

机载 InSAR 敏感度方程定标限制条件的仿真实验^①

杨怀宁^② * * * * 郭华东 * 韩春明 *

(* 中国科学院对地观测与数字地球科学中心 北京 100020)

(** 中国地震应急搜救中心 北京 100049)

(*** 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要 通过对机载干涉合成孔径雷达(InSAR)常用的干涉参数定标方法——基于敏感度方程的干涉定标的仿真实验,分别在逐步增多需要定标的干涉参数个数和增大干涉参数偏差量的情况下,深入研究了这种定标方法对参与定标的干涉参数数目及干涉参数偏差边界值等的限制条件,结果表明,该方法在干涉参数和大偏差条件下可以实现有效校准。

关键词 干涉合成孔径雷达(InSAR), 定标, 敏感度方程, 仿真

0 引 言

机载干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)系统主要应用于地形测绘,美国于 20 世纪 60 年代末开始相关研究,并于 70 年代首次获取了较高精度的地形高程图^[1]。进入 80 年代后,随着美国 TopSAR^[2,3]、德国的 E-SAR^[4]和丹麦的 EMISAR^[5]等实用型机载 SAR 系统逐步研制成功,InSAR 技术及其应用研究得到了空前的发展。

载机飞行的不稳定性 and 系统误差严重影响和制约了机载 InSAR 生成高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM)^[6]。通过精确记录载机在飞行过程中的姿态变化,可以在 SAR 成像处理阶段对载机飞行的不稳定性进行校正^[7]。系统误差包括系统设备引起的相位偏移和系统参数偏差。其中前者是由系统的不完善性所致,具体有载机机身反射引起的电磁波多路径效应、主副天线之间的未完全隔离和通道泄漏等^[5]。系统参数偏差主要来自基线、时间延迟、载机姿态等参数的测量偏差。InSAR 定标的目的是对系统设备的相位偏移和干涉参数偏差进行校正,以提高生成 DEM 的精度。对系统设备相位偏移的校正称为干涉系统的设备定标,而对于干涉参数偏差的校正称为干涉参数定标。干涉系统的设备定标通常采用建模的方法进行处理^[5,8,9]。干涉参数定标的传统方法是基于相位校正的干涉定

标^[8],目前常用方法是基于敏感度方程的干涉定标^[6,7,10],其基本思想是求解目标三维位置关于干涉参数的偏导数,得到干涉敏感度方程,建立起目标函数与干涉参数偏差之间的关系,基于数个位置布放合理的定标点组成方程组,通过方程组求解的方法获取各个干涉参数偏差估计值,进而校正相应的干涉参数,并应用校正后的干涉参数进行目标三维重建,从而提高 DEM 的精度。

本文对基于敏感度方程的干涉参数定标方法进行了完全仿真,验证了该方法对参与定标的干涉参数个数以及各干涉参数误差边界值无明显要求。

1 斜视模型下的机载 InSAR 定标

1.1 斜视模型下的目标定位

机载双天线 InSAR 通过两副天线同时接收地面的反射信号,实现对地面的同时观测,获取同一景观的复数像对,其典型几何关系是斜视模型(见图 1)。在几何关系描述中,引入天线坐标系 xyz 和全局坐标系 sch , 分别如图 1(a)和图 1(b)所示。天线坐标系主要考虑基线向量和在 yz 平面内的天线辐射曲线图的最大值。全局坐标系近似于当地的地球椭圆, s 与名义上的载机飞行方向平行, h 指向高程向^[10]。

由于载机的旋转(包括偏航、俯仰和测滚运动)使天线指向偏离原来的垂向位置,产生了斜视角。

^① 863 计划(2007AA120304)资助项目。

^② 男,1975 年生,博士;研究方向:微波遥感;联系人, E-mail: huainingy@126.com
(收稿日期:2009-07-08)

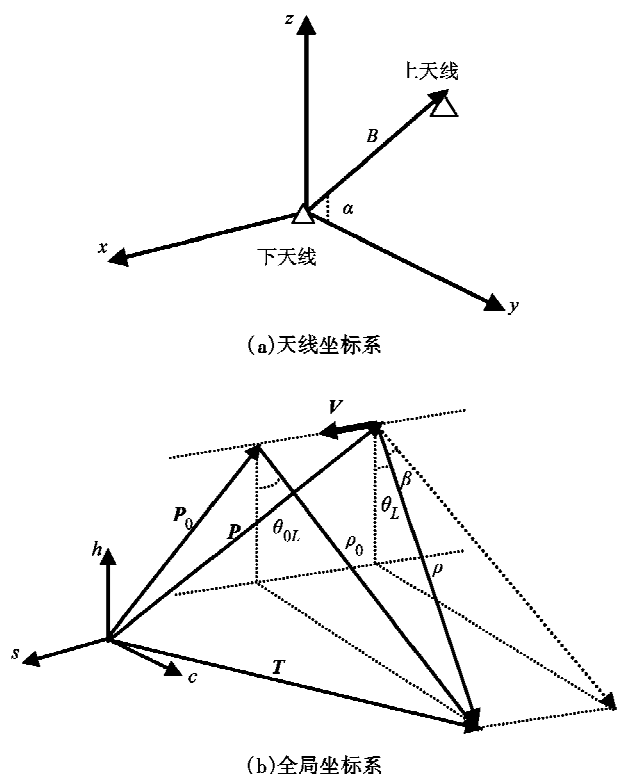


图 1 机载 InSAR 几何关系

根据图 1(b)的几何关系,目标点的位置 T 可以由主天线相位中心的位置 P 、惯性导航系统测出的载机姿态角(偏航角 θ_y 、俯仰角 θ_p 和滚转角 θ_r)、解缠干涉相位 φ 、基线长 B 和倾角 α 得出,公式为

$$T = P + \rho \begin{bmatrix} \sin\beta \\ \sqrt{\sin^2\theta_L - \sin^2\beta} \\ -\cos\theta_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 β 是斜视角, θ_L 是视角,可以分别由公式

$$\sin\beta = \sqrt{\cos^2\theta_p - \cos^2\theta_L} \cdot \frac{\sin\theta_y}{\cos\theta_p} + \cos\theta_L \cdot \cos\theta_y \cdot \tan\theta_p \quad (2)$$

$$\theta_L = \arccos(\cos\theta_p \cos(\alpha - \arcsin(\frac{\lambda\varphi}{2\pi B} + \frac{(\frac{\lambda\varphi}{2\pi B})^2 - B^2}{2B})) + \theta_r) \quad (3)$$

算出。

1.2 基于敏感度方程的干涉参数定标

通过对基本目标定位方程,即公式(1),针对各干涉参数求偏导数,可得出目标三维位置对不同干涉参数的敏感度,这些敏感度表示相应干涉参数对目标定位误差的影响,由各干涉参数的敏感度构成敏感度矩阵表示为

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{CR1}}{\partial B} & \frac{\partial T_{CR1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial T_{CR1}}{\partial \phi} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ \frac{\partial T_{CRL}}{\partial B} & \frac{\partial T_{CRL}}{\partial \alpha} & \frac{\partial T_{CRL}}{\partial \phi} & \dots \end{bmatrix} \quad (4)$$

目标位置差和参数偏差间的基本关系式,即敏感度方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{CR1} \\ \dots \\ \Delta T_{CRL} \end{bmatrix} = F \cdot \begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta \alpha \\ \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式可以简化为

$$\Delta = F \cdot \Delta X \quad (6)$$

其中: Δ 为 $L \times 1$ 目标位置误差,通常只对高程向定标,则 Δ 为高程数据误差向量; F 为 $L \times N$ 敏感度矩阵; ΔX 为 $N \times 1$ 待估计的干涉参数偏差向量; L 为定标点的数目; N 为待定标的参数数目。要求 $L > N$, 则式(6)为一超定线性方程组,应用最小二乘法求解^[10,11]。

获取定标数据的定标点,即地面控制点(ground control points, GCP),通常是在定标场中布放的角反射器(corner reflectors, CR)或者是 SAR 影像中易于辨别的特征点。随着需要定标干涉参数的数目增加,敏感度矩阵的条件数随之增加。如果 GCP 聚集在一定区域,将导致条件数恶化。敏感度矩阵的条件数过大会使定标处理对随机噪声非常敏感,降低条件数的有效途径之一是合理摆放定标器,即沿距离向等间距布设^[7,11,12]。

根据初始的名义干涉参数和展开相位生成 DEM,然后通过敏感度方程,建立起 GCP 处的位置偏差与干涉参数偏差的关系,计算出干涉参数偏差,更新相应的干涉参数,重新计算 DEM,直到前后两次计算的地面高程的均方差达到理想精度,一般情况下迭代过程需要三到四次,详细干涉参数定标算法参见文献[6,12,13]。

2 仿真实验

在实际情况下,几乎所有的机载 InSAR 参数,包括基线、干涉系统的相位偏置、绝对时间延迟、载机平台的位置和姿态等均存在误差,有的甚至较大。这样,在使用基于敏感度方程的干涉定标方法时,进一步明确参与定标的干涉参数个数以及其误差边界值等的限制条件具有重要意义。

本文以某机载 InSAR 的参数近似为基础,利用

干涉几何关系,结合地形起伏较大的 GCP 数据,对敏感度方程干涉参数定标方法进行完全仿真实验,分别在逐步增多需要校正的干涉参数个数和逐步增大干涉参数偏差量的情况下,深入研究使用该方法对参与定标的干涉参数数目及其误差边界值等的限制条件。

2.1 定标方法的仿真实验过程

在 SAR 成像处理阶段,对于载机姿态的俯仰角和滚转角已经进行了精确补偿,这里认为是零,根据

公式(2)斜视角也为零。本文仿真实验采用正侧视模型,并仅对目标高程进行校正。

敏感度方程干涉参数定标方法的仿真实验可以直接根据干涉几何关系和地面高程信息获取定标点的干涉相位,对相关干涉参数施加偏差,进而利用敏感度方程实施干涉参数定标,最终得出定标后的干涉参数及定标点的计算高程值,其原理框图如图 2 所示。

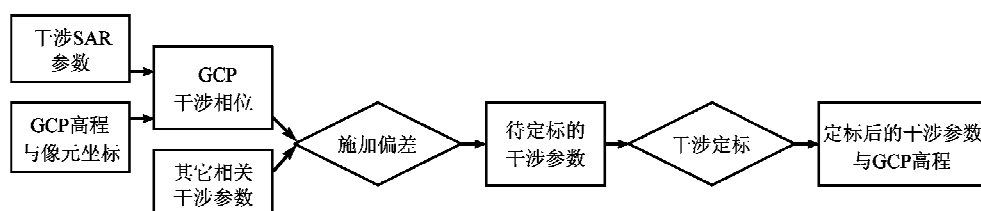


图2 定标方法仿真的原理流程图

基于敏感度方程的干涉参数定标仿真采用如下步骤进行:

(1) 明确干涉参数定标仿真实验需要使用的干涉参数;

(2) 结合定标器布放的原则,在距离向选取一系列点作为 GCP;

(3) 根据设置的干涉参数和 InSAR 几何关系,计算对应的 GCP 的干涉相位;

(4) 确定不同的干涉参数组合方案,对相关干涉参数施加偏差,利用敏感度方程的干涉参数定标方法进行实验,获取定标后的干涉参数和定标点高

程。

2.2 参与定标的干涉参数个数要求检验

在本仿真实验中,设置的干涉参数如表 1 所示的真值,所用的参数还有波长(为 0.031m)、斜距向分辨率(为 1.0m)。基于 GCP 个数要求大于待解算的干涉参数偏差数以及减少敏感度矩阵条件数的考虑,仅在单一方位沿距离向等间距选取 6 个 GCP,其具体像元位置如表 2 所示。结合设置的干涉参数和 GCP 的像元位置,计算得出各 GCP 的干涉相位(见表 2)。选取对 DEM 高程精度影响较大且常见的干涉参数,如基线、相位偏置、绝对时间延迟和载机姿

表 1 干涉参数定标仿真试验中设置的干涉参数及其偏差

干涉参数	基线长度 B (m)	基线倾角 α (rad)	相位偏置 φ (rad)	绝对时延 t (μ s)	航高 h (m)
真值	2.03	0.36	--	63.9	8300
偏差	-0.04	-0.02	3.0	2.0	-40
名义值	1.99	0.34	--	65.9	8260

表 2 干涉参数定标仿真实验中使用的 GCP 信息

GCP	距离向像元坐标	高程(m)	干涉相位(rad)
1	1000	30	-126.762219
2	2000	56	-167.151477
3	3000	82	-196.800523
4	4000	68	-218.340945
5	5000	46	-235.324725
6	6000	26	-249.271260

态等,分别按照基线长度、基线倾角和相位偏置,基线长度、基线倾角、相位偏置和绝对时间延迟,以及基线长度、基线倾角、相位偏置、绝对时间延迟和航高(这里指天线相位中心位置相对于航区基准面的垂直距离)等三种干涉参数组合方案。考虑实际情况下的干涉参数偏差量,各参数偏差及其名义值如表 1 所示。进而在地形起伏较大情况下利用敏感度方程的干涉参数定标方法进行实验。

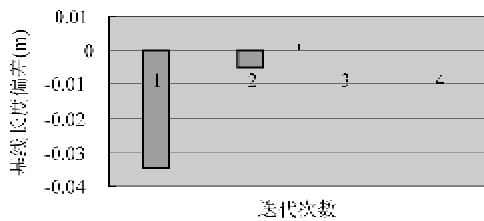
三种干涉参数定标组合方案的定标计算结果见

表 3、图 3 和表 4。实验结果表明,前两种干涉参数组合方案,经过 4 次迭代,干涉参数偏差已经完全小

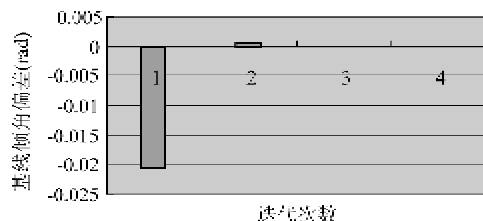
于 $\pm 1 \times 10^{-6}$, GCP 高程差均小于 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 。第三

表 3 三种干涉参数组合方案定标仿真实验下的参数偏差迭代结果

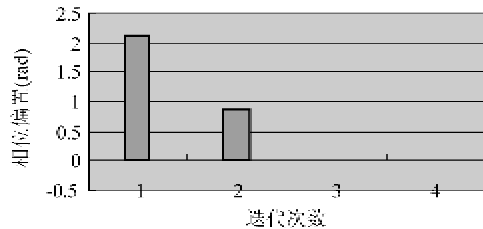
迭代次数		1	2	3	4
组合方案 1	ΔB (m)	-0.042782	0.002788	-0.000006	0.000000
	$\Delta\alpha$ (rad)	-0.0179629	-0.002035	-0.000002	0.000000
	$\Delta\varphi$ (rad)	4.058621	-1.059116	0.000496	-0.000000
组合方案 2	ΔB (m)	-0.034846	-0.005134	-0.000021	0.000000
	$\Delta\alpha$ (rad)	-0.020401	0.000399	0.000002	-0.000000
	$\Delta\varphi$ (rad)	2.138688	0.857258	0.004022	-0.000000
	Δt (μ s)	2.038020	-0.037860	-0.000159	-0.000000
组合方案 3	ΔB (m)	-0.031858	-0.008104	-0.000038	0.000000
	$\Delta\alpha$ (rad)	-0.023339	0.003337	0.000002	0.000000
	$\Delta\varphi$ (rad)	1.047574	1.944275	0.008034	-0.000001
	Δt (μ s)	2.176743	-0.176336	-0.000397	0.000000
	Δh (m)	-19.645095	-20.314299	-0.039159	0.000011



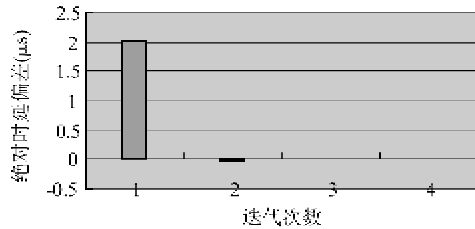
(a)基线长度偏差迭代结果



(b)基线倾角偏差迭代结果



(c)相位偏差偏差迭代结果



(d)绝对时延偏差迭代结果

图 3 第二种干涉参数组合方案定标仿真实验下的参数偏差迭代结果

表 4 三种干涉参数组合方案定标仿真实验下的高程差迭代结果 (m)

GCP 点号		1	2	3	4	5	6
组合方案 1	迭代 1 次	-138.677262	-154.602845	-165.580134	-173.713187	-179.851694	-184.368826
	迭代 2 次	1.460221	1.361376	1.376963	1.500761	1.713803	2.007799
	迭代 3 次	-0.015129	-0.015959	-0.016181	-0.016098	-0.015773	-0.015239
	迭代 4 次	0.000003	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000006
组合方案 2	迭代 1 次	-376.996636	-372.079534	-365.409629	-359.314823	-353.300728	-347.155672
	迭代 2 次	-2.004644	-2.147022	-2.007197	-1.738548	-1.367749	-0.910648
	迭代 3 次	-0.012611	-0.015033	-0.016387	-0.017224	-0.017702	-0.017900
	迭代 4 次	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003
组合方案 3	迭代 1 次	-416.996636	-412.079534	-405.409629	-399.314823	-393.300728	-387.155673
	迭代 2 次	-2.029981	-2.158359	-2.002533	-1.685053	-1.256556	-0.746614
	迭代 3 次	-0.076318	-0.088426	-0.098036	-0.106160	-0.113395	-0.120003
	迭代 4 次	0.000004	0.000004	0.000004	0.000003	0.000003	0.000003

种组合经过四次迭代后,除航高外其它干涉参数偏差均小于 $\pm 1 \times 10^{-6}$, GCP 高程差均小于 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 。实验结果说明:基于敏感度方程的干涉参数定标方法能够很快收敛;如果 GCP 的坐标能够精确测量且在 SAR 影像上精确定位,并在明确存在偏差的干涉参数的情况下,可以实现对干涉参数的精确定标;只要 GCP 个数大于待解算的干涉参数偏差数且布放合

理,对于参与定标的干涉参数个数就没有明显限制。

2.3 干涉参数误差边界值条件检验

在本仿真实验中,干涉参数和参与定标的 GCP 的设置与 2.2 实验完全一致。按照基线长度、基线倾角、相位偏置和绝对时间延迟组合方案,对相关参数施加的偏差值由小到大,分别得到三组干涉参数名义值(见表 5)。

表 5 干涉参数定标仿真试验中设置的干涉参数偏差及其名义值

干涉参数	第一组		第二组		第三组	
	偏差	名义值	偏差	名义值	偏差	名义值
基线长度 B (m)	-0.04	1.99	-0.10	1.93	-0.50	1.53
基线倾角 α (rad)	-0.02	0.34	-0.06	0.30	-0.12	0.24
相位偏置 φ (rad)	3	--	20	--	100	--
绝对时延 t (μ s)	2.0	65.9	6.0	69.9	10.0	73.9

第一组干涉参数的定标计算结果见表 3、表 4 的组合方案 2;第二、三组计算结果分别见表 6、表 7。实验结果表明,按照各组干涉参数偏差和对应名义

值的设置结果,第一组经过 4 次迭代,干涉参数偏差已经完全小于 $\pm 1 \times 10^{-6}$, GCP 高程差均小于 $\pm 1 \times 10^{-5}$,而第二组的调整结果经过 5 次迭代,第三组则

表 6 干涉参数定标仿真试验中的参数偏差迭代结果

干涉参数	ΔB (m)	$\Delta \alpha$ (rad)	$\Delta \varphi$ (rad)	Δt (μ s)
第二组	迭代 1 次	-0.059015	-0.066500	11.478068
	迭代 2 次	-0.039609	0.006293	8.216904
	迭代 3 次	-0.001374	0.000207	0.304608
	迭代 4 次	-0.000002	0.000000	0.000388
	迭代 5 次	0.000000	0.000000	0.000000
第三组	迭代 1 次	-0.111197	-0.199368	17.935281
	迭代 2 次	-0.271058	0.055993	55.306374
	迭代 3 次	-0.105210	0.0211794	23.903524
	迭代 4 次	-0.012387	0.002171	2.821048
	迭代 6 次	-0.000149	0.000025	0.033740
	迭代 7 次	-0.000000	0.000000	0.000002

表 7 干涉参数定标仿真试验中的高程差迭代结果(m)

GCP 点号	1	2	3	4	5	6
第二组	迭代 1 次	-1101.236076	-1181.156419	-1251.432164	-1317.524658	-1382.016181
	迭代 2 次	-2.372191	-8.518400	-12.461545	-15.224554	-17.210314
	迭代 3 次	-1.006328	-1.259923	-1.447503	-1.601592	-1.735308
	迭代 4 次	-0.001075	-0.001399	-0.001643	-0.001847	-0.002027
	迭代 5 次	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	-0.000000
第三组	迭代 1 次	-3169.406929	-3483.653962	-3727.669624	-3936.761444	-4129.010499
	迭代 2 次	77.101190	2.740978	-44.514018	-77.011389	-100.078982
	迭代 3 次	-55.473700	-75.555015	-89.921921	-101.444403	-111.250921
	迭代 4 次	-8.992556	-11.180318	-12.807107	-14.158957	-15.347434
	迭代 6 次	-0.113286	-0.140122	-0.160214	-0.176971	-0.191742
	迭代 7 次	0.000006	0.000001	-0.000002	-0.000006	-0.000008

经过 7 次迭代,干涉参数偏差和高程差精度均小于 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 。实验说明,在使用该方法进行参数定标时,各干涉参数对于偏差的边界值并无明显限制,当参数偏差较大时,需要迭代的次数较多,但在定标点的 GCP 位置布放合理且精确测量的前提下,最终都可以实现对各干涉参数的绝对定标,且 DEM 精度要求也完全可以实现。

3 结 论

在明确敏感度方程的机载干涉参数定标原理和具体实施步骤的基础上,根据仿真实验的目的,设计了参与定标的干涉参数组合方案以及对相关参数施加不同的偏差,并对该方法进行了验证。

仿真实验结果表明,即便在参与定标的干涉参数数目较多或者参数偏差较大的情况下,基于敏感度方程的干涉定标方法也可以很快实现收敛,并且均能够准确得出干涉参数和 GCP 高程真值,充分说明了基于敏感度方程的干涉参数定标方法的可行性。

敏感度方程的干涉定标需要使用多个定标点,定标点通常是角反射器或者是 SAR 影像上易于辨别的特征点,这样保证定标点在 SAR 影像上能够精确定位。另外定标点要求位置布放合理且经过精确测量。

仿真实验中选取了起伏较大的 GCP,表明如果定标器在 SAR 影像上能够清晰识别,干涉定标场地可以选择在地形有较大起伏的区域。

参考文献

- [1] Graham L C. Synthetic interferometric radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(6):763-768
- [2] Zebker H A, Madsen S N, Martin J, et al. The TOPSAR in-

terferometric radar topographic mapping instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 933-940

- [3] Madsen S N, Martin J M, Zebker H A. Analysis and evaluation of the NASA/JPL TOPSAR across-track interferometric SAR system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2):383-391
- [4] Scheiber R, Reigber A, Ulbricht A, et al. Overview of interferometric data acquisition and processing models of the experimental airborne SAR system of DLR. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Hamburg, German, 1999. 35-37
- [5] Madsen S N, Skou N, Woelders K, et al. EMISAR Single pass Topographic SAR interferometer modes. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Nebraska, USA, 1996. 674-676
- [6] Mallorqui J J, Bara M, Broquetas A. Calibration requirements for airborne SAR interferometry. In: *Proceedings of the SPIE Conference on SAR Image Analysis, Modeling and Techniques III*, Barcelona, Spain, 2000. 4173:267-278
- [7] Mallorqui J J, Rosado I, Bara M. Interferometric calibration for DEM enhancing and system characterization on single pass SAR interferometry. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Sydney, Australia, 2001. 404-406
- [8] Dall J, Grindler P J, Madsen S N. Calibration of a high resolution airborne 3D SAR. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Singapore, 1997. 1018-1021
- [9] Dall J, Christensen E L. Interferometric calibration with natural distributed targets. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toronto, Canada, 2002. 170-172
- [10] Mallorqui J J, Bara M, Broquetas A. Sensitivity Equations and Calibration Requirements on Airborne Interferometry. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Hawaii, USA, 2000. 2739-2741
- [11] 王彦平.机载干涉 SAR 定标模型与算法研究:[博士学位论文].北京:中国科学院电子学研究所,2003.87-100
- [12] 王彦平,彭海良,云日升.机载干涉合成孔径雷达定标中的定标器布放.电子与信息学报,2004,26(1):89-94
- [13] 张薇,向茂生,吴一戎.基于正侧视模型的机载双天线干涉 SAR 外定标方法.遥感技术与应用,2008,23(3): 346-350

Imitation experiment on the parameter requirements of the sensitivity equation-based calibration for airborne InSAR

Yang Huaining* ** ***, Guo Huadong*, Han Chunming*

(* Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100020)

(** National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049)

(*** Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract

By means of imitation experiment on the interferometric parameter calibration method based on sensitivity equations for airborne interferometric synthetic aperture radars (InSAR), the authors did the research on the requirements of the calibrated parameter number and the error capacity. The results show that this method can realize the interferometric parameters calibration even with more required calibrated parameters and larger errors of parameters.

Key words: interferometric synthetic aperture radars (InSAR), calibration, sensitivity equations, imitation