

顺轨双天线机载 InSAR 的地面运动目标检测研究

李道京 汤立波 吴一戎 丁赤彪

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 基于高分辨率顺轨双天线机载 InSAR, 研究了地面运动目标检测问题。采用双通道干涉处理, 抑制地面静止杂波。针对高分辨率 InSAR 合成孔径时间较长的特点, 将运动目标成像处理的概念引入运动目标检测过程, 对运动目标信号实施距离徙动校正后, 再聚焦成像, 从而改善检测信噪比和信杂比, 并进一步提高测速精度。InSAR 仿真数据的处理结果表明了该方法的有效性。

关键词 合成孔径雷达, 干涉合成孔径雷达, 地面运动目标检测, 地面运动目标成像, 干涉处理

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-0961-04

Ground Moving Target Indication Based on Along Track Airborne InSAR with Two Antennas

Li Dao-jing Tang Li-bo Wu Yi-rong Ding Chi-biao

(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The Ground Moving Target Indication(GMTI) is investigated based on along track high resolution airborne InSAR with two antennas. The two antenna interferometric processing is used to suppress ground clutter. The concept of moving target imaging is introduced for GMTI of high resolution InSAR with longer synthetic aperture time. The range migration correction and refocus processing for moving target signals are implemented to improve the signal-noise rate and signal-clutter rate for their detection and velocity measurement. The processing results of simulated InSAR data show the effectiveness of the new method.

Key words SAR, InSAR, Ground Moving Target Indication (GMTI), Ground moving target imaging, Interferometric processing

1 引言

顺轨双天线机载干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)原理上可实现在较短的时间间隔内, 在同一空间位置, 对地面目标的两次观测, 进而完成地面运动目标检测(Ground Moving Target Indication, GMTI)和目标运动速度测量。与单天线合成孔径雷达相比, 它在检测处于地面主杂波区内的低速运动目标方面具有明显的优势^[1,2], 故InSAR-GMTI一直是国内外合成孔径雷达研究工作的一个重要方面。

目前在InSAR-GMTI研究上, 一种技术途径为先利用顺轨双通道信号的干涉处理抑制地面静止杂波, 然后再实施对运动目标的检测^[1,2]; 另一种技术途径为直接对两幅SAR图像进行干涉处理, 利用运动目标干涉相位的变化在复平面完成对其检测^[3]。两种技术途径相比较, 前者具有鲜明的空-时二维滤波特征, 后者具有和SAR图像应用紧密结合的特点。但无论上述哪一种处理方法, 都很少考虑地面运动目标

距离徙动带来的影响, 或者在GMTI场合下, 采取降低SAR分辨率的手段。而事实上, 在高分辨率情况下, 由于合成孔径时间较长, 即使地面运动目标速度较低, 也会产生较大的距离徙动, 进而造成较大的信噪比和信杂比的损失并导致检测概率的下降。

本文研究了高分辨率顺轨双天线InSAR中的地面运动目标的检测和速度测量问题, 在处理过程中引入了运动目标成像的概念^[4], 从而提高了运动目标信号的检测能力。

2 基本理论

顺轨双天线 InSAR 的工作模式较多, 通常两个天线具有同时接收能力, 也可具有交替发射信号能力。采用两天线交替发射模式时, 会使等效基线变长, 有利于提高测速精度, 但同时使等效的 PRF 降低。本文研究假定一个天线始终发射, 两天线同时接收, 这样做可降低高 PRF 时两天线交替发射对天线转换开关速度的要求。

由于地面低速运动目标通常处于地杂波区, 其信号强度又较小, 在 InSAR-GMTI 处理中首先进行地杂波的对消将有

利于对低速运动目标的检测。地杂波的对消可在 SAR 的图像域完成,也可在信号的距离-方位多普勒频率 (r, f_d) 域内完成,与前者相比,后者具有可同时处理高速运动目标的优点。

与其它主要用于地面低速运动目标检测的机载雷达不同, InSAR 的主要任务是获取高分辨率干涉图像,高分辨率成像要求长的合成孔径时间,这使得在 GMTI 中常用的缓解地面运动目标距离徙动影响的子孔径相干处理^[2]方法并不实用。

基于上述考虑,本文方法将首先进行运动目标的距离徙动校正和成像处理,并在 (r, f_d) 域完成地杂波的干涉对消,进一步实现运动目标信号检测和速度测量,提出的一个顺轨双天线 InSAR-GMTI 信号处理方案如图 1 所示。

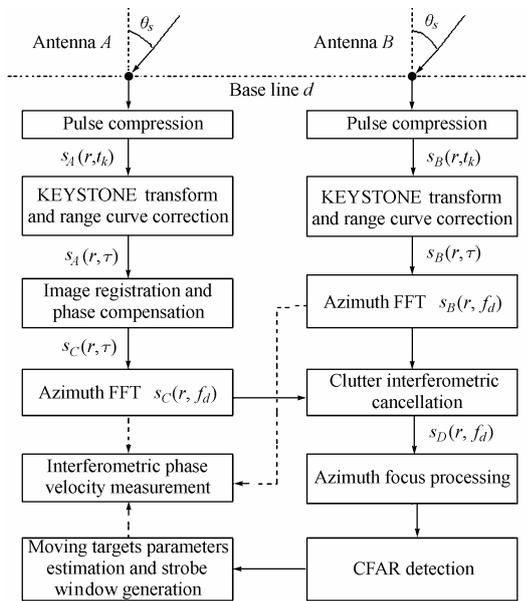


图 1 信号处理流程框图

Fig.1 Signal processing diagram

假设 InSAR 天线基线长度为 d , 下倾角为 ψ , 载机速度为 V , 斜视角为 θ_s , 目标斜距离为 r , 方位时间为 t_k , 距离频率为 f , 方位多普勒频率为 f_d , 两通道的回波信号分别为 $s_A(r, t_k)$ 和 $s_B(r, t_k)$, 信号处理基本步骤如下:

(1) 运动目标的距离徙动校正 运动目标的距离徙动包括距离走动和距离弯曲两部分。对信号 $s_A(r, t_k)$ 和 $s_B(r, t_k)$ 在 (f, t_k) 域分别进行 KEystone 变换^[4], 即令

$$t_k = \left(\frac{f_c}{f + f_c} \right) \tau \quad (1)$$

其中 f_c 为信号的载频, τ 为新的方位时间。

KEystone 变换可消除运动目标信号的距离-多普勒线性耦合作用,从而实现运动目标距离走动校正。进一步,构造相位函数

$$\Psi(f, \tau) = \exp[-j\pi f_r \tau^2 / (1 + f/f_c)] \quad (2)$$

其中 f_r 为地面静止目标信号的调频率。

由于通常 SAR 载机的飞行速度远大于地面运动目标的

方位速度,距离弯曲(主要是二阶项)主要是由载机的运动造成的。用 $\Psi(f, \tau)$ 在 (f, τ) 域对 KEystone 变换后的信号进行相位补偿,可获得经过距离弯曲校正的运动目标信号 $s_A(r, t_k)$ 和 $s_B(r, t_k)$ 。实际应用时,距离弯曲校正可在距离向分块进行, f_r 可以根据聚焦深度为参考进行调整。

(2) 图像配准相位补偿^[5] 当 InSAR 工作在正侧视时,两通道静止杂波图像在方位多普勒频率向的位置误差配准,可通过在方位时间域的相位补偿实现,图像配准相位补偿表达式为

$$s_c(r, \tau) = s_A(r, \tau) \exp[-j2\pi V d \tau / (\lambda r)] \quad (3)$$

(3) 在 (r, f_d) 域内的杂波干涉对消 基于干涉处理的杂波对消表达式为^[1]

$$S_D(r, f_d) = S_B(r, f_d) - W(r, f_d) S_C(r, f_d) \quad (4)$$

$$W(r, f_d) = \exp[j\pi d f_d / (V \cos \theta_s)] \quad (5)$$

当 $W(r, f_d) = -1$ 时,有

$$S_D(r, f_d) = S_B(r, f_d) + S_C(r, f_d) \quad (6)$$

此时的求和处理可用于对主杂波区外高速运动目标的检测。

(4) 运动目标信号检测 本文利用干涉处理完成地面静止杂波对消,提高了运动目标的信杂比,运动目标的距离徙动校正的实施,改善了运动目标的信噪比,从而为其在 (r, f_d) 域的恒虚警(CFAR)检测创造条件。

当地面运动目标存在方位速度,会产生散焦现象,并导致信噪比降低。利用 DECHIRP 处理实现信号的 Radon-Wigner 变换^[6],可完成信号的聚焦处理,此时信号的 CFAR 检测范围拓展到距离-方位多普勒频率-多普勒调频率域。

(5) 选通条件下的干涉相差测速 利用 CFAR 检测结果可在 (r, f_d) 域形成选通门,供在选通条件下实施两通道信号干涉相差测速,以减少干涉处理量和其它单元的相位干扰。与此同时,运动目标方位多普勒频率的估计,也给解决高速运动目标干涉相位模糊问题带来方便。

特别要指出的是,图 1 方案中干涉相差在 (r, f_d) 域获得,在两通道信号进行干涉相差测量前,需首先完成空域相位补偿,即有

$$\Delta\phi(r, f_d) = \text{Phase}[S_B^*(r, f_d) W(r, f_d) S_C(r, f_d)] \quad (7)$$

其中 Phase 为复信号的相位计算函数,地面运动目标在地距方向的速度为^[5]

$$V_{gr} = [\Delta\phi(r, f_d) \lambda V] / [2\pi d \cos(\psi)] \quad (8)$$

由文献[1]可知,当信号与杂波和噪声功率之比大于 13dB 时,在虚警率 10^{-4} 的条件下,对运动目标的发现概率约为 0.6。而信噪比越高,对干涉相差的估值精度越高,用其获得的测速精度也越高。信噪比 13dB 时,干涉相差的估值精度约为 0.16rad。

完成运动目标检测和速度测量后,根据其参数的估计值,可在 SAR 图像上对其进行标识。

3 仿真结果

对本文给出的信号处理流程进行仿真, 其参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数表
Tab.1 Simulation parameters

InSAR 参数		地面静止目标(杂波)参数	
信号载频 f_c	10GHz	目标个数	24
基线长度 d	0.6m	方位间距	250m
载机速度 V	75m/s	距离间距	30m
载机高度 H	5000m	距离场景尺寸	120m
天线斜视角 θ_s	0°(正侧视)	方位场景尺寸	1000m
天线下倾角 ψ	30°	场景中心斜距	10 km
重复频率	1000Hz	杂噪比	27dB (脉冲压缩后)
距离分辨率	1m	地面运动目标参数	
距离单元间隔	0.5m	运动目标个数	2
合成孔径时间	4s	运动目标位置	场景中心
方位分辨率	0.7m (斜距 10km)	目标 1 速度	-0.5m/s (地距方向)
		目标 1 信噪比	0 dB (脉冲压缩后)
		目标 2 速度	7m/s (地距方向)
		目标 2 信噪比	-6 dB (脉冲压缩后)

根据图 1 给出的信号处理流程, 图 2 给出了对仿真信号的处理结果, 图 3 给出了对两个运动目标信号在 (r, f_d) 域的恒虚警检测结果。

运动目标在地距方向存在运动速度, 会导致其图像在方位多普勒频率上的偏移。在图 2 中, 位于场景中心的运动目标 2, 由于其运动速度较高, 其成像位置的偏移量远大于运动目标 1。

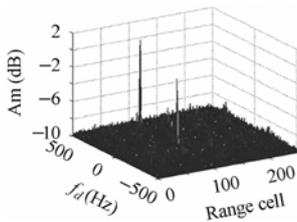


图 2 对仿真信号的处理结果
Fig.2 Processing result of simulation signal

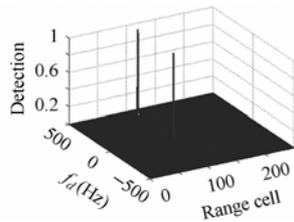


图 3 对运动目标的检测结果
Fig.3 Detection result of moving targets

运动目标的距离徙动会使信号能量分布在不同的距离

单元中, 并使检测信噪比降低。图 4 给出了仿真信号未进行距离徙动校正的处理结果, 由于运动目标 2 的距离向速度较高, 距离走动较大, 其在 (r, f_d) 域的信噪比很低, 不可能被检测出来。另外, 运动目标 1 的信噪比略有降低, 说明距离弯曲对信噪比的影响较小。由此可见运动目标距离徙动校正对运动目标检测的重要性, 也再次表明了 InSAR-GMTI 问题的复杂性。

图 5 给出了仿真信号未进行杂波干涉对消的处理结果。由于位于场景中心的两个运动目标的信噪比与静止杂波的信噪比相差近 30dB, 运动目标信号不能被观测到。尽管本文方法在 (r, f_d) 域获得的成像结果存在较大的几何失真, 但这并不影响对运动目标信号的检测和在 SAR 图像上的标识。对比图 2 的处理结果, 可看出干涉处理对静止杂波的抑制能力是很强的。

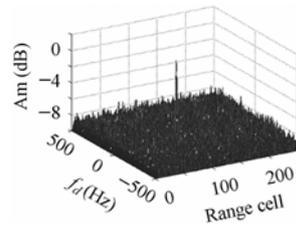


图 4 仿真信号未进行距离徙动校正的处理结果
Fig.4 Simulation signal processing result without range migration correction

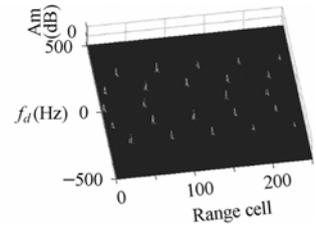


图 5 仿真信号未进行杂波干涉对消的处理结果
Fig.5 Simulation signal processing result without clutter cancellation

利用 CFAR 检测结果在 (r, f_d) 域形成选通门, 获得的两通道运动目标信号干涉相差分别约为 0.6 rad (运动目标 1) 和 2.4 rad (运动目标 2), 如图 6 所示。

理论上, 运动目标 1 产生的干涉相差应为 0.73 rad; 运动目标 2 产生的干涉相差应为 -10.22 rad (以 2π 为模处理后应为 2.34 rad)。实际的干涉相差处理结果和理论值较为接近, 说明了本文方法对运动目标测速的有效性。

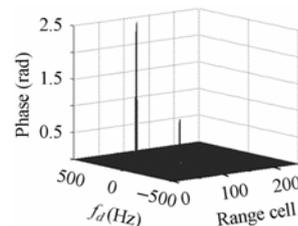


图 6 选通条件下两通道运动目标信号干涉相差
Fig.6 Two channels interferometric phase of moving targets with strobe window

4 结束语

本章研究了高分辨率顺轨双天线机载 InSAR 的运动目标检测问题, 将对杂波的干涉对消处理和对运动目标的成像处理两个概念相结合, 对运动目标信号实施距离徙动校正, 聚焦成像处理后再进行 CFAR 检测, 以提高信号与杂波和噪声比。仿真结果表明了本文方法对低速和高速地面运动目标

均具有较好的检测性能。与此同时,在 (r, f_d) 域基于选通处理的干涉相差测量,也具有较高的测速精度。

参 考 文 献

- [1] Yadin Eli. A Performance evaluation model for a two port interferometer SAR-MTI, 1996 IEEE National Radar Conference, Michigan, 1996: 261–266.
- [2] 朱岱寅, 朱兆达. 机载干涉 SAR/ISAR 对地面慢速目标成像研究. 电子与信息学报, 2003, 25(5): 585–590.
- [3] 高飞, 毛士艺, 玉振明, 袁运能. 一种星载自动检测地面慢速运动目标方法的性能分析. 电子与信息学报, 2004, 26(增刊): 303–309.
- [4] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR imaging of moving targets. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188–199.
- [5] 郑明洁. 合成孔径雷达运动目标检测和成像研究. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2003 年 3 月.
- [6] 李道京, 张麟兮, 俞下章. 近程 SAR 图像中的地面运动目标检测. 西北工业大学学报, 2003, 21(6): 744–748.
- 李道京: 男, 1964 年生, 博士后, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理.
- 汤立波: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达运动目标检测与成像.
- 吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理.
- 丁赤飏: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理.