

文章编号: 1001- 2486(2007) 05- 0066- 05

# 基于理想干涉的 InSAR 处理性能评估新方法\*

路兴强, 黄海风, 梁向农

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为克服常规的 InSAR 处理性能评估方法只能分析整体性能的缺点, 提出一种适用于分布式星载 InSAR 的理想干涉相位图仿真算法, 此算法不仅能得到理想干涉相位, 而且能得到理想情况下的配准偏移量。在此基础上, 提出一种基于理想干涉相位及理想配准偏移量(统称为理想干涉量)的 InSAR 处理性能评估新方法。此方法可以有效隔离 InSAR 处理流程各个环节的误差, 对 InSAR 处理流程的各个环节的算法优化具有重要的实用价值。

**关键词:** 干涉合成孔径雷达; 性能评估; 理想干涉

中图分类号: TN911 文献标识码: A

## A Novel Method for InSAR Performance Evaluation Based on Perfect Interferometry

LU Xing-qiang, HUANG Hai-feng, LIANG Dian-nong

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

**Abstract:** Only the final performance of InSAR processing is evaluated in normal evaluation method. In this regard, an algorithm for interferometric phase simulation is presented in the hope that it is applicable to distributed spaceborne InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Not only the perfect interferometric phase but also the perfect co-registration offset are generated in this algorithm. A novel method for InSAR performance evaluation is proposed, which is based on perfect interferometric phase and perfect co-registration offset. With this method, the errors of each step of InSAR processing can be isolated. Furthermore, performance of InSAR processing algorithm can be evaluated.

**Key words:** InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar); performance evaluation; perfect interferometric phase

InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar) 处理流程涉及的环节众多, 各环节相互之间的误差存在较复杂的耦合关系, 常规的对于 InSAR 处理性能评估都是从最终的 DEM 产品出发, 验证最终 DEM 产品的误差<sup>[1-2]</sup>, 但是这种性能评价的方法只能对 InSAR 处理的整体性能进行分析, 不能对 InSAR 处理各个环节的性能进行评估。

2003 年 Eineder 提出了两种仿真理想干涉相位的方法<sup>[3]</sup>, 并指出理想干涉相位可以用于 InSAR 处理的性能评估, 但是 Eineder 的文献中却没有充分利用理想干涉相位数据, 而且 Eineder 的仿真算法对 InSAR 空间几何模型取了两个近似, 一是同距离高度平面近似, 二是正侧视投影近似。对于更一般的分布式星载 InSAR 的情况, 其空间几何关系及信号模型要复杂得多<sup>[4-5]</sup>, 使得 Eineder 推导的许多方程及其求解方法不再适用。

本文将 Eineder 的方法进行了重要改进, 使得生成理想相位的方法适用于分布式星载 InSAR 的情况, 更具有普适性, 并且在计算理想相位的过程中得到了理想情况下的配准偏移量。在此基础上, 提出一种基于理想干涉的 InSAR 处理性能评估新方法, 通过在 InSAR 处理的各个环节注入理想干涉相位或理想配准偏移量, 对 InSAR 处理各个环节所产生的误差进行分离, 实现了对 InSAR 处理的各个环节的算法性能的评估, 并进行了仿真, 实验证明此方法能够有效地分离分布式星载 InSAR 处理各个环节的误差, 对各个环节算法的性能进行有效评估。最后得出了基于理想干涉相位及理想配准偏移进行性能评

\* 收稿日期: 2007- 03- 08

作者简介: 路兴强(1979—), 男, 博士生。

估得到的若干有益结论。

## 1 理想干涉相位的生成方法

理想干涉相位的生成方法的思路是首先将主图像像素映射到地面的实名点, 然后计算出此实名点在辅图像上对应的距离方位坐标, 再得到干涉相位。如图 1 所示。

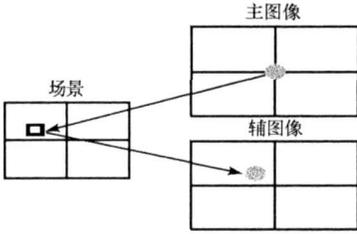


图 1 理想相位的生成方法示意图

Fig. 1 Method of perfect interferometric phase generation

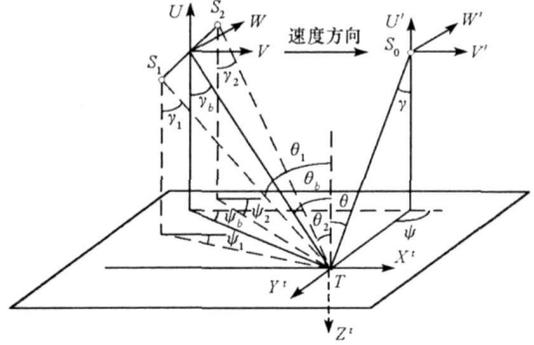


图 2 分布式 InSAR 空间几何关系

Fig. 2 Geometry of distributed InSAR

分布式 InSAR 的典型空间几何关系如图 2 所示, 其中  $S_0, S_1, S_2$  分别是发射星及两颗接收星位置, 三颗星在地心惯性坐标系 (坐标原点在地心,  $x$  轴指向春分点,  $z$  轴指向北极的惯性系) 下的位置矢量分别为  $R_0, R_1, R_2$ ,  $T$  为目标点的位置, 其位置矢量为  $R_T$ , 则  $S_1, S_2$  两颗星所成的 SAR 图像的干涉相位为

$$\Delta\phi = -j2\pi(r_1 - r_2) / \lambda \quad (1)$$

$r_1, r_2$  分别为接收星  $S_1, S_2$  的发射接收斜距和:

$$r_1 = |R_1 - R_T| + |R_0 - R_T| \quad (2)$$

$$r_2 = |R_2 - R_T| + |R_0 - R_T| \quad (3)$$

两接收星的多普勒方程分别为

$$\frac{1}{|R_0 - R_T|} [V_0 \cdot (R_0 - R_T) + \omega_e \cdot (R_0 \times R_T)] + \frac{1}{|R_1 - R_T|} [V_1 \cdot (R_1 - R_T) + \omega_e \cdot (R_1 \times R_T)] = -\chi_{DC_1} \quad (4)$$

$$\frac{1}{|R_0 - R_T|} [V_0 \cdot (R_0 - R_T) + \omega_e \cdot (R_0 \times R_T)] + \frac{1}{|R_2 - R_T|} [V_2 \cdot (R_2 - R_T) + \omega_e \cdot (R_2 \times R_T)] = -\chi_{DC_2} \quad (5)$$

其中,  $V_i (i = 0, 1, 2)$  为卫星  $i$  的速度,  $\omega_e$  为地球自转角速度,  $\lambda$  为信号波长。地面点坐标  $R_T$  有三个坐标分量, 要从主图像中的像素坐标求解出目标位置, 只靠方程 (2) 和 (4) 是不够的。由于在仿真中已知地面场景地面高度信息的离散采样, 可以用插值的方法构造地面高度的解析函数:

$$h[T_e(R_T), T_n(R_T)] = T_h(R_T) \quad (6)$$

其中  $T_e, T_n, T_h$  为地心惯性坐标系转换到东、北、高度坐标系下的转换函数。

综上所述, 理想干涉相位生成的流程如下:

步骤 1: 输入主图像的距离方位坐标, 由式 (2)、(4)、(6) 用迭代的方法求得主图像的像素点对应的地面实名点的坐标  $R_T$ ;

步骤 2: 将  $R_T$  代入式 (5), 用迭代的方法求解出辅图像的方向向慢时间, 并将求解的辅图像慢时间代入式 (3) 求解出辅图像的斜距;

步骤 3: 将第 2 步的计算结果及主图像中读出的卫星 1 的斜距代入式 (1) 即可得出理想干涉相位;

步骤 4: 将第 2 步求得的辅图像方向向慢时间及辅图像斜距与辅图像像素坐标求差, 即可得出理想情况下的方向向和距离向配准偏移。

## 2 基于理想干涉的 InSAR 处理性能评估

得到了理想干涉相位及理想配准偏移等理想干涉量后,便可以在 InSAR 处理的不同阶段分别注入理想干涉量,对 InSAR 处理流程的各个环节进行性能评估,评估的流程如图 3 所示。

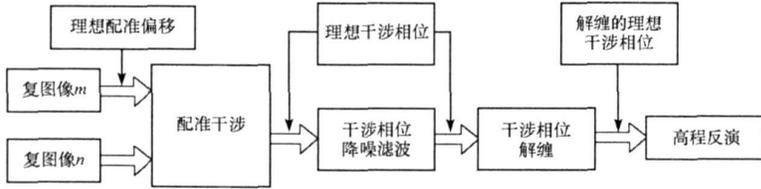


图 3 基于理想干涉的 InSAR 处理性能评估流程

Fig. 3 Flow of Evaluating InSAR processing performance based on perfect interferometry

对于图 2 所示的分布式 InSAR 编队形式, InSAR 测高的过程是首先进行地面定位求出目标点的坐标  $R_r$ , 然后进行变换  $T_h(R_r)$  得到高度信息, 测高误差主要由地面定位的过程引入, 地面定位的过程即是求解下述方程组的过程:

$$\begin{cases} |R_0(t_1) - R_r| + |R_1(t_1) - R_r| = r_1 \\ \frac{1}{|R_0 - R_r|} [V_0 \cdot (R_0 - R_r) + \omega_e \cdot (R_0 \times R_r)] + \frac{1}{|R_1 - R_r|} [V_1 \cdot (R_1 - R_r) + \omega_e \cdot (R_1 \times R_r)] = -\chi_{DC_1} \\ (|R_0(t_1 + \Delta t) - R_r| + |R_2(t_1 + \Delta t) - R_r|) - r_1 = \frac{\lambda}{2\pi} (\phi + \phi_p + \Delta\phi_c) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $t_1$  为主图像方位向慢时间,  $\Delta t$  为方位向配准偏移量,  $\phi_c$  为解缠后干涉相位,  $\phi_p$  为相位图滤波前被去除的平地相位,  $\Delta\phi_c$  是由控制点数据获得的补偿相位。下面用上节得到的理想干涉相位及理想配准偏移量对式(7)的误差因素进行分离分析,并针对平地场景进行仿真实验。

### 2.1 配准误差对干涉相位的影响

配准误差除引起图像的去相干加重外还会给干涉相位带来额外的误差<sup>[9]</sup>,应用上节所求得理想干涉相位及理想配准偏移量,采用图 4 所示的流程即可以得到配准误差引起的干涉相位误差。

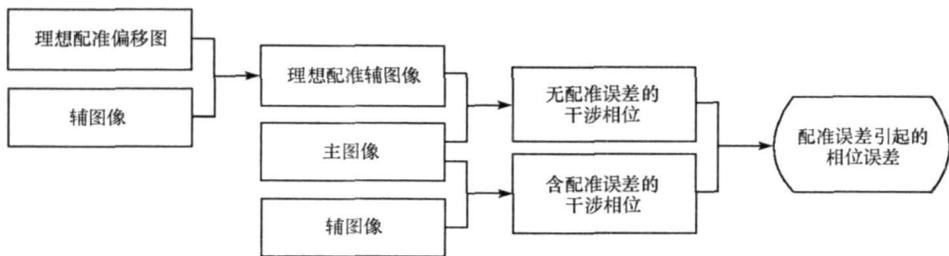


图 4 配准误差引起的相位误差分离流程

Fig. 4 Flow of isolating the phase error caused by registration

平地场景配准误差引起的相位误差(主值区间内)分布如图 5 所示,由图可以看出配准造成图像边缘有较大的相位误差,主要是由于选择的配准参考点过于集中于图像中心,引起边缘出现较大偏移误差,最终导致较大干涉相位误差。

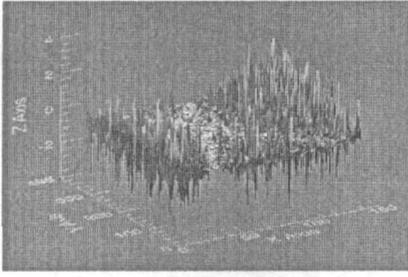


图 5 配准误差引起的相位误差

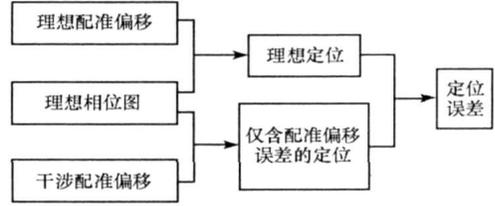
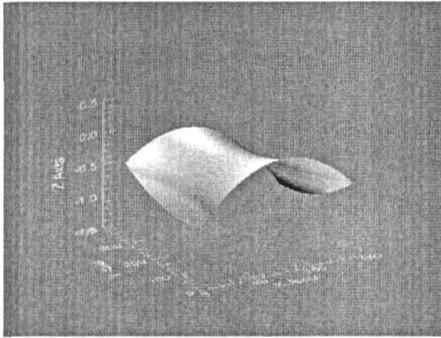
Fig. 5 Phase error caused by  $\alpha$ -registration

图 6 配准偏移量误差对定位误差的影响分析流程

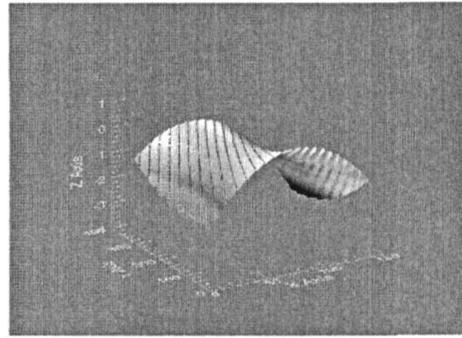
Fig. 6 Analyzing flow of geolocation error caused by  $\alpha$ -registration offset

## 2.2 方位向配准偏差对测高精度的影响

由于式(7)的第三个方程中有方位向配准偏移的因素, 因此, 理论上方位向配准偏移误差会引起较大的测高误差。采用理想的配准偏移及理想的干涉相位图可以得到理想的定位, 而应用理想的干涉相位及实际的配准偏移可以得到仅包含配准误差的定位, 采用图 6 的流程便可以得到仅包含方位向配准偏移误差的定位(测高)误差。方位向配准偏移误差及仿真得到的测高误差如图 7 所示。



(a) 方位向配准偏移量误差



(b) 测量误差

图 7 方位向配准偏移量引起的测高误差

Fig. 7 Height error caused by azimuth  $\alpha$ -registration offset

由图 7 可以发现偏移量与测高误差近似成正比, 其原因是, 在式(7)第三个方程中, 卫星方位向偏移导致斜距差偏移, 等价于引起干涉相位偏移, 最终成比例引起高程偏移。

## 2.3 干涉相位误差

对配准误差引起的干涉相位误差进行分离后(图 4 中的理想配准辅图像)可以得到仅由基线去相干引起的相位误差, 如图 8(a) 所示, 含配准误差的测高误差如图 8(b) 所示。

## 2.4 补偿相位误差

控制点的干涉相位误差会导致补偿相位误差, 为验证控制点对测高误差的影响, 对理想相位图有控制点和无控制点的情况分别进行处理得到结果如图 9 所示。

由图可见控制点对测高误差加了一个整体的偏移, 这与理论分析的结果是相吻合的。

综上所述, 基于理想相位图和理想配准偏移量可以对整个 InSAR 处理流程的误差进行分离, 并能够对各环节的处理算法进行性能评价, 该方法对于 InSAR 各个环节的处理优化具有指导性作用。基于理想干涉相位还可以对滤波和解缠相位误差进行分析, 进而评价算法性能。鉴于篇幅所限, 本文未给出仿真结果。

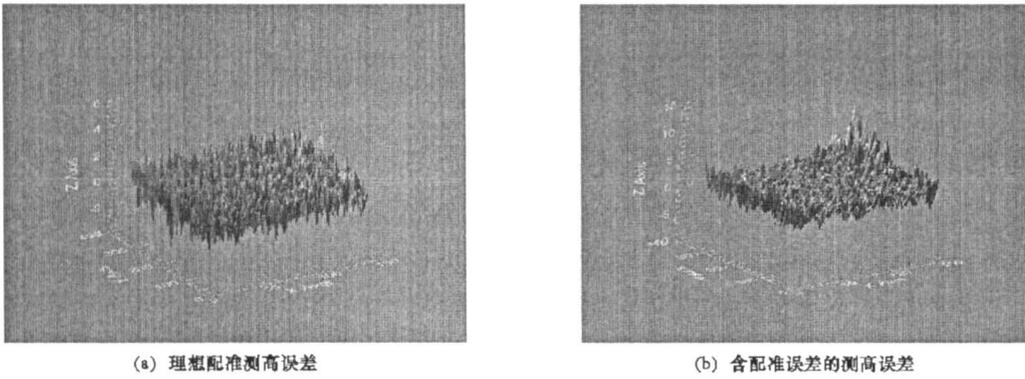


图8 干涉相位误差对测高精度的影响

Fig. 8 Height error caused by interferometric phase

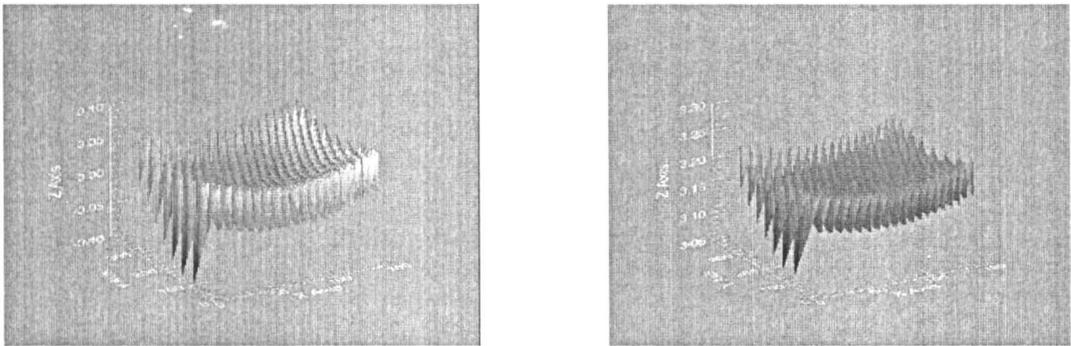


图9 补偿相位对测高误差的影响

Fig. 9 Height error caused by compensated phase error

### 3 结论

综合以上分析及仿真结果还可以得到以下结论:

- (1) 配准环节会引入两个较大误差, 必须提高配准精度;
- (2) 干涉相位误差仍然是较大误差源, 基本决定相对高程误差起伏;
- (3) 补偿相位偏差会整体引起高程偏差, 需通过控制点在位置域和高程域进行校正。

### 参考文献:

- [1] Iwamoto M, Fujisaka T, et al. Evaluation of Elevation Derived from Interferometric SAR Data with DEM[C]// IGARSS' 97, 1997, 2: 966- 968.
- [2] Breit H, Kropfle W, Adam N, et al. SRIM X-SAR of Europe—Results and Algorithmic Improvements[C]// IGARSS' 02, 2002, 1: 155- 157.
- [3] Eineder M. Efficient Simulation of SAR Interferograms of Large Areas and of Rugged Terrain[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6).
- [4] 何峰, 梁甸农, 刘建平. 星载寄生式 SAR 系统干涉信号模型与相对高程测量性能分析[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(3).
- [5] 黄海风. 分布式星载 SAR 干涉测高系统技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [6] Li F, Goldstein R. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars[J]. IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing, 1990, 28: 88- 97.