

任意线阵的直接数据域空时自适应处理方法

杨志伟¹, 贺 顺^{1,2}, 廖桂生¹, 欧阳缮³

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 西安科技大学通信与信息工程学院, 陕西西安 710054;
3. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西桂林 541004)

摘 要: 研究机载预警雷达在前视任意线阵构形下的地杂波和干扰抑制问题. 在采用迭代法获得单个距离门回波数据的空时二维谱基础上, 结合图像特征分析提取杂波和干扰分布特性曲线, 通过将待检测单元数据向重构的杂波和干扰子空间正交投影检测动目标. 能避免直接数据域方法存在的空时孔径损失和克服传统统计空时自适应处理 (STAP) 方法在非平稳环境性能下降问题, 仿真结果表明本文方法具有良好的动目标检测性能.

关键词: 机载预警雷达; 地面运动目标检测; 空时自适应处理; 非平稳杂波抑制

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2900-05

Direct Data Domain Approach with Space-Time Adaptive Processing for Arbitrary Linear Array

YANG Zhi-wei¹, HE Shun^{1,2}, LIAO Gui-sheng¹, OUYANG Shan³

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;
2. Communication and Information Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
3. Information and Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: This paper describes a new non-homogeneous clutter and interference mitigation method for forward-looking airborne early warning radar with arbitrary linear array configuration. The approach is performed in three stages, i. e. the minimal mean square space-time spectral estimation with iterative processing which using only a single range bin data, the clutter and jammer ridge reconstruction based on image feature extraction, moving target detection with subspace projection. An important feature of the proposed method is its ability to extract requisite implementation information from the data itself without sacrificing space-time aperture. A preliminary result against an airborne simulation data demonstrates the effectiveness of the proposed method.

Key words: airborne early warning radar; ground moving target indication; space-time adaptive processing; non-homogeneous clutter cancellation

1 引言

增强对地攻击要求机载预警雷达具备地面运动目标检测能力. 从多普勒域上看, 动目标多普勒频率往往落在展宽的地杂波多普勒谱内, 脉冲多普勒处理分离目标与地杂波的方法不再奏效. 利用空间自由度和时间自由度的空时自适应处理 (STAP) 方法能有效提高杂波抑制性能, 获得较好的最小可检测速度 (MDV). 最小方差准则下的最优 STAP 方法需要准确已知待检测距离单元的空时相关矩阵, 而实际工作环境中通常利用临近距离门的回波数据 (训练样本) 进行估计, 这就要求训练样本满足独立同分布特性. 文献 [1] 指出独立同分布样本数大于 2 倍系统自由度时空自适应处理器的性能损失相

对最优处理而言不超过 3dB. 但在实际工作环境中, 杂波空时谱分布特性通常依赖距离单元 (例如机载预警雷达的非正侧面阵观察构形) 且杂波功率分布的非均匀 (例如地理环境的空间变化, 人造强散射目标、照射遮挡等). 这些非理想因素导致最大似然方法估计的背景统计信息是有偏的, 严重恶化了传统 STAP 方法的杂波抑制性能.

杂波谱对齐^[2~6]技术 (例如多普勒移位、高价多普勒移位、自适应多普勒补偿、角度-多普勒补偿、自适应角度-多普勒补偿、尺度变换、联合空时插值等) 和时变加权^[7] (即采用线性模型近似随着距离单元变化的最优自适应权矢量) 是解决杂波空时谱分布特性依赖距离单元的有效手段, 但它们均没有考虑杂波分布的非均匀问

题.事实上,非均匀杂波将导致杂波谱对齐更加困难(杂波空时谱分布特性与观察结构和杂波功率分布有关)和时变加权方法失效(线性模型不能够描述随着距离单元变化的非均匀杂波分布特性).采用对协方差矩阵进行加权处理^[8]或结合先验信息^[9~11]修正协方差矩阵能够缓解杂波谱距离依赖所导致的处理性能下降,但难以获得处理性能与协方差矩阵修正量的显示关系.针对杂波功率分布非均匀问题,非均匀检测(NHD)^[12]通过某种度量(例如广义内积、关联维数等)从训练样本中检测出非均匀样本.不过 NHD 需要在所谓“均匀”样本基础上对剩余样本进行筛选,存在统计模型误差问题.文献[13]通过选择具有较强功率的距离门回波数据构成训练样本,潜在地会导致滤波器凹口展宽和不能有效剔除训练样本中的强目标信号.文献[14,15]结合功率挑选和相位挑选获取功率足够强、相位分布接近杂波相位分布的回波数据构成训练样本,能够剔除训练样本中的强目标信号,但同样存在滤波器凹口展宽问题.

从原理上讲,利用待检测距离单元回波数据直接估计杂波空时相关矩阵的直接数据域方法^[16]能够解决 STAP 所面临的杂波非平稳问题,但是该方法牺牲了空时孔径,性能损失通常大于 3dB,并且仅适用于空时均匀采样情况.在文献[17]中提出了包含最小均方误差杂波谱拟合和重构两个步骤的直接数据域自适应匹配滤波方法,不存在孔径损失问题,但仍仅适用于空时均匀采样情况.为此,本文重点研究机载预警雷达在前视任意线阵观察构形下面临的非平稳杂波和干扰抑制问题.在采用迭代算法获得单个距离门回波数据的最小均方空时二维谱基础上,结合图像特征分析方法提取前视非均匀线阵的杂波和干扰分布特性曲线,然后通过对待检测单元回波数据向重构的杂波和干扰子空间正交投影实现动目标检测.仿真数据处理表明本文方法能避免空时孔径损失问题和克服传统统计空时自适应处理(STAP)方法在非平稳杂波环境存在的性能严重下降问题,具有良好的动目标检测性能.

2 信号模型

图 1 给出了机载预警雷达前视观察示意,其中 XYZ 构成右手直角坐标系, v 表示载机的速度, h 为载机高度, α 和 β 分别表示杂波相对阵面的方位角和俯仰角, φ 表示速度方向相对阵面的偏航角, d_m 表示通道 m 与参考通道的阵面距离.

对通道 m , 给定方位角和俯仰角的杂波空间频率 f_s^m 和多普勒频率 f_d^m 可表示为:

$$f_s^m = \frac{d_m}{\lambda} \mathbf{u}_a \cdot \mathbf{u}_c = \frac{d_m}{\lambda} \cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{d_m}{\lambda} \cos \theta_{\text{acone}} \quad (1)$$

$$f_d^m = \frac{2v}{\lambda} \mathbf{u}_v \cdot \mathbf{u}_c = \frac{2v}{\lambda} \cos \beta \cdot \cos(\alpha - \varphi) = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_{\text{vcone}}$$

对前视观察构形 $\varphi = \pi/2$ 有下面的表达式成立:

$$\left(\frac{\lambda}{d_m} f_s^m\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2v} f_d^m\right)^2 = (\cos \beta)^2 \quad (2)$$

其中 λ 表示工作波长, $\mathbf{u}_c = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \beta \\ \sin \alpha \cdot \cos \beta \\ -\sin \beta \end{bmatrix}$, $\mathbf{u}_a = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 和

$\mathbf{u}_v = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \end{bmatrix}$ 分别表示阵面到杂波的单位方向矢量、等效线阵单位方向矢量和载机速度单位矢量, θ_{vcone} 和 θ_{acone} 分别表示速度和阵列相对于杂波的空间锥角.显然有 f_s^m 和 f_d^m 满足二次曲线分布,且与俯仰角有关,即杂波空时谱分布特性具有距离依赖性.

进一步假设通道数 M , 相干积累脉冲数 N , 给定距离单元的雷达回波数据可表示为:

$$H_0: \mathbf{x} = \sum_{k=1}^{N_c} g_k \cdot \gamma_k \cdot (\mathbf{s}_t^k \otimes \mathbf{s}_s^k) + \mathbf{x}_J + \mathbf{n} \quad (3)$$

$$H_1: \mathbf{x} = \sum_{k=1}^{N_c} g_k \cdot \gamma_k \cdot (\mathbf{s}_t^k \otimes \mathbf{s}_s^k) + \mathbf{x}_J + \mathbf{x}_s + \mathbf{n}$$

其中 H_0 假设表示该距离单元回波不包含动目标信号, H_1 假设表示该距离单元回波包含动目标信号; N_c 表示等效杂波地块数, g_k 和 γ_k 分别表示第 k 个杂波地块的等效增益和等效后向散射系数; $\mathbf{s}_t^k = [1 \cdots \exp(j(N-1)\phi_t^k)]^T$ 和 $\mathbf{s}_s^k = [1 \cdots \exp(j\zeta_M \phi_s^k)]^T$ 表示第 k 个杂波地块的时域导向矢量和空域导向矢量; $\phi_t^k = \frac{4\pi v \cos \theta_{\text{vcone}}^k}{\lambda f_r}$,

$\zeta_M = \frac{d_M}{d_0}$, $\phi_s^k = \frac{2\pi d_0 \cos \theta_{\text{acone}}^k}{\lambda}$, d_0 表示选择的归一化通道间隔, θ_{vcone}^k 和 θ_{acone}^k 表示第 k 个杂波地块的速度锥角和阵列锥角, f_r 表示脉冲重复频率; “ \otimes ”表示 Kronecker

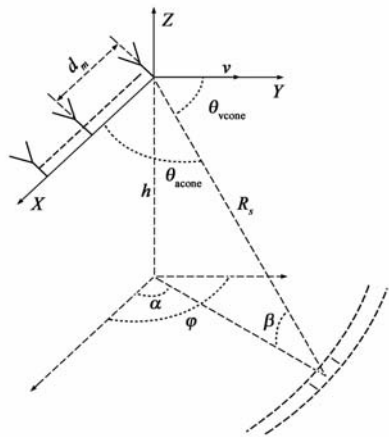


图1 前视观察示意图

积,“T”表示转置; \mathbf{x}_j 表示干扰信号, \mathbf{x}_s 表示动目标信号, \mathbf{n} 表示加性高斯白噪声.

假设径向速度为 v_r 的动目标位于第 k 个杂波地块,则动目标的时域导向矢量可表示为 $\mathbf{s}_t = [1 \cdots \exp(j(N-1)\phi_{ts})]^T$,空域导向矢量可表示为 $\mathbf{s}_s = [1 \cdots \exp(j\zeta_M\phi_{ss})]^T$,其中 $\phi_{ts} = \frac{4\pi(v\cos\theta_{vcone}^k + v_r)}{\lambda f_r}$ 和 $\phi_{ss} = \frac{2\pi d_0\cos\theta_{acone}^k}{\lambda}$.可以发现:动目标的时域导向矢量与该杂波地块存在差异,空域导向矢量保持一致.也正是由于动目标与杂波在空时二维域上可区分,空时处理方法能够在主瓣杂波区检测出动目标.

3 杂波抑制算法

在前视观察构形下,杂波的空时谱分布特性与俯仰角有关,动目标的空时谱为离散点谱,干扰的空时谱分布通常表现为与归一化空间角频率轴垂直的线段.下图给出了前视观察构形下典型的杂波、动目标和干扰空时谱分布示意,其中 $f_{sn} = \frac{2d_0\cos\theta_{acone}}{\lambda}$ 表示归一化空间角频率和 $f_{dn} = \frac{4v\cos\theta_{vcone}}{\lambda f_r}$ 表示归一化多谱勒频率.

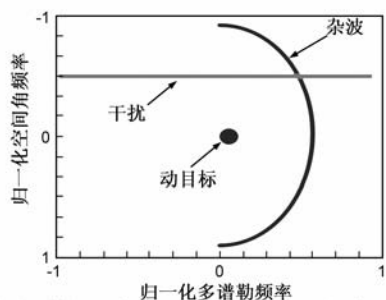


图2 前视观察构形的典型杂波、动目标和干扰空时谱分布示意图

空时处理的核心是设计凹口对准杂波和干扰且对动目标获得最大增益的二维滤波器,在动目标与杂波和干扰的空时二维谱不重叠时适用.不失一般性,假设与 f_{sn} 和 f_{dn} 对应的空时导向矢量可表示成 $\mathbf{a}_{st}(f_{sn}, f_{dn}) = \mathbf{a}_t(f_{dn}) \otimes \mathbf{a}_s(f_{sn})$ 形式,其中 $\mathbf{a}_t(f_{dn}) = [1 \cdots \exp(j(N-1)\pi f_{dn})]^T$ 和 $\mathbf{a}_s(f_{sn}) = [1 \cdots \exp(j\zeta_M\pi f_{sn})]^T$,则待检测单元数据的最小均方谱可根据下式计算:

$$P(f_{sn}, f_{dn}) = \left\| \frac{\mathbf{a}_{st}^H(f_{sn}, f_{dn}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x}}{\mathbf{a}_{st}^H(f_{sn}, f_{dn}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{st}(f_{sn}, f_{dn})} \right\| \quad (4)$$

“H”表示共轭转置, \mathbf{R} 表示待检测单元数据的相关矩阵.

在获取待检测单元数据的最小均方谱后,只要辨识出动目标的离散点谱,就可达到动目标检测目的.实际工作环境中 \mathbf{R} 通常未知,获得上述最小均方谱较为困难.尽管采用匹配滤波方法(即令 \mathbf{R} 为单位阵)可计算出待检测单元数据的空时谱(称为匹配空时谱),但

是它与最小均方谱相比存在明显展宽,淹没了靠近主杂波和干扰的微弱动目标,难以有效检测动目标的离散谱点.一方面,考虑到空时谱展宽对连续分布的杂波和干扰而言具有对称性,采用图像特征提取的方法^[18]不难获得其分布轨迹的几何中心(称为杂波和干扰轨迹);另一方面,考虑到观察几何构形和平台运动参数存在误差以及多通道系统存在响应误差等非理想因素,直接根据匹配滤波计算的空时谱提取的杂波和干扰轨迹可能存在较大偏差.为此,本文采用迭代思想计算待检测单元杂波和干扰的最小均方谱.换言之,根据提取的杂波和干扰轨迹重构杂波加干扰相关矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{gj}$,利用重构的 $\hat{\mathbf{R}}_{gj}$ 计算杂波加干扰的最小均方谱并重复杂波和干扰轨迹提取与相关矩阵重构操作,直至提取的杂波和干扰轨迹无明显变化为止(迭代过程中的收敛条件可选择为前后两次提取点迹的总功率之差小于给定门限,实验表明通常只需 1~2 次迭代即可).其中杂波加干扰相关矩阵按照下式重构:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{gj} &= \mathbf{A} \mathbf{A}^H + \hat{\sigma}_n^2 \mathbf{I} \\ \mathbf{A} &= [\mathbf{a}_{st}(f_{sn}^1, f_{dn}^1) \quad \mathbf{a}_{st}(f_{sn}^1, f_{dn}^2) \quad \cdots \quad \mathbf{a}_{st}(f_{sn}^p, f_{dn}^q)] \\ \mathbf{A} &= \text{diag}\{P(f_{sn}^1, f_{dn}^1) \quad P(f_{sn}^1, f_{dn}^2) \quad \cdots \quad P(f_{sn}^p, f_{dn}^q)\} \end{aligned} \quad (5)$$

$\hat{\sigma}_n^2$ 表示估计的噪声功率, \mathbf{I} 为单位矩阵, $\{(f_{sn}^p, f_{dn}^q) | f_{sn}^p \in [-1, 1], f_{dn}^q \in [-1, 1]\}$ 表示提取的杂波和干扰轨迹, $\text{diag}\{\cdot\}$ 表示构造对角矩阵.

一旦我们提取出杂波和干扰轨迹后,基于子空间投影的自适应权矢量采用下式计算:

$$\mathbf{w}_{sp} = (\mathbf{I} - \mathbf{A} \mathbf{A}^{\#}) \mathbf{a}_{st}(f_{sn}^t, f_{dn}^t) \quad (6)$$

“#”表示矩阵的伪逆, $\mathbf{a}_{st}(f_{sn}^t, f_{dn}^t)$ 表示动目标的空时导向矢量.

4 实验结果

本节通过计算机仿真验证所提方法的有效性.系统参数如下:工作波长 0.125m(S 波段),平台高度 5km,载机速度 150m/s,发射信号带宽 10MHz,俯仰维列子阵合成后提供 10 个方位通道(半波长归一化位置[0, 1, 2, 3, 7, 8, 10, 11, 13, 15]),相干积累脉冲数 22,脉冲重复频率选择保证主瓣距离和多普勒无模糊,偏航角 90°;全孔径发射/全孔径接收的杂噪比 CNR = 30dB;干扰的归一化空间角频率 $f_{sn}^t = -0.2$ 并占据整个多谱勒带宽,干噪比 JNR = 40dB;运动目标的归一化空间角频率 $f_{sn}^t = 0$ 和归一化多谱勒频率 $f_{dn}^t = -0.3$,信杂比 SCR = -10dB.

前视观察构形下,杂波谱的距离依赖性在近距离表现最为明显,因此在后续仿真分析中选择观察斜距 15km.

图 3 和图 4 分别给出了理想情况下多普勒中心移至零频时的待检测单元数据最小均方谱和采用匹配滤波方法计算的空时谱,可以发现:杂波和干扰的匹配空时谱相对最小均方谱而言存在明显展宽,潜在地会淹没靠近杂波和干扰区的动目标点状谱;动目标的匹配空时谱存在扩散现象和能量损失,潜在地会导致动目标检测性能下降.图 5 给出了采用本文方法迭代一次后计算的杂波和干扰空时谱.与匹配空时谱相比,本文方法提取的杂波和干扰空时谱分布更为集中且能正确反映杂波和干扰轨迹的分布特性.在图 6 中进一步给出本文方法的空时二维自适应滤波响应.虽然在目标位置的滤波响应二维主瓣较宽,但是能够在杂波和干扰位置正确形成深凹口,可有效改善动目标检测性能.

下面进一步给出本文方法在通道存在幅度和相位误差下的处理性能.仿真中通道幅度和相位均方根误差分别为 1dB 和 0.2rad,其它条件与图 3 相同.图 7 给出了采用本文方法迭代一次后的杂波和干扰空时谱,图 8 是本文方法与 EFA 方法^[19]和无误差下最优处理在进行 1000 次蒙特卡洛实验后

获得的改善因子损失(定义改善因子损失为自适应处理与无误差且仅存在噪声情况下最优处理的输出信噪比之比).可以发现:本文方法采用杂波和干扰空时谱拟合与重构两个步骤,尽管存在误差时估计的杂波和干扰空时谱分布相对无误差情况而言略有展宽,但其分布宽度仍比理想情况下的匹配空时谱窄很多;本文方法根据估计的杂波和干扰子空间计算自适应权矢量,对通道幅度和相位误差较 EFA 方法更为稳健,能获得更窄的改善因子损失凹口,即具有更好的杂波和干扰抑制能力和动目标检测性能.

5 结论

直接数据域方法是提高空时自适应处理非平稳杂

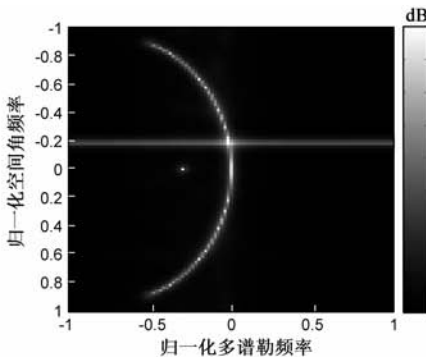


图3 待检测单元数据的最小均方谱

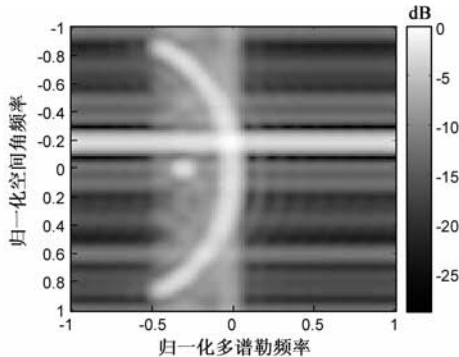


图4 待检测单元数据的匹配空时谱

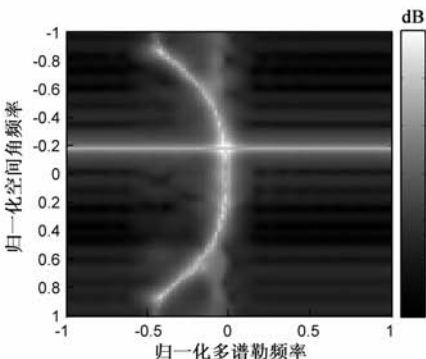


图5 本文方法的空时谱(杂波+干扰)

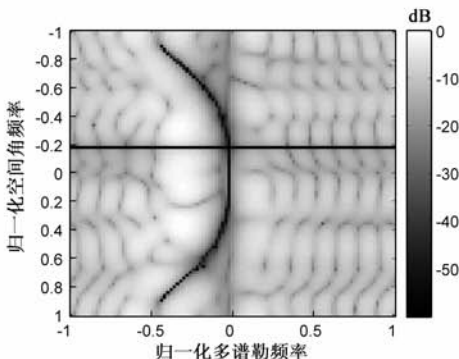


图6 本文方法的二维滤波响应

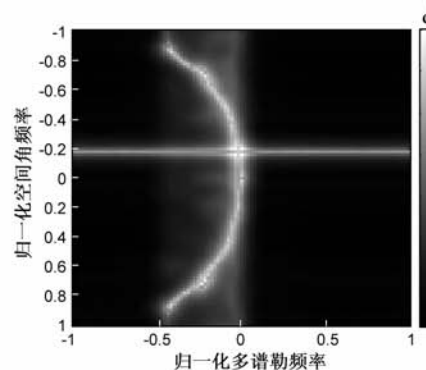


图7 本文方法的空时谱(杂波+干扰,幅度/相位均方根误差1dB/0.2rad)

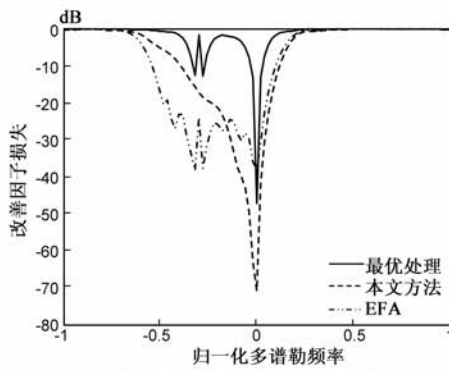


图8 本文方法的自适应处理损失

波和干扰抑制性能的有效手段,但该方法仅在空时均匀采样前提下有效.本文在采用迭代法获得单个距离门回波数据最小均方空时谱分布的基础上,结合图像特征分析和提取技术自适应估计杂波和干扰分布特性曲线,最后将待检测单元数据向重构的杂波和干扰子空间正交投影检测动目标.有效解决了传统直接数据域方法存在的空时孔径损失和传统统计 STAP 方法性能恶化问题.仿真结果表明文中方法对通道响应误差稳健,能有效抑制非平稳杂波和干扰.

参考文献

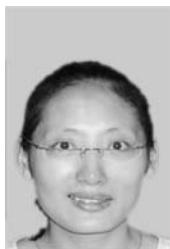
- [1] L E Brennan, I S Reed. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973, 9

- (2): 237 – 252.
- [2] Kreyenkamp O, Klemm R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(5): 253 – 258.
 - [3] B Himed, Y Zhang, A Hajjari. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radars [A]. Proceedings of the IEEE Radar Conference [C]. NY, USA: IEEE Press, 2002. 311 – 317.
 - [4] Lapiere F D, Verly J G, Droogenbroeck M V. New solutions to the problem of range dependence in bistatic STAP radars [A]. Proceedings of the IEEE International Radar Conference [C]. NY, USA: IEEE Press, 2003. 452 – 459.
 - [5] Melvin W L, Davis M E. Adaptive cancellation method for geometry-induced non-stationary bi-static clutter environments [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(2): 651 – 672.
 - [6] Varadarajan V, Krolak J L. Joint space-time interpolation for distorted linear and bi-static array geometries [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3): 848 – 860.
 - [7] Kogon S M, Zatman M A. Bistatic STAP for airborne radar systems [A]. Proceedings of IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM) [C]. Lexington, MA: IEEE Press, 2000. 256 – 260.
 - [8] 谢文冲, 王永良. 基于 CMT 技术的非正侧视相控阵机载雷达 STAP 方法研究 [J]. 电子学报, 2007, 35(3): 441 – 444.
Xie Wen-chong, Wang Yong-liang. Study on clutter suppression approach to airborne phased radar with non-sidelooking arrays based on CMT [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 441 – 444. (in Chinese)
 - [9] Stoica Petre, Li Jian, Zhu Xuming, Guerci Joseph R. On using a priori knowledge in space-time adaptive processing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2598 – 2602.
 - [10] Bergin 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): 997 – 1009.
 - [11] 高飞, 谢文冲, 王永良. 机载共相阵雷达杂波抑制方法研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2014 – 2020.
Gao Fei, Xie Wen-chong, Wang Yong-liang. Study on clutter suppression method for airborne radar with conformal arrays [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2014 – 2020. (in Chinese)
 - [12] Chen P. On Testing The Equality of Covariance Matrices Under Singularity [R]. Rome, NY: Rome Laboratory, 1994.
 - [13] Rabideau D J, Steinhardt A O. Improved adaptive clutter cancellation through data-adaptive training [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 879 – 891.
 - [14] Stephen M Kogon. Adaptive weight training for post-Doppler STAP algorithms in non-homogeneous clutter [A]. Applications of Space-Time Adaptive Processing (Series 14, Chapter 11) [C]. U. K: Institution of Electrical Engineers (IEE) Press, 2004. 359 – 374.
 - [15] 曾操, 廖桂生, 杨志伟, 刘聪锋. 基于样本加权的三通道 SAR-GMTI 机载数据处理分析 [J]. 电子学报, 2009, 37(3): 506 – 512.
Zeng Cao, Liao Guisheng, Yang Zhiwei, Liu Congfeng. Airborne data processing and performance analysis based on three-aperture SAR-GMTI system using weighted sample [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 506 – 512. (in Chinese)
 - [16] Sarkar T K, Wang H, Park S, et al. A deterministic least square approach to space-time adaptive processing [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (AP), 2001, 49(1): 91 – 103.
 - [17] 杨志伟, 廖桂生, 贺顺, 曾操. 直接数据域的自适应匹配滤波方法 [J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1616 – 1620.
Yang Zhi-wei, Liao Gui-sheng, He Shun, Zeng Cao. Direct data domain approach with adaptive match filter [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1616 – 1620. (in Chinese)
 - [18] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
 - [19] DiPietro R C. Extended factored space-time processing for airborne radar [A]. Proceedings of 26th Asilomar Conference on Signal, System and Computers [C]. Pacific Grove, CA: IEEE Press, 1992. 425 – 430.

作者简介



杨志伟 男, 博士, 1980 年 9 月生于四川南充. 现为西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室副教授, 中国电子学会会员. 主持了国家自然科学基金、国防预研基金、博士点基金和中央高校基本科研业务费等科研任务. 主要从事阵列信号处理、空时极化自适应处理、地面运动目标检测和天基预警领域研究.
E-mail: zwyang@mail.xidian.edu.cn



贺顺 女, 1980 年 1 月生于湖南常德. 现为西安电子科技大学信号与信息处理专业在读博士研究生, 西安科技大学通信学院讲师. 研究方向为宽带信号检测与估计、自适应阵列处理.
E-mail: heshun-1212@163.com