

机载 SAR 影像定向中像点粗差的拟准检定方法

邱春平¹ 秦志远² 熊 新¹ 张红敏¹ 靳国旺^{1,3} 李 贺¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001
2 河南城建学院测绘工程系,河南 平顶山,467036
3 中国测绘科学研究院,北京,100039

摘 要:结合距离-多普勒模型,推导了 SAR(synthetic aperture radar)影像定向中像点坐标粗差对误差方程的影响,分析了像点坐标粗差探测的必要性和难点;依据粗差的拟准检定法,针对 SAR 影像定向中的像点坐标粗差检定问题,设计了具体的解算流程和策略,首次将粗差的拟准检定法运用到机载 SAR 影像定向中。并分别利用模拟和实测数据进行了系统性的实验,结果表明,该方法不仅能够准确探测出多个粗差的位置,而且能够估计出粗差的大小。与 SAR 影像定向通常采用的最小二乘方法相比,该方法能够明显提高 SAR 影像定向参数的解算精度以及后续的立体定位精度,对于修复受粗差影响的 SAR 影像数据具有重要意义。

关键词:合成孔径雷达;立体定位;定向参数;粗差探测;拟准检定法
中图分类号:P237 **文献标志码:**A

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)以其全天时、全天候、不受天气影响的独特优势,受到了众多学者的高度重视,并发展成为一种获取地面目标位置信息的重要手段^[1]。利用 SAR 影像获取地面目标位置信息的主要途径包括 SAR 影像单像定位、SAR 影像立体定位、SAR 影像区域网平差、干涉 SAR(interferometry SAR, InSAR)技术、差分干涉(differential interferometry SAR, D-InSAR)技术、永久散射体干涉测量技术以及 SAR 层析技术等^[2-5]。这些方法对 SAR 影像定向参数的精度都有一定的要求,因此,SAR 影像定向不仅是立体定位的重要步骤,也是包括 SAR 影像几何纠正、区域网平差等处理手段的重要前提。

然而,SAR 侧视成像使得影像上会出现叠掩和阴影,相干成像又必然导致斑点噪声,这些特点增大了像点坐标粗差出现的概率,降低定向精度,并最终影响地面目标的定位精度。当前 SAR 影像摄影测量领域中有关粗差定位的研究主要集中在 SAR 影像匹配与 InSAR 获取的数字高程模型(digital elevation model, DEM)的地理编码方面,而在 SAR 影像定向参数解算、区域网平差等其他方面,有关粗差的研究较少。研究的方法主要有抗差估计^[6]、基于假设检验的粗差探测法^[7-8]

以及根据切比雪夫定理剔除 $(\mu-4\sigma,\mu+4\sigma)$ 之外的值^[9]。以上这些方法仅能够降低粗差对计算结果的影响,并不能够估计出粗差的大小,并且,当观测量中有多于 1 个粗差时,基于假设检验的粗差探测方法难以奏效^[10]。

本文针对 SAR 影像定向中的像点坐标粗差探测问题,进行了粗差检定方法的研究,以期能够准确估计出像点粗差的大小,提高 SAR 影像的定向精度以及后续处理的精度。首先推导了像点坐标粗差对误差方程的影响,然后借鉴文献[10]提出的粗差的拟准检定法,设计了 SAR 影像定向的粗差检定流程,并分别基于模拟和实测的机载 SAR 影像数据进行了一系列实验,验证了本文方法的正确性和有效性。

1 机载 SAR 影像定向粗差分析

SAR 影像定向模型采用经典的距离-多普勒模型,包括距离方程和多普勒方程,表达式为:

$$\left\{\begin{aligned}R_s &= (X-X_s)^2 + (Y-Y_s)^2 + (Z-Z_s)^2 = \\&\quad (yM_y + D) \\V_x(X-X_s) + V_y(Y-Y_s) + V_z(Z-Z_s) &= -\frac{\lambda R_s}{2}f\end{aligned}\right.$$

(1)

式中, (X,Y,Z) 表示地面点在物方坐标系中的三维坐标; R_s 表示地面点 (X,Y,Z) 对应的斜距; M_y 表示为 SAR 影像的斜距向采样间隔; D 表示近距延迟; y 表示 SAR 影像的斜距向像点坐标; f 表示天线相位中心的多普勒频移; (X_s,Y_s,Z_s) 、 (V_x,V_y,V_z) 分别表示 SAR 天线相位中心在物方坐标系中的位置矢量和速度矢量,可由初始时刻的位置矢量 (X_{s0},Y_{s0},Z_{s0}) 和速度矢量 (V_{x0},V_{y0},V_{z0}) 以及时间 T 获得:

$$\begin{cases} X_s = X_{s0} + V_x T \\ Y_s = Y_{s0} + V_y T \\ Z_s = Z_{s0} + V_z T \\ V_x = V_{x0} \\ V_y = V_{y0} \\ V_z = V_{z0} \\ T = Kx \end{cases} \quad (2)$$

式中, x 表示 SAR 影像的方位向像点坐标; K 表示方位向各行间的时间间隔,规定初始时刻为 0。

SAR 影像定向即是解算参数 $(X_{s0},Y_{s0},Z_{s0},V_{x0},V_{y0},V_{z0},D,f)$ 的过程。由于式(1)是关于定向参数的非线性方程,因此,需要根据泰勒公式进行线性化,得到误差方程式:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}_0 - \mathbf{L}, \mathbf{P} \quad (3)$$

式中, \mathbf{V} 、 \mathbf{A} 、 $\hat{\mathbf{X}}_0$ 、 \mathbf{L} 、 \mathbf{P} 分别为误差方程的残差、系数矩阵、定向参数的改正数向量、误差方程的观测向量向量和权矩阵。当存在多于 4 个地面控制点时,利用其对应的像点坐标和 SAR 系统参数通过迭代解算即可求出定向参数。

为推导像点坐标的粗差对误差方程的影响,假设某像点坐标粗差为 $(\Delta x, \Delta y)$,对应的误差方程的观测量为 \mathbf{L}' ,不含粗差时的观测量为 \mathbf{L} ,则粗差对 \mathbf{L} 的影响可以用 $\Delta \mathbf{L} = \mathbf{L}' - \mathbf{L} = [\Delta L_1 \ \Delta L_2]^T$ 来表示,其中,

$$\begin{cases} \Delta L_1 = -(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)\Delta x^2 + 2(V_x(X - X_s) + V_y(Y - Y_s) + V_z(Z - Z_s))\Delta x + M_y^2\Delta y^2 + 2M_y(yM_y + D)\Delta y \\ \Delta L_2 = (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)\Delta x - \lambda f M_y \Delta y / 2 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,两个方向的像点粗差对误差方程的影响各不相同,距离方程和多普勒方程受到的影响各不相同,这对于粗差检定方法的设计具有启示作用。一方面,不宜把所有的方程放在一起进行粗差探测;另一方面,若已经求出观测向量 \mathbf{L} 的粗差 $\Delta \mathbf{L}$,可以通过解算非线性方程组(4),求出像点坐标粗差 $(\Delta x, \Delta y)$ 。

2 机载 SAR 影像定向中像点粗差的拟准检定原理及流程

首先介绍粗差的拟准检定法^[10-12],然后具体讨论机载 SAR 影像定向的粗差检定方法和流程。式(3)对应的观测方程为:

$$\mathbf{A}\mathbf{X}_0 = \mathbf{L} + \mathbf{A}, \mathbf{P} \quad (5)$$

式中, \mathbf{A} 为 $m \times n$ 维系数矩阵; \mathbf{X}_0 为 m 维待估参数的真值向量; \mathbf{L} 为 n 维观测向量; \mathbf{A} 为真误差向量。由 n 阶单位阵 \mathbf{I} 和投影矩阵 $\mathbf{J} = \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P}$ 可以得到平差因子阵 \mathbf{R} ,且满足:

$$\mathbf{R}\mathbf{A} = -\mathbf{R}\mathbf{L} \quad (6)$$

这是一个秩亏方程,求解需要附加约束条件。

设选出了 r 个拟准观测,且 $r > m$,在式(6)的基础上附加“拟准观测的真误差的范数极小”,即 $\|\Delta_r\|^2 = \min$,可以求得真误差估值 $\hat{\mathbf{A}}$ 的确定解。当观测值中含有粗差时,正确选择拟准观测,求得的真误差估值呈现明显的分群,即某些真误差明显偏大,这就为辨识和定位粗差提供了可靠的依据,根据一定的标准判定离群真误差(明显偏大的真误差)对应的观测含有粗差^[10]。

现假设找到了 b 个粗差 \mathbf{G}_b ,得到 b 个 n 维单位向量 $\mathbf{e}_j = (0 \cdots 0 \ 1 \ 0 \cdots 0)^T, j = 1 \cdots b$,第 j 个观测有粗差对应第 j 个分量为 1,其余为 0。令 $\mathbf{C}_b = (\mathbf{e}_1 \cdots \mathbf{e}_b)$,粗差的估值为 $\hat{\mathbf{C}}_b$,则含有粗差的观测方程为:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{A} \ \mathbf{C}_b) \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_0 \\ \hat{\mathbf{C}}_b \end{bmatrix} - \mathbf{L} \quad (7)$$

利用最小二乘法,可从式(7)中求出粗差的估值^[10]:

$$\hat{\mathbf{G}}_b = (\mathbf{C}_b^T \mathbf{P} \mathbf{R} \mathbf{C}_b)^{-1} \mathbf{C}_b^T \mathbf{P} \mathbf{R} \mathbf{L} \quad (8)$$

拟准检定法的关键在于拟准观测的选定,参照该方法,本文设计了针对 SAR 影像定向的粗差拟准检定方法,并基于大量的实验总结了一套拟准观测的选择策略,具体流程如图 1 所示,大致可分为以下 3 部分,即预平差、计算像点坐标粗差和解算 SAR 影像定向参数。

2.1 预平差

与一般的定向参数解算过程不同,每一次迭代解算都对观测值做一次评估。为此,计算出平差因子阵 \mathbf{R} 之后,分别计算 $a_i = -r_{ii}l_i, b_i = -\sum_{i \neq j} r_{ij}l_j, \lambda_i = 1/r_{ii}, \lambda m_i = (\sum_{i=0}^n \lambda_j - \lambda_i)/(n-1)$,其中 r_{ii}, r_{ij} 为 \mathbf{R} 的元素;标准化残差 $\mu_i = v_i/(\hat{\sigma}_0 \sqrt{r_{ii}})$,其中 $\hat{\sigma}_0$

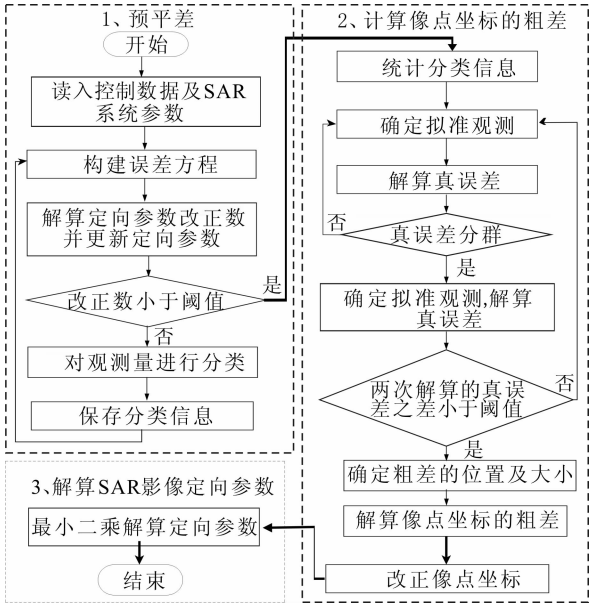


图 1 SAR 影像定向中像点粗差的拟准检定流程

Fig. 1 The Quasi-Accurate Detection Process for SAR Image Positioning

$= \text{med}_j |v_j| (j = 1 \cdots n)$ 。将满足下列任何一个条件的观测量归为非拟准观测^[10], 即可能含有粗差的观测, 并保存。

① $ab_i = |a_i| - |b_i| > 3\text{med}|a_i|$ 或者 $|a_i|$ 和 $|b_i| > 3\text{med}|a_i|$;

② $\lambda_i > 1.5\lambda m_i$;

③ 标准化残差从大到小排序之后的前 $n_0 = n_g\alpha$ 个, 其中 n_g 为控制点的个数, α 为粗差出现的概率, 一般取 $1\% \sim 10\%$ ^[10], 注意对标准化残差进行排序的时候要把距离方程和多普勒方程分开分别进行, 这是由误差方程的特点决定的。

2.2 计算像点坐标的粗差

对预平差中保存下来的非拟准观测进行统计, 根据出现的次数进行排序, 出现的次数越多, 可疑性越高。具体步骤为:

1) 初步选出 n_0 个最可能的非拟准观测, 将其他的观测认定为拟准观测, 解算真误差。

2) 查看上一步解算出的真误差是否分群, 如不分群, 返回第 1) 步, 增加非拟准观测的数量, 重新选择拟准观测; 如分群, 则进行下一步。

3) 认为离群真误差对应的观测值为非拟准观

测, 重新选定拟准观测, 解算真误差。

4) 查看之前两次解算的真误差是否小于一定的阈值, 如不小于, 则返回第 1) 步; 如果小于一定的阈值, 则确定离群真误差对应的观测含有粗差, 进行下一步。

5) 解算误差方程的观测量对应的粗差。假设某一像点 (x, y) 对应的误差方程的观测量含有粗差 $\Delta L_C = [\Delta L_1 \ \Delta L_2]^T$, 则解算式 (4), 即可求出该点所含有的粗差 $(\Delta x, \Delta y)$ 。

2.3 解算 SAR 影像定向参数

利用 § 2.2 解算出的像点坐标粗差改正初始的像点坐标值, 然后, 迭代解算定向参数。

3 实验与分析

测量平差中一般认为大于 3 倍中误差的误差是粗差, 然而, 实测数据的中误差无法事先得知, 粗差的位置和大小也很难确定。一般需要通过后续处理的精度来评估数据质量。因此, 首先设计了一组模拟实验来验证本文方法的有效性; 然后, 基于实测数据, 分别采用最小二乘解法和本文方法进行了 SAR 影像定向和立体定位实验, 进而通过立体定位的精度间接地评估定向参数的解算精度。

3.1 基于模拟数据的粗差检定

为了分析方便, 此处假定多普勒中心频移为 0, 此时式 (1) 即为 F. Leberl 公式。给定 SAR 系统参数, 利用 F. Leberl 公式, 由一组像点坐标及对应地面点的高程 (x, y, Z) , 可以解算对应地面点的平面坐标 (X, Y) 。数据模拟中采用的定向参数分别为: $X_{S0} = 0; Y_{S0} = 0; Z_{S0} = 3\ 200\text{ m}; V_{X0} = 0.001\text{ m/像素}; V_{Y0} = 0.3\text{ m/像素}; V_{Z0} = 0; D = 2\ 627\text{ m}$ 。

在点 1 和点 3 上分别添加不同大小的粗差, 对应的实验分别记为实验 1.1、1.2 和 1.3, 模拟粗差大小和检定结果如表 1 所示。另外, 为了对比本文方法和最小二乘 (least square, LS) 方法的解算精度, 分别计算了两种解法的单位权方差和定向参数解算值的绝对误差。实验结果如表 2 所示。

表 1 基于模拟数据的机载 SAR 影像定向粗差检定结果/像素

Tab. 1 Gross Error Detection Results for Airborne SAR Image Orientation with Simulated Data/像素

粗差位置	粗差方向	实验 1.1		实验 1.2		实验 1.3	
		模拟粗差	检定结果	模拟粗差	检定结果	模拟粗差	检定结果
点 1	方位向	-4.00	-3.99	-14.00	-13.93	-24.00	-23.82
	距离向	3.00	2.93	13.00	13.24	23.00	24.03
点 3	方位向	6.00	5.93	16.00	15.88	26.00	25.78
	距离向	-8.00	-8.07	-18.00	-18.52	-28.00	-29.53

表 2 基于模拟数据的机载 SAR 影像定向结果精度统计

Tab. 2 Precision Analysis of Airborne SAR Image Orientation with Simulated Data

比较指标		实验 1.1		实验 1.2		实验 1.3	
		LS 方法	本文方法	LS 方法	本文方法	LS 方法	本文方法
单位权中误差	σ	2.58	5.37×10^{-2}	7.10	1.46×10^{-1}	1.17×10	4.24×10^{-1}
参数解算绝对误差	X_{S0}/m	1.26×10	3.85×10^{-1}	5.47×10	1.42	1.05×10^2	3.97
	Y_{S0}/m	4.18	6.10×10^{-2}	1.11×10	1.48×10^{-1}	1.78×10	6.46×10^{-1}
	Z_{S0}/m	1.82×10	5.89×10^{-1}	7.06×10	1.96	1.32×10^2	5.28
	$V_{X0}/\text{m}\cdot\text{像素}^{-1}$	1.47×10^{-5}	2.15×10^{-6}	1.08×10^{-4}	3.24×10^{-7}	2.04×10^{-4}	6.09×10^{-6}
	$V_{Y0}/\text{m}\cdot\text{像素}^{-1}$	2.32×10^{-4}	6.16×10^{-6}	6.80×10^{-4}	1.05×10^{-5}	1.12×10^{-3}	1.94×10^{-6}
	$V_{Z0}/\text{m}\cdot\text{像素}^{-1}$	3.66×10^{-4}	5.31×10^{-6}	1.04×10^{-3}	1.98×10^{-5}	1.72×10^{-3}	7.86×10^{-6}
	D/m	2.09×10	7.03×10^{-1}	8.62×10	2.35	1.64×10^2	6.37

分析表 1 和表 2 可知,对于不同大小、不同方向的像点粗差,本文设计的 SAR 影像定向粗差检定方法都能够准确检测出粗差的位置,并解算出粗差的大小,解算精度在一个像素以内。和最小二乘方法相比,本文方法能够明显提高 SAR 影像的定向精度。这说明本文方法是准确可行的。

3.2 基于实测数据的粗差检定

选用文献[2]中的一对立体像对作为实验数据,左片控制点 11 个,右片控制点 13 个,左右两

片的连接点 6 个。由于参数的真值无法获知,为了比较本文方法与最小二乘方法的优劣,利用解算出的定向参数进行了立体交会,得到连接点地面坐标的解算值,把连接点地面坐标的残差作为 SAR 影像定向精度的评价指标。根据模拟粗差的大小,本节的实验分别记为实验 2.1、2.2 和 2.3。在左右两张影像的第 1、3 个点上分别添加不同大小的模拟粗差,模拟粗差及检定结果如表 3 所示。

表 3 基于实测数据的机载 SAR 影像定向粗差检定结果/像素

Tab. 3 Gross Error Detection Results for Airborne SAR Image Orientation with Real Data/像素

粗差位置		粗差方向	实验 2.1		实验 2.2		实验 2.3	
			模拟粗差	解算结果	模拟粗差	解算结果	模拟粗差	解算结果
像对左片	点 L_1	方位向	-4.00	-1.22	-14.00	-11.56	-24.00	-22.41
		距离向	3.00	-11.06	13.00	-1.06	23.00	-31.63
	点 L_3	方位向	6.00	4.83	16.00	14.52	26.00	25.52
		距离向	-8.00	-3.78	-18.00	-14.67	-28.00	-45.53
像对右片	点 R_1	方位向	-4.00	-4.26	-14.00	-13.98	-24.00	-24.51
		距离向	3.00	6.72	13.00	14.79	23.00	26.30
	点 R_3	方位向	6.00	7.95	16.00	18.53	26.00	29.11
		距离向	-8.00	-10.19	-18.00	-20.25	-28.00	-30.96

分析表 3 可知,本文的方法能够检测出粗差的位置,并计算出粗差的大小,但并不精确,个别点上粗差的解算结果和模拟值相差很大。进一步的实验和分析发现,这是原始数据的误差造成的,SAR 影像像点坐标量测值难免存在误差,且误差的大小和位置未知,一些点的误差可能较大,不再是偶然误差,而是较小的粗差。当含粗差的观测值较多时,各个观测值相互影响,容易出现掩盖和湮没现象^[13-16],导致粗差定位失败。

为了验证上述分析,需要考察原始数据的精度。首先,利用不加模拟粗差的数据,分别采用本文方法和最小二乘方法进行 SAR 影像定向,然后,利用解算的定向参数进行立体定位,记为实验 2.0。检定结果显示,左右像片分别有 2 个、4 个点上存在不等大小的粗差,这初步验证了上面的分析。实验 2.0、2.1、2.2、2.3 的立体定位结果分

别如表 4、表 5 所示。分析表 4、表 5 可知:

- 1) 对于原始数据,即实验 2.0,本文方法明显优于最小二乘法,这说明原始数据的确含有粗差。与此同时,对比实验 2.0 和实验 2.1,当同样采用本文的方法时,添加了模拟粗差的数据的立体定位精度反而比原始数据高,这是因为原始数据中的误差并不全是偶然误差,也有一些小粗差,加上模拟粗差之后,原本的小粗差反而能够更好地探测出来,这再次验证了之前关于原始数据的分析。
- 2) 不经过粗差检定,直接利用原始数据进行 SAR 影像参数解算和立体定位会损失精度,并且像点坐标粗差越大,对参数解算的影响越大。因此,在进行 SAR 影像定位之前,应该剔除原始数据中的粗差。
- 3) 本文设计的 SAR 影像定向方法能够有效地探测出像点粗差的位置,并计算出粗差的大小,

进而明显提高 SAR 影像定向参数的解算精度和 立体定位精度。

表 4 基于实测数据的机载 SAR 影像立体交会精度统计表(1)/m
Tab. 4 Precision Analysis of Stereo-positioning with Airborne SAR Images (1)/m

对比指标	实验 2.0						实验 2.1					
	LS 方法			本文方法			LS 方法			本文方法		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
6 个 连接点 的残差	1.33	0.16	0.69	0.35	0.04	-0.01	1.37	0	0.93	0.03	0.01	-0.23
	-0.96	-0.02	-0.68	0.28	0	0.44	-1.94	-0.43	-1.73	0.30	0.15	0.49
	-1.52	-0.59	-1.98	-0.47	-0.41	-0.68	-1.29	-0.07	-2.17	-0.34	-0.43	-0.68
	-0.45	0.34	-0.46	-0.33	-0.02	-0.33	-1.15	0.74	-1.77	-0.36	0.02	-0.36
	-0.19	0.35	-0.16	-0.73	0.05	-0.74	-0.63	0.31	-1.07	-0.18	0.07	0.09
	0.39	0.32	-0.05	0.13	0.29	-0.38	-0.49	0.64	-1.74	0.24	0.37	0.02
中误差	0.95	0.34	0.92	0.43	0.21	0.49	1.24	0.46	1.63	0.27	0.24	0.39

表 5 基于实测数据的机载 SAR 影像立体交会精度统计表(2)/m
Tab. 5 Precision Analysis of Stereo-positioning with Airborne SAR Images(2)/m

对比指标	实验 2.2						实验 2.3					
	LS 方法			本文方法			LS 方法			本文方法		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
6 个 连接点 的残差	1.59	-0.50	1.33	0.42	-0.11	0.30	1.96	-1.01	1.84	-0.17	0.13	-0.29
	-3.53	-1.29	-3.53	-0.07	0.17	-0.09	-5.16	-2.13	-5.37	0.10	-0.06	0.29
	-0.62	0.94	-2.29	-0.04	-0.59	-0.17	0.22	1.97	-2.26	-0.85	-0.57	-1.19
	-2.07	1.48	-3.76	0	0.33	0.34	-2.90	2.21	-5.67	0.80	0.24	1.12
	-1.55	0.25	-2.65	-0.43	0.07	-0.39	-2.62	0.21	-4.41	-0.04	0.32	0.17
	-2.07	1.23	-4.52	0.10	0.32	-0.25	-3.75	1.81	-7.46	-0.22	0.22	-0.56
中误差	2.09	1.05	3.19	0.25	0.32	0.28	3.16	1.71	4.91	0.49	0.30	0.73

4 结 语

本文在推导了 SAR 影像定向中像点坐标粗差对误差方程影响的基础上,分析了像点坐标粗差探测难点;依据粗差的拟准检定法,针对 SAR 影像定向,设计了粗差拟准检定的流程,首次将粗差的拟准检定法运用到机载 SAR 影像定向中。实验结果表明,该方法能够准确探测出多个粗差的位置,并估计出粗差的大小,进而明显提高 SAR 影像定向参数的解算精度以及后续的立体定位精度。这对于修复受粗差影响的像点数据具有重要意义,尤其是在控制数据不足的情况下。

研究发现,即便是对于较小的粗差,本文方法仍然具有一定的效果,但是当粗差较小且个数较多时,平差中存在掩盖和淹没现象,这一直是粗差探测领域的难点之一,也是下一步的研究重点。

随着遥感数据处理进入大数据时代,数据采集趋向于自动化和快速化,这在一定程度上增大了粗差出现的概率;另一方面,人们对测量结果的准确性和精度要求越来越高。因此,进一步研究粗差拟准检定法及其他粗差检定方法在 SAR 影像区域网平差中的应用,具有重要的现实意义。

参 考 文 献

[1] Jin Guowang. Research on Key Processing Techniques for Deriving Accurate DEM from InSAR[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007(靳国旺. InSAR 获取高精度 DEM 关键处理技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2007)

[2] Zhang Hongmin. Research on Technologies of Accurate Positioning with SAR Images[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2013(张红敏. SAR 影像高精度定位技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2013)

[3] Zhang Hongmin, Jin Guowang, Xu Qing, et al. Accurate Positioning with Stereo SAR Images and One Ground Control Point [J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(1):85-91(张红敏, 靳国旺, 徐青, 等. 利用单个地面控制点的 SAR 图像高精度立体定位[J]. 雷达学报, 2014, 3(1): 85-91)

[4] Wang Mengmeng, Huang Guoman, Hua Fenfen, et al. Joint Calibration Method of Airborne Dual-antenna Interferometric SAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(12): 1 259-1 265(王萌萌, 黄国满, 花奋奋, 等. 机载双天线 InSAR 联合定标算法[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1 259-1 265)

[5] Gisinger C, Balss U, Pail R, et al. Precise Three-

Dimensional Stereo Localization of Corner Reflectors and Persistent Scatterers with TerraSAR-X [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 1 782-1 802

[6] Frankot R T, Hensley S, Shafer S. Noise Resistant Estimation Techniques for SAR Image Registration and Stereo Matching [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, California, USA, 1994

[7] Yague-Martinez N, Eineder M, Brcic R, et al. TanDEM-X Mission: SAR Image Coregistration Aspects[C]. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010

[8] Shi Lei, Li Pingxiang, Yang Jie. SAR Imagery Registration Based on SIFT and Data Snooping [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(11): 1 296-1 299(史磊, 李平湘, 杨杰. 利用 SIFT 与粗差探测进行 SAR 影像配准 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(11): 1 296-1 299)

[9] Liao M, Wang T, Lu L, et al. Reconstruction of DEMs from ERS-1/2 TanDEM Data in Mountainous Area Facilitated by SRTM Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2 325-2 335

[10] Ou Jikun. Quasi-Accurate Detection of Gross Error [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(1): 15-20(欧吉坤. 粗差的拟准检定法 (QUAD 法)[J]. *测绘学报*, 1999, 28(1): 15-20)

[11] Chai Yanju. Theory, Application and Program Design of Quasi-Accurate Detection[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, University of Chinese Academy of Sciences, 2002(柴艳菊. 拟准检定法的理论、应用及程序设计[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(测量与地球物理研究所), 2002)

[12] Han Baoming, Ou Jikun. Detecting and Repairing the Gross Errors and Cycle Slips by QUAD Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(3): 246-250(韩保民, 欧吉坤. 用拟准检定法探测和修复 GPS 数据中的粗差和周跳[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2002, 27(3): 246-250)

[13] Han Baoming, Ou Jikun, Qu Guoqing. A Comprehensive Kalman Filtering and Its Application to GPS-based Orbit Determination for LEOs[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(6): 493-496(韩保民, 欧吉坤, 曲国庆. 一种新的综合 Kalman 滤波及其在星载 GPS 低轨卫星定轨中的应用[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2005, 30(6): 493-496)

[14] Gui Qingming, Li Xinna. Bayesian Unmasking Method for Positioning Multiple Blunder[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(1): 1-5(归庆明, 李新娜. 多个粗差定位的抗掩盖型 Bayes 方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(1): 1-5)

[15] Zhang Qianqian, Gui Qingming, Wang Yanting. Multiple Outlier Detection in Observations Including Leverage Points with Outliers by Bayes Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 582-585(张倩倩, 归庆明, 王延婷. 处理高杠杆异常值的抗隐差型 Bayes 方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(5): 582-585)

[16] Wang Yanting, Gui Qingming. Bayes Unmasking Method to Detection of Gross Errors Together with Influence Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9): 1 055-1 058(王延婷, 归庆明. 结合影响分析的抗隐差型 Bayes 粗差探测方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(9): 1 055-1 058)

Quasi-Accurate Detection of Image Coordinate Gross Error for Airborne SAR Images Orientation

QIU Chunping¹ QIN Zhiyuan² XIONG Xin¹ ZHANG Hongmin¹ JIN Guowang^{1,3} LI He¹

1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 Department of Surveying and Mapping Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China

3 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China

Abstract: This paper focuses on the detection of gross error in airborne SAR image coordinates during the process of orientation parameter calculation and stereo positioning. Firstly, based on the range Doppler model, a preliminary discussion is conducted to investigate the impact of image coordinate gross error on the error equations. Secondly, after analyzing the necessity and difficulty of gross detection,

Accuracy Verification and Analysis of Ground-based Synthetic Aperture Radar Based on Two-dimensional Deformation Field

ZHOU Lü^{1,2} GUO Jiming^{1,3} HU Jiyuan¹ ZHANG Di¹ CHEN Ming^{1,4} YANG Fei¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

3 Key Laboratory of Precise Engineering and Industry Surveying of NASG, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

Abstract: Ground-based interferometric radar can realize small regional-scale continuous deformation monitoring with high-accuracy. To investigate the deformation detection capability and accuracy, a set of accuracy verification platform and system are established in this paper. The corner reflectors are arranged at different positions on the roof and the stepping platforms are used to control the corner reflectors and simulate deformation in different values. The deformation corner reflectors, stable points and the surface of the roof constitute a small two-dimensional deformation field. We use the IBIS-L system to finish the deformation detection and analysis. The experimental results show that when the millimeter level deformation occurs in the corner reflectors, the average accuracy of deformation detection of the ground-based interferometric radar IBIS-L system is 0.27 mm, while the sub millimeter level deformation occurs the corner reflectors, its average accuracy is 0.11 mm. This system can realize the sub millimeter level deformation detection in small regional-scale. For the small and slow change, this system has better deformation detection ability and reliability.

Keywords: GBSAR; interferometry; corner reflector; deformation detection; accuracy verification

First author: ZHOU Lü, PhD, specializes in the data processing theory and algorithm of InSAR/GB-InSAR. E-mail: zhoulv_w hu@163.com
Corresponding author: GUO Jiming, PhD, professor. E-mail: jmguo@s gg. whu. edu. cn
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41474004, 41461089, 41604019.

(上接第 288 页)

based on the quasi-accurate detection, a specific calculation scheme and strategy for orientation parameter calculation is proposed. For the first time, quasi-accurate detection is applied to SAR image orientation. Finally, a series of experiments with both simulated data and real airborne SAR images are carried out to validate the proposed scheme and strategy. The experimental results show that the proposed scheme in this paper is able to detect and calculate the gross errors in image coordinates. Compared to the classical least-square estimation usually used in image orientation, a higher accuracy of both orientation parameters and the subsequent stereo positioning are achieved. The research in this paper is particularly meaningful to improve the quality of the SAR data affected by gross errors in situations where control points are not enough.

Key words: synthetic aperture radar; stereo positioning; orientation parameters; gross error detection; quasi-accurate detection

First author: QIU Chunping, master, specializes in radargrammetry. E-mail: Q_C_Ping@163.com
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41071296, 41474010, 61401509; the National High-Tech R & D Program of China(863 Program), No. 2011AA120402.