

一种稳健的非均匀杂波协方差矩阵估计方法

许华健 杨志伟* 廖桂生 田 敏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 在非均匀环境下, 针对传统样本挑选、样本加权等方法由于数据利用率低导致独立同分布训练样本不足的问题, 该文提出一种在空时 2 维谱平面联合距离维逐空-时频点谱估计与滤波的协方差矩阵估计方法。该方法根据杂波和目标在距离-空时 2 维谱平面的分布特性, 逐点频估计待检测单元杂波谱, 并采用中值滤波方式消除目标污染对地物杂波谱估计的干扰; 最后重构无空时孔径损失的杂波协方差矩阵。仿真结果表明, 相比于传统非均匀统计 STAP 方法, 所提的距离-空时 2 维谱滤波方法能够在样本数不足时有效缓解目标信号污染、离散地形杂波或孤立干扰引起的 STAP 性能下降问题。

关键词: 机载雷达; 空时自适应处理; 空时 2 维谱; 谱估计; 协方差矩阵

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1036-08

DOI: 10.11999/JEIT160747

Robust Approach for Clutter Covariance Matrix Estimation with STAP in Heterogeneous Environment

XU Huajian YANG Zhiwei LIAO Guisheng TIAN Min

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The conventional statistical Space-Time Adaptive Processing (STAP) methods, such as sample selection and sample weighting methods, and so forth, have a very low utilization ratio of sample data, which results in that the problem of training samples lack is more prominent in heterogeneous clutter environment. Thus, in this paper, the space-time spectrum of the clutter Cell Under Test (CUT) is estimated according to the distribution characteristics of the clutter and the moving target in the range and space-time two dimensional spectrum plane. In addition, the median filtering is exploited to avoid the disturbance due to the moving target for the estimation of clutter spectrum. Finally, the reconstruction of clutter covariance matrix without sacrificing space-time aperture and clutter suppression is achieved. The results of the simulated experiments demonstrate that the proposed method can effectively alleviate the STAP performance degradation due to the interference target, discrete terrain clutter or isolation interference, compared with the traditional statistical STAP methods.

Key words: Airborne radar; Space-Time Adaptive Processing (STAP); Space-time 2-D spectrum; Spectrum estimation; Covariance matrix

1 引言

机载预警雷达下视工作时, 平台运动使得地面杂波谱展宽, 导致其对地面慢速运动目标的检测能力变差。Brennan 等人^[1]根据最大似然比理论推导出了空时 2 维自适应最佳处理器结构, 即最优 STAP。其研究表明, STAP 可以有效地补偿机载雷达的平台运动效应, 并获得理想的杂波抑制能力。最

优 STAP 的核心问题在于精确估计待检测单元的杂波空时协方差矩阵。然而, 在实际工作环境中, 复杂的地面场景杂波^[2,3]、离散地形强杂波^[4]以及动目标污染^[5]等因素往往导致杂波分布非均匀。此时, 非均匀样本的干扰以及可用均匀样本数的减少使得利用最大似然方法估计的杂波协方差矩阵与待检测单元的杂波统计特性失配, 导致 STAP 性能严重恶化^[6]。

针对上述问题, 国内外学者从不同角度出发提出了相应的解决方案。降维 STAP 算法^[7]通过设计固定的降维处理结构降低系统自由度, 降低对训练样本需求的同时减小了运算量; 而降秩 STAP 算法^[8]根据杂波的低秩特性, 基于特征空间分类与分析方法估计杂波子空间, 缓解了样本数不足导致的性

收稿日期: 2016-07-14; 改回日期: 2016-11-07; 网络出版: 2016-12-02

*通信作者: 杨志伟 yangzw@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671352, 61231017), 国家青年科学基金(61501471), CAST 创新基金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671352, 61231017), The National Science Foundation for Young Scientists of China (61501471), The Innovational Foundation of China Academy of Space Technology

能损失问题。基于知识辅助处理的方法^[9-11]在非均匀环境中能够获得良好的性能，不过其性能依赖于先验知识及其精确程度；先验知识精确程度不足将使得该类方法性能下降。虽然基于待检测单元数据的直接数据域(DDD)方法^[12,13]能够从本质上解决STAP所面临的杂波分布非均匀问题，然而该方法存在空时孔径损失且慢速运动目标检测性能下降的问题。

样本挑选方法^[14-16]从训练样本中筛选出非均匀样本集，降低了非均匀样本带来的性能损失，然而样本的选择本就意味着训练样本数的减少，这使得训练样本不足的问题更加突出；样本加权方法^[17]虽然从表面上看来利用了所有的数据，但是数据利用率仍然不足。由于非均匀样本总是包含有效的杂波场景信息，较小的权值使得该样本对杂波协方差矩阵估计的贡献随之减小。例如被目标信号污染的样本中大部分的均匀杂波场景信息依然是可用的，然而权值的减小降低了该样本中杂波场景信息的作用。

为解决上述问题，本文从提高数据利用率角度出发，提出一种距离-空时联合滤波估计杂波协方差矩阵的方法。该方法根据杂波和目标在距离-空时2维谱平面的分布特性设计广义加权滤波器估计杂波谱，并通过中值滤波方式滤除离散目标点对杂波谱估计的干扰；最后重构全维杂波协方差矩阵。仿真结果表明本文方法能够有效提高数据利用率，并获得良好的杂波估计性能。此外，本文方法结合直接数据域的处理方式能够有效缓解复杂地理环境下对独立同分布训练样本数的需求。

2 信号模型

2.1 空时信号模型

不失一般性，图1给出了机载阵列雷达正侧视示意图。其中载机的速度和高度分别为 V 和 H ，且沿 X 轴飞行。雷达天线是由 N 个阵元组成的均匀线阵，以第1个阵元作为参考，其它阵元与其间距满足 $d_1 = d_2 = \dots = d_{N-1} = d$ 。 α 和 β 分别表示杂波地块相对于阵列的方位角、俯仰角。杂波地块相对于雷达平台的速度矢量和阵列方向矢量的夹角分别为速度空间锥角 θ_{vc} 和阵列空间锥角 θ_{ac} ；雷达正侧视时速度空间锥角与阵列空间锥角相等，此时称为空间锥角 $\theta_{co} = \cos \alpha \cdot \cos \beta$ 。

设每个阵元接收的相干脉冲数为 M 。则雷达接收的第 r 个距离门回波数据可以表示为式(1)所示二元检测形式：

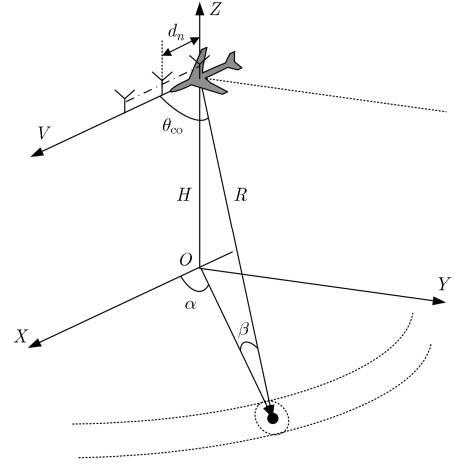


图1 机载阵列雷达正侧视示意图

$$\left. \begin{aligned} H_0: \mathbf{x}_r &= \mathbf{c}_r + \mathbf{n}_r = \sum_{l=1}^{N_c} \gamma_c^l \mathbf{a}_{st}(f_d^l, f_s^l) + \mathbf{n}_r \\ H_1: \mathbf{x}_r &= \mathbf{s}_r + \mathbf{c}_r + \mathbf{n}_r = \gamma_t^q \mathbf{a}_{st}(f_d^q, f_s^q) \\ &\quad + \sum_{l=1}^{N_c} \gamma_c^l \mathbf{a}_{st}(f_d^l, f_s^l) + \mathbf{n}_r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中， H_0 表示该距离门不含动目标，而 H_1 表示包含动目标； $\mathbf{c}_r = \sum_{l=1}^{N_c} \gamma_c^l \mathbf{a}_{st}(f_d^l, f_s^l)$ 表示该距离门的杂波信号， N_c 表示第 r 距离门的等效杂波地块数目， γ_c^l 表示第 r 个距离门第 l 个等效杂波地块的等效增益和等效后向散射系数的乘积。 $\mathbf{a}_{st}(f_d^l, f_s^l) = \mathbf{s}_t(f_d^l) \otimes \mathbf{s}_s(f_s^l)$ 表示该等效杂波地块的空时导向矢量，其中时域导向矢量和空域导向矢量分别为 $\mathbf{s}_t(f_d^l) = [1, e^{j\pi f_d^l}, \dots, e^{j\pi f_d^l(M-1)}]^T$ 和 $\mathbf{s}_s(f_s^l) = [1, e^{j\pi f_s^l}, \dots, e^{j\pi f_s^l(N-1)}]^T$ ， \otimes 表示Kronecker积， $f_d^l = \frac{4V}{\lambda \cdot f_r} \cos \alpha_l \cdot \cos \beta_r$ 和

$$f_s^l = \frac{2d}{\lambda} \cos \alpha_l \cdot \cos \beta_r$$

分别表示该等效杂波块的归一化多普勒频率和归一化空间角频率， f_r 表示脉冲重复频率， β_r 表示第 r 个距离门的俯仰角， α_l 表示第 l 个等效杂波地块的方位角； \mathbf{n}_r 表示加性的高斯白噪声； $\mathbf{s}_r = \gamma_t^q \mathbf{a}_{st}(f_d^q, f_s^q)$ 表示动目标信号， γ_t^q 表示目标等效后向散射系数与等效增益的乘积， $\mathbf{a}_{st}(f_d^q, f_s^q) = \mathbf{s}_t(f_d^q) \otimes \mathbf{s}_s(f_s^q)$ 表示目标的空时导向矢量。若径向速度为 v_r 的动目标位于第 q 个等效杂波地块，那么目标和该等效杂波地块的空时导向不同之处在于：目标的时域导向矢量与该等效杂波地块存在差异，而空域导向矢量保持一致，即满足

$$\left. \begin{aligned} f_d^q &= \frac{4V}{\lambda \cdot f_r} \cos \alpha_q \cdot \cos \beta_r + \frac{4v_r}{\lambda \cdot f_r} \\ f_s^q &= \frac{2d}{\lambda} \cos \alpha_q \cdot \cos \beta_r \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, v_t 表示目标地面速度在雷达视线方向的投影。正是因为动目标与杂波在空时 2 维域上可区分, STAP 方法才能在主瓣杂波区检测出动目标。

2.2 最优 STAP

根据上述的信号模型, 若待检测单元动目标的空时导向矢量为

$$\mathbf{a}_{\text{st}}(f_d^t, f_s^t) = \mathbf{s}_t(f_d^t) \otimes \mathbf{s}_s(f_s^t) \quad (3)$$

那么基于线性约束最小方差准则的 STAP 最优权为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{\text{st}}(f_d^t, f_s^t)}{\mathbf{a}_{\text{st}}^H(f_d^t, f_s^t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_{\text{st}}(f_d^t, f_s^t)} \quad (4)$$

其中, 符号 \mathbf{H} 表示共轭转置, \mathbf{R} 为待检测单元在 H_0 假设下的杂波协方差矩阵。由于杂波协方差矩阵 \mathbf{R} 常常是未知的, 实际工作环境中通常利用临近 K 个距离门样本的最大似然估计值 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{SCM}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H$, 即样本协方差矩阵(Sample Covariance Matrix, SCM), 作为其估计值。

3 距离-空时联合滤波方法

3.1 加权 SCM 类方法的不足

RMB 准则^[18]指出若要求最大似然估计的性能损失不超过 3 dB, 则需要不少于 2 倍系统自由度的独立同分布样本数。然而, 实际的非均匀环境破坏了独立同分布假设, 使得可用样本急剧减少, 传统 STAP 方法的杂波抑制性能随之严重恶化。样本挑选和样本加权类方法估计协方差矩阵可以统一表示成加权 SCM 类方法, 即

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{WSCM}} = \sum_{k=1}^K w_k \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H \quad (5)$$

其中, w_k 表示第 k 个距离门样本数据 \mathbf{x}_k 的加权实系数且满足 $\sum_{k=1}^K w_k = 1$ 。

显然, 就标准 SCM 方法而言, 权值 $w_k = 1/K$ ($k = 1, 2, \dots, K$); 就广义内积(Generalized Inner Product, GIP)样本挑选方法^[15]而言, 权值 w_k 等于 0 或 $1/L$ ($L \leq K$ 且 $k = 1, 2, \dots, K$), 其中 L 表示挑选出的均匀样本数, $w_k = 0$ 则表示第 k 个距离门样本为被剔除的非均匀样本(第 k 个距离门样本的 GIP 值定义为 $\text{GIP}_k = \mathbf{x}_k^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{x}_k$, 其中 $\hat{\mathbf{R}}$ 为样本协方差矩阵估计值); 就迭代 GIP 样本加权方法^[17]而言, 权值 w_k 与该样本的 GIP 值和迭代挑选的所谓均匀样本的 GIP 值之间的差异有关, 通常差异越大, 权值越小, 对应样本在协方差矩阵估计中的贡献也越小。

通过上述分析易知: 在本质上, 加权 SCM 类方法采用单一系数 w_k 调整训练样本 \mathbf{x}_k 在协方差矩阵估计中的权值, 即等效于对空时 2 维平面内的整体

谱点进行取舍(或加权)。单一加权方式虽然缓解了非均匀样本对协方差矩阵估计的不利影响, 但是也降低了空时 2 维平面内与地物杂波分布特性相同区域在协方差矩阵估计中的作用。尤其是包含目标信号污染、离散地形杂波或孤立干扰的训练样本。事实上, 上述样本的非均匀性在空时 2 维平面内仅表现为局部区域分布特性发生改变。图 2 给出了正侧视时典型样本数据中杂波和动目标在空时 2 维谱平面的分布示意, 其中杂波功率谱呈现对角分布, 而目标功率谱则为分布在 2 维平面内局部区域的离散点。针对此类样本采用传统的单一加权方式估计杂波协方差矩阵, 则训练样本的杂波(脊)区域被舍弃。显然, 加权 SCM 类方法的数据利用率不高, 使得样本数不足问题更加突出。

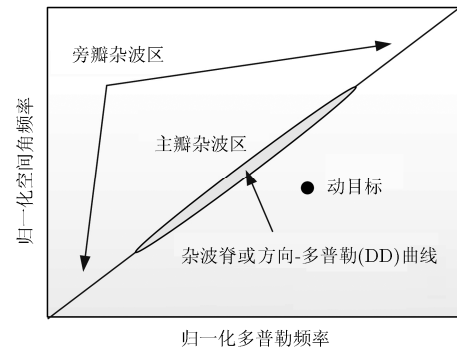


图 2 杂波和目标空时 2 维谱平面分布示意

3.2 广义加权方式

根据 Ward^[19]杂波模型, 第 k 个距离门数据的协方差矩阵 \mathbf{R}_k 可以由空时 2 维平面内一系列的离散点谱重构得到, 即

$$\mathbf{R}_k = E[\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H] = \sum_{l=1}^{N_c + N_q} \rho_k^l(f_d^l, f_s^l) \cdot \mathbf{a}_{\text{st}}(f_d^l, f_s^l) \cdot \mathbf{a}_{\text{st}}^H(f_d^l, f_s^l) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_k \quad (6)$$

式中, f_d^l 和 f_s^l 分别表示离散点谱对应的归一化多普勒频率和归一化空间频率, $\rho_k^l(f_d^l, f_s^l)$ 表示等效杂波地块、目标信号、离散地形杂波或者孤立干扰的功率, \mathbf{I}_k 为单位阵, σ_n^2 为噪声功率, N_c 表示等效杂波地块的数目, 而 N_q 表示目标、离散地形杂波或孤立干扰的数目。

那么依据式(6), 加权 SCM 类方法的杂波协方差矩阵估计结果可以重写为

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{WSCM}} = \sum_{k=1}^K w_k \left(\sum_{l=1}^{N_c + N_q} \rho_k^l(f_d^l, f_s^l) \mathbf{a}_{\text{st}}(f_d^l, f_s^l) \mathbf{a}_{\text{st}}^H(f_d^l, f_s^l) \right) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (7)$$

其中, \mathbf{I} 为单位阵。由式(7)可知, 当 $N_q > 0$, 即距离门 k 的样本中存在目标信号污染、离散地形杂波或孤立干扰时, 采用加权 SCM 类方法估计杂波协方差矩阵将损失该距离门中的杂波信息 $\rho_k^l(f_d^l, f_s^l)$ ($l = 1, 2, \dots, N_c$)。为了解决上述问题, 本文采用空时 2 维平面广义加权方式解决上述方法的不足, 即

$$\hat{\mathbf{R}} = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{l=1}^{N_c+N_q} w_k(f_d^l, f_s^l) \rho_k^l(f_d^l, f_s^l) \mathbf{a}_{\text{st}}(f_d^l, f_s^l) \mathbf{a}_{\text{st}}^H(f_d^l, f_s^l) \right) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (8)$$

显然, 当 $w_k(f_d^l, f_s^l) = w_k(l = 1, 2, \dots, N_c, N_c+1, \dots, N_c+N_q)$ 时, 式(8)可以化简为式(7), 这说明加权 SCM 类方法是上述广义加权方法的特例。若目标信号污染、离散地形杂波或孤立干扰等局部异常区域对应的权值 $w_k(f_d^l, f_s^l)$ ($l = N_c+1, N_c+2, \dots, N_c+N_q$) 近似等于零, 而地物杂波分布区域(杂波脊区域)的权值较大, 则上述广义加权方式便可以解决加权 SCM 类方法单一加权系数的不足。

考虑到样本的非均匀性在空时 2 维谱平面具有更为直观的描述形式, 即样本非均匀表现为样本的空时功率谱结构(包括功率和分布区域)存在差异, 可在训练样本集的空时 2 维平面上通过逐谱点滤波的方式求解加权系数 $w_k(f_d^l, f_s^l)$ 。

3.3 距离-空时联合滤波的全维协方差矩阵估计

根据上一节的讨论, 待检测距离门 r 的空时功率谱估计值可以表示为

$$\hat{\rho}_{r,c}(f_d^i, f_s^j) = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^K w_k(f_d^i, f_s^j) \cdot P_k(f_d^i, f_s^j), \quad f_d^i, f_s^j \in \Psi, \quad \Psi = [-1, 1] \quad (9)$$

其中, $P_k(f_d^i, f_s^j)$ 表示第 k 个距离门样本在归一化多普勒频率 f_d^i 和归一化空间角频率 f_s^j 点处的功率谱值。该距离门样本的功率谱可以是 Capon 形式或者也可以由 IAA 方法^[12]估计得到。 Q 表示加权系数归一化因子, 即 $Q = \sum_{k=1}^K w_k(f_d^i, f_s^j)$ 。

理论上邻近距离门间的杂波分布特性具有较好的一致性, 因此加权系数 $w_k(f_d^i, f_s^j)$ 为^[20]

$$w_k(f_d^i, f_s^j) = g_{\gamma_s}(|k-r|) g_{\gamma_p} \left(\left| P_k(f_d^i, f_s^j) - \hat{P}_{r,\text{md}}(f_d^i, f_s^j) \right| \right) \quad (10)$$

其中, $|\cdot|$ 表示取绝对值, 加权函数 $g_{\gamma_p}(\cdot)$ 和 $g_{\gamma_s}(\cdot)$ 分别表示功率谱维和距离维的加权核函数, 即待检测距离门和训练样本同时满足功率相近和距离接近的条件下, 其权值则越大。加权函数 $g_{\gamma}(\cdot)$ 通常为高斯型

核函数 $g_{\gamma}(u) = \exp(-u^2/\gamma^2)$, 参数 γ 表示调节因子。距离维和功率谱维调节因子 γ_s 和 γ_p 可以根据地物杂波的非均匀程度确定, 即杂波非均匀程度越大, 调节因子越小。在 (f_d^i, f_s^j) 处的参考功率谱为

$$\hat{P}_{r,\text{md}}(f_d^i, f_s^j) = \text{median} \left\{ P_k(f_d^i, f_s^j) \right\}_{k=r-I}^{k=r+I} \quad (11)$$

式(11)表示以待检测距离门 r 为中心、半径为 I 的中值滤波窗内, $2I+1$ 个距离门功率谱经过中值滤波后的值。这是因为待检测距离门数据有可能存在目标信号, 如果直接用待检测单元的功率谱作为参考功率谱, 那么目标信号会影响杂波功率谱的估计。由于目标信号在距离上通常不具有连续分布特性, 因此可将其视为离群值。考虑到中值滤波器作为一种对离群值稳健且实现简单的估计器, 选择中值滤波器可以有效消除目标信号(离群值)对杂波功率谱估计的影响。至于中值滤波窗半径 I 的选取, 半径 I 在可能的目标最大跨距离单元数的 2~10 倍范围内选取, 杂波场景随距离的变化程度越剧烈, 选取的滤波窗半径 I 应该越小。虽然采用中值滤波处理可以有效地消除目标信号对杂波功率谱估计的影响, 但是也使得重构的杂波协方差矩阵误差增大, 影响 STAP 性能。不过后续的仿真实验结果表明: 对于正侧视图型而言, 在目标信号污染、离散地形杂波或孤立干扰等非均匀环境中, 采用中值滤波后本文方法的性能损失在 3 dB 以内。

在获得待检测距离门 r 的杂波谱估计 $\hat{\rho}_{r,c}(f_d^i, f_s^j)$ 的基础上, 依据式(6)可重构出待检测距离门的全维杂波协方差矩阵为

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{re}} = \sum_{f_d^i \in \Psi} \sum_{f_s^j \in \Psi} \hat{\rho}_{r,c}(f_d^i, f_s^j) \mathbf{a}_{\text{st}}(f_d^i, f_s^j) \cdot \mathbf{a}_{\text{st}}^H(f_d^i, f_s^j) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (12)$$

一旦获得杂波协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{re}}$, 我们可以采用 AMF 方法抑制杂波^[13]。图 3 给出了基于距离-空时联合滤波的地物杂波谱估计示意图。

4 仿真实验

为了验证本文所提方法的有效性, 下面以机载正侧视情况为例进行仿真验证。按照表 1 所示的雷达系统参数仿真杂波, 521 个距离门杂波数据按照 Ward 模型仿真产生, 其能量受方向图及距离联合调制(不考虑距离模糊)。为了更好地反映所提方法相比于加权 SCM 类方法在目标信号污染、离散地形杂波或孤立干扰(如桥梁、铁塔等强散射体)等非均匀环境中的性能优势, 在仿真中注入 60 个运动目标和 10 个孤立干扰(或离散地形杂波), 其具体参数如表 2 所示。其中目标的归一化多普勒频率 $2f_d/f_r$ 范围为 0.30~0.65。

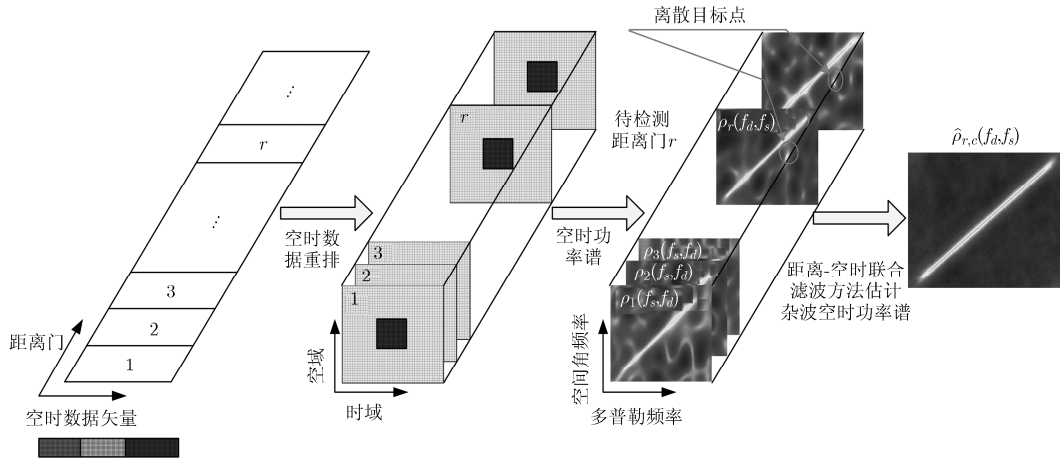


图 3 稳健的地物杂波谱估计示意图

表 1 雷达系统参数

工作波长 (λ)	0.23 m
脉冲数	25
脉冲重复频率(PRF)	2500 Hz
阵元数	10
阵元间距	0.115 m
距离采样频率	3 MHz
平台高度	5000 m
平台速度	140 m/s

表 2 注入的信号和干扰参数

信号或干扰	信噪比 (dB)	距离单元	多普勒通道
运动目标 1~60	45	6~478 号等间隔分布	17~21
孤立干扰 1	80	15	9
孤立干扰 2	80	50	10
孤立干扰 3	80	55	18
孤立干扰 4	80	80	18
孤立干扰 5	80	95	17
离散地形杂波 1	80	154	9
离散地形杂波 2	80	200	19
离散地形杂波 3	80	250	17
离散地形杂波 4	80	280	9
离散地形杂波 5	80	300	17

仿真数据的距离-多普勒图如图 4 所示, 运动目标已经在图 4 中标出, 注入的孤立干扰或离散地形杂波信号处于旁瓣区, 并未在图中标出。图 5 给出了 50 号距离门的 Capon 谱(空时平滑子孔径大小分别为 6 和 10)。可以明显观察到在旁瓣区存在一个孤立干扰(归一化多普勒频率约为-0.3)。对 54 号距离门进行检测, 其 Capon 谱如图 6 所示。图 7 给出了估计的杂波功率谱(文献[12]中讨论了 2 维谱搜索间隔对杂波子空间估计的影响, 此处我们取 2 维谱搜索间隔为 1/20 的主瓣宽度, 其中主瓣宽度定义为空域或时域孔径的倒数), 可以看出, 采用所提距离-空时联合滤波方法能够获得较好的杂波功率谱估计且消除了目标信号和孤立干扰(或离散地形杂波)的影响(中值滤波窗半径为 15, 距离维和功率谱为调节因子分别为 120 和 10)。在此基础上, 根据重构的全维杂波协方差矩阵构造出该距离门数据的自适应权矢量, 可以完成杂波抑制。为了方便分析, 我们给出 3 种加权 SCM 类方法(即加权迭代 GIP 方法、传统 GIP 方法和 SCM 方法)估计的杂波协方差矩阵作为对比。

为了说明训练样本数变化对所提方法的影响, 图 8 给出了不同估计方法获得的杂波子空间与真实

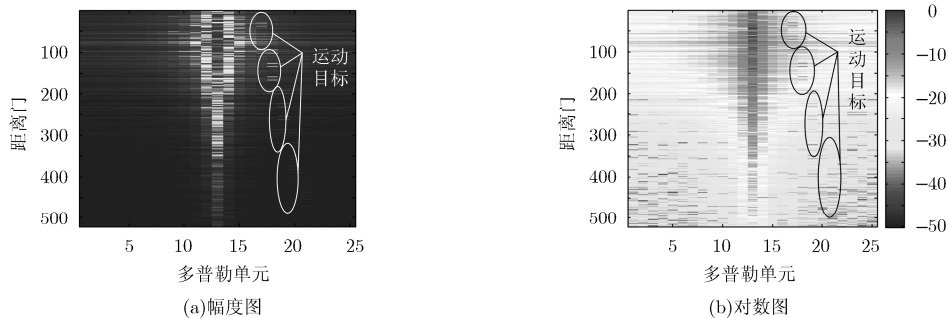


图 4 仿真数据的距离-多普勒图

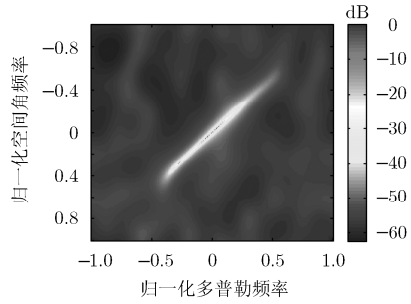


图 5 50 号距离门的 Capon 谱

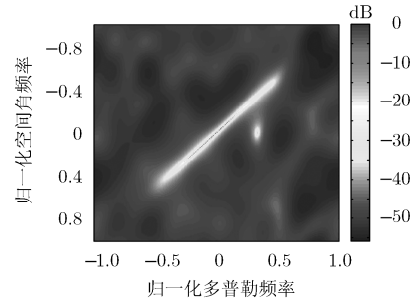


图 6 54 号待检测距离门的 Capon 谱

杂波子空间距离随训练样本数的变化关系曲线(子空间距离定义为 $\|\hat{U}_s \hat{U}_s^H - U_s U_s^H\|_F / \|U_s U_s^H\|_F$, 其中 $U_s U_s^H$ 表示真实杂波子空间, $\hat{U}_s \hat{U}_s^H$ 表示估计的杂波子空间, $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 F-范数。显然, 子空间距离越小, 说明估计的杂波协方差矩阵越准确)。可以看出: 在训练样本数 L 少于两倍系统自由度 M (此处 $M=250$)时, 距离-空时联合滤波方法估计的杂波协方差矩阵准确程度优于 3 种加权 SCM 类方法。此外, 所提方法对训练样本数的变化具有良好的稳健性。事实上, 由于结合了直接数据域的处理方式, 故该方法对训练样本数的需求不高。为了更好地反映本文方法相比于加权 SCM 类方法在非均匀环境中的样本数不足情况下的性能优势, 在以下仿真中, 选择 520 个距离门作为训练样本。

图 9 给出了训练样本数为 520 时, 采用不同方法得到的单次输出的信杂噪比(SCNR)损失随归一化多普勒频率变化曲线的对比。从图 9 可知, 传统 GIP 方法能够挑选出一部分存在目标信号污染的样本, 不过却无法挑选出远距离单元的非均匀样本, 因而其杂波协方差矩阵估计性能不好, 产生一定程度的信号自相消现象。进一步地, 还可以观察到, 加权迭代 GIP 方法虽然能够消除非均匀样本的影响, 但是针对整个距离单元进行加权的方式依然等效于舍弃了非均匀样本, 样本利用率降低, 使得杂

波协方差矩阵估计性能损失增大(样本数小于 2 倍系统自由度, 性能损失将超过 3 dB)。此外, 所提方法在目标所在多普勒频率处的性能优于 3 种加权 SCM 类方法。这也说明了, 所提方法能够有效克服样本挑选(或加权)方法数据利用率不高的问题, 缓解了目标信号污染等非均匀环境下样本数不足带来的协方差矩阵估计性能下降问题。

为了进一步说明所提方法的 STAP 性能, 我们采用不同方法获得协方差矩阵后计算最优权矢量, 分别对 44~64 号距离门进行杂波抑制处理, 处理结果如图 10 所示。可以看出, 目标自相消效应损失了 40 dB 左右运动目标能量, 导致 SCM 方法目标检测性能下降。而传统 GIP 方法和加权迭代 GIP 方法能够在一定程度缓解目标自相消效应, 不过却无法避免 55 号或 50 号距离门的孤立干扰引起的虚警。相比于 3 种加权 SCM 类方法, 所提方法具有较好的目标检测性能。

5 结束语

本文在空时 2 维谱平面上联合多个距离门样本数据, 采用距离维和功率谱维滤波方式估计待检测单元的杂波谱, 从而正确重构出全维的杂波协方差矩阵。距离-空时联合滤波方法提高了数据利用率并有效地缓解了传统统计 STAP 方法训练样本数需求和非均匀样本性能损失的矛盾。仿真数据处理结果

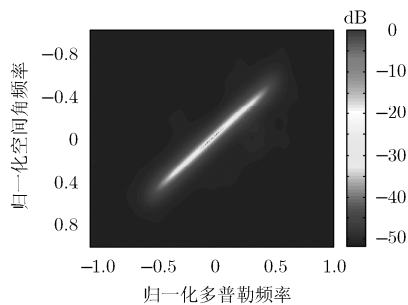


图 7 估计的杂波功率谱(54 号距离门)

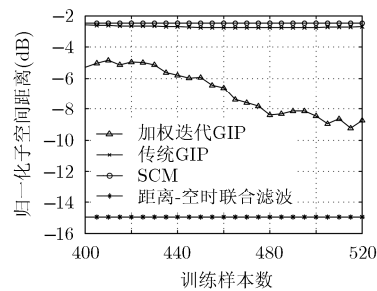


图 8 杂波子空间距离随训练样本数变化关系

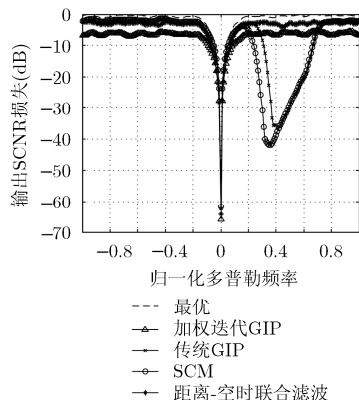
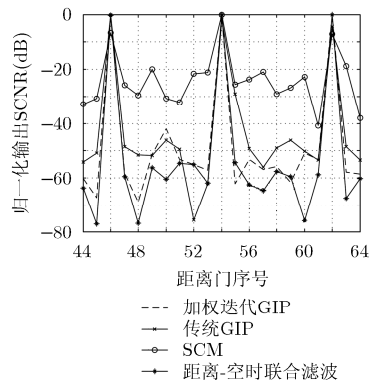


图 9 输出 SCNR 损失曲线

图 10 STAP 处理后的归一化输出
SCNR(归一化多普勒频率 0.3356)

表明本文方法能够在样本数不足时缓解目标信号污染、离散地形杂波或孤立干扰导致的 STAP 性能下降问题。

参考文献

- [1] BRENNAN L E, REED I S, and MALLETT J D. Theory of adaptive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(3): 237-251. doi: 10.1109/TAES.1973.309792.
- [2] BESSON O, BIDON S, and TOURNERET J Y. Covariance matrix estimation with heterogeneous samples[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(3): 909-920. doi: 10.1109/TSP.2007.908995
- [3] MELVIN W L. A STAP overview[J]. *IEEE Aerospace Electronic Systems Magazine*, 2004, 19(1): 19-35. doi: 10.1109/MAES.2004.1263229.
- [4] 高志奇, 陶海红, 赵继超. 基于 S 变换的机载雷达稳健空时自适应算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(6): 1268-1275. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.06.08.
GAO Zhiqi, TAO Haihong, and ZHAO Jichao. Robust space-time adaptive processing based on S transform for airborne radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(6): 1268-1275. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.06.08.
- [5] BESSON O and BIDON S. Adaptive processing with signal contaminated training samples[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(17): 4318-4329. doi: 10.1109/TSP.2013.2269048.
- [6] BIDON S, BESSON O, and TOURNERET J Y. A bayesian approach to adaptive detection in nonhomogeneous environments[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(1): 205-217. doi: 10.1109/TSP.2007.901664.
- [7] TONG Yalong, WANG Tong, and WU Jianxin. Improving EFA-STAP performance using persymmetric covariance matrix estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(2): 925-936. doi: 10.1109/TAES.2015.130264.
- [8] FA Rui and DE LAMARE R C. Reduced-rank STAP algorithms using joint iterative optimization of filters[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 1668-1684. doi: 10.1109/TAES.2011.5937257.
- [9] HAN Sudan, FAN Chongyi, and HUANG Xiaotao. Knowledge-aided shrinkage interference covariance matrix estimation in STAP[C]. 2015 International Conference on Estimation, Detection and Information Fusion (ICEDIF), Harbin, China, 2015: 259-263. doi: 10.1109/ICEDIF.2015.7280202.
- [10] 方明, 刘宏伟, 戴奉周, 等. 基于环境动态感知的空时自适应处理[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(8): 1786-1792. doi: 10.11999/JEIT141505.
FANG Ming, LIU Hongwei, DAI Fengzhou, et al. Space-time adaptive processing via dynamic environment sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1786-1792. doi: 10.11999/JEIT141505.
- [11] 吴亿锋, 王彤, 吴建新, 等. 基于道路信息的知识辅助空时自适应处理[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(3): 613-618. doi: 10.11999/JEIT140626.
WU Yifeng, WANG Tong, WU Jianxin, et al. A knowledge aided space time adaptive processing based on road network data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 613-618. doi: 10.11999/JEIT140626.
- [12] 文才, 王彤, 吴建新. 直接数据域迭代空时自适应处理方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(5): 831-837. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.04.
WEN Cai, WANG Tong, and WU Jianxin. Direct data domain approach with iterative space-time adaptive processing[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(5): 831-837. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.04.
- [13] 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.
- [14] WU Yifeng, WANG Tong, WU Jianxin, *et al.* Training sample selection for space-time adaptive processing in heterogeneous environments[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing letters*, 2015, 12(4): 691-695. doi: 10.1109/LGRS.2014.2357804.
- [15] YANG Xiaopeng, LIU Yongxu, HU Xiaona, *et al.* Robust generalized inner products algorithm using prolate spheroidal wave functions[C]. Radar Conference (RADAR) on Aerospace, Components and Signal Processing, Atlanta, GA, 2012: 581-584. doi: 10.1109/RADAR.2012.6212207.
- [16] YANG Xiaopeng, LIU Yongxu, and LONG Teng. Robust non-homogeneity detection algorithm based on prolate spheroidal wave functions for space-time adaptive processing [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2013, 7(1): 47-54. doi: 10.1049/iet-rsn.2011.0404.
- [17] 郭佳佳, 廖桂生, 杨志伟, 等. 利用广义内积值迭代加权的空时协方差矩阵估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(2): 422-427. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00426.
- GUO Jiajia, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, *et al.* Iterative weighted covariance matrix estimation method for STAP based on generalized inner products[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 422-427. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00426.
- [18] 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.
- [19] WARD J. Space-time adaptive processing for airborne radar [R]. Lexington, MA: Lincoln Lab., 1994: 20-51.
- [20] HONDT O D, GUILLASO S, and HELLWICH O. Iterative bilateral filtering of polarimetric SAR data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(3): 1628-1639. doi: 10.1109/JSTARS.2013.2256881.
- 许华健: 男, 1990 年生, 博士生, 研究方向为空时自适应处理、合成孔径雷达动目标检测.
- 杨志伟: 男, 1980 年生, 副教授, 主要研究方向为阵列信号处理、地面动目标检测、极化处理.
- 廖桂生: 男, 1963 年生, 教授, 主要研究方向为自适应信号处理、信号检测与估计、智能天线信号处理技术.
- 田 敏: 女, 1993 年生, 博士生, 研究方向为运动平台地面动目标检测.