

极化 SAR 动目标定位中的残差图像干涉相干性分析

刘忠训 代大海 王雪松 李盾
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 该文研究极化 SAR 动目标检测及定位中的频域残差图像干涉相干性优化问题。给出了多普勒频域杂波对消处理的基本流程,提出了一种利用频域残差图像进行最优极化干涉处理从而提高目标运动参数估计精度的方法。结合最优极化干涉理论,通过仿真分析研究了不同极化下频域残差图像的干涉相干性,验证了文中方法的有效性。

关键词: SAR; 最优极化干涉; 动目标检测定位; 杂波对消; 频域残差图像

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0606-04

Analysis of the Interferometric Coherence between Residue Images in Location of Moving Target with Polarimetric SAR

Liu Zhong-xun Dai Da-hai Wang Xue-song Li Dun

(School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper mainly deals with the optimal interferometric coherence of the residual images in frequency domain in detection and location of moving target with polarimetric SAR. The essential procedure of clutter cancellation in doppler frequency is presented. A novel method for improving the estimated accuracy of the motion parameters is proposed by taking the optimal polarimetric interferometry processing with residual images in frequency domain. Referring to the theory of optimal polarimetric interferometry, the interferometric coherences of the residual images with different polarization are analyzed. Simulation results show the effectiveness of proposed method.

Key words: SAR; Optimal polarimetric interferometry; Moving target detection and location; Clutter cancellation; Residual images in frequency domain

1 引言

常规的 SAR 成像处理方法一般不具备对运动目标的检测成像能力,如何将动目标从固定地物杂波和静止目标回波中分离出来,提高动目标检测定位时的信杂比,从而实现对动目标运动参数的精确估计,是 SAR 动目标成像处理的关键技术^[1-3]。

常用的 SAR 地面慢速运动目标检测处理方法主要有相位中心偏置天线(DPCA)技术、空时自适应处理(STAP)技术以及沿航迹多孔径干涉处理技术等^[2,4-6]。干涉合成孔径雷达(Interferometry SAR, InSAR)技术利用 SAR 系统从空间分离的沿航迹多个天线孔径对同一地区成像,首先补偿由于天线孔径间距引起的回波信号相位差值,并在多普勒频域进行固定地物杂波对消处理,然后根据对消之后相邻两路残差图像中对应像素之间的干涉相位信息估计动目标运动参数,从而实现对地面运动目标的检测、定位与测速^[2,4]。若考虑地面目标的极化散射特性,利用全极化 SAR 进行干涉处理,干涉相位的估计精度将在很大程度上依赖于目标的极化特性。

最优极化干涉理论最初应用于提高 SAR 地面高程测量精度^[7],文献[1]将其拓展应用于动目标的检测处理之中。本文给出了一种利用相邻通道杂波对消后的频域残差图像进行极化干涉处理的方法。首先将 M 个沿航迹天线子孔径的极化回波数据进行相位偏差补偿,并在多普勒频域进行地杂波对消处理,得到相邻孔径之间的 $M-1$ 路频域残差图像,然后结合最优极化干涉理论,求取最优极化特征矢量,以获得残差图像之间的最佳极化干涉相干,从而进一步提高极化干涉相位的估计精度。

2 多普勒频域杂波对消处理

图 1 给出了沿航迹多孔径干涉 SAR 的空间几何关系。雷达载机高度为 h ,在水平面内以速度 v_a 沿 x 轴对成像区域进行正侧视扫描,雷达阵列天线由沿航迹以等间隔 D 线性排列的 M 个子孔径构成,中间子孔径以水平(H)、垂直(V)极化同时发射载频为 f_0 波形正交的两路线性调频信号,调频斜率为 b ,脉冲宽度为 τ ,脉冲重复周期为 T ,其余 $M-1$ 个子孔径与中间子孔径同时在 H, V 两个不同的极化通道接收回波信号^[1,3,8]。

假设目标作匀速直线运动,其距离向和方位向速度分量分别为 v_x , v_y 。在扫描初始时刻天线中间子孔径和运动目

2007-11-20 收到,2008-09-23 改回

国家自然科学基金(60736006)和国防科技大学优秀研究生创新基金(S070406)资助课题

相应的极化干涉相位为

$$\varphi = \arg \{ \text{Int}(f, m) \} = \arg \{ \mathbf{w}_1^H [\boldsymbol{\Omega}_{l-1}] \mathbf{w}_2 \} \quad (10)$$

其中 $\langle \bullet \rangle$ 表示求集合平均, $[\boldsymbol{\Omega}_{l-1}] = \langle \mathbf{k}_{i,l+1} \mathbf{k}_{i-1,l}^* \rangle$, 实际中可采取增加干涉 SAR 沿航迹天线子孔径数目的方法, 来获得多路残差图像, 从而得到估计干涉相位的统计数据。如果在某个像素单元内检测到运动目标存在, 通过计算式(10)中的极化干涉相位值可以估计出运动目标的径向速度和真实方位位置等参数。事实上, 由于近似处理引起的残差图像中残留杂波和系统噪声的影响, 相位估值的精度在很大程度上依赖于频域残差图像之间的相干性^[1]。

残差图像之间的极化干涉相干性强弱可以用它们像素间的极化干涉相关系数 γ 来表征。 γ 定义为两个矢量信号之间归一化复互相关的绝对值^[1], 即

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\left| \langle (\mathbf{w}_1^H \mathbf{k}_{i,l+1}) (\mathbf{w}_2^H \mathbf{k}_{i-1,l}^*)^H \rangle \right|}{\sqrt{\langle (\mathbf{w}_1^H \mathbf{k}_{i,l+1}) (\mathbf{w}_2^H \mathbf{k}_{i,l+1}^*)^H \rangle \cdot \langle (\mathbf{w}_1^H \mathbf{k}_{i-1,l}) (\mathbf{w}_2^H \mathbf{k}_{i-1,l}^*)^H \rangle}} \\ &= \frac{\left| \langle \mathbf{w}_1^H [\boldsymbol{\Omega}_{l-1}] \mathbf{w}_2 \rangle \right|}{\sqrt{\langle \mathbf{w}_1^H [\mathbf{T}_{l-1}] \mathbf{w}_2 \rangle \cdot \langle \mathbf{w}_1^H [\mathbf{T}_{l-1}] \mathbf{w}_2 \rangle}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $[\mathbf{T}_{l-1}] = \langle \mathbf{k}_{i,l+1} \mathbf{k}_{i,l+1}^* \rangle$, $[\mathbf{T}_{l-1}] = \langle \mathbf{k}_{i-1,l} \mathbf{k}_{i-1,l}^* \rangle$ 分别是目标极化特性相关矩阵, 它们均包含了频域残差图像的全极化信息。 $[\boldsymbol{\Omega}_{l-1}]$ 不仅包含了全极化信息, 而且包含了频域残差图像不同极化通道之间的干涉相位关系。

如果 $\mathbf{w}_1 = \mathbf{w}_2$, 则 γ 等效为单极化标量干涉的情况, 其取值主要依赖于频域杂波对消后动目标的信杂比; 若 $\mathbf{w}_1 \neq \mathbf{w}_2$, 则 γ 的取值还依赖于 \mathbf{w}_1 和 \mathbf{w}_2 所代表的两种散射机理之间的极化相关系数^[7]。 γ 取值越大, 表明频域残差图像之间的干涉相干性越强, 干涉相位的估计精度也就越高。文献[7]给出了根据式(11), 利用 Lagrange 法求取最优极化特征矢量的方法。选择最优的极化特征矢量 $\mathbf{w}_{1,\text{opt}}$ 和 $\mathbf{w}_{2,\text{opt}}$, 可以实现残差图像之间的最佳极化干涉相关, 获得高精度的干涉相位值, 从而提高运动目标径向速度和真实方位位置的估计精度。

综上所述, 对 $M-1$ 路频域残差图像中运动目标存在的像素单元进行最优极化干涉处理的基本流程如下所示:

(1) 将 $I_{pq,l+1}(f', m')$ ($pq = \text{HH}, \text{HV}, \text{VV}$) 变换成 Pauli 正交复矩阵基下的三维矢量图像 $\mathbf{k}_{i,l+1}$;

(2) 计算矩阵 $[\mathbf{T}_{l-1}]$, $[\mathbf{T}_{l-1}]$ 和 $[\boldsymbol{\Omega}_{l-1}]$, 代入式(11), 求取最优的极化特征矢量 $\mathbf{w}_{1,\text{opt}}$ 和 $\mathbf{w}_{2,\text{opt}}$;

(3) 计算 $\mathbf{w}_{1,\text{opt}}$ 和 $\mathbf{w}_{2,\text{opt}}$ 所对应的极化干涉相位值, 从而实现目标运动参数的高精度估计。

4 仿真分析

设天线子孔径数目为 $M = 10$ 个, 孔径间距为 $D = 2\text{m}$, 波长为 $\lambda = 0.07\text{m}$, 运动点目标的极化散射矩阵为 $\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} 0.25 & -0.433 \\ -0.433 & 0.75 \end{bmatrix}$ 。第 l 个孔径与第 $l+1$ 个孔径杂波对消之

后, 不同极化通道的残留杂波和噪声通常满足交叉极化分量和共极化分量之间不相关, 其具体模拟方法可以参阅文献[9], 此处不再赘述。在仿真分析中, 式(11)中 \mathbf{w}_1 和 \mathbf{w}_2 的取值对应着不同极化下频域残差图像的干涉相干性, 利用文献[2]中的最优极化干涉理论求取最优极化特征矢量 $\mathbf{w}_{1,\text{opt}}$ 和 $\mathbf{w}_{2,\text{opt}}$, 从而获得频域残差图像之间的最佳极化干涉相干。

图3给出了当信杂比分别为 0dB, 5dB, 10dB 和 20dB 时, 在 4 种不同极化状态组合下残差图像之间干涉相关系数 γ 随目标径向速度 (0~7m/s) 的变化曲线, 此处信杂比的定义为式(6)中动目标信号与残差图像中残留杂波和噪声之和的比值。从图中可以看出:

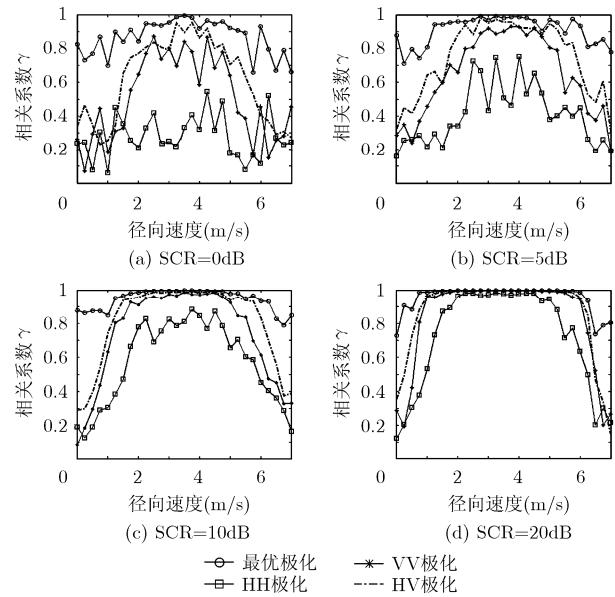


图3 不同极化下的残差图像干涉相干性

(1) 在相同信杂比条件下, 最优极化特征矢量 $\mathbf{w}_{1,\text{opt}}$ 和 $\mathbf{w}_{2,\text{opt}}$ 所对应的残差图像干涉相干性最强, HH 极化通道最弱。这说明杂波的散射特性对信号的极化方式较为敏感, 选择最优的极化特征矢量可以更为有效地抑制地物杂波, 从而提高动目标的检测概率以及干涉相位的估计精度, 实现对目标运动参数的精确估计。

(2) 在径向速度 0m/s 和 7m/s 附近, 残差图像之间的极化干涉相干性明显减弱, 这两个速度均为“盲速”。这是由于相邻子孔径间的地杂波对消特性随目标径向速度出现周期性的变化, 在“盲速”附近, 运动目标回波信号的能量被部分对消, 动目标的信杂比也相应减小, 从而频域残差图像之间的相干性降低。

图4给出了当运动目标径向速度分别为 3.5m/s, 6m/s 时, 不同极化状态组合下残差图像干涉相干性随信杂比的变化曲线。图中曲线表明, 随着信杂比的提高, 频域残差图像之间的极化干涉相干性将逐渐增强。在不同信杂比条件下, 最优极化对干涉相干性均有所改善, 而且在信杂比越低时,

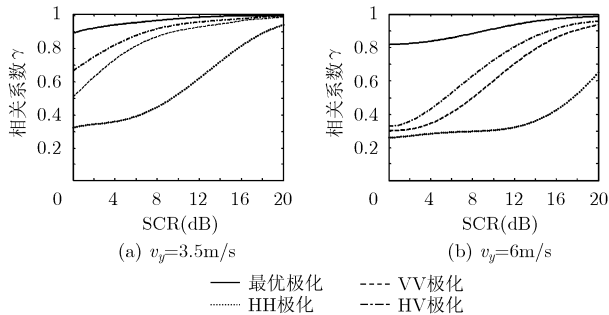


图4 残差图像干涉相干性随信杂比的变化曲线

改善效果越明显。

5 结束语

本文给出了一种利用频域残差图像进行极化干涉处理从而提高 SAR 动目标定位中干涉相位精度的方法。文中根据多孔径极化干涉 SAR 回波信号模型, 给出了多普勒频域杂波对消处理的流程以及对频域残差图像进行最优极化干涉处理的基本方法, 并着力研究了频域残差图像的最优极化干涉相干性问题, 通过仿真分析验证了最优极化特征矢量可以获得更高的频域残差图像干涉相干性, 从而可以实现目标运动参数的高精度估计, 进一步拓展了最优极化干涉理论在 SAR 动目标检测定位处理中的应用。

参考文献

- [1] Wang Gen-yuan, Xia Xiang-Gen, and Chen V C. Radar imaging of moving targets in foliage using multifrequency multiaperture polarimetric SAR [J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2003, 41(8): 1755-1764.
- [2] 保铮, 邢孟道等著. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 11-111.
Bao Zheng and Xing Meng-dao, *et al.*. The Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 11-111.
- [3] 张直中. 机载和星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 79-165.

Zhang Zhi-zhong. An Introduction of the Airborne SAR and Spaceborne SAR[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 79-165.

- [4] 李景文, 李春升, 周荫清. 三孔径 INSAR 动目标检测和成像[J]. *电子学报*, 1999, 27(6): 40-43.
- Li Jing-wen, Li Chun-sheng, and Zhou Yin-qing. Three-aperture INSAR moving targets detecting and imaging[J]. *Acta Electronics Sinica*, 1999, 27(6): 40-43.
- [5] Ruegg M, Meier E, and Nuesch D. Capabilities of dual-frequency millimeter wave SAR with monopulse processing for ground moving target indication [J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2007, 45(3): 539-553.
- [6] Yu Ze, Zhou Yin-qing, Chen Jie, Li Chun-sheng, Wang Peng-bo, and He Min. Performance improvement of the spaceborne three-channel SAR-GMTI system: A novel satellite attitude steering technique. *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Denver USA, 2006: 3184-3187.
- [7] Cloude S R and Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1998, 36(5): 1551-1564.
- [8] Giuli D, Fossi M, and Facheris L. Radar target scattering matrix measurement through orthogonal signals [J]. *IEEE Proc-F*, 1993, 140(4): 233-242.
- [9] 代大海. POLSAR 图像模拟及目标检测与分类方法研究[D]. [硕士论文], 国防科技大学, 2003.
Dai Da-hai. Research on POLSAR image simulation, target detection and classification [D]. NUDT, 2003.

- 刘忠训: 男, 1984 年生, 博士生, 从事 SAR 动目标检测成像、新体制雷达探测技术方面的研究。
- 代大海: 男, 1980 年生, 讲师, 研究方向为极化雷达成像、雷达信号处理与目标识别。
- 王雪松: 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达极化信息处理、新体制雷达探测、信号处理与目标识别等领域研究。