

基于 InSAR 构型的地面运动目标检测与测速方法

文 俊, 廖桂生, 朱圣棋

(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: 提出了一种基于干涉合成孔径雷达构型的地面运动目标检测及测速定位新方法。该方法在高程相位和动目标相位耦合的情况下, 充分利用相应像素对及其相邻像素对的相干信息进行高度补偿从而进行动目标参数估计。针对干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)系统中由于长垂直基线导致杂波自由度随地形起伏大大增加等杂波抑制问题, 在处理过程中引入了联合像素法, 进一步提高了动目标检测和测速精度。通过仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 地面运动目标检测; 图像配准; 杂波抑制; 联合像素

中图分类号: TN 957

文献标志码: A

Method for ground moving target indication and velocity estimation based on InSAR system

WEN Jun, LIAO Gui-sheng, ZHU Sheng-qi

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: This paper presents a new method for ground moving target indication (GMTI) and velocity estimation based on the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) system. Under the circumstance of terrain interferometric phase and velocity phase coupling, this method takes advantage of the coherence information of neighboring pixel pairs to compensate terrain interferometric phase. To suppress the increasing clutter degree of freedom with the terrain induced by long across-track baseline, the joint pixel method is adopted to improve the performance of GMTI and the accuracy of velocity estimation. Simulation results verify the validity and superiority of the proposed algorithm.

Keywords: interferometric synthetic aperture radar; ground moving target indication; image coregistration; clutter suppression; joint pixel

0 引言

地面运动目标检测(ground moving target indication, GMTI)在军事上具有特殊重要的意义, 一直是人们关注的焦点问题。传统的单星天基雷达由于受到基线长度的限制, 大大制约了其 GMTI 性能^[1]。干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)系统具有长基线和多基线的特点, 实现了对目标地面三维地貌的高精度成像^[2]和对地面运动目标的高精度检测, 即能在获取高程信息的同时检测运动目标。并且, 由于其在检测低速运动目标方面具有明显优势^[3], 使得结合 InSAR 做地面运动目标检测成为一个重要的研究方面^[4-5]。

目前, 在 InSAR 构型下进行 GMTI 的相关研究有: 基于

分布式小卫星的地面运动目标检测方法(美国的 TechSat 21 计划); 利用 InSAR 构型具有单航过并能提供长基线和多基线的优点, 降低地面动目标检测的最小可检测速度(minimum detectable velocity, MDV)的方法^[6]; 在 InSAR-GMTI 处理过程中引入运动目标成像的概念从而提高测速精度的方法^[7]。然而, 上述处理方法都很少充分考虑由于较长垂直基线带来的杂波抑制和存在配准误差时动目标测速定位的稳健性问题, 如杂波自由度随地形起伏大大增加等。

针对以上问题, 本文提出了一种稳健的 InSAR 构型下的地面运动目标的检测和测速方法。其处理步骤总结如下: 首先利用 SAR 成像得到复图对, 配准后利用空时二维滤波抑制静止杂波, 然后再对高度信息进行补偿, 最后实施对运动目标的检测和测速。

收稿日期: 2008-09-22; 修回日期: 2009-04-15。

基金项目: 国家自然科学基金(60736009); 教育部长江学者和创新团队支持计划(IRT0645)资助课题

作者简介: 文俊(1984-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为 SAR 地面目标检测。E-mail: wenjun0511@163.com

1 信号模型

首先给出 InSAR 构型的信号模型:

假设 SAR 聚焦成像后,对同一像素(对应于同一地面单元)两颗卫星阵列接收到的复数据矢量 $s_m (m=1,2)$ 可以写为

$$s_1(i, j) = \sigma_1 \exp(-j\phi_{h1}) \exp(-j\phi_{\varphi_1}) \quad (1)$$

$$s_2(i, j) = \sigma_2 \exp(-j\phi_{h2}) \exp(-j\phi_{\varphi_2}) \quad (2)$$

式中, σ_m 为复反射系数; ϕ_{hm} 为静止杂波和高程相位; ϕ_{φ_m} 为目标运动产生的相位。首先可写出两幅复图像的相位差

$$\Psi_s(i, j) = \arg [s_1^*(i, j) s_2(i, j)] \quad (3)$$

式中, Ψ_s 为两幅复图像在 (i, j) 的干涉相位; * 为求共轭; arg 为取相位的运算。若动目标位置为 (i, j) , 则通过估计该点的静止杂波相位来获得动目标相关参数, 该点的静止杂波相位包括高度相位和水平杂波相位。

InSAR 测高原理可由图 1 所示, 当天线工作时, 点目标 P 到 A_1 和 A_2 斜距 r_1 及 r_2 是可以得到的, θ 为侧偏角。设天线 A_1 和 A_2 在同一个垂直于航向法平面内平行运动, 基线长度 B 以及基线与地面垂直所形成的倾角 α 为已知, 则从图 1 所示几何关系得

$$r_2^2 = r_1^2 + B^2 + 2Br_1 \cos(\alpha + \theta) \quad (4)$$

且

$$\theta = \arccos\left(\frac{r_2^2 - r_1^2 - B^2}{2Br_1}\right) - \alpha \quad (5)$$

式中, B 和 α 自行设置; 而斜距 r_1 和 r_2 可以由两颗卫星分别测量。由此可以从式(5)计算得到所需的参数 θ , 从而确定了 P 点在法平面的位置(包括它的高程)。

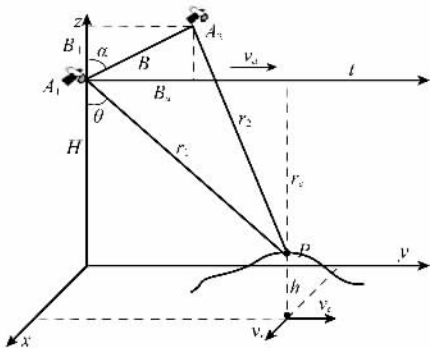


图 1 干涉几何关系

又 $\Delta r = \frac{\phi\lambda}{2\pi}$, ϕ 为两者的相位差, Δr 为采用干涉法测量两天线目标回波的波程差, $\Delta r = r_2 - r_1$ 。

$$\theta = \arccos\left(\frac{(2r_1 + \Delta r)\Delta r - B^2}{2Br_1}\right) - \alpha \quad (6)$$

$$h = H - r_1 \cos \theta \quad (7)$$

在动目标检测的处理过程中, 由于 InSAR 构型存在长的垂直基线, 杂波自由度大大增加, 传统的单像素消杂波方法并不能很好地抑制杂波, 所以采用联合像素消杂波的方法。如图 2 所示将回波数据重构如下。

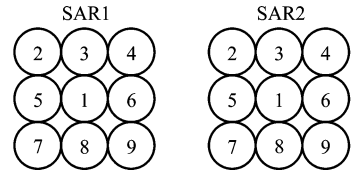


图 2 数据构造示意图

选择待检测像素及周围的 8 个像素(依实际情况而定, 也可以按“十”字选取), 以 2 通道为例, 排列如下

$$\mathbf{x}_m(i, j) = [s_m(i, j), s_m(i-1, j-1),$$

$$s_m(i-1, j), s_m(i-1, j+1), \dots, s_m(i+1, j+1)]^T \quad (8)$$

式中, (i, j) 为待检测像素在图像中的位置, 将多个通道的数据排列成矢量的形式为

$$\mathbf{X}(i, j) = [\mathbf{x}_1^T(i, j), \mathbf{x}_2^T(i, j), \dots, \mathbf{x}_N^T(i, j)]^T \quad (9)$$

该数据是一个维数为 $9N \times 1$ 的矢量。则杂波加噪声的协方差矩阵可以写为

$$\mathbf{R}(i, j) = E\{\mathbf{X}(i, j)\mathbf{X}^H(i, j)\} \quad (10)$$

式中, $E\{\cdot\}$ 表示求数学期望的运算; $[\cdot]^H$ 表示矢量的共轭转置操作。实际系统的协方差矩阵 \mathbf{R} 是通过周围多个满足独立同分布的像素数据平均来估计的

$$\mathbf{R}(i, j) =$$

$$\frac{1}{ML} \sum_{l=-L/2}^{L/2-1} \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \mathbf{X}(i+l, j+m)\mathbf{X}^H(i+l, j+m) \quad (11)$$

式中, L 和 M 分别为沿方位向和距离向选取的样本数, 为保证输出信杂噪比的损失不超过 3 dB^[8](相对于确知协方差矩阵下的最佳信杂噪比), 要求 ML 大于两倍自由度。在动目标检测中, 为了避免目标信号污染样本, 可以在估计协方差矩阵时保留一些保护单元, 即在估计协方差矩阵时避开待检测像素及其最相邻的像素。

然后可得自适应权矢量 $\mathbf{W} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}$, 其中 $\mu = \frac{1}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}}$, \mathbf{a} 为导向矢量。

若运动目标在 SAR 图像上的位置为 (i, j) , 则第 m 颗卫星中的运动目标成像后的信号可以写为^[9]

$$s_m(i, j) = \sigma(i, j) \exp\left(-j \frac{2\pi r(i, j)}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{2\pi v_r(i, j) d_{m1}}{\lambda v_a}\right) \quad (12)$$

式中, $\sigma(i, j)$ 为该运动目标的复反射系数; $r(i, j)$ 为卫星在成像中心时刻到该目标的斜距; d_{m1} 为第 m 颗卫星的天线中心到参考卫星天线中心的沿航向距离; v_a 为卫星速度, v_r 为运动目标的径向速度。 s_1 和 s_2 干涉后相位差为 $\Delta\varphi$, 由式(12)可得

$$v_r = \frac{\lambda v_a \Delta\varphi}{2\pi d} \quad (13)$$

式中, $\Delta\varphi$ 的存在相位模糊问题, 其主值区间为 $[-\pi, \pi]$ 。由式(13)得到对应的无模糊速度 v_r 为 $\frac{\lambda v_a}{2d}$, 即无模糊测速范围为 $\left[-\frac{\lambda v_a}{2d}, \frac{\lambda v_a}{2d}\right]$, 而由 $2\pi n = \frac{2\pi d}{\lambda v_a} v_r$, 得到盲速 $v_{r\text{blind}} = n \frac{\lambda v_a}{d}$ 。

2 实验步骤

信号处理流程框图如图 3 所示。



图 3 信号处理流程框图

步骤 1 SAR 成像处理。利用传统的 SAR 成像技术对回波进行成像处理。

步骤 2 SAR 图像配准。每颗卫星的接收回波进行 SAR 成像以后, 对所有图像进行配准。图像配准可以采用 Hill 的像素配准法^[10]及 Gabriel 等人提出的亚像素配准法^[11]。图像配准的精度一般要求到达十分之一分辨单元。经过图像配准处理以后, 不同 SAR 图像中的同一像素对应于同一地面单元。为了降低图像配准的难度, 我们也可以考虑适当降低距离分辨率并结合基线长度的测量和估计结果。

步骤 3 杂波抑制。SAR 图像经过配准处理以后, 利用空时自适应处理来抑制图像内的杂波。抑制杂波的阵列权矢量 w 由

$$w = \mu R^{-1} a \quad (14)$$

得到, 其中 $a = [1, 0, \dots, 0]^T$ 。理论上, 为约束运动目标的输出增益恒定, a 应为运动目标导向矢量 a_r 。由于运动目标信号不会损失, 这里用 $[1, 0, \dots, 0]$ 代替 a_r ^[12]。协方差矩阵由独立同分布的样本来估计, 从相邻像素中选取样本时应保留保护单元, 即沿待处理的像素及其最相邻像素周围取样本, 杂波加噪声的协方差矩阵 R 由下式进行估计

$$R = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L s_l s_l^H \quad (15)$$

式中, $L (L \geq 2N - 1)$ 为从相邻像素中获得独立同分布样本数; s_l 为第 l 个相邻像素的阵列矢量。

步骤 4 高程相位补偿。两幅 SAR 图像干涉相位为

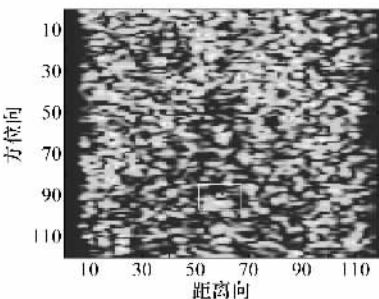


图 4 动目标检测前幅度图

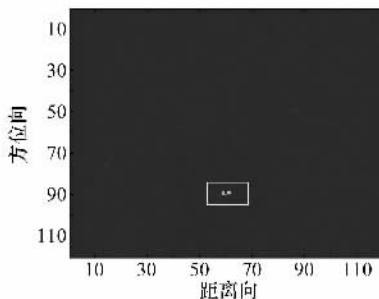


图 5 联合像素法动目标显示结果

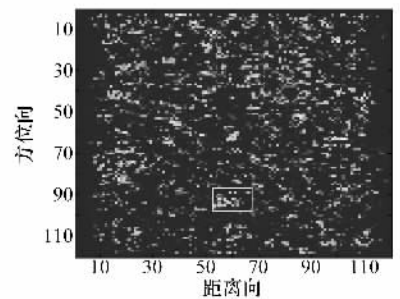


图 6 单像素法动目标显示结果

$$\Psi(i, j) = \text{mean} \left\{ \sum_{m=-L}^L \sum_{n=-K}^K \arg [s_1^*(i+m, j+n) \cdot s_2(i+m, j+n)] \right\} \quad (16)$$

式中, $s_1(i, j)$ 和 $s_2(i, j)$ 分别代表复图像 1 和 2 的复值; L 和 K 代表在距离向和方位向滑动窗口大小, 其值根据相位波动的幅度选取, 本文取 $L = K = 3$ 。

则补偿后的 SAR 图像像素值为

$$\hat{s}(i, j) = s(i, j) \Psi^*(i, j) \quad (17)$$

式中, $\hat{\cdot}$ 为估计值。

步骤 5 恒虚警检测 (constant false alarm detection, CFAR) 及地面运动目标测速定位。对 SAR 进行杂波抑制和高程相位补偿之后, 利用现有的 CFAR 技术检测地面运动目标。对检测到的运动目标进行测速定位。根据卫星速度 v_a 并由式 (13) 计算检测到的目标速度 v_r , 可以得出目标的定位位置

$$x_0 = x + r_c \frac{v_r}{v_a} \quad (18)$$

式中, r_c 为目标到平台的斜距。

3 仿真实验

为了验证本文所述的原理方法, 进行了仿真实验, 其参数如表 1 所示。

表 1 仿真实验参数

参数	取值
卫星高度/km	750
卫星速度/(m/s)	7 492.7
波长/cm	3
脉冲重复频率/Hz	4 464
垂直基线/m	281.4
水平基线/m	281.4
发射带宽/MHz	60

图 4 为未进行杂波相消前的 SAR 图像, 对两幅 SAR 图像进行精配准。图 5 为对 SAR 图像进行联合像素消杂波后的动目标检测结果, 白色方框标注为含有动目标信息区域, 从图 5 标注的区域可以明显看出周围的杂波噪声得到很好的抑制并明显的将动目标检测出来。图 6 由于没有采用联合像素消杂波, 较图 5 可直观地看出白色方框内尚存很多噪点并不能很好地将动目标检测出来。通过比较图 4 可知只有当 CFAR 很高时才有可能将动目标检测出来, 故在实际运用中并不能实现动目标检测。

SAR 图像当无配准误差条件下动目标检测的测速误差如图 7 所示,测速误差在 0.055 m/s 左右。当速度为 0.2 m/s 时,信噪比为 -10 dB~20 dB 的测速误差如图 8,随着信噪比的增加,动目标测速的误差也逐渐从 0.12 m/s 减小到 0.05 m/s。

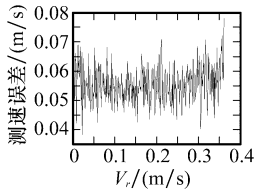


图 7 无配准误差条件下,信噪噪比为 8 dB 的测速误差

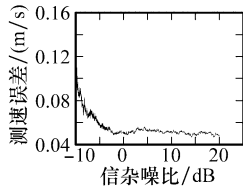


图 8 速度为 0.2 m/s,信噪噪比为 -10 dB~20 dB 的测速误差

当配准误差为 0.2 个像素和 1 个像素时动目标检测的测速误差如图 9 和图 11 所示,测速误差从 0.055 m/s 上升到 0.065 m/s。当速度为 0.2 m/s 时,信噪噪比为 -10 dB~20 dB 的测速误差分别如图 10 和图 12,随着信噪噪比的增加测速误差不断减小,并维持在 0.05 m/s。由此可见采用联合像素消杂波的方法在存在像素误差的情况下具有较好的检测性能。

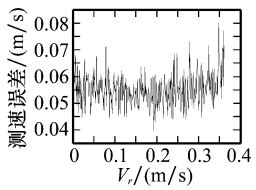


图 9 配准误差为 0.2 像素,信噪噪比为 8 dB 的测速误差

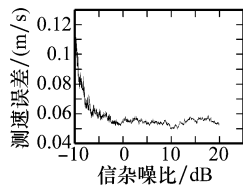


图 10 速度为 0.2m/s,信噪噪比为 -10 dB~20 dB 的测速误差

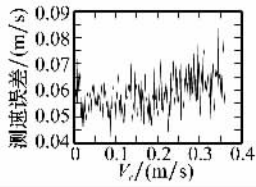


图 11 配准误差为 1 像素,信噪噪比为 8 dB 的测速误差

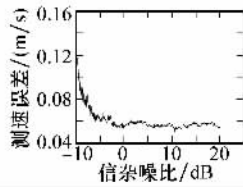
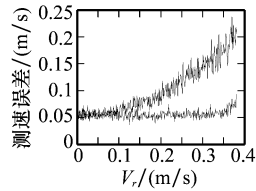


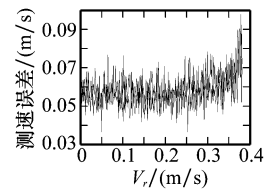
图 12 速度为 0.2 m/s,信噪噪比为 -10 dB~20 dB 的测速误差

从图 13 可以看出进行高度补偿和无高度补偿的动目标测速误差,由于干涉相位中耦合了高程相位,倘若不进行高度补偿,测速误差将大大增加。而采用本文所述的高度补偿法可以明显提高测速的精度,将测速误差控制在 0.05 m/s 左右,所以在 InSAR 构型下的动目标检测过程中进行高程补偿是不可或缺的步骤。图 14 表示的是存在配准误差的情况下联合像素测速法与单像素法测速的误差比较,从图中可以看出,由于联合像素法充分利用了待检测目标单元周围的相邻像素的相干信息,使得测速精度高于单像素法。



—: 无高度补偿; —: 高度补偿后

图 13 有无高度补偿的测速误差性能比较



—: 单像素; —: 联合像素

图 14 联合像素与单像素测速误差比较

4 结 论

本文提出了一种基于干涉合成孔径雷达构型的地面运动目标检测及测速定位新方法,并在进行动目标检测中采用了联合像素消杂波的方法,提高了检测的精度。通过仿真实验,分析了该方法在无配准误差和存在配准误差时检测性能,并对比了非 InSAR 构型的动目标检测结果。本方法利用了 InSAR 对高度信息进行相位补偿,并利用了相邻像素的相干信息,实现了有高程信息时的动目标检测及测速定位,通过仿真实验验证了本方法的有效性。

参考文献:

- [1] Martin M, Stallard M. Distributed satellite missions and technologies—the TechSat 21 program[C]// *Proc. of the AIAA Space Technology Conference and Exposition*, 1999; AIAA - 99 - 4479.
- [2] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[C]// *Proc. of the IEEE*, 2000, 88(3): 333 - 382.
- [3] Yadin E. A Performance evaluation model for a two port interferometer SAR-MTI [C] // *IEEE National Radar Conference*, 1996; 261 - 266.
- [4] 唐晓青, 向茂生, 吴一戎. 基于回波数据的机载双天线 InSAR 运动补偿[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(10): 2311 - 2316. (Tang Xiaqing, Xiang Maosheng, Wu Yirong. Raw data-based motion compensation of airborne dual-antenna InSAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(10): 2311 - 2316.)
- [5] 刘楠, 张林让, 张娟, 等. 多频-多基线 MIMO InSAR 及其性能分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(9): 2090 - 2095. (Liu Nan, Zhang Linrang, Zhang Juan, et al. Multifrequency-multi-baseline MIMO InSAR and its performance analysis[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(9): 2090 - 2095.)
- [6] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inverse Problem*, 1998, 14(4): 1 - 54.
- [7] 李道京, 汤立波, 吴一戎, 等. 顺轨双天线机载 InSAR 的地面运动目标检测研究. *电子与信息学报*, 2006, 28(6): 961 - 964.
- [8] Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, 10(6): 853 - 863.
- [9] 刘颖, 廖桂生, 周争光. 对图像配准误差稳健的分布式星载 SAR 地面运动目标检测及高精度的测速定位方法[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 1009 - 1014.
- [10] Hill G M. Researchs in the lunar theory[J]. *American Journal of Mathematics*, 1878, 1(1): 5 - 26.
- [11] Gabriel A K, Goldstein R M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(5): 857 - 872.
- [12] 李真芳, 保铮. 基于成像的分布式卫星 SAR 系统地面运动目标检测(GMTD)及定位技术[J]. *中国科学*, 2005, 35(6): 597 - 609.