

文章编号: 1001- 2486(2008) 04- 0071- 05

基于双星编队 SAR 的差分干涉研究*

王 敏, 孙希龙, 余安喜, 梁甸农

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 结合系统特点, 分析了利用双星编队 SAR 进行差分干涉测量的特殊性和优越性, 对双星编队 SAR 的立体基线进行分解, 得到了差分干涉的有效基线分量, 建立了双星编队 SAR 的差分干涉模型, 并利用冗余图像采用数据融合的方法提高了测量精度, 用地形形变量检测的仿真实验验证了模型和方法的正确性和有效性。

关键词: 双星编队 SAR; 立体基线; 差分干涉; 数据融合

中图分类号: TN958 文献标识码: A

Research on Differential Interferometry for Bi-satellite Formation SAR

WANG Min, SUN Xi-long, YU An-xi, LIANG Dian-nong

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

Abstract: According to the characteristics of Bi-satellite formation SAR system, the peculiarity and superiority of differential interferometry were discussed, valid components of baseline for differential interferometry were obtained by decomposing the solid baseline, and then the model of differential interferometry for Bi-satellite formation SAR was established, and a method based on data fusion was used to compensate the measurement noises that were very hard to be avoided. Finally, a computer simulation results confirmed the feasibility and precision of the proposed model and method.

Key words: bi-satellite formation SAR; solid baseline; differential interferometry; data fusion

合成孔径雷达差分干涉(D-InSAR, Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry)技术是对合成孔径雷达干涉技术的拓展, 利用地形形变前后的两幅 SAR 图像进行干涉处理, 所得的相位图中既包含地形信息又同时包含形变信息, 采用一定方法去除地形信息后就可获知地形的形变信息。根据地形信息去除方法的不同可以分为二轨法、三轨法和四轨法^[1-2]。

Grabriel 等^[3]在 1989 年首次论证了该技术在探测地表形变方面的能力, 其后对 D-InSAR 原理及其应用的研究广泛开展, 其应用领域也从短时间大形变量(地震、火山爆发等)的检测^[4]推广到了缓慢小形变量(城区、矿区沉降等)的检测^[5]。

目前差分干涉的试验研究大都利用 ERS-1/2、JERS-1 等商业卫星串行任务(Tandem Mode)所获得的 SAR 图像, 在这种重复轨道(Repeat Pass)干涉情况下, 困难主要集中在如何消除基线误差、大气效应和时间去相干等因素对差分精度的影响。近年来, 国内外提出了多种分布式编队卫星 SAR 的概念系统^[6-7], 从而为差分干涉提供了一条新的研究思路, 利用该系统进行差分干涉的优点在于: (1) 同时获得的图像对不存在时间去相干问题, 所受大气效应的影响也不大, 因为此时时间基线为零, 空间基线也不大, 大气异质性表现不明显; (2) 能够利用星间测量设备获得高精度的星间基线, 从而提高形变测量精度。

1 双星编队 SAR 的立体基线分解

目前对 D-InSAR 原理的论述多是基于卫星轨道平行、雷达正侧视并且基线在主图像距离高度平面

* 收稿日期: 2008-03-17

作者简介: 王敏(1978-), 男, 博士生。

内这一简化模型^[8-9],但实际星载 SAR 系统并不能满足此假设,所获得图像对的基线通常不在主图像的距离高度平面内,但在干涉测高中我们关心的是基线的垂直分量,这就需要立体基线进行分解。双星编队 SAR 的空间几何关系如图 1 所示。

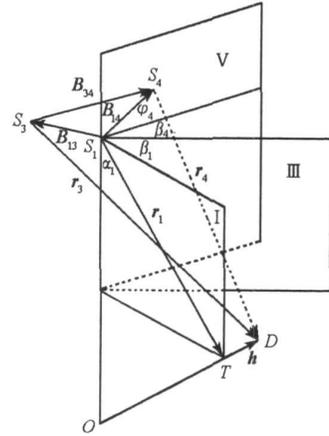
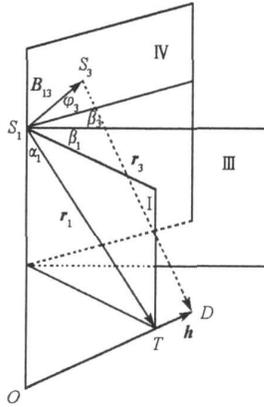
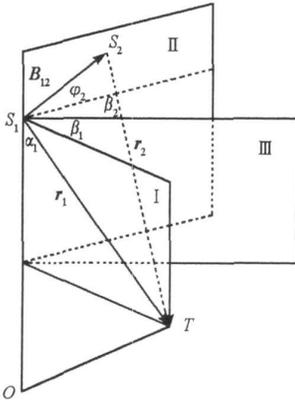


图 1 双星编队 SAR 几何模型

图 2 Slc1-sl3 干涉几何关系

图 3 Slc1-sl4 干涉几何关系

Fig. 1 Bistatic SAR geometry model Fig. 2 Slc1-sl3 interferometric geometry Fig. 3 Slc1-sl4 interferometric geometry

其中, O 点为地心, S_1 为主星位置, S_2 为辅星位置, T 为目标点, I 为卫星 1 的距离高度平面, II 为基线与地心所确定的平面, III 为卫星 1 的轨道面, 主辅星编队飞行。建立主星的质心轨道坐标系, S_1 为原点, Z 轴由航天器质心指向地心, X 轴在 S_1 轨道平面 III 内, 指向航天器运行方向并与 Z 轴垂直, Y 轴按右手法则确定。在此坐标系下将基线矢量 B 分解成三个分量:

• 视距向平行基线 B_{pr}

$$B_{pr} = B[\sin \alpha_1 \cos \varphi_2 \cos(\beta_1 + \beta_2) - \sin \varphi_2 \cos \alpha_1] \quad (1)$$

• 视距向垂直基线 B_{vr}

$$B_{vr} = B[\cos \alpha_1 \cos \varphi_2 \cos(\beta_1 + \beta_2) + \sin \varphi_2 \sin \alpha_1] \quad (2)$$

• 方位向垂直基线 B_{va}

$$B_{va} = B \cos \varphi_2 \sin(\beta_1 + \beta_2) \quad (3)$$

2 双星编队 SAR 的差分干涉

假设编队卫星工作在一发双收模式, 其中卫星 1 为主星, 既发射信号又接收信号, 卫星 2 为辅星, 只接收信号。由于双星编队飞行, 对同一地区双航过就可以得到四幅 SAR 图像, 假设在两次航过期间被观测区域发生形变, 第一次航过产生的两幅图像 slc1 和 slc2 为该区域形变前的图像, 第二次航过产生的两幅图像 slc3, slc4 为形变后的图像。其中 slc1, slc3 由主星接收的回波生成, slc2, slc4 由辅星接收的回波生成。以图像 slc1 与 slc2 干涉处理得到只包含形变前地形信息的干涉相位图, slc1 分别与形变后的图像 slc3 与 slc4 配对干涉得到两幅同时包含地形信息和形变信息的干涉相位图。三幅干涉相位图分别为

$$\phi_{12} = -\frac{2\pi}{\lambda}[\langle r_1, r_1 \rangle^{1/2} - \langle r_1 - B_{12}, r_1 - B_{12} \rangle^{1/2}] \approx -\frac{2\pi}{\lambda} B_{12pr} \quad (4)$$

$$\phi_{13} = -\frac{4\pi}{\lambda}[\langle r_1, r_1 \rangle^{1/2} - \langle r_1 + h - B_{13}, r_1 + h - B_{13} \rangle^{1/2}] \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B_{13pr} + \frac{4\pi}{\lambda} h_r \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \phi_{14} &= -\frac{2\pi}{\lambda}[\langle r_1, r_1 \rangle^{1/2} - \langle r_1 + h - B_{13}, r_1 + h - B_{13} \rangle^{1/2}] - \frac{2\pi}{\lambda}[\langle r_1, r_1 \rangle^{1/2} - \langle r_1 + h - B_{14}, r_1 + h - B_{14} \rangle^{1/2}] \\ &\approx -\frac{2\pi}{\lambda} B_{13pr} - \frac{2\pi}{\lambda} B_{14pr} + \frac{4\pi}{\lambda} h_r \end{aligned} \quad (6)$$

其中, h_r 为视线向形变量。将卫星 1 的下视角 α_1 分解为一参考视线下视角 α_0 与一小的视角增量 $\Delta\alpha$

之和的形式, 则干涉相位进一步简化为

$$\phi_{12} = -\frac{2\pi}{\lambda}B_{12pr}^0 - \frac{2\pi}{\lambda}\Delta\alpha B_{12pr}^0 \quad (7)$$

$$\phi_{13} = -\frac{4\pi}{\lambda}B_{13pr}^0 - \frac{4\pi}{\lambda}\Delta\alpha B_{13pr}^0 + \frac{4\pi}{\lambda}h_r \quad (8)$$

$$\phi_{14} = -\frac{2\pi}{\lambda}(B_{13pr}^0 + b_{14pr}^0) - \frac{2\pi}{\lambda}\Delta\alpha(B_{13pr}^0 + B_{14pr}^0) + \frac{4\pi}{\lambda}h_r \quad (9)$$

上标 0 指基线相对于参考视线矢量的分解。

由上面的三个相位简化公式得视线向形变的反演公式为

$$h_{r13} = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\left(\phi_{13} + \frac{2\pi}{\lambda}B_{13pr}^0 \right) - 2\frac{B_{13pr}^0}{B_{12pr}^0} \left(\phi_{12} + \frac{2\pi}{\lambda}B_{12pr}^0 \right) \right] \quad (10)$$

$$h_{r14} = \frac{\lambda}{4\pi} \left\{ \left[\left(\phi_{14} + \frac{2\pi}{\lambda}(B_{13pr}^0 + B_{14pr}^0) \right) \right] - 2\frac{B_{13pr}^0 + B_{14pr}^0}{B_{12pr}^0} \left(\phi_{12} + \frac{2\pi}{\lambda}B_{12pr}^0 \right) \right\} \quad (11)$$

上两式就是分别利用 slc1、slc2、slc3 以及 slc1、slc2、slc4 进行“三轨法”差分干涉的视线向形变反演公式, 可以看出它们和基于单星重复轨道任务的差分干涉公式^[1]存在一定差异, 这主要是由双星编队的干涉几何关系的特殊性造成的。观察差分干涉公式(10)与(11), 一方面, 干涉相位 ϕ_{12} 由双星编队 SAR 一次航过获得的两幅图像干涉处理得到的, 所以不会受到时间去相干的影响, 此外, 大气效应引起的噪声相位也很小, 因为此时时间基线为零, 空间基线也不大; 另一方面, 相位 ϕ_{13} 、 ϕ_{14} 是由编队两次航过的图像干涉处理得到的, 其中仍然包含一定的时间去相干和大气效应引起的误差。所以, 利用双星编队 SAR 进行单次差分干涉处理只能在一定程度上消除大气效应与时间去相干引起的不利影响。

由于前面利用编队获得的四幅图像进行了两次差分处理, 为了充分利用丰富的图像资源, 这里引入数据融合的思想, 进一步适当降低处理误差。考虑残余时间去相关、空间去相干以及热噪声的影响, 两次检测的视线向形变可以写成如下形式:

$$h_{r13} = h_r + n_1 \quad (12)$$

$$h_{r14} = h_r + n_2 \quad (13)$$

n_1 、 n_2 分别为两次差分处理引入的误差。 n_1 、 n_2 的统计特性可以通过各个误差源的统计特性推导得知, 但误差源模型的建立以及误差传递关系的确定都有很大的难度。为简化起见, 这里不妨假设 n_1 、 n_2 为相互独立的 0 均值高斯白噪声, 并具有相同的均方差。采用数据融合的思想, 依据最小二乘估计理论, 对 h_r 进行最小二乘估计, 结果为

$$\hat{h}_r = \frac{1}{2}(h_{r13} + h_{r14}) \quad (14)$$

这样, 以 \hat{h}_r 作为形变量在视线向的最终检测值可以有效地降低测量结果中的随机误差。

以上方法是在误差统计特性未知的情况下进行的最小二乘估计, 可以预见, 如果对各种误差源进行准确的建模, 根据误差传递关系, 确定 n_1 、 n_2 更准确的误差特性, 进而采用更准确的融合估计算法, 检测质量还将获得进一步的改善。

3 仿真实验

为了验证双星编队 SAR 差分干涉模型和融合算法的正确性和有效性, 利用本课题组开发的“天基雷达先进仿真器(SBRAS)”^[10]进行差分干涉的仿真实验, 误差 n_1 、 n_2 在回波模拟环节注入, 为高斯白噪声。实验中设计一太阳同步轨道的双星编队 SAR 系统, 雷达工作在 C 波段, 单发双收模式, 轨道与雷达参数分别如表 1、表 2 所示。利用一幅三维自然场景作为被观测区域, 在其中心约占总面积 3/5 的圆形区域内加一调幅正弦波作为地形形变量, 形变量峰值为 4cm。实验中设定的形变量仅发生在垂直向, 即图 2 和图 3 中 h 在 OT 向上, 此时能够利用视线向形变与简单的几何关系确定出来绝对形变量^[11]。

表1 双星编队轨道参数

Tab. 1 The orbit parameters of bi-satellite formation

	半长轴(km)	升交点赤经($^{\circ}$)	轨道倾角($^{\circ}$)	近地点幅角($^{\circ}$)	偏心率
主星	7162.98	98.549	133.012	123.30	0.000426
辅星	7162.97	98.552	133.011	115.05	0.000421

表2 发射星雷达参数

Tab. 2 The radar parameters of send satellite

中心频率(MHz)	带宽(MHz)	脉冲重复频率(Hz)	下视角($^{\circ}$)	斜视角($^{\circ}$)
5331.0	16.0	1735.0	29.6	89.0

图5和图6分别为原地形SAR图像的灰度图和地形形变幅度图。利用所建立的差分干涉模型进行处理,具体处理流程如图4所示,图7为视线向形变量在最小二乘后的估计结果,图8为形变量的解算误差。

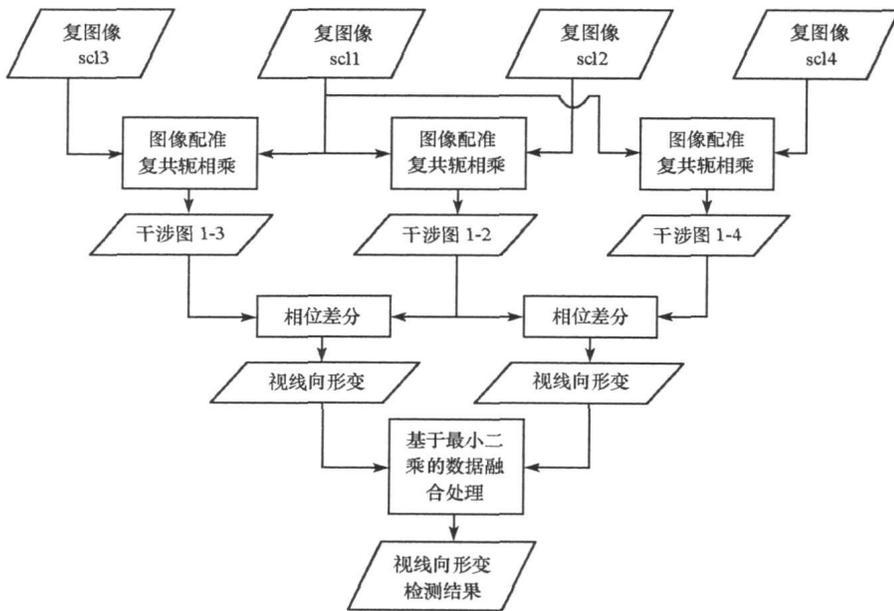


图4 双星编队SAR差分干涉的处理流程

Fig. 4 Bi-satellite formation SAR differential interferometry processing flow

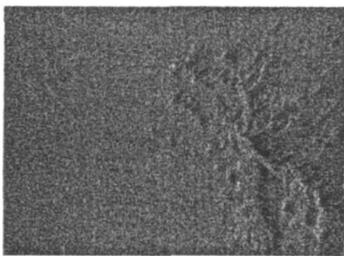


图5 原地形SAR图像

Fig. 5 SAR image of original terrain

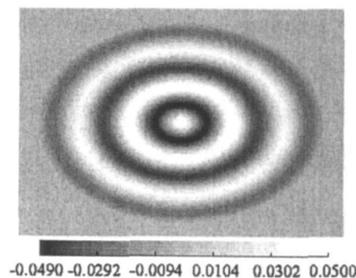


图6 模拟的地形形变(m)

Fig. 6 Simulated terrain deformation(m)

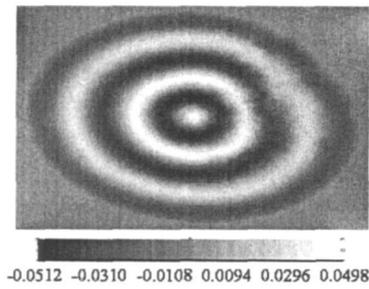


图7 融合之后的检测结果(m)

Fig. 7 Measurement result of data fusion(m)

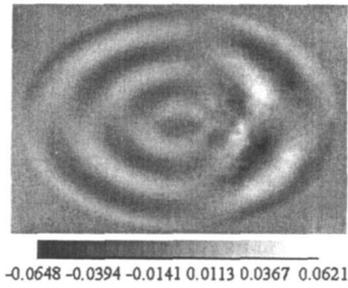


图8 形变量解算误差图(m)

Fig. 8 Error map of measurement deformation(m)

表3 检测误差统计结果

Tab. 3 Statistic results of measurement error

	slc1、slc2、slc3 差分结果	slc1、slc2、slc4 差分结果	最小二乘结果
误差均值(m)	- 0.00788	0.00653	- 0.00067
误差标准差(m)	0.01571	0.01673	0.01487

表3 给出 slc1、slc2 与 slc3, slc1、slc2 与 slc4 差分处理所得到的检测误差统计结果, 以及最小二乘之后的误差统计结果。比较表3 中三组数据可以看出, 最小二乘的精度优于任何单次差分检测的精度, 可见最小二乘方法对误差进行了进一步的抑制。

4 结论

双星编队 SAR 是国内外近年来提出的天基 SAR 新系统, 该系统在应用差分干涉技术检测地形形变方面较单星重复轨道模式具有一定的优势, 能在一定程度上降低大气效应、时间去相干等因素对检测质量的不良影响。本文结合双星编队 SAR 的系统特点, 建立了双星编队 SAR 立体基线情况下的差分干涉模型, 基于数据融合的思想对测量误差进行了进一步消除, 仿真实验结果进一步验证了模型与方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 59- 63.
- [2] 刘国祥. InSAR 基本原理[J]. 四川测绘, 2004, 27(4): 187- 190.
- [3] Gabriel A K, Golstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry[J]. Geophys. Res., 1989, 94: 9183- 9191.
- [4] Zebker H A, Rosen P. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1994, 99B(10): 19617- 19634.
- [5] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉降 D-InSAR 监测实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(8): 778- 781.
- [6] Krieger G, Fiedler H, Moreira A. Bi- and Multistatic SAR: Potentials and Challenges[C]//EUSAR, 2004: 365- 370.
- [7] 梁甸农, 朱炬波, 董臻. 小卫星分布式雷达[J]. 中国基础科学, 2004, 6: 7- 10.
- [8] 王超, 张红, 于勇, 等. 雷达差分干涉测量[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(3): 13- 17.
- [9] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry[C]//Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333- 382.
- [10] Wang M, Liang D, Huang H, et al. SBRAS—An Advanced Simulator of Spaceborne Radar[C]//Igass 2007, Barcelona, Spain, 2007.
- [11] 查显杰, 傅容珊, 戴志阳. 用 D-InSAR 技术测量地面形变位移三分量[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 997- 1002.