

## 分布式卫星的环绕对 InSAR 测高精度的影响<sup>1</sup>

张晓玲 曾斌 黄顺吉

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘要:** 分布式卫星 SAR 系统是最近提出的一种新的 SAR 系统, 该文结合干涉 SAR(InSAR) 技术, 研究了该系统中 InSAR 成像所面临的问题, 分析和推到了系统环绕引起的干涉相位、基线等参数的变化, 以及对成像高度精度的影响, 给出了相应的数学模型及关系曲线, 分析结果表明随着环绕角度的增加, 测高误差增大, 必须对相位和基线进行合理修正。

**关键词:** 分布式卫星系统, 合成孔径雷达, 干涉相位, 有效基线, 成像精度

**中图分类号:** TN951, TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0157-06

## The Influence of the Rotating of the Cluster Micro-Satellite on Height Measurement of InSAR

Zhang Xiao-ling Zeng Bin Huang Shun-ji

(Dept. of Electron Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** The cluster micro-satellite Synthetic Aperture Radar(SAR) system is an innovative SAR system brought forward recently. In the cluster micro-satellite system, technology of cross-track interferometric SAR imaging processing is studied. The influence of the rotating of the cluster micro-satellite on the baseline and the interferometric phase is analyzed. The corrected formula of the baseline and the interferometric phase are derived. By computer simulation, the errors between corrected and uncorrected height measurement are compared. The analysis results verify the correction of the formula and the necessity to correct the baseline and the phase.

**Key words** Cluster micro-satellite system, Synthetic Aperture Radar(SAR), Interferometric phase, Available baseline, Height error

### 1 引言

分布式卫星合成孔径雷达(SAR)系统是国外最近提出的面向 21 世纪的一种新的 SAR 系统<sup>[1]</sup>, 它由一组群聚卫星协同工作完成单一卫星的功能。这种群聚组合可扩展 SAR 系统用途, 增加灵活性和提高可靠性<sup>[2,3]</sup>。这种群聚组合可提供更多的基线组合方式, 获得更多数据源<sup>[4-6]</sup>, 包括垂直于轨道向和沿轨道向的数据, 进一步提高潜在性能。

对于干涉 SAR(InSAR) 成像的数据获取目前主要有两种方式: 一种是利用卫星的重复轨道 SAR 回波数据。另一种是利用双天线采集 SAR 回波数据。前者的劣势是很难精确估计两次飞行的轨道间距(即基线), 严重影响测高精度。并且不同时刻采集的回波数据, 易产生时间非相关性, 对于较短波段(如 X 波段)很不利。因此 1994 年美国航天飞机 SIR-C/X-SAR 系统的 X 波段 SAR 原始数据未能处理出一幅满意的三维 SAR 图像。基于这种原因, 2001 年发射的奋进号航天飞机 SIR-C/X-SAR 采用了双天线体制采集回波数据, 获得了星载 SAR 三维成像技术的突破性进展。但双天线方式使有效载荷设备复杂化, 对于卫星平台是一个严重障碍。分布式 SAR 系统克服了上述两种方式的劣势, 能提供 InSAR 所需的精确基线组合。并且利用垂直于轨道向

<sup>1</sup> 2002-06-14 收到, 2002-12-19 改回

InSAR(CT-InSAR) 技术, 可提取高度信息, 进行三维成像; 利用沿航迹 InSAR(AT-InSAR) 技术进行运动目标的研究, 提取慢动目标速度。这是分布式卫星组合对 SAR 系统性能的重要贡献。

分布式卫星系统由多颗卫星 (如设为 8 颗) 形成群聚组合 (图 1), 并分布在同一平面上。当卫星组合以速度  $V$  沿地球轨道运行的同时也沿其分布式圆周绕中心点  $S_V$  转动 (环绕)。环绕周期恰好等于绕地球轨道周期。卫星间的相对几何关系及群聚平面仰角始终保持不变。本文主要分析分布式 SAR 系统中, 群聚卫星的环绕运动引起的相位、基线的变化, 以及对 InSAR 测高精度的影响, 推导相应的修正模型。

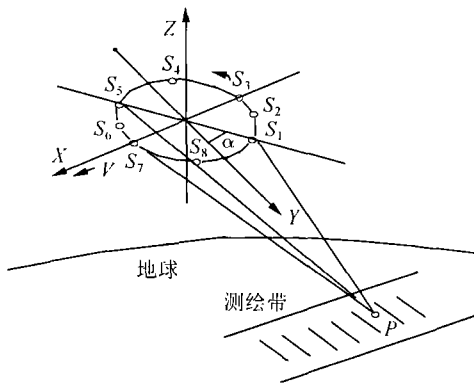


图 1 分布式卫星 SAR 几何布局示意图

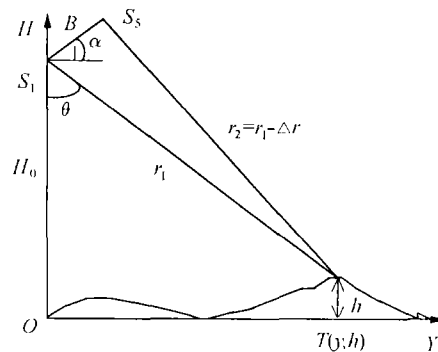


图 2 InSAR 的几何示意图

## 2 InSAR 三维成像的基本原理

InSAR 的几何位置关系如图 2 所示。根据 InSAR 成像原理<sup>[7]</sup>, 垂直于轨道向的卫星  $S_1$  和  $S_5$  的复图像经干涉后的回波相位差 (即干涉相位) 为

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (4\pi/\lambda)(r_1 - r_2) = (4\pi/\lambda)\Delta r \quad (1)$$

由图 2 知, 如果斜距  $r$  远远大于基线长度, 则有

$$\sin(\theta - \alpha) = [r_1^2 + B^2 - (r_1 - \Delta r)^2]/(2r_1 B) \approx \Delta r/B - \Delta r^2/(2r_1 B) \quad (2)$$

由式 (1) 和 (2) 得目标的相对高度  $h$  为

$$h = H_0 - r_1 \cos \theta = H_0 - r_1 \cos \left( \alpha + \arcsin \left( \frac{\lambda \varphi}{4\pi B} \left( 1 - \frac{\lambda \varphi}{8\pi r_1} \right) \right) \right) \quad (3a)$$

在分布式卫星系统中, 由于我们采用一颗卫星发射信号, 其余卫星接收信号, 因此高度公式需稍做修改。式 (3a) 可改为

$$h = H_0 - r_1 \cos \theta = H_0 - r_1 \cos \left( \alpha + \arcsin \left( \frac{\lambda \varphi}{2\pi B} \left( 1 - \frac{\lambda \varphi}{4\pi r_1} \right) \right) \right) \quad (3b)$$

由此知道轨道参数, 即可由干涉相位估计目标高度。式 (3b) 未考虑地球球面影响, 但实际应用中, 对于星载 InSAR,  $H_0$  还应考虑球面效应。

### 3 卫星环绕对测高精度的影响

群聚卫星环绕运动导致相位及有效基线变化。为讨论方便, 这里仅推导最长基线对应的两卫星 (如  $S_1, S_5$ ) 的位置变化。

#### 3.1 卫星 ( $S_1, S_5$ ) 位置变化的确定

如图 3 所示,  $O$  点、 $E$  点分别表示卫星  $S_1, S_5$  的初始位置,  $R$  为卫星环绕圆周的半径,  $B, F$  为卫星环绕  $\beta$  角的位置,  $\alpha$  为群聚平面与水平面的夹角。  $X$  轴为卫星方向,  $Y$  轴为距离向。以星下点地面为坐标原点, 设  $O$  点距地面高度为  $H_0$ , 经推导,  $B$  点坐标为  $X$  坐标:  $R \sin \beta$ ;  $Y$  坐标:  $2R \cos \alpha \sin^2(\beta/2)$ ;  $Z$  轴上坐标:  $H_1 = H_0 + BC = H_0 + 2R \sin \alpha \sin^2(\beta/2)$ 。

设地面目标点坐标为  $(0, y_0, h)$ , 则卫星  $S_1$  在  $O$  点和  $B$  点距目标点的距离分别为

$$r_1 = \sqrt{y_0^2 + (H_0 - h)^2} \quad (4)$$

$$r'_1 = \sqrt{R^2 \sin^2 \beta + (y_0 - 2R \cos \alpha \sin^2(\beta/2))^2 + (H_0 - h + 2R \sin \alpha \sin^2(\beta/2))^2} \quad (5)$$

同理可得卫星  $S_5$  转动到  $F$  点的坐标。则卫星  $S_5$  在  $E$  点、 $F$  点距目标点的距离分别为

$$r_2 = \sqrt{(y_0 - 2R \cos \alpha)^2 + (H_0 + 2R \sin \alpha - h)^2} \quad (6)$$

$$r'_2 = \sqrt{R^2 \sin^2 \beta + (y_0 - 2R \cos \alpha \cos^2(\beta/2))^2 + (H_0 + 2R \sin \alpha \cos^2(\beta/2) - h)^2} \quad (7)$$

式 (4)~(7) 反映了卫星环绕角与目标的距离变化。由此可分析环绕对高度精度的影响。

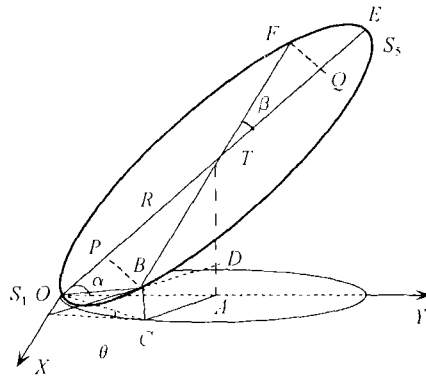


图 3 分布式卫星 SAR 系统示意图

#### 3.2 卫星环绕对测高精度的影响

在分布式系统中, 卫星的干涉相位及 InSAR 成像高度公式分别由式 (1) 和 (3b) 给出。由于分布式卫星的环绕, 会造成相位  $\varphi$ 、基线  $B$ 、星下点距离  $H_0$  以及斜距  $r$  等的误差估计, 对测高精度产生影响, 尤其  $\varphi$  和  $B$  对高度测量影响较大, 因此主要讨论这两个因素。

当卫星  $S_1$  和  $S_5$  环绕  $\beta$  角后, 由式 (5) 及 (7) 可得干涉相位为

$$\varphi' = (4\pi/\lambda)\Delta r' = (4\pi/\lambda)(r'_1 - r'_2) \quad (8)$$

根据 InSAR 成像原理, 高度的提取是由垂直轨道向两卫星的干涉相位中得到的, 卫星环绕一定角度后, 获得的干涉相位不能直接用于高度估计, 如果仍按式 (3b) 估计高度, 显然会引起高度误差, 另外环绕也造成了有效基线的误差, 因此需要修正。

将卫星环绕  $\beta$  后的基线投影到垂直轨道向 (即  $P, Q$  点, 见图 3), 则有效基线为

$$B' = B \cos \beta \quad (9)$$

由图 3 可求出投影点  $P, Q$  到目标点的距离为

$$r_1'' = \sqrt{[y_0 - R(1 - \cos \beta) \cos \alpha]^2 + [H_0 - h + R(1 - \cos \beta) \sin \alpha]^2} \quad (10)$$

$$r_2'' = \sqrt{[y_0 - R(1 + \cos \beta) \cos \alpha]^2 + [H_0 - h + R(1 + \cos \beta) \sin \alpha]^2} \quad (11)$$

投影点  $P, Q$  处的干涉相位则为

$$\varphi'' = (2\pi/\lambda)\Delta r'' = (2\pi/\lambda)(r_1'' - r_2'') \quad (12)$$

利用式 (8) 和式 (12), 可得修正后的干涉相位为

$$\varphi'' = [(r_1'' - r_2'')/(r_1' - r_2')] \cdot \varphi' \quad (13)$$

当同时考虑干涉相位及基线变化, 则高度公式为

$$h_2 = H_0 - r_1'' \cos \left( \alpha + \arcsin \frac{\lambda}{2\pi B \cos \beta} \cdot \frac{r_1'' - r_2''}{r_1' - r_2'} \varphi' \left( 1 - \frac{\lambda}{4\pi r_1''} \cdot \frac{r_1'' - r_2''}{r_1' - r_2'} \varphi' \right) \right) \quad (14)$$

式中  $\varphi'$  为环绕  $\beta$  时所测得的干涉相位。式 (14) 是修正后的测高模型, 反映了卫星环绕对高度测量产生的影响。下面通过数据仿真进行误差分析。

#### 4 实验仿真结果及分析

根据系统要求, 设分布式卫星环绕圆周直径为 240m, 高度  $H_0 = 800\text{km}$ , 投射角  $\theta = 35^\circ$ , 群聚卫星平面与水平面夹角  $\alpha = 30^\circ$ ; 群聚卫星自身环绕一周为 100.8min。图 4 模拟了环绕角为  $0^\circ$  时的高度剖面图, 图 5 为卫星环绕  $0.24^\circ$  和  $1^\circ$  时, 不考虑修正得到的高度图。图 6 给出了环绕与高度误差的关系, 表 1 列出了几个典型值。

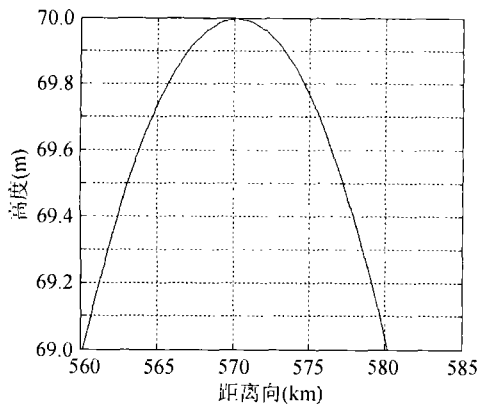


图 4 模拟的原始高度剖面图

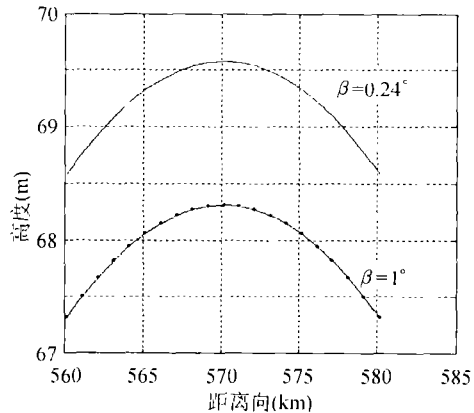


图 5 未修正的高度图

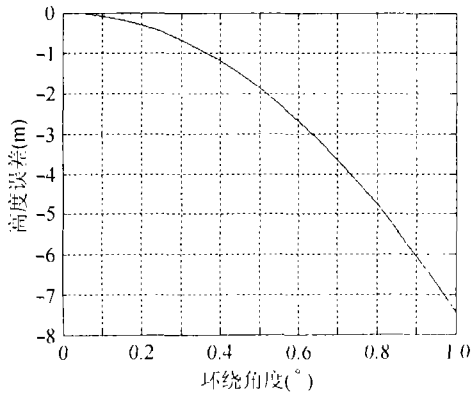


图 6 环绕角  $\beta$  与高度误差的关系

环绕角度 $\beta(^{\circ})$	高度误差 $\Delta h(\text{m})$
0.06(1s)	0.03
0.12(2s)	0.11
0.24(4s)	0.42
0.48(8s)	1.69
0.95(16s)	6.67

由此可见环绕角越大,产生的误差越大。当分布式卫星以 100.8min 转动一周,卫星运行时间低于 4s(0.24 $^{\circ}$ )时,卫星  $S_1, S_5$  基本可看成平行轨道进行 InSAR 成像,产生的高度误差小于 1m。但随着环绕角的增大,干涉相位和基线引起的高度误差也随之增大。当环绕角度达 1 $^{\circ}$ (16.8s)时,产生的高度误差达到 7.4m,因此随着环绕角的增大,必须对相位和基线进行实时修正。

图 7 为仅考虑相位修正后的高度误差图。误差虽有明显减小,但仍存在一定误差,且沿距离向而增大。若同时对基线和相位进行修正,无论环绕角大还是小,产生的高度误差都非常小(至少  $10^{-7}$  量级)。图 8 为同时考虑相位和基线修正的结果。

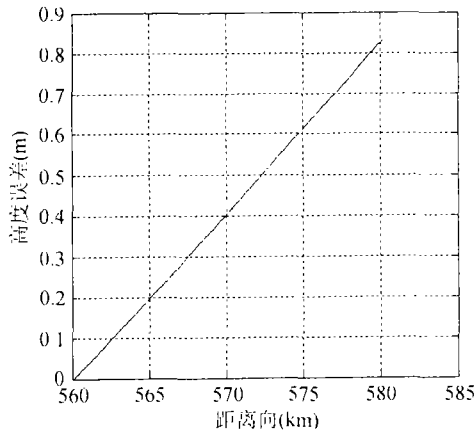


图 7 仅考虑相位修正时的高度误差图

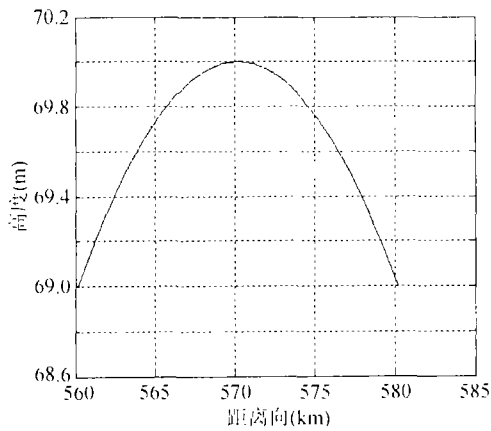


图 8 基线和相位修正后的高度图

基于上述分布式卫星 SAR 系统参数,通过实验仿真可得到如下结论:

(1) 环绕角度很小时,卫星环绕引起的基线和相位变化对测高精度影响不大。例如转动 0.24 $^{\circ}$ 时,引起的高度误差小于 0.5m。

(2) 环绕角较大时,干涉相位及基线必须同时修正,否则高度误差非常大。以 8 颗星为例,卫星环绕造成的最大误差在环绕角为 22.5 $^{\circ}$ 位置上,超过 22.5 $^{\circ}$ 时便由另两颗卫星代替。这时有效基线为 221.7m(物理基线 240m),因此必须修正。修正后误差很小,结果令人满意。

(3) 因群聚卫星本身需要环绕运动来保持这个整体,从测量相位参数的精度来讲,如果能在  $2\text{s}(0.12^\circ)$  内获得一帧 SAR 图像,卫星的环绕量可以忽略。否则会使相位的测量产生误差。

## 5 结束语

分布式卫星 SAR 系统提供了更多的基线组合方式和更多的数据源,利用垂直于轨道向的干涉成像,可获取高度信息,利用沿轨道向的干涉处理,可检测慢动目标速度。本文分析了分布式卫星 SAR 系统中垂直于轨道向 InSAR 成像处理问题,主要针对卫星环绕运动对 InSAR 测高精度的影响。分析和推到了系统环绕引起的干涉相位、基线等参数的变化,以及对成像高精度的影响,建立了相应的数学模型及关系曲线。仿真结果表明随着环绕角度的增加,测高误差增大,必须对相位和基线进行合理的修正,以提高测高精度。

## 参 考 文 献

- [1] Das A, Cobb R. TechSat21-Space Missions Using Collaborating Constellations of Satellites. Proceeding of the 12th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, UT, Aug.31-Sep.3, 1998: 125-129.
- [2] 黄顺吉. 分布式卫星 SAR 系统总体技术研究. 成都: 电子科技大学雷达成像实验室报告, 2001.
- [3] 林来兴. 微小卫星绕飞空间站的动力学和控制. 航天控制, 1999, (3): 26-33.
- [4] Lombardini F, Griffiths H D. Optimum and suboptimum estimator performance for multibaseline InSAR. Proceedings of EUSAR 2000 3<sup>rd</sup>, Germany, May 2000: 315-318.
- [5] Homer J, Longstaff I D, Callaghan G. High resolution 3-D SAR via multi-baseline interferometry. Proc. IGARSS'96, 1996: 796-798.
- [6] Lombardo P, Lombardini F. Multi-baseline SAR interferometry for terrain slope adaptivity. Proc. Nat. Radar Conf., Syracuse, NY, 1997: 196-201.
- [7] 张晓玲, 王建国, 黄顺吉. 干涉 SAR 成像中地形高度估计及基线估计方法的研究. 信号处理, 1999, 15(4): 316-320.

张晓玲: 女, 1964 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达成像技术、目标分类与识别。

曾 斌: 男, 1974 年生, 博士生, 主要研究方向为雷达成像技术。

黄顺吉: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像技术、导航等。