

编队卫星 InSAR 系统的相位同步分析

汤晓涛, 楼良盛, 刘志铭
(西安测绘研究所, 西安 710054)

摘要: 编队卫星 InSAR 系统属多基雷达系统, 依靠编队卫星构型形成干涉所需的基线。一发多收工作模式下的编队卫星 InSAR 高程测量系统, 协同工作的雷达间必须建立时间同步、相位同步和空间同步, 其同步精度将影响 InSAR 系统的功能与性能。三大同步中, 相位同步误差直接影响 SAR 复影像的相位误差, 从而影响系统的高程测量精度。本文根据编队卫星条件下 SAR 成像的要求, 对相位同步的要求进行了分析, 并给出了由于相位不同步所引起的相位误差对 InSAR 高程测量精度影响。分析结果表明, 编队卫星 InSAR 系统对于相位同步的要求包含两个方面: 一是为保证被动雷达能够对回波实现相参成像, 在整个合成孔径时间内, 主动和被动两个雷达在载波相位上必须保持确定和可知的关系, 且其差值随系统距离向分辨率的不同必须限定在一定范围内; 二是在整个干涉数据的录取时间里, 主动和被动两个雷达载波相位同步误差不能超过高程测量的精度要求所允许的误差。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 相位同步; 编队卫星

1 前言

干涉合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar—InSAR), 按照其干涉模式可以分为切轨迹干涉 (Across-Track Interferometry) 和顺轨迹干涉 (Along-Track Interferometry) 两种^[1]。前者用于提取地面三维信息或检测地形变化量^[2,3], 后者用于动目标检测和海洋水流与波形测量^[1]。

编队卫星 InSAR 系统属多基雷达系统, 依靠卫星编队构型形成干涉所需的基线, 通常情况下编队卫星的轨道构形服从 Hill 方程^[4]。由于卫星编队具有很好的灵活性, 能够提供 InSAR 干涉所需的有效基线, 近几年该项技术开始受到越来越多国家的重视。目前国际上较有代表性, 并正在付诸实施的系统主要有德国空间局的 TanDEM-X^[8,9] 计划。

编队卫星 InSAR 系统回波信号的相干性是检测系统好坏的一个重要指标, 为了能使分置在各卫星上的雷达所接收信号具有较好的相干性, 协同工作的雷达多采用一发多收 (一个雷达发射, 所有雷达一起接收) 的工作模式。在此模式下,

发射雷达与接收雷达之间必须要相互协调、相互配合, 才能实现工作目的。为此, 需要在主辅雷达之间, 建立起一定的同步关系, 通常包括时间同步、相位 (相参) 同步和空间同步, 即所谓“三大同步”。

(1) 时间同步。接收雷达要想取得所需目标的回波, 就需要精确地预知需要的回波到达时间, 以便在恰当的时间对进入天线的电磁波进行采样。这就要求接收雷达必须事先知道发射雷达发射各脉冲的精确时刻, 并使自己与发射雷达在时间上精确配合。这就是时间同步, 其目的是要让接收雷达能在准确的时间上录取回波, 保证发射接收雷达成像在距离方向的良好覆盖以及使接收雷达在发射雷达发射时关闭接收通道, 避免直达泄露干扰的作用。

(2) 空间同步。其目的是要保证主动发射与被动接收的两个雷达的波束, 都指向同一目标地面, 并在地面有足够的重合以保证被动雷达成像的品质。空间同步在编队卫星 InSAR 系统中的作用, 是让被动接收雷达的波束能指向主动发射雷达波束照射的地面, 从天线方向性的角度让被动雷达接收回波的能量最大, 以取得被动雷达成像

收稿日期: 2007-08-22 修回日期: 2008-03-05

作者简介: 汤晓涛 (1963-), 男, 硕士, 主要研究方向: 摄影测量与遥感、InSAR 技术。

E-mail: txiaota@pub.xaonline.com

的高信噪比。主、被动雷达间在天线波束指向上的这种配合要求, 就是编队卫星 InSAR系统的空间同步。

(3) 相位(相参)同步。对于编队卫星 InSAR系统中的多基雷达而言, 一方面, 参与工作的各合成孔径雷达是相干体制雷达, 它要求参与孔径合成的所有回波脉冲之间在相位上保持确定和可知的关系, 成像处理要依据这些相位间的关系对所有的回波进行相干积累, 才能实现孔径的合成; 另一方面, 必须使发射接收雷达载波相位同步误差引起的相位误差导致的对高程测量的误差控制在一定范围, 才可能得到满足一定精度的测量成果。使被动雷达的本振与主动雷达的发射在相位上保持一定的关系并将同步误差控制在一定范围就是相位同步。

本文就编队卫星 InSAR系统在切轨迹干涉工作模式下“三大同步”中的相位同步要求进行了探讨。

2 相位同步及其要求

雷达天线接收到目标点的回波信号^[1]可由(1)式表示:

$$s'(\hat{t}; t_m; R_B) = a_r \left[\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right] a_a(t_m) \times \exp \left[j2\pi f_c \left(t - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right) \right] \exp \left[j\pi \gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right)^2 \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m; R_B) \right] \quad (1)$$

式中: $a_r(\cdot)$ 和 $a_a(\cdot)$ 分别为雷达线调频信号的窗函数和方位窗函数, t 为雷达工作时间, $\hat{t} = t - mT$ 为快时间, $t_m = mT$ 为慢时间, 即发射脉冲时刻, T 为发射脉冲重复周期, m 为脉冲数, $R(t_m; R_B)$ 为 t_m 时刻的参考距离, f_c 为载波频率, γ 为调频率, λ 为信号波长, c 为光速。

雷达在接收信号后, 要进行去载波频率处理, 当辅雷达的本振与主雷达发射信号的载波频率不一致变为 f'_c 时, 其目标点的回波信号去载波频率处理后为:

$$s(\hat{t}; t_m; R_B) = a_r \left[\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right] a_a(t_m) \times$$

$$\exp \left[j2\pi(f_c - f'_c) \left(t - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right) \right] \exp \left[j\pi \gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right)^2 \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m; R_B) \right] \quad (2)$$

设 $\Delta f_c = f_c - f'_c$, 则(2)式可表示为:

$$s(\hat{t}; t_m; R_B) = a_r \left[\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right] a_a(t_m) \times \exp \left[j2\pi \Delta f_c \left(t - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right) \right] \exp \left[j\pi \gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right)^2 \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m; R_B) \right] \quad (3)$$

主辅雷达相位不同步引起的相位误差 $\Delta\Phi$ 为:

$$\Delta\Phi = 2\pi \Delta f_c \times \Delta t \quad (4)$$

其中 Δt 为成像时的相干积累时间: $\Delta t = \frac{1}{B_R}$, B_R 为雷达脉冲线性调频带宽。

用雷达脉冲线性调频带宽 B_R 表示, (4)式变为:

$$\Delta\Phi = 2\pi \Delta f_c \times \frac{1}{B_R} \quad (5)$$

若 $\Delta\Phi$ 超过 $\frac{\pi}{2}$, 回波信号无法聚焦, 不能成像。为了保证成像质量, 工程实现中一般要求 $\Delta\Phi$ 不超过 $\frac{\pi}{4}$ ^[10], 即:

$$\left| 2\pi \Delta f_c \times \frac{1}{B_R} \right| \leq \pm \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

式中雷达脉冲线性调频带宽 B_R 决定了雷达的斜距分辨率 ρ_R , 且二者具有如下关系^[10]:

$$B_R = \frac{c}{2\rho_R} \quad (7)$$

(7)式代入(6)式, 可得:

$$|\Delta f_c| \leq \pm \frac{c}{16\rho_R} \quad (8)$$

由(8)式可以得到不同距离向分辨率条件下满足 SAR 成像对相位同步的基本要求, 见图 1。

3 相位同步误差对 InSAR 高程测量的影响分析

从 InSAR 高程测量原理可知^[11-13], InSAR 系

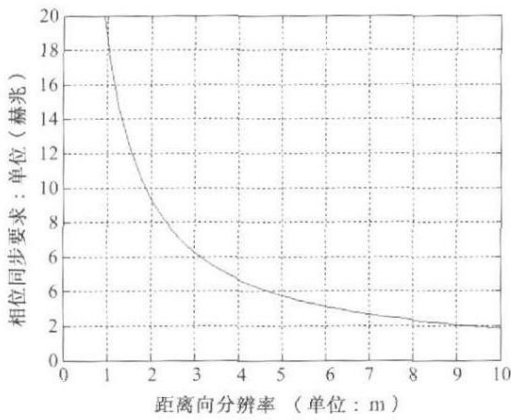


图 1 距离向分辨率与相位同步要求关系

Fig 1 The relationship of phase synchronization requirements and slant range resolution

统高程测量的主要误差源包括相位误差 $d\psi$ 、基线长度误差 dB 、基线倾角误差 $d\alpha$ 、斜距误差 dR 以及平台位置误差 dH 等五项，其关系式如下：

$$dh = \frac{\lambda R (\sin \theta + \cos \theta \tan \tau_k)}{2\pi B \cos(\theta - \alpha)} d\psi - \frac{R (\sin \theta + \cos \theta \tan \tau_k) \tan(\theta - \alpha)}{B} dB + R (\sin \theta + \cos \theta \tan \tau_k) d\alpha - \cos \theta dR + dH \quad (9)$$

式中 R 为主雷达斜距， B 为基线长度， θ 为主雷达侧视角， α 为基线倾角， λ 为雷达信号波长， τ_k 为地面坡度（正为迎坡，负为顺坡）。

根据相位同步的定义及其要求可知，相位同步误差对 InSAR 高程测量的影响主要反映为相位误差。由 (9)、(4) 式可得相位同步通过相位误差对 InSAR 高程测量精度的影响为：

$$m_h = \pm \frac{\lambda R (\sin \theta + \cos \theta \tan \tau_k) \Delta t}{B \cos(\theta - \alpha)} m_{\tau_c} \quad (10)$$

考虑到 $\Delta t = \frac{1}{B_r}$ 以及 (7) 式可得：

$$m_h = \pm \frac{2\lambda R R_r (\sin \theta + \cos \theta \tan \tau_k)}{B \cos(\theta - \alpha)} m_{\tau_c} \quad (11)$$

(10)、(11) 式中 m_h 为高程测量误差， m_{τ_c} 为相位同步误差。

由 (11) 式可知，相位同步误差引起的高程误差与雷达斜距 R 成正比，与基线长度 B 成反比。一般情况下， R 为几百 km 量级， B 为 1km 左右，而 $\cos(\theta - \alpha)$ 最大为 1，故相位误差对 InSAR 高

程测量精度的影响很大。以一个卫星轨道高度 500km、雷达侧视角 45° 、斜距分辨率 5m、雷达工作波段为 X 波段，中心频率为 9.6GHz（波长为 3.2cm）的编队卫星 InSAR 系统为例，雷达收发模式为一发多收时，根据有效基线的选择要求^[1, 14]，其垂直基线长度应为 1 200m 左右。由 (11) 式，图 2 绘出了在不同地面坡度时，相位同步误差对 InSAR 高程测量精度影响等值线图（单位：m）。

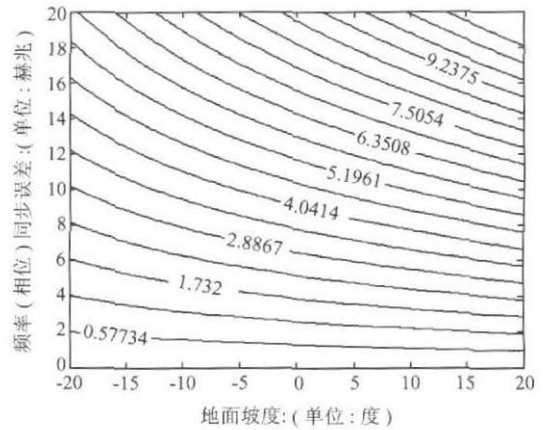


图 2 相位同步误差对高程测量精度的影响

Fig 2 Influence of phase synchronization error to elevation measurement precision

4 结论

对于编队卫星 InSAR 系统中多基雷达的相位同步有两个层次的要求：一是在整个合成孔径时间内，主动和被动两个雷达载波的相位差之间的变化不得超过 $\frac{\pi}{2}$ （工程实现一般要求为 $\frac{\pi}{4}$ ），以保证被动雷达能够对回波实现相参成像，其相位同步的要求随雷达距离向分辨率的不同而不同；二是在整个干涉数据的录取时间里，主动和被动两个雷达载波的相位同步误差不能超过高程测量的精度要求所允许的误差。

通常后一个要求的精度高于前一个。系统如果能够达到前一个要求即基本具备了 SAR 成像和干涉测量的功能，可以进行干涉处理，但若不对两个雷达载波的相位同步误差进行控制，系统的精度性能将得不到保障。亦即，前者影响系统的成像与干涉功能，后者影响系统的精度性能。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [2] 史世平. 使用 ERS-1/2 干涉测量 SAR 数据生成 DEM. 测绘学报, 2000, 29(4): 317~323
- [3] 于晶涛, 陈鹰. 一种新的 InSAR 干涉条纹图滤波方法. 测绘学报, 2004, 33(2): 121~126
- [4] G Krieger, H Fiedler, J Mittermayer, et al. Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry. IEEE Proc - Radar Sonar Navig, 2003, 150(3): 87~96
- [5] D Massonnet. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. IEEE Trans Geosci Remote Sensing 2001, 39(3): 506~520
- [6] Amiot T, Douchin F, Thouvenot E, et al. The interferometric cartwheel: A multi-purpose formation of passive radar microsatellites. Proc of the IGARSS'02, 435~437.
- [7] J Mittermayer, G Krieger, M Wendler, A Moreira, et al. Preliminary interferometric performance estimation for the interferometric cartwheel in combination with ENVISAT ASAR. CEOS Workshop Tokyo, Japan, 2~5 April, 2001
- [8] Alberto Moreira, Gerhard Krieger, Irena Hajnsek, et al. TanDEM-X: A TerraSAR-X Add-On Satellite for Single-Pass SAR Interferometry. 0-7803-8743-0/04 (C) IEEE, 2004, 1000~1003
- [9] TanDEM-X - Radar Interferometry with unprecedented Accuracy in Close Formation Flight with TerraSAR-X Satellites. URL: www.terasat.de/en/prod/tandem/index.php
- [10] 陆军等译. 合成孔径雷达. 华东电子工程研究所, 1999.
- [11] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量. 北京: 科学出版社, 2002
- [12] 史世平, 常本义. 干涉合成孔径雷达地形测图原理及数字模拟. 测绘科技, 1996 (1): 8~14
- [13] E Rodriguez, J M Martin. Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars. IEEE Proceedings, 1992, 139(2): 147~159.
- [14] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京: 国防工业出版社, 2003.

Analyses of Phase Synchronization on InSAR System Based on Formation-Flying Satellites

TANG Xiaotao LOU Liangsheng LU Zhiming

(Xian Research Institute of Surveying and Mapping, Xian 710054 China)

Abstract The InSAR system based on formation-flying satellites is a multi-radar system, which depends on the satellites formation to form the baselines needed by the interferometry. For this system, time synchronization, phase synchronization and space synchronization should be established by the cooperated radars with each other. The precision of three synchronizations will influence the systematic function and performance of the InSAR system. The error of phase synchronization among the three synchronizations will affect the phase error of SAR SLC image directly, and influence the elevation measurement precision sequentially. In this paper, the requirements on phase synchronization are analysed based on the need of the SAR imaging under the condition of formation-flying satellites, the influences on the elevation measurement precision due to the loss of phase synchronization are also given. The results show that the requirements on phase synchronization include two facets: firstly, the carrier frequencies of master/slave radars should keep certain relationship with synthetic aperture to assure the SAR imaging to be done successfully, and the carrier frequency difference must be restricted to a determinate range which depends on different slant range resolutions. Secondly, the phase synchronization error can not overrun a limit which is requested by elevation accuracy demand and during the whole interferometric data acquisition time.

Key words interferometric synthetic aperture radar, phase synchronization, formation-flying satellites