

基于联合特征空间投影的 SAR 图像域杂波抑制

杨志伟, 廖桂生, 曾 操

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 杂波抑制是实现地面慢速目标检测(GMTI, Ground Moving Target Indication)的前提条件. 本文研究基于高分辨合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)图像在杂波起伏时地面动目标检测问题. 利用沿航迹(along-track)多幅 SAR 图像的相关性, 提出一种基于广义特征分解的联合噪声子空间投影杂波相消算法. 理论分析和仿真结果表明该算法在一定程度上能够有效抑制杂波内部起伏, 并且对 SAR 图像配准误差具有稳健性.

关键词: 地面动目标检测; 合成孔径雷达; 分布式小卫星; 子空间

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)12-2298-04

Clutter Suppression Based on Joint Eigenspace Projection in Synthetic Aperture Radar Image Domain

YANG Zhi-wei, LIAO Gui-sheng, ZENG Cao

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Clutter suppressing is the prime problem for ground moving target indication(GMTI). We focus on clutter inner undulating which influences the performance of moving target detection. Exploring correlation between along-track synthetic aperture radar(SAR) images, a clutter suppressing algorithm based on joint noise eigen-subspace projection is presented. The robustness for clutter inner undulating and images registration error is proved by subspace analysis and extensive simulation.

Key words: ground moving target indication; synthetic aperture radar; distributed constellation; subspace

1 引言

地面动目标(特别是地面慢速目标)检测是一项具有挑战性的任务. 基于空时自适应处理(STAP)的动目标检测方法在非均匀环境下存在很多问题^[1,2]. 单载体多通道天基 SAR/GMTI 系统受基线长度限制而难以获得较小的最小可检测速度(MDV). 利用分布式小卫星编队^[3-5]进行地面动目标检测则具有明显优点: 长的沿航迹基线可以显著降低系统的最小可检测速度, 提高对地面慢速目标检测能力; 多基线联合处理可以将盲速推至感兴趣速度区之外. 在 SAR/GMTI 工作模式中, 提高 SAR 图像分辨率, 可以提高沿航迹所获得的多幅 SAR 图像对应分辨单元的杂波相干性, 并且能够在一定程度上减轻杂波分辨单元内地形高度起伏的影响, 有利于杂波相消. 文献[6]利用联合像素域子空间投影的办法对解决高分辨 SAR 图像未精确配准时的杂波相消提供了一个较好的思路, 然而该算法在目标临近杂波方位单元存在较大杂波剩余. 在文献[7]中利用多点相消技术在

SAR 图像域进行杂波抑制和动目标检测, 对图像配准误差具有稳健性. 遗憾的是上述方法在杂波存在内部起伏时, 检测性能都明显下降.

本文在假设分布式小卫星编队采用沿航迹直线排列, 并且地面慢速目标在 SAR 图像上的越距离门情况可以忽略(或通过 Keystone 变换^[8]可以减轻)前提下, 利用相邻两幅 SAR 图像的互相关特性, 形成联合噪声子空间, 进而通过对数据矢量向联合噪声子空间投影达到抑制杂波内部起伏和图像配准误差目的, 实现动目标检测功能.

2 数据模型及杂波抑制算法

假设沿航迹分布的两颗小卫星对相同地面区域所获得的 SAR 图像为 $f_1(m, n)$ 和 $f_2(m, n)$, 并且可以认为:

$$f_2(m, n) = f_1(m, n) * * h(m, n) + f_{e2}(m, n) \quad (1)$$

其中: $* *$ 表示二维卷积; $h(m, n)$ 表示两颗卫星对相同静止地面区域所成图像相对差异的冲击响应;

$f_{e21}(m, n)$ 表示动目标在第二幅 SAR 图像里相对第一幅 SAR 图像的差异信息. 文献[7]利用子空间投影求得二维有限冲击响应函数 $h(m, n)$, 然后通过式(2)估计两幅 SAR 图像中的动目标差异信息:

$$f_{e21}(m, n) = f_2(m, n) - \sum_{u,v} h(u, v) f_1(m-u, n-v) = W_{21}^T F_{21} \quad (2)$$

其中: 求和范围 $u = \{-N_m, \dots, N_m\}, v = \{-N_n, \dots, N_n\}; (2N_m + 1) \times (2N_n + 1)$ 表示临近区域大小; $W_{21} = [1, -h(m - N_m, n - N_n), \dots, -h(m + N_m, n + N_n)]^T$; $F_{21} = [f_2(m, n), f_1(m - N_m, n - N_n), \dots, f_1(m + N_m, n + N_n)]^T$.

如果两幅同一静止区域 SAR 图像的差异仅由两个成像系统的响应差异和系统噪声影响, 在 $h(m, n)$ 阶数足够情况下采用文献[7]获得的解为最小方差解. 但实际上: $h(m, n)$ 的阶数选取与 SAR 图像域可用独立同分布样本数密切相关, 不可能具有较高的阶数; 杂波内部运动使两幅 SAR 图像杂波相关性下降. 因此文[7]求得的自适应二维有限冲击响应不是最优解.

为改善二维冲击响应估计不准确和杂波起伏时的动目标检测性能, 本文同时采用下面的数据矢量:

$$F_{12} = [f_1(m, n), f_2(m - N_m, n - N_n), \dots, f_2(m + N_m, n + N_n)]^T \quad (3)$$

以临近区域大小 3×3 为例, 数据矢量 F_{21} 和 F_{12} 按照图 1 所示获取:

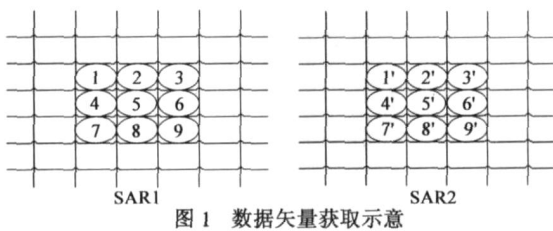


图 1 数据矢量获取示意

$F_{12} = [f_1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]^T$; $F_{21} = [f_2, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]^T$. 进而有: 矩阵 $R_{21} = E[F_{21} F_{21}^H]$ 包含第一幅图像杂波自相关信息和第二幅图像某一像素与第一幅图像对应区域的平均互相关信息; 矩阵 $R_{12} = E[F_{12} F_{12}^H]$ 包含第二幅图像杂波自相关信息以及第一幅图像某一像素与第二幅图像对应区域的互相关信息. 杂波内部运动和二维冲击响 $h(m, n)$ 的近似误差使得 R_{21} 和 R_{12} 中杂波的互相关信息不一致, 但仍可认为系统噪声的互相关信息在统计上是一致的, 对其估计具有稳健性. 所以考虑对矩阵束 (R_{21}, R_{12}) 进行广义特征分解, 即: $R_{21} V = R_{12} V$, 其中 V 的列矢量是矩阵束 (R_{21}, R_{12}) 的广义特征矢量, 而对角阵 Λ 的对角元素为相应广义特征值. 本文定义: 最小广义特征值 λ_{\min} 对应

的广义特征矢量 v_{\min} 张成矩阵束 (R_{21}, R_{12}) 的一维联合噪声子空间 U_N , 其余广义特征矢量张成联合杂波子空间 U_C , 显然 $U_N \perp U_C$. 含有动目标信息的数据矢量 F_{21} 应该位于 U_N 与 U_C 的并空间, 如果将 F_{21} 向 U_N 投影则能够抑制 F_{21} 的杂波分量, 达到动目标检测目的. 这是因为无配准误差时杂波的理想空域导向矢量可表示为 $a_c = [1 \dots 1]_N^T$, N 表示接收通道数; 地面慢速目标在多幅 SAR 图像间没有发生越距离门走动情况下的理想空域导向矢量可表示为 $a_s = [1 \ e^{j\phi_1(v_r)} \dots e^{j\phi_{N-1}(v_r)}]_N^T$, 其中 $\{\phi_i(v_r)\}_{i=1}^{N-1}$ 表示由目标运动引入的附加相位. 显然除盲速目标 (即 $\{\phi_i(v_r) = 0\}_{i=1}^{N-1}$) 之外, 目标与杂波处于不同空间 (导向矢量不同).

3 广义特征空间分析

便于对矩阵束 (R_{21}, R_{12}) 的广义特征值分布和广义特征空间进行定性分析, 假设杂波满足独立同分布条件, 并假设地面场景的第二幅 SAR 图像可由第一幅 SAR 图像表示, 即: $f_{e2}(m, n) = f_{c1}(m, n) + n_2(m, n)$, 其中 $f_{c1}(m, n)$ 和 $n_2(m, n)$ 均为复数. 考虑噪声影响, 有: $f_1(m, n) = f_{c1}(m, n) + n_1(m, n)$ 和 $f_2(m, n) = f_{c2}(m, n) + n_2(m, n)$, 其中 $n_1(m, n)$ 和 $n_2(m, n)$ 表示分辨单元内的噪声分量. 进而有下面的表达式成立:

$$F_{21} = [0, \dots, 1, \dots, 0]^T \times f_{c1}(m, n) + [0, f_{c1}(m - N_m, n - N_n), \dots, 0, \dots, f_{c1}(m + N_m, n + N_n)]^T + [n_2(m, n) + n_1(m - N_m, n - N_n), \dots, n_1(m, n), \dots, n_1(m + N_m, n + N_n)]^T$$

$$F_{12} = [1, 0, \dots, 0, \dots, 0]^T \times f_{c1}(m, n) + [0, f_{c2}(m - N_m, n - N_n), \dots, 0, \dots, f_{c2}(m + N_m, n + N_n)]^T + [n_1(m, n), n_2(m - N_m, n - N_n), \dots, n_2(m, n) + n_1(m + N_m, n + N_n)]^T$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} \sigma_{n_2}^2 + \sigma_{c_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ & \sigma_{c_1}^2 + \sigma_{n_1}^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_{n_1}^2 \\ & & & & \sigma_{c_1}^2 + \sigma_{n_2}^2 \end{bmatrix} = \sigma_{c_1}^2 (H + A_{21})$$

$$R_{12} = \begin{bmatrix} \sigma_{n_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ & \sigma_{c_2}^2 + \sigma_{n_2}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{n_2}^2 + \sigma_{c_1}^2 \\ 0 & & & & \sigma_{c_2}^2 + \sigma_{n_2}^2 \end{bmatrix} = \sigma_{c_1}^2 (H + A_{12}) \quad (4)$$

其中: $\sigma_{c_1}^2 = E[f_{c1}(m, n) \cdot f_{c1}^*(m, n)]$;

$$\begin{aligned} \sigma_{c2}^2 &= E[f_{c2}(m, n), f_{c2}^*(m, n)]; \sigma_{n1}^2 = E[n_1(m, n) \cdot n_1^*(m, n)]; \\ \sigma_{n2}^2 &= E[n_2(m, n) \cdot n_2^*(m, n)]; \quad = [\quad, 0, \dots, 1, \dots, 0]^T; \\ &= [1, 0, \dots, \quad, \dots, 0]^T. \end{aligned}$$

由于 R_{12} 是可逆的, 所以矩阵束 (R_{21}, R_{12}) 的广义特征值和广义特征矢量与矩阵 $R_{12}^{-1}R_{21}$ 的特征值和特征矢量等价. 假设 $\sigma_{c1}^2, \sigma_{c2}^2 \gg \sigma_{n1}^2, \sigma_{n2}^2$, 并且有 $(\sigma_{n2}^2 + \sigma_{c1}^2) / \sigma_{c1}^2 \approx \sigma_{n1}^2 / \sigma_{c1}^2$. 可以得到:

$$\begin{aligned} R_{12}^{-1}R_{21} &= (H + A_{12})^{-1}(H + A_{21}) \\ &= \left(A_{12}^{-1} - \frac{A_{12}^{-1}HA_{21}^{-1}}{1 + HA_{12}^{-1}A_{21}^{-1}} \right) (H + A_{21}) \\ &= A_{12}^{-1}H - A_{12}^{-1}HA_{21}^{-1}H - A_{12}^{-1}HA_{21}^{-1}A_{21} + A_{12}^{-1}A_{21} \\ &\quad + H + A_{12}^{-1}A_{21} \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\text{span}(\quad, \quad)$; $A_{12}^{-1}A_{21}$ 是对角矩阵, 并且有 $(2N_m + 1) \times (2N_n + 1) - 1$ 个元素在数值上接近 1, 剩下的两个元素互为倒数. 因此矩阵束的广义特征值具有下述特性: 一个大广义特征值和一个小广义特征值, 其余广义特征值数值上接近 1. 仿照子空间分析方法: 大特征值对应的特征矢量张成信号子空间, 小特征值对应的特征矢量张成噪声子空间. 但这里仅有最小广义特征值 λ_{\min} 对应的广义特征矢量 v_{\min} 刻画了 R_{21} 和 R_{12} 的噪声信息.

图 2 给出了实际的广义特征谱 (特征值按升序排列), 它说明对广义特征值分布和广义特征空间的定性分析是正确的. 可以发现: 两幅 SAR 图像的配准误差越大, 或者相关系数越低, 都会导致杂波特征值数增大, 减少了系统可用自由度, 杂波抑制性能随之下降. 其中: 杂噪比 40dB, 信杂噪比 0dB (动目标幅度平方与杂波平均幅度平方之比); 求和范围 $u = \{-3, \dots, 3\}$, $v = \{-3, \dots, 3\}$; 相关系数在无配准误差情况下根据 $\rho = E[|f_1 f_2^*|] / \sqrt{E[f_1 f_1^*] E[f_2 f_2^*]}$ 计算获得.

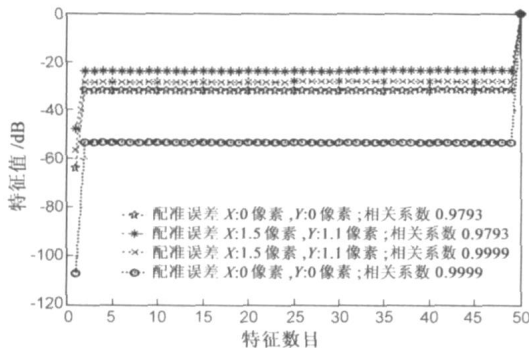


图 2 杂波广义特征谱

4 仿真实验结果

为验证本文方法的有效性, 以两颗处于沿航迹飞行状态的小卫星 SAR 成像系统为例, 并忽略卫星姿态

的摄动, 且认为能够正确对地面成像. 其中沿航迹基线长度是 355m, X 波段雷达处于正侧视工作状态; 小卫星平台位于距离地面 676km 高处, 速度为 7518.9m/s, 地面观测条带中心斜距 1000km; 杂噪比 27dB, 信杂噪比 0dB.

图 3 和图 4 是杂波存在起伏时 (幅度 $\sigma^2 = 0.1$ 高斯起伏, 相位 $\pm 30^\circ$ 均匀起伏) 图像精确配准和存在配准误差 ($x: -0.45, y: 0.5$ 像素) 情况下动目标检测结果 (无起伏、精确配准情况下相关系数 0.99), 其中虚线表示文 [7] 方法所获得的结果, 实线表示本文方法动目标检测结果. 可以发现杂波起伏和图像配准误差都会导致图像相关性下降, 进而杂波抑制性能下降. 在一定配准误差和杂波起伏情况下, 本文方法均比文 [7] 方法具有更高的输出信杂噪比和更为平坦的杂波剩余功率, 有利于后续恒虚警处理和提高动目标检测性能.

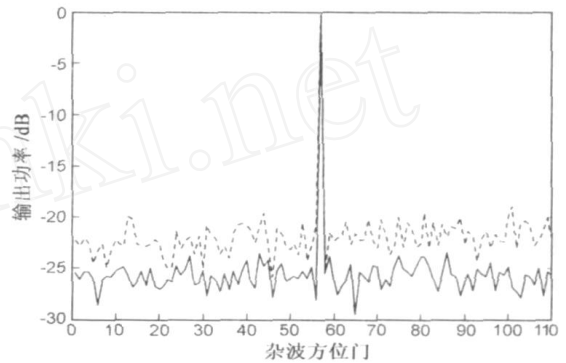


图 3 无配准误差 ($v_r=2\text{m/s}$)

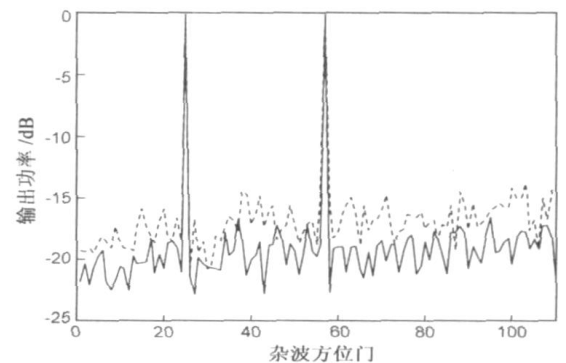


图 4 存在配准误差 ($v_{r1}=2\text{m/s}, v_{r2}=3.8\text{m/s}$)

由于单基线无法同时获得较大盲速区和较高低速区检测能力, 因此考虑多基线联合处理以达到在感兴趣速度区间尽量减少盲速点目的. 图 5 是 SAR 图像无配准误差, 杂波相关系数 0.97 时速度响应曲线 (虚线表示文 [7] 方法所获得的结果, 实线表示本文方法相应结果). 其中沿航迹基线长度 (0m, 106.16m, 210.4m, 309.5m), 工作波长 0.18m, 其它条件同图 3. 可以发现, 在杂波相干性不高的情况下文中方法仍然具有较好的速度响应曲线, 能够对地面慢速目标进行有效检测.

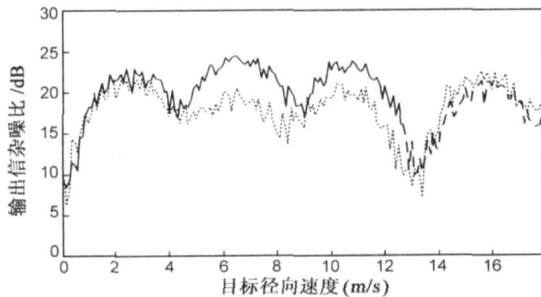


图 5 无配准误差时的速度响应曲线

5 结论

基于分布式小卫星平台的 SAR/GMTI 工作体制是提高地面慢速目标检测能力的有效方式,而杂波起伏和多幅高分辨 SAR 图像配准误差将不可避免.本文利用沿航迹所获得的多幅 SAR 图像的相干性,给出一种在图像域基于联合噪声子空间投影的杂波相消算法.文中算法对图像配准误差具有一定的稳健性,并且能够在一定程度上抑制对应分辨单元的杂波起伏,具有良好性能.

参考文献:

- [1] Bao Zheng, Liao Guisheng, et al. Adaptive spatial-temporal processing for airborne radars[J]. Chinese Journal of Electronics, 1993, 2(1): 1 - 7.
- [2] 廖桂生, 保铮, 许志勇. 机载雷达空时二维自适应处理框架及其应用[J]. 中国科学(E 辑), 1997, 27(4): 336 - 341.
Liao Guisheng, Bao Zheng, Xu Zhiyong. A framework of rank-reduced space-time adaptive processing for airborne radar and its applications[J]. Science in China Series E, 1997, 40(5): 505 - 512. (in Chinese)
- [3] A Das, R Cobb, M Stallard. TechSat 21: A revolutionary concept in distributed space based sensing[A]. Proceeding of AIAA Defense and Civil Space Programs Conference & Exhibit [C]. Huntsville, AL, 1998.
- [4] M Martin, M Stallard. Distributed satellite missions and technologies—the TechSat 21 program[A]. Proceeding of AIAA Space Technology Conference & Exposition[C]. Albuquerque, NM, 28 - 30 Sept. 1999.
- [5] D Massonnet. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Trans on Geosci. Remote Sensing, 2001, 39(3): 506 - 520.
- [6] 李真芳, 保铮, 杨凤凤. 基于成像的分布式卫星 SAR 系统地面动目标检测(GMTI)及定位技术[J]. 中国科学(E 辑), 2005, 35(6): 597 - 609.
Li Z F, Bao Z, Yang F F. Ground moving target detection and location based on SAR images for distributed spaceborne SAR [J]. Science in China Series F, 2005, 48(5): 632 - 646.
- [7] M Smumekh. Signal subspace fusing of uncalibrated sensors with application in SAR and diagnostic medicine [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(1): 127 - 137.
- [8] R P Perry, R C Dipietro, R L Fante. SAR imaging of moving targets[J]. IEEE Trans on Aeros and Elect Sys, 1999, 35(1): 188 - 200.

作者简介:



杨志伟 男, 1980 年出生于四川省南充市, 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. 主要从事阵列信号处理、动目标检测研究. E-mail: yankyeesa @163.com



廖桂生 男, 1963 年出生于广西壮族自治区桂林市, 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员. 获部委科技进步一等奖和二等奖多次. 在国内外发表学术论文 140 余篇. 现主要从事雷达信号处理、通信信号处理、阵列信号处理和动目标检测等方面的研究.
E-mail: gsliao @xidian.edu.cn



曾 操 男, 1979 年出生于湖北省襄樊市, 现为西安电子科技大学信号与信息处理专业博士研究生. 主要研究方向为: 阵列误差校正、地面动目标检测. E-mail: czeng@mail.xidian.edu.cn