InSAR 图像配准雷达几何法处理性能分析

路瑞峰1,赵 迪1,2,侯雨生1,陈重华1,魏 春1,陈筠力1

(1. 上海卫星工程研究所,上海 201109; 2. 中科卫星应用德清研究院

浙江省微波目标特性测量与遥感重点实验室,浙江 湖州 313200)

摘 要:图像配准是干涉合成孔径雷达(InSAR)信号处理的关键步骤。基于雷达几何的 InSAR 图像配准方法。利用主辅雷达成像几何和外部数字高程模型(DEM)进行主辅 SAR 图像配准。基于 SAR 图像距离多普勒定位方程,系统梳理了配准处理精度的影响因素,对各误差因素的作用机理进行了理论分析,并综合分析了该算法对重复航过和单次航过 InSAR系统图像的配准处理性能。仿真结果验证了理论分析方法的有效性。分析结果对我国InSAR地面系统建设和相关卫星指标论证具有重要的支撑作用。

关键词:干涉合成孔径雷达;图像配准;雷达几何;合成孔径雷达(SAR)距离多普勒方程;性能分析
 中图分类号:TN 957 文献标志码:A DOI:10.19328/j. cnki. 1006-1630. 2018. 06. 012

Performance Analysis of InSAR Image Coregistration Algorithm Based on Radar Geometry

LU Ruifeng¹, ZHAO Di^{1,2}, HOU Yusheng¹, CHEN Chonghua¹, WEI Chun¹, CHEN Junli¹ (1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 2. Laboratory of

Target Microwave Properties, Deqing Academy of Satellite Applications, Huzhou 313200, Zhejiang, China)

Abstract:Image coregistration is one of the key steps in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) processing. The image coregistration method based on radar geometry utilizes the multi-static SAR focusing geometry and coarse digital elevation model (DEM) to carry out InSAR image coregistration. Based on the SAR range-Doppler equations, this paper systematically analyzes the error sources of the co-registration algorithm. Then, the effects of the errors are studied theoretically in the first time. The performances of the algorithm on the repeated orbit and distributed InSAR are discussed comprehensively. Simulation results verify the validity of the theoretical analysis. This work can effectively support the development of InSAR processor and the satellite designation.

Keywords:interferometric synthetic aperture radar(InSAR); image coregistration; radar geometry; synthetic aperture radar range-Doppler equations; performance analysis

0 引言

干涉合成孔径雷达(InSAR)是获取高精度地面高程模型(DEM)的重要遥感手段^[1-3]。它利用沿垂 直航向分布的2部SAR天线,以不同视角观测同一 地区,并对获取的2幅复SAR图像进行干涉处理, 求取主副雷达天线相位中心与目标之间的斜距差, 进而获取观测区域的DEM。图像配准是InSAR处 理的关键步骤,其精度不仅会影响主辅 SAR 图像的 相干性,在斜视雷达几何下,还会在干涉条纹图中引 入相位偏差^[4]。提高图像配准精度对提高 DEM 精 度具有重要意义。

目前,国内外对 InSAR 图像配准进行了深入研究,并提出了多种有效的处理算法,主要包括最大相关系数法、最大频谱法、点目标配准法和雷达几何

收稿日期:2018-06-10;修回日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金(61601298);浙江省微波目标特性测量与遥感重点实验室开放基金(2018KF01,2018KF04)

作者简介:路瑞峰(1984—),男,硕士,工程师,主要研究方向为星载 SAR 系统设计与分析。

法^[2-7]。前3种方法均基于数据,其配准性能与数据 质量密切相关,而基于雷达几何的图像配准方法是 一种独立于 SAR 图像复数据的方法。雷达几何法 因其在复杂地形下稳健的配准性能而受到广泛关 注^[5-7],但其配准精度与图像几何参数和外部辅助 DEM 精度密切相关。文献[7]研究了 DEM 误差对 雷达几何法图像配准性能的影响,但没有对图像几 何参数精度对算法性能的影响进行分析。

本文从 SAR 图像雷达几何出发,利用偏微分方 程系统研究了 SAR 几何参数误差、粗 DEM 精度等 非理想因素对雷达几何 InSAR 图像配准算法性能 的影响。本文内容安排如下:第1节介绍了利用雷 达几何进行 InSAR 图像配准的基本原理和处理流 程,第2节分析了各非理想因素对 SAR 图像反定位 精度的影响,第3节分析了雷达几何图像配准法对 重复航过和单航过 InSAR 系统的配准性能,最后在 第4节对全文进行了总结。

1 基于雷达几何的 InSAR 图像配准 方法

InSAR 图像配准雷达几何法主要依据主辅 SAR 图像的雷达成像距离多普勒几何^[6],即

$$\frac{\mathbf{v}_{t,i}(t_{a,i}) \bullet \left[\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{t,i}(t_{a,i}) \right]}{|\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{t,i}(t_{a,i})|} + \frac{\mathbf{v}_{r,i}(t_{a,i}) \bullet \left[\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{r,i}(t_{a,i}) \right]}{|\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{r,i}(t_{a,i})|} = \lambda f_{dfc,i} \quad (1)$$

 $|p_{target} - p_{t,i}(t_{a,i})| + |p_{target} - p_{r,i}(t_{a,i})| = c\tau_i$ (2) 式中: p_{target} 为地面目标位置矢量; $p_{t,i}(t)$ 和 $v_{t,i}(t)$ 分 別为第 *i* 幅 SAR 图像发射天线相位中心在方位时 刻 *t* 的位置和速度; $p_{r,i}$ 和 $v_{r,i}$ 分別为第 *i* 幅 SAR 图 像接收天线相位中心位置和速度; λ 为雷达波长; $f_{dfe,i}$ 为第 *i* 幅 SAR 图像成像多普勒中心频率; $t_{a,i}$ 和 τ_i 分別为该目标对应的方位时间和信号传播时 延。在式(1)中,令 $p_{t,i}(t) = p_{r,i}(t), v_{t,i}(t) =$ $v_{r,i}(t)$,即可得到单基 SAR 系统的距离多普勒方 程。

本文采用地球固定坐标系。当天线相位中心状态矢量和雷达成像参数已知时,可结合地球模型解算目标空间位置,实现 SAR 图像目标几何定位^[8]。 常用的地球椭球模型为

$$\frac{(p_x)^2 + (p_y)^2}{(R_e + h)^2} + \frac{(p_z)^2}{(1 - f)^2 (R_e + h)^2} = 1 \quad (3)$$

式中: $p_{\text{target}} = \begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z \end{bmatrix}^T$; R_e 为地球赤道半径;

f 为地球扁率因子;h 为目标高程。当观测场景内的 目标点三维坐标已知时,通过求解式(1),(2)也可解 算出该目标在 SAR 成像几何下的方位时间和脉冲 延迟,此时目标在第 i 幅 SAR 图像中的方位和距离 坐标 (n_{a,i},n_{r,i})可由式(4),(5)求得,即

$$n_{\mathrm{a},i} = (t_{\mathrm{a},i} - t_{\mathrm{a},i}) \bullet f_{\mathrm{p},i} \tag{4}$$

$$n_{\mathrm{r},i} = (\tau_i - \tau_{\mathrm{s},i}) \bullet f_{\mathrm{s},i} \tag{5}$$

式中: $t_{as,i}$ 和 $\tau_{s,i}$ 分别为第i幅 SAR 图像方位起始时间和距离起始时间; $f_{p,i}$ 和 $f_{s,i}$ 分别为第i幅 SAR 图像的脉冲重复频率和距离向采样频率。该过程被称为 SAR 图像反定位。

利用粗 DEM 求取图像配准偏移量,其基本流 程如图 1 所示,主要包括:

1) 从 SAR 主图像中,按 128 格×128 格网间距 选择图像配准控制点^[9],并提取其雷达成像参数(包 括雷达斜距、成像多普勒中心、雷达波长),以及天线 相位中心状态(包括位置、速度)测量信息。

2)利用 RD 法根据辅助粗 DEM 对控制点进行 目标定位。

3)利用辅 SAR 图像数据录取参数(包括方位 和距离起始时间、脉冲重复频率、距离向信号采样频率),求取目标点在辅 SAR 图像上的方位和距离向 坐标,并据此确定主辅 SAR 图像方位和距离向配准 偏移量。

4)重复步骤1~3,直至求取出所设全部控制点
 的配准偏移量。

5) 内插出 SAR 图像各像素的配准偏移量,并 对 SAR 辅图像进行重采样。

2 雷达几何法 SAR 图像配准误差源 及其影响分析

在实际 InSAR 系统中,利用雷达几何进行图 像配准,其主要影响因素有主辅 SAR 图像天线相 位中心状态测量误差、成像处理误差、GPS 时间记 录误差、电子延迟误差和大气延迟误差引起的斜距 误差等 SAR 图像几何参数误差,以及粗精度 DEM 高程误差^[8]。利用表 1 中的德国 TerraSAR-X系统 参数^[10]对 SAR 图像目标反定位精度进行分析。

由式(1)~(5)可知,影响雷达几何法 SAR 图像 配准精度的主要因素包括天线相位中心速度误差、 天线相位中心位置误差、控制点位置误差、方位定时 误差、斜距误差等,具体分析如下。记



图 1 粗 DEM 辅助 InSAR 图像配准偏移量求取流程 Fig. 1 InSAR image coregistration offset extraction process with coarse DEM

Tab. 1 Typical system parameters of TerraSAK-A					
参数	值				
轨道高度/km	511.5				
卫星速度/(m•s ⁻¹)	7 680				
雷达下视角/(°)	20~45				
中心频率/GHz	9.65				
采样频率/MHz	110				
脉冲重复频率/Hz	3 700				
成像多普勒中心频率/Hz	0				

	表	1 Ter	raSAR-2	(卫星典型	杀车	充参数
ab.	1	Typical	system	parameters	of	TerraSAR-X

注:如无特殊说明,仿真中取下视角为28.5°。

由隐函数存在定理可知, Jacobian 矩阵为

$$\mathbf{J}_{i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t_{\mathrm{a},i}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \tau_{i}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial t_{\mathrm{a},i}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \tau_{i}} \end{bmatrix}$$
(8)

式中:

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i}}{\partial t_{a,i}} = \frac{\boldsymbol{a}_{t,i}(t_{a,i}) \cdot [\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})] - |\boldsymbol{v}_{t,i}(t_{a,i})|^{2}}{|\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})|} + \frac{\{\boldsymbol{v}_{t,i}(t_{a,i}) \cdot [\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})]\}^{2}}{|\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})|^{3}} + \frac{\boldsymbol{a}_{r,i}(t_{a,i}) \cdot [\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})]^{2}}{|\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})|} + \frac{\{\boldsymbol{v}_{r,i}(t_{a,i}) \cdot [\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})] - |\boldsymbol{v}_{r,i}(t_{a,i})|^{2}}{|\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})|} + \frac{\{\boldsymbol{v}_{r,i}(t_{a,i}) \cdot [\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})] - |\boldsymbol{v}_{r,i}(t_{a,i})|^{2}}{|\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})|} + \frac{\{\boldsymbol{v}_{r,i}(t_{a,i}) \cdot [\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})]\}^{2}}{|\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})|^{3}}$$
(9)

$$\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{\text{r},i}(t_{\text{a},i}) |^{3}$$
$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i}}{\partial \tau_{i}} = 0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{G}_{i}}{\partial t_{\mathrm{a},i}} = -\frac{\boldsymbol{v}_{\mathrm{t},i}(t_{\mathrm{a},i}) \cdot \left[\boldsymbol{p}_{\mathrm{target}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{t},i}(t_{\mathrm{a},i})\right]}{\left|\boldsymbol{p}_{\mathrm{target}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{t},i}(t_{\mathrm{a},i})\right|} - \frac{\boldsymbol{v}_{\mathrm{r},i}(t_{\mathrm{a},i}) \cdot \left[\boldsymbol{p}_{\mathrm{target}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{r},i}(t_{\mathrm{a},i})\right]}{\left|\boldsymbol{p}_{\mathrm{target}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{r},i}(t_{\mathrm{a},i})\right|}$$
(11)

$$\frac{\partial \boldsymbol{G}_i}{\partial \tau_i} = -c \tag{12}$$

其中, **a**_{t,i}(t) 和 **a**_{r,i}(t) 分别为 t 时刻第 i 幅 SAR 图 像发射和接收天线相位中心加速度。

2.1 天线相位中心速度误差

假定发射和接收天线3轴速度误差分别为 $\Delta v_{t,i}$ 和 $\Delta v_{r,i}$,则该误差引起的目标在第i幅 SAR 图 像中反定位误差为

$$\begin{split} & \left[\begin{matrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{matrix} \right]_{\Delta v_{\mathrm{t},i},\Delta v_{\mathrm{r},i}} = \\ & \left[\begin{matrix} f_{\mathrm{p},i} & 0 \\ 0 & f_{\mathrm{s},i} \end{matrix} \right] \left[- \boldsymbol{J}_{i}^{-1} \end{matrix} \right]^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \partial \boldsymbol{F}_{i} \\ \partial \boldsymbol{v}_{\mathrm{t},i} \\ \partial \boldsymbol{F}_{i} \\ \partial \boldsymbol{v}_{\mathrm{r},i} \end{matrix} \right]^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{v}_{\mathrm{t},i} \\ \Delta \boldsymbol{v}_{\mathrm{t},i} \end{bmatrix} \\ \end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

式中:

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i}}{\partial \boldsymbol{v}_{t,i}} = \frac{\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})}{\left| \boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i}) \right|}$$
(14)

$$\frac{\partial \boldsymbol{G}_i}{\partial \boldsymbol{v}_{\mathrm{t},i}} = \boldsymbol{O} \tag{15}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i}}{\partial \boldsymbol{v}_{r,i}} = \frac{\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{\text{a},i})}{|\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{\text{a},i})|}$$
(16)

$$\frac{\partial \boldsymbol{G}_i}{\partial \boldsymbol{v}_{\mathbf{r},i}} = \boldsymbol{O} \tag{17}$$

卫星速度误差对 SAR 图像反定位精度影响的 仿真试验和理论分析结果如图 2 所示。图中, v_a 和 v_r 分别表示沿航向和沿雷达视线速度, $v_b = v_a v_r$ 。 由图可知,沿视线方向的速度误差影响较大,其他速 度分量的影响可忽略不计,而速度误差对距离向反 定位精度的影响基本可忽略不计。

2.2 天线相位中心位置误差

假定发射和接收天线3轴位置误差分别为 $\Delta p_{t,i}$ 和 $\Delta p_{r,i}$,则其引起的目标在第 i幅 SAR 图像 中反定位误差为

$$\begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{s},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta p_{\mathrm{t},i},\Delta p_{\mathrm{r},i}} = \begin{bmatrix} f_{\mathrm{p},i} & 0 \\ 0 & f_{\mathrm{s},i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{J}_{i}^{-1} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{F}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\mathrm{t},i}}, \frac{\partial \boldsymbol{G}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\mathrm{t},i}} \\ \frac{\partial \boldsymbol{F}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\mathrm{r},i}}, \frac{\partial \boldsymbol{G}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\mathrm{r},i}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{p}_{\mathrm{t},i} \\ \Delta \boldsymbol{p}_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix} (18)$$

式中:

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_i}{\partial \boldsymbol{p}_{t,i}} = \frac{\boldsymbol{v}_{t,i}(t_{a,i})}{|\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})|} -$$



图 2 速度误差对 SAR 图像反定位精度影响分析曲线 Fig. 2 Influence of velocity error on SAR

image reverse positioning accuracy

$$\frac{\mathbf{v}_{t,i}(t_{a,i}) \cdot \left[\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{t,i}(t_{a,i}) \right]}{\|\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{t,i}(t_{a,i})\|^{3}} \times \left[\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{t,i}(t_{a,i}) \right]$$
(19)

$$\frac{\partial \boldsymbol{G}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{t,i}} = \frac{\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})}{|\boldsymbol{p}_{target} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})|}$$
(20)

$$\frac{\partial \mathbf{F}_{i}}{\partial \mathbf{p}_{r,i}} = \frac{\mathbf{v}_{r,i}(t_{a,i})}{|\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{r,i}(t_{a,i})|} + \frac{\mathbf{v}_{r,i}(t_{a,i}) \cdot [\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{r,i}(t_{a,i})]}{|\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{r,i}(t_{a,i})|^{3}} \times [\mathbf{p}_{target} - \mathbf{p}_{r,i}(t_{a,i})] \qquad (21)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{G}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\mathrm{r},i}} = \frac{\boldsymbol{p}_{\mathrm{target}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{r},i}(t_{\mathrm{a},i})}{|\boldsymbol{p}_{\mathrm{target}} - \boldsymbol{p}_{\mathrm{r},i}(t_{\mathrm{a},i})|}$$
(22)

卫星定位误差对 SAR 图像反定位精度的影响 的仿真试验和理论分析结果如图 3 所示。由图可 知,仿真试验结果和理论分析结果保持一致。SAR 图像方位向反定位精度主要受沿航向位置误差影 响,其他位置误差分量的影响可忽略不计;而其距离 向反定位精度主要受沿视线方向位置误差影响,其 他分量的影响可忽略不计。



Fig. 3 Influence of position error on SAR image reverse positioning accuracy

2.3 控制点位置误差

假定主图像中控制点的位置误差为 Δp_{target} ,则 该控制点在第 i幅 SAR 图像中反定位误差为

$$\begin{bmatrix} \Delta n_{\text{a},i} \\ \Delta n_{\text{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta p_{\text{target}}} = \begin{bmatrix} f_{\text{p},i} & 0 \\ 0 & f_{\text{s},i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{J}_{i}^{-1} \end{bmatrix}^{\text{T}} \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{F}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\text{target}}}, \frac{\partial \boldsymbol{G}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\text{target}}} \end{bmatrix}^{\text{T}} \Delta \boldsymbol{p}_{\text{target}}$$
(23)
$$\overrightarrow{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{\Pi} \cdot \mathbf{I}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{F}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\text{target}}} = \frac{\boldsymbol{v}_{\text{t},i}(t_{\text{a},i})}{|\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{\text{t},i}(t_{\text{a},i})|} - \frac{\boldsymbol{v}_{\text{t},i}(t_{\text{a},i}) \cdot [\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{\text{t},i}(t_{\text{a},i})]}{|\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{\text{t},i}(t_{\text{a},i})|^{3}} \times [\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{\text{t},i}(t_{\text{a},i})] + \frac{\boldsymbol{v}_{\text{r},i}(t_{\text{a},i})}{|\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{\text{r},i}(t_{\text{a},i})|} - \frac{\boldsymbol{v}_{\text{r},i}(t_{\text{a},i})}{|\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{\text{r},i}(t_{\text{a},i})|} - \frac{\boldsymbol{v}_{\text{r},i}(t_{\text{a},i})}{|\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{\text{r},i}(t_{\text{a},i})|}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{G}_{i}}{\partial \boldsymbol{p}_{\text{target}}} = \frac{\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i})}{\left| \boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{t,i}(t_{a,i}) \right|} + \frac{\boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i})}{\left| \boldsymbol{p}_{\text{target}} - \boldsymbol{p}_{r,i}(t_{a,i}) \right|}$$
(25)

目前,利用雷达几何法进行 SAR 图像配准时, 常使用数据精度满足 DTED-2 标准的 SRTM DEM,其格网间距为 90 m,地面绝对高程精度为 15 m。该 DEM 在大地坐标系下,使用时需转化至 地球固定坐标下。大地坐标系到地球固定坐标系的 转换公式为

$$\begin{cases} p_x = (N+h)\cos B \cos L\\ p_y = (N+h)\cos B \sin L\\ p_z = (N(1-e^2)+h)\sin B\\ N = R_{eq}/\operatorname{sqrt}(1-e^2\sin^2 B) \end{cases}$$
(26)

式中: (L,B,h)为目标大地坐标系坐标,L,B和h分 别为其经度、纬度和高程;N为地球纬度圈半径; e^2 = 1 - $(1 - f)^2$,为地球第二曲率的平方; R_{eq} 为地 球赤道半径。由式可知,目标位置误差与高程误差 的关系为

$$\Delta \boldsymbol{p}_{\text{target}} = \begin{bmatrix} \cos B \cos L \\ \cos B \sin L \\ \sin B \end{bmatrix} \Delta h \qquad (27)$$

由式(1),(2)可知,目标位置误差可等效为卫 星位置误差,其影响不再赘述。由式(27)可知,在 雷达几何法图像配准中,目标位置误差由目标高 程误差引起,且与目标空间位置有关。在一个轨 道周期内,TerraSAR-X卫星15m高程误差引起 的SAR图像反定位误差仿真试验结果如图4所 示。由图可知,高程误差主要引起距离向反定位 误差。

2.4 方位定时误差

方位定时误差(Δt_{GPS,i})来自 GPS 时间同步误 差和卫星频率源误差,直接影响 SAR 图像中点目标 的方位位置,方位定时误差对目标位置的影响可表 示为

$$\begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta t_{\mathrm{GPS},i}} = \begin{bmatrix} f_{\mathrm{p},i} & 0 \\ 0 & f_{\mathrm{s},i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{J}_{i}^{-1} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{i}}{\partial t_{\mathrm{a},i}}, \frac{\partial G_{i}}{\partial t_{\mathrm{a},i}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \Delta t_{\mathrm{GPS},i} \quad (28)$$

2.5 斜距误差

雷达斜距误差主要来自电子电路延迟和大气延





迟。斜距误差对目标位置的影响可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta \tau_{\mathrm{e},i},\Delta \tau_{\mathrm{atm},i}} = \begin{bmatrix} f_{\mathrm{p},i} & 0 \\ 0 & f_{\mathrm{s},i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{J}_{i}^{-1} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{i}}{\partial \tau_{i}}, \frac{\partial G_{i}}{\partial \tau_{i}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} (\Delta \tau_{\mathrm{e},i} + \Delta \tau_{\mathrm{atm},i})$$
(29)

式中: $\Delta \tau_{e,i}$ 为电子电路延迟; $\Delta \tau_{atm,i}$ 为大气延迟。

综上所述,目标点在第 *i* 幅 SAR 图像中的位置 误差可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta v_{\mathrm{t},i},\Delta v_{\mathrm{r},i}} + \begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta \rho_{\mathrm{t},i},\Delta \rho_{\mathrm{r},i}} + \begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta \rho_{\mathrm{target}}} + \begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta r_{\mathrm{e},i},\Delta r_{\mathrm{atm},i}} + \begin{bmatrix} \Delta n_{\mathrm{a},i} \\ \Delta n_{\mathrm{r},i} \end{bmatrix}_{\Delta r_{\mathrm{GPS},i}}$$
(30)

3 基于雷达几何的 InSAR 图像配准 性能分析

对基于雷达几何的图像配准算法性能,可采用 以下流程进行分析:首先,分析主图像目标定位误差 Δ**p**target,然后将其作为分析辅图像反定位误差的输 入,利用式(30)求出 SAR 辅图像反定位精度,即可 求得该算法的配准精度。为降低分析复杂度,本文 采用误差已知的地面控制点(如粗 DEM)分析其在 主辅 SAR 图像中的反定位精度,并据此分析该算法 精度。从统计意义上讲,上述 2 种方法是等价的。 本文根据第 *i*,*j* 幅 SAR 图像求取配准偏移量误差 的表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta n_{\text{a_regis}} \\ \Delta n_{\text{r_regis}} \end{bmatrix}_{i,j} = \begin{bmatrix} \Delta n_{\text{a},i} \\ \Delta n_{\text{r},i} \end{bmatrix}_{\text{total}} - \begin{bmatrix} \Delta n_{\text{a},j} \\ \Delta n_{\text{r},j} \end{bmatrix}_{\text{total}}$$
(31)

式中: $\Delta n_{a_{regis}}$ 为方位向配准偏移量误差; $\Delta n_{r_{regis}}$ 为距 离向配准偏移量误差。为便于下面分析,这里将天线 相位中心位置误差、天线相位中心速度误差、GPS 时间误差和雷达斜距误差归结为图像辅助数据误差,将 其引起的 SAR 图像方位和距离向反定位误差定义为 Δn_{ai_image} 和 Δn_{ri_image} 。目前,星载 InSAR 系统主要包括 单星重复航过 InSAR 和双星编队单航过 InSAR,下 面将针对这 2 种体制进行性能分析。

3.1 单星重复航过 InSAR

单星重复航过 InSAR 系统中,主辅 SAR 图像 辅助数据误差相对独立,而由目标位置误差引起 的主辅 SAR 图像反定位误差可在一定程度上对 消。因此,雷达几何图像配准法在单星重复航过 InSAR 数据处理中的方位和距离向配准误差可表 示为

$$\sigma_{\Delta n_{a_{\rm regis}}} = \sqrt{2\sigma_{\Delta n_{ai_{\rm image}}}^2 + \sigma_{\Delta n_{a_{\rm target}}}^2}$$

$$\sigma_{\Delta n_{r_{\rm regis}}} = \sqrt{2\sigma_{\Delta n_{ri_{\rm image}}}^2 + \sigma_{\Delta n_{r_{\rm target}}}^2}$$
(32)

式中: $\Delta n_{a_{\text{target}}}$ 为目标位置误差在方位向分量; $\Delta n_{r_{\text{regis}}}$ 为目标位置误差在距离向分量。

TerraSAR-X L1b 图像产品辅助参数精度见表 2。需要说明的是,TerraSAR-X 系统斜距测量误差 与观测场景的高程变化有关,难以定量描述,这里只 能分析 SAR 图像辅助参数误差引起的方位向反定 位误差。仿真结果表明:辅助参数引起的方位偏移 量方差约为 0.45 m(对应的 $\sigma_{\Delta v_{al_image}}$ 约为 0.22 像 素),这与 TerraSAR-X 系统几何校正试验结果 (0.483 m)相吻合^[10]。

由前可知,高程误差引起的距离向反定位误差 主要随雷达平地入射角变化,而主辅 SAR 之间的垂 直有效基线决定了主辅雷达平地入射角差异。因此,

表 2 TerraSAR-X L1b 图像产品几何精度

Tab. 2 L1b image product geometric accuracy of TerraSAR-X

参数	取值		
卫星定位误差/m	0.2(3轴,1σ)		
卫星测速误差/(m•s ⁻¹)	0.005(3 轴, 1σ)		
方位定时误差/μs	8.5(1σ)		

高程误差引起的主辅 SAR 图像配准偏移量误差可 表示为

$$\sigma_{\Delta n_{r_{t} \text{target}}} \approx \frac{\sigma_{\Delta h}}{R_{\text{sample}}} \left(\cos \theta_{i,1} - \cos \theta_{i,2}\right)$$
$$\approx \frac{\sigma_{\Delta h}}{R_{\text{sample}}} \sin \theta_{i,1} \left(\theta_{i,1} - \theta_{i,2}\right)$$
$$\approx \frac{\sigma_{\Delta h}}{R_{\text{sample}}} \frac{B_{\perp} \sin \theta_{i,1}}{R}$$
(33)

式中: $\theta_{i,1}$ 和 $\theta_{i,2}$ 分别为主辅 SAR 平地入射角; B_{\perp} 为垂直有效基线;R为雷达斜距; R_{sample} 为距离向采样间隔。

高程误差分别为 15 m(SRTM DEM 精度)和 160 m(GTOPO30 DEM 精度)时, 雷达几何配准 法图像配准偏移量随雷达下视角和垂直有效基 线长度变化曲线如图 5 所示。由图可知, 当垂直 有效基线长度为 1 000 m时, 15 m高程误差引起 的配准偏移量误差仅为 0.01 像素。由前可知, 该误差远小于 SAR 图像几何参数引起的配准偏 移量误差, 而160 m高程误差引起的配准偏移量 将达到 0.1 像素, 量级与图像几何参数误差影响 相当。



图 5 雷达几何图像配准法配准偏移量误差 Fig. 5 Offset error of radar geometric image coregistration method

综上可知,重复航过 InSAR 雷达几何图像配准 法精度主要受主辅 SAR 图像辅助参数精度影响, SRTM 粗 DEM 高程误差引起的图像配准偏移量估 计误差基本可忽略不计。对于实际的 InSAR 处理 器,可采用 SRTM DEM 作为辅助高程信息,进行雷 达几何法图像配准,之后采用基于数据的图像配准 方法,降低 SAR 图像几何参数误差带来的影响,进 一步提高图像配准精度。

3.2 单航过 InSAR

目前,以德国 TanDEM-X 为代表的分布式卫星 单航过 InSAR 系统得到了广泛关注^[11]。相比于重 复航过 InSAR 系统,分布式卫星 InSAR 系统由主 星发射雷达信号,主辅雷达同时接收地面回波,此时 主辅雷达面临的大气延迟基本相同。此外,由于基 线测量精度较高,使得轨道测量误差对 SAR 图像配 准误差的影响可忽略不计。

分布式卫星 InSAR 系统在获取干涉数据时通 常工作于双基模式,此时主辅雷达面临时间同步和 相位同步问题。时间同步直接影响辅图像距离向时 间精度,而相位同步误差将导致 SAR 图像方位偏移 等问题,影响辅图像的雷达几何精度。TanDEM-X 系统在轨运行调试阶段的时间同步误差约为 0.13 ns,其引起的距离向配准偏移量误差仅为 0.01 像素,而 TanDEM-X 的相位同步精度可达 1°,其引 起的方位偏移量将小于 0.005 像素。高程误差引起 的主辅 SAR 图像配准偏移量误差可表示为

$$\sigma_{\Delta n_{r_{\rm target}}} \approx \frac{\sigma_{\Delta h}}{R_{\rm sample}} \, \frac{B_{\perp} \, \sin \theta_{i1}}{2R} \tag{34}$$

其大小约为重复航过 InSAR 的一半,这是因为单次

航过垂直有效基线可等效为重复航过 InSAR 的二 分之一。

综上分析可知,分布式卫星 InSAR 系统在利用 雷达几何法进行图像配准时,主要受到相位同步误 差、时间同步误差和粗 DEM 高程误差的影响。对 于单航过 InSAR 系统,其图像配准处理流程应根据 系统相位同步和时间同步精度决定。

4 结束语

本文对利用主辅 SAR 图像雷达几何进行 In-SAR 图像配准的方法进行了研究。通过分析 SAR 图像反定位精度,研究了雷达几何误差和外部粗 DEM 误差对雷达几何法图像配准性能的影响。理 论分析和仿真试验结果表明:

1) 粗 DEM 高程精度对配准精度的影响与垂直 有效基线长度和雷达下视角有关。当垂直有效基线 长度为 1 000 m 时,SRTM 高程误差(15 m)引起的 重复航过 InSAR 配准精度仅为 0.01 像素量级,单 航过 InSAR 系统图像配准误差相应减半。

2) 主辅 SAR 图像雷达几何误差对不同体制下的 InSAR 系统的影响区别较大。对于重复航过 InSAR系统,其配准性能的主要影响因素包括卫星 轨道测量误差,以及方位和距离向定时误差,其配准 误差约为 SAR 图像反定位精度的√2 倍。对于单航 过 InSAR 系统,基于雷达几何的图像配准的误差源 主要为主辅雷达的时间同步和相位同步误差。

本文对星载 InSAR 处理器工程化设计和卫星 系统指标设计具有重要的理论指导意义,可有效支 撑我国未来星载 InSAR 技术的发展。

参考文献

[1] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333-382.

- [2] 李威,李春升,时信华,等.分布式 InSAR 系统技术 综述[J].上海航天,2011,28(4):38-46,66.
- [3] 陈国忠,赵迪,王晓鹏,等.干涉 SAR 多基线分析与 设计[J].上海航天,2016,33(6):26-29.
- SCHEIBER R, MOREIRA A. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity[J].
 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2179-2191.
- [5] SANSOSTI E, BERARDINO P, MANUNTA M, et al. Geometrical SAR image registration [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2006, 44(10): 2861-2870.
- [6] 郭交,李真芳,刘艳阳,等.基于粗数字高程模型信息的干涉相位图生成方法[J].电子与信息学报,2010,32(11):2642-2647.
- [7] NITTI D O, HANSSEN R F, REFICE A, et al. Impact of DEM-assisted coregistration on high-resolution SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(3): 1127-1143.
- XU H P, KANG C H. Equivalence analysis of accuracy of geolocation models for spaceborne InSAR[J].
 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 48(1):480-490.
- [9] SRAFINO F. SAR image coregistration based on isolated point scatters [J]. IEEE Geoscience Remote Sensing Letter, 2006, 3(3): 354-358.
- [10] BREIT H, FRITZ T, BALSS U, et al. TerraSAR-X SAR processing and products[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 727-740.
- [11] KRIEGER G, MOREIRA A, FIEDLER H, et al. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3317-3341.

(本文编辑:李栋飏)