 & \dots & \mathbf{H}_{P-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{h}$ 是一 $(K-P+1)Q \times MNK$ 维矩阵, 满足方程

$$\mathbf{h} \mathbf{X}_i = \mathbf{0} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{X}_i = [\mathbf{X}_i^T(1) \quad \mathbf{X}_i^T(2) \quad \dots \quad \mathbf{X}_i^T(K)]^T$

基于正交投影理论下 STAR 算法的空时自适应权矢量

$$\mathbf{W}_{\text{STAR}} = \mathbf{h}^H (\mathbf{h} \mathbf{h}^H)^{-1} \mathbf{h} \mathbf{S} \quad (12)$$

3.2 基于参数估计的 MIMO-STAR 算法

AR 模型的难点在于模型阶数的选取, 这一点在 MIMO-STAR 算法中表现的尤为突出, 因为这里不仅要确定空域阶数 Q , 而且要确定时域阶数 P , 现有的方法根据 Akaike 信息论 (AIC) 准则^[11] 或者最小描述长度 (MDL)^[12] 准则来确定模型阶数, 但这两种方法存在以下缺点: (1) 计算复杂, 运算量巨大。用 AIC 准则或 MDL 准则确定参数的方法需要经过多次矩阵运算来估计模型参数, 运算量巨大, 难以满足机载雷达实时处理的要求。(2) 模型参数估计受训练样本数目影响。传统方法估计模型参数需要的 IID 样本数目众多, 在实际杂波环境中难

以实现,当训练样本数目不足时,得到的模型参数往往不准确。为此,我们提出一种基于杂波特征结构的 MIMO-STAR 模型参数估计方法。

根据自适应滤波理论,在 MIMO-STAR 算法中空时自适应最优处理器由白化滤波器和匹配滤波级联而成,其中参数 Q 和 P 分别决定着白化滤波器的空域和时域维数,为实现对杂波的有效抑制,用于抵消杂波的向量空间必须是完备的,如果维数偏小将导致向量空间不完备,无法充分抑制杂波和干扰,如果维数偏大,则可能导致杂波和干扰被过度抑制,损失部分信号信息^[13],因此,为实现对杂波的有效抑制,在 AR 模型中,矢量滤波器系数矩阵的维数应等于系统维数减去杂波自由度。

根据该理论,对照公式(11), $\mathbf{X}_i$ 是由 K 个连续脉冲构成的杂波子空间,为对其有效抑制,其系数滤波器的维数应满足

$$(K-P+1)Q = MNK - \rho \quad (13)$$

其中

$$\rho = N + \gamma(M-1) + \beta(K-1) \quad (14)$$

根据子空间理论,满足式(13)的一组参数 P 和 Q 所构成的矢量滤波器,可以充分抑制杂波,且目标信号损失最小, P 和 Q 的最优值不唯一。求 P 和 Q 全部最优解是一个带约束条件的优化问题^[11-12],求解过程较为复杂,在实际系统中也不需要,只需找到一组最优解即可。

与式(13)和(14)类似,公式(8)中 $\mathbf{e}_i$ 的列向量表示 P 个连续脉冲所构成的子空间,为充分抑制杂波,其滤波器系数矩阵的维数应满足

$$Q = MNP - \rho_p \quad (15)$$

其中 ρ_p 表示 MN 个阵元对应的 P 个连续脉冲子空间的杂波自由度,其中

$$\rho_p = N + \gamma(M-1) + \beta(P-1) \quad (16)$$

由于方程(13)和(15)都包含有未知参数 P 和 Q ,将它们联立,得到一个关于参数 P 和 Q 二元一次方程组

$$\begin{cases} Q = MNP - \rho_p \\ (K-P+1)Q = MNK - \rho \end{cases} \quad (17)$$

解此方程组,即可得到滤波器参数 P 和 Q ,由于方程组(17)只是一个标量的二元一次方程组,解方程不需要复杂的矩阵运算,从而大大简化了求解过程,减少了运算量。

4 仿真研究

本文以正侧视条件下均匀线性阵列天线机载 MIMO 雷达为研究对象,主要仿真参数如下:发射阵元数 $M=5$,接收阵元数 $N=6$,相干处理脉冲数 $K=8$,载机高度 $H=8000\text{m}$,载机飞行速度 $v=130\text{m/s}$,雷达工作波长 $\lambda=0.23\text{m}$,脉冲重复频率 $f_r=2260\text{Hz}$,接收阵元间距 $d_R=\lambda/2$,发射阵元间距 $d_T=Nd_R$,杂噪比 $\text{CNR}=50\text{dB}$ 。

仿真1 估计参数的正确性分析

根据公式 $\rho = N + \gamma(M-1) + \beta(K-1)$ 计算出杂波自由度 $\rho=37$,将仿真参数和 $\rho=37$ 代入方程组(17),可以解得 $P=2, Q=29$ 。

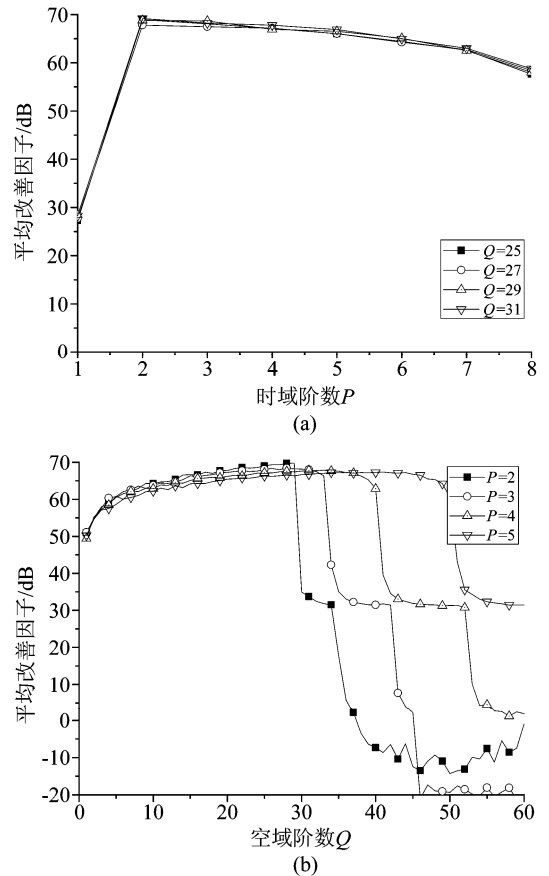


图3 MIMO-STAR 算法平均改善因子与滤波器参数关系图

Fig. 3 Average improve factor of MIMO-STAR as a function of filter parameters

取训练样本数 $N_s=20$,图3(a)为参数 Q 取不同值时,平均改善因子与时域阶数 P 的关系图;图3(b)为参数 P 取不同值时,平均改善因子与空域阶数 Q 的关系图。由图3(a)可以看出,当参数 Q 固

定时,当 $P=2$ 时平均改善因子取得最大值,由图 3(b)可以看出,当参数 P 固定时,当 $Q=29$ 时平均改善因子取得最大值。因此,滤波参数 P 和 Q 的真实值应为 2 和 29,由此可见,本文提出方法得到估计值与参数的真实值完全相同。

仿真 2 估计参数与训练样本数目关系分析

由于方程组(18)中不包含有训练样本数目 N_s ,因此,由此估计出的模型参数与训练样本数无关。仿真 2 研究模型参数与训练样本数目之间的关系,分别考察样本数 $N_s=10$ 、 $N_s=20$ 、 $N_s=100$ 和 $N_s=200$ 四种情况。

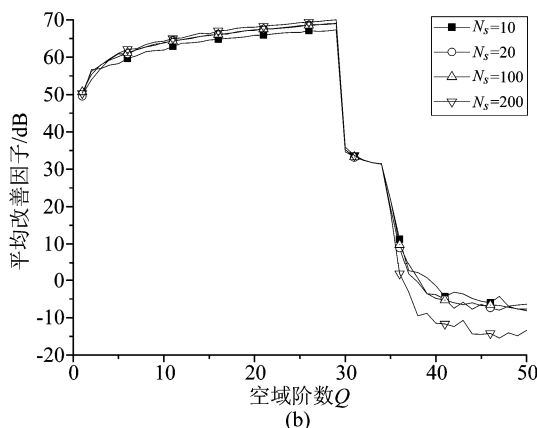
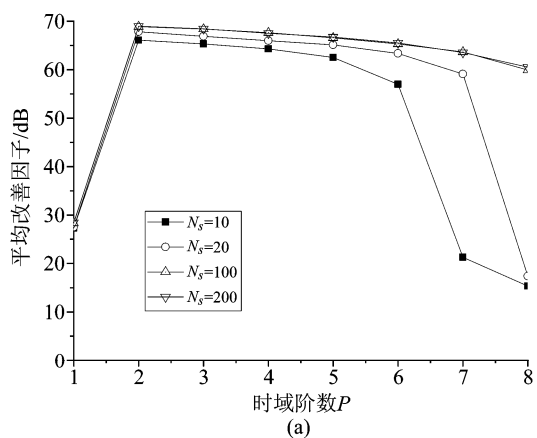


图 4 不同训练样本条件下平均改善因子与滤波器参数关系图
Fig. 4 Average improve factor of MIMO-STAR as a function of filter parameters under different training samples

图 4(a)为固定 $Q=29$ 时,四种不同训练样本数目条件下平均改善因子与参数 P 的关系图;图 4(b)为固定 $P=2$ 时,不同训练样本数目条件下平均改善因子与参数 Q 的关系图。由图 4(a)可以看出,无论训练样本数取值多少,均是当 $P=2$ 时平均改善因子取得最大值,同样,由图 4(b)看出,无论训练样本数

取何值,均是 $Q=29$ 时平均改善因子取得最大值,即说明模型参数与训练样本数目无关,这与解方程组得到的参数与训练样本数无关的结论相符。并且当训练样本数目 $N_s \geq 20$ 时,无论固定 $P=2$ 还是固定 $Q=29$ 条件下,随着训练样本数目的增加,平均改善因子基本保持不变,这说明 MIMO-STAR 算法可以在极小的训练样本条件下获得良好的杂波抑制性能,从而避免了严重非均匀条件下训练样本数目不足对参数估计的影响,使本文提出的方法适用于非均匀杂波环境。

仿真 3 参数估计 MIMO-STAR 算法杂波抑制性能研究

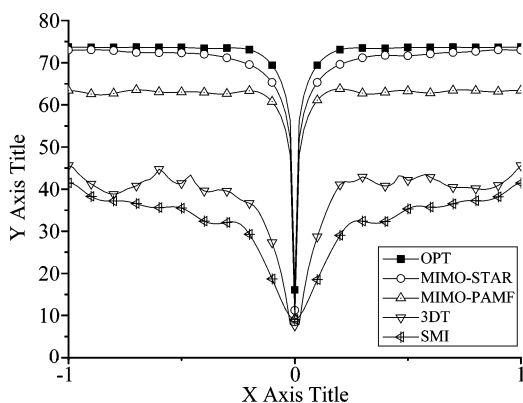


图 5 机载 MIMO 雷达参数化 STAP 方法改善因子比较图
Fig. 5 Improve factor comparison of parameter STAR methods for airborne MIMO radar

为对本文提出的参数估计 MIMO-STAR 算法的杂波抑制性能进行研究,图 5 给出了训练样本数 $N_s=20$ 条件下, MIMO-STAR 法、MIMO-PAMF 法、3DT 法和统计型的 SMI (Sample Matrix Inversion) 法的改善因子比较图。由图 5 可以看出,在极少训练样本条件下, MIMO-STAR 法有良好的杂波抑制性能,改善因子与最优处理器平均仅相差约 1.96dB,平均好于 MIMO-PAMF 法约 8.14dB,而统计型的 3DT 法和 SMI 法由于没有足够多的训练样本来估计协方差矩阵,因而性能很差。

5 结论

本文将 STAR 算法引入到机载 MIMO 雷达的杂波抑制问题,减小对 IID 样本的需要,降低运算量。针对其模型参数估计运算复杂,受训练样本数目影响较大的不足,提出一种基于代数方程的模型参数

估计方法,仿真结果表明,该算法在保持良好的杂波抑制性能前提下,可以准确、快速地确定 MIMO-STAR 法中的模型参数,且计算过程与训练样本数目无关,适用于非均匀杂波环境。

参考文献

- [1] Wang H, Sarkar T K, Park S. A deterministic least-squares approach to space-time adaptive processing [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49 (1): 91-103.
- [2] 杨志伟,贺顺,廖桂生,等. 任意线阵的直接数据域空时自适应处理方法[J]. 电子学报, 2011, 39 (12): 2900-2904.
Yang Zhiwei, He Shun, Liao Guisheng, et al. Direct data domain approach with space-time adaptive processing for arbitrary linear array [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(12): 2900-2904. (in Chinese)
- [3] Shackelford A K, Gerlach Karl, Blunt S D. Partially adaptive STAP using the FRACTA algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45 (1): 58-69.
- [4] Roman J R, Rangaswamy M, Davis D W, et al. Parametric adaptive matched filter for airborne radar applications [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 677-692.
- [5] Parker P, Swindlehurst A. Space-time autoregressive filtering for matched subspace STAP [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(2): 510-520.
- [6] 沈明威,朱岱寅,朱兆达. 一种抗干扰目标的 STAR 算法[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 570-574.
Shen Mingwei, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. An outlier resistant space time autoregressive algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 570-574. (in Chinese)
- [7] Lim C H, Mulgrew B. Prediction of inverse covariance matrix (PICM) sequences for STAP [J]. IEEE Signal Process Letters, 2006, 13(4): 236-239.
- [8] 李彩彩,廖桂生,朱圣棋,等. 一种抑制严重非均匀杂波的机载 MIMO-STAP 方法 [J]. 电子学报, 2011, 39 (3): 511-517.
Li Caicai, Liao Guisheng, Zhu Shengqi, et al. An airborne MIMO-STAP method for severely Non-homogeneous clutter suppression [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 511-517. (in Chinese)
- [9] 晁淑媛,陈伯孝,戴奉周. 非均匀杂波 MIMO 雷达检测 [J]. 电子学报, 2011, 39(3): 626-631.

Chao Shuyuan, Chen Baixiao, Dai Fengzhou. MIMO radar detection in nonhomogeneous clutter [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 626-631. (in Chinese)

- [10] 张西川,谢文冲,张永顺,等. 任意波形相关性的机载 MIMO 雷达杂波建模与分析 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 646-651.
Zhang Xichuan, Xie Wenchong, Zhang Yongshun, et al. Modeling and Analysis of the Clutter on Airborne MIMO Radar with Arbitrary Waveform Correlation [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3): 646-651. (in Chinese)
- [11] Scharf L L, Friedlander B. Matched subspace detectors [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1994, 42 (8): 2146-2157.
- [12] Aksasse B, Radouane L. Two-dimensional autoregressive (2-D AR) model order estimation [J]. IEEE Transaction on Signal Process, 1999, 47(7): 2072-2077.
- [13] 段克清,谢文冲,高飞,等. 基于杂波自由度的 STAR 模型参数估计方法 [J]. 信号处理, 2009, 25 (11): 1715-1718.
Duan Keqing, Xie Wenchong, Gao Fei, et al. Parameters Estimation Method for STAR Model Based on Clutter Degree of Freedom [J]. Signal Processing, 2009, 25 (11): 1715-1718. (in Chinese)

作者简介



赵 军 男, 1974 年生, 河南新蔡人, 2009 年在南京航空航天大学获博士学位, 现于南京航空航天大学从事博士后研究, 主要研究方向为空时自适应信号处理和阵列信号处理。

E-mail: happyzj112@163.com



沈明威 男, 1981 年生, 江苏省苏州人。2003 年和 2008 年分别在南京航空航天大学获工学学士和工学博士学位。现为河海大学副教授, 主要从事空时自适应处理和 SAR/GMTI 的研究工作。

E-mail: smw_nuaa@hotmail.com



朱岱寅 男, 1974 年生, 江苏省无锡市人, 1996 年本科毕业于东南大学无线电工程系, 分别于 1998 年和 2002 年在南京航空航天大学电子工程系获硕士和博士学位, 现为南京航空航天大学电子工程系教授、博士生导师, IEEE 会员, 主要从事雷达成像和信号处理方面的研究。

E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn