

一种新的稀少控制条件下机载 SAR 影像区域网平差方法的研究

马 婧^{①②③} 尤红建^{①②} 龙 辉^{①②} 丁赤彪^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘 要: 困难测图地区缺少控制点一直是 SAR 图像校正的难点之一。该文针对机载 SAR 影像, 提出了一种新的基于 F.leberl 构像模型平差的方法。借鉴光束法平差方法中解算前、后方交会思想, 交替趋近求解未知参量。实验结果表明, 该方法不仅实现了在稀少控制点下求得定位参数的稳定解, 而且有效减小了航带间同名点坐标误差, 平差精度达到了单航带多控制点独立校正的水平。

关键词: 机载 SAR 影像; F.leberl 模型; 区域网平差

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2842-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01466

A New Method of Block Adjustment of Airborne SAR Images with Few GCPs

Ma Jing^{①②③} You Hong-jian^{①②} Long Hui^{①②} Ding Chi-biao^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Lacking of GCPs (Ground Control Points) in hard survey area is one of the most difficult problems of geometric rectification. This paper proposes a new method of large SAR image-block adjustment based on F.leberl model. The parameters of the images and ground coordinate of pass points can be calculated with the use of alternative and iterative algorithm. The result shows that this method could get steady result with few GCPs and the error of tie points can also be decreased effectively, the accuracy reaches to the lever of single-image-calibration method.

Key words: Airborne SAR images; F.leberl model; Block adjustment

1 引言

传统的多航带机载 SAR 影像定位需要大量的控制点, 这与大面积、稀少控制地形测图的应用需求还有较大差距。而摄影测量中的区域网平差思想可以有效解决这一问题。

SAR 图像在摄影测量领域的应用近几年才得到人们的重视。许多学者提出了针对光学遥感影像的平差方法^[1,2]。对机载 SAR 影像, 可以采用正射多项式模型进行平差^[3], 但该方法未使用严密构像模型。文献[4]提出了用距离多普勒方程对机载 SAR 影像进行平差, 但该方法使用了 12 个定位参数, 误差方

程的系数矩阵条件数大, 造成解不稳定。

针对这些问题, 本文从摄影测量的角度出发, 对多条航带的机载 SAR 影像, 提出一种新的基于 F.leberl 模型的区域网平差的方法。该方法从 SAR 的严密构像模型出发, 在平差模型求解的过程中, 同时完成了校正与拼接的工作。实验结果表明该方法取得了预期的效果。

2 研究方法

2.1 平差模型的建立

F.leberl 构像模型是基于距离条件和零多普勒条件的构像模型^[5], 它符合 SAR 成像机理, 是严密的构像模型。

(1) 距离多普勒条件

$$F_1 = (X_S - X_G)^2 + (Y_S - Y_G)^2 + (Z_S - Z_G)^2 - (D_{S0} + xm_x)^2 = 0 \quad (1)$$

2009-11-13 收到, 2010-08-19 改回

国家自然科学基金(40701110)和“航空电子系统综合技术国防科技重点实验室”和“航空科学基金”(20085593001)资助课题

通信作者: 马婧 majingsnow@163.com

$$E_2 = X_V(X_S - X_G) + Y_V(Y_S - Y_G) + Z_V(Z_S - Z_G) = 0 \quad (2)$$

其中 D_{S0} 为近距点斜距, m_x 为距离向分辨率。 (X_G, Y_G, Z_G) 为像点 (x, y) 所对应的地面坐标。 (X_S, Y_S, Z_S) 为飞机的位置坐标矢量。可表示为

$$\left. \begin{aligned} X_S &= X_{S0} + X_{V0}T + X_{\alpha0}T^2 \\ Y_S &= Y_{S0} + Y_{V0}T + Y_{\alpha0}T^2 \\ Z_S &= Z_{S0} + Z_{V0}T + Z_{\alpha0}T^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $X_{S0}, Y_{S0}, Z_{S0}, X_{V0}, Y_{V0}, Z_{V0}, X_{\alpha0}, Y_{\alpha0}, Z_{\alpha0}$ 是 SAR 影像定位的外方位参数。

(2)地球模型 用距离-多普勒条件可以求解外方位元素, 但反演出地面的 3 维坐标, 还要应用地球的椭球模型方程。设 R_1, R_2 分别是椭球长半轴和短半轴, 为了计算方便, 椭球模型变形为

$$F_3 = X_G^2 + Y_G^2 + Z_G^2(R_1^2 / R_2^2) - R_1^2 = 0 \quad (4)$$

2.2 剔除粗差及平差解算

2.2.1 最小二乘法去粗 当控制点有粗差时, 会严重影响定位精度和计算的可靠性。因此, 在平差前先对各单航带的控制点进行处理, 考虑到地形起伏对控制点引起的误差, 使用正射多项式^[6]:

$$\left. \begin{aligned} x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2 \\ y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2 \\ &-(H - Z)Z / R / m_x \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将 n 个控制点的地面坐标和影像坐标代入式(5), 用最小二乘法确定系数 a_i, b_i 。然后对第 i 个控制点应用式(5), 计算其对应的 (x', y') 。再计算 (x', y') 与原影像坐标之间的残差 ω_i , 统计 n 个点的均方差 σ_0 。判断若 $|\omega_i| > 3\sigma_0$, 则认为该控制点存在粗差。去除该点且 $n=n-1$, 反复迭代直到满足条件。

2.2.2 F.leberl 模型交替趋近法 控制点去粗后, 就要进行平差解算。F.leberl 模型是非线性的, 必须对其线性化。使用泰勒公式对式(1), 式(2), 式(4)线性化后, 建立误差方程:

$$\left. \begin{aligned} v_{F1} &= A_{11}\Delta X_{S0} + A_{12}\Delta Y_{S0} + \dots + A_{19}\Delta Z_{\alpha0} \\ &+ B_{11}\Delta X_G + B_{12}\Delta Y_G + B_{13}\Delta Z_G - l_{F1} \\ v_{F2} &= A_{21}\Delta X_{S0} + A_{22}\Delta Y_{S0} + \dots + A_{29}\Delta Z_{\alpha0} \\ &+ B_{21}\Delta X_G + B_{22}\Delta Y_G + B_{23}\Delta Z_G - l_{F2} \\ v_{F3} &= A_{31}\Delta X_{S0} + A_{32}\Delta Y_{S0} + \dots + A_{39}\Delta Z_{\alpha0} \\ &+ B_{31}\Delta X_G + B_{32}\Delta Y_G + B_{33}\Delta Z_G - l_{F3} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 A_{1i}, A_{2i}, A_{3i} 分别是式(1), 式(2), 式(4)对 9 个定位参数求偏导; B_{1i}, B_{2i}, B_{3i} 分别是式(1), 式(2), 式(4)对 X_G, Y_G, Z_G 求偏导。 l_{F1}, l_{F2}, l_{F3} 是常数项, 式(6)写成矩阵形式为

$$V = AX + BT - L \quad (7)$$

有两类未知参数需要解答: 影像外方位参数的改正数向量 X , 和加密点地面坐标的改正数向量 T 。借鉴光束法交替趋近的思想^[7], 由式(7): 已知外方位参数时,

$$V = BT - L \quad (8a)$$

已知地面点坐标时:

$$V = AX - L \quad (8b)$$

(1)将各影像的控制点和加密点(分别为已知的和近似的)代入式(8b)求得其最小二乘解为 $X = (A^T A)^{-1} A^T L$ 。修正各影像外方位参数。

(2)将修正的外方位参数代入式(8a)求得其最小二乘解为 $T = (B^T B)^{-1} B^T L$ 。修正加密点地面坐标: $X = X' + \Delta X_G; Y = Y' + \Delta Y_G; Z = Z' + \Delta Z_G$ 。

(3)重复(1), (2)步, 直到外方位参数与加密点地面坐标的修正值小于设定阈值。

3 实验结果及分析

3.1 实验数据

实验数据选取山东济宁测区。采用 3 条航带。影像分辨率为 1.5 m, 区域覆盖范围达 40 km×15 km, 场景中西部为平原, 基本覆盖为农田和城镇, 平均高程达 30 m, 场景东南部为山地。根据 1:10000 的地图人工选取控制点和加密点, 3 条航带共布置 9 个地面控制点, 15 个加密点。各航带影像控制点及加密点分布如图 1 所示。

3.2 实验结果

分别统计平缓地区和地形起伏较大地区加密点和检查点的精度。如表 1 所示。

为了评价该方法的精度, 将该方法与以下 3 组实验比较: (1) GPS 记录进行导航坐标系与 WGS84

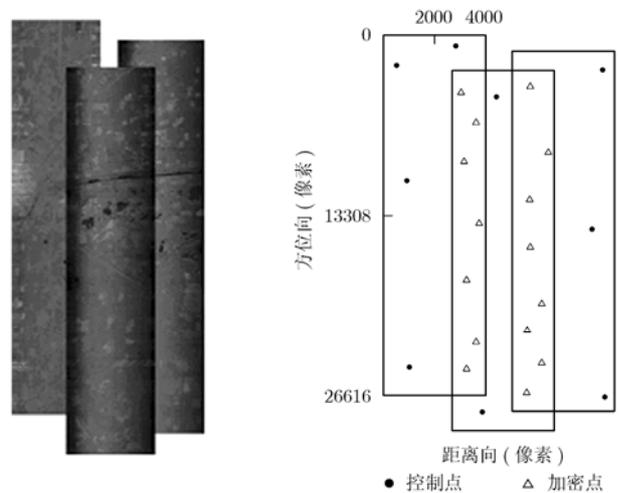


图 1 控制点及加密点分布图

表 1 加密点和检查点精度

F.leberl 模型区域网平差		加密点误差 (m)			Num	检查点误差 (m)		
		X	Y	Z		X	Y	Z
平缓地区	航带 1	5.8268	6.4206	6.4988	23	5.7787	8.1873	5.65
$Z_{\min}=27$ m	航带 2	8.3151	8.7584	4.4768	22	6.6344	9.0312	6.51
$Z_{\max}=54$ m	航带 3	4.5761	9.3369	5.0443	26	9.090	11.249	7.73
地形起伏地区	航带 1	8.3548	13.548	6.5514	5	9.5471	12.437	8.587
$Z_{\min}=63.3$ m	航带 2	9.156	17.756	7.2485	3	11.958	14.585	9.541
$Z_{\max}=271.9$ m	航带 3	6.2241	19.365	5.1254	3	8.2957	21.381	7.724

坐标系的转换后^[8], 拟合飞机轨迹, 然后进行定位; (2)各航带通过控制点单独校正。(3)使用二次多项式

模型平差。统计总中误差 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P'_i - P_i)^2}{n}}$, 其

中 n 是检查点个数, P'_i 是第 i 个检查点坐标向量计算值, P_i 第 i 个检查点坐标向量真值, 结果如表 2 所示。

结果分析: 从表 1 可知, 平缓地区加密点和检查点的误差较小。起伏较大的地区误差较大, 这主要因为地形起伏造成图像内部非系统性的畸变, 这种误差很难消除, 可以先在成像时进行方位空变补偿来减小图像内部畸变, 然后再进行区域网平差。

从表 2 可知, 由 GPS 系统直接定位, 不需要 GCPs, 但存在较大的系统误差; 而用 F.leberl 模型对各航带单独校正时, 共用了 30 个控制点, 校正后总中误差为 12.77 m; 二次多项式模型平差使用了 11 个 GCP, 平差后误差为 19.84 m; 而采用本文提出的方法, 三条带只需要 9 个 GCP, 且平差后的误差为 13.401 m, 与单行带校正后的精度相当。由表 2 最后一列可知, 平差后, 同名点坐标之间的误差明显减小。4 种方法定位效果如图 2 所示。

3.3 布点方案及误差分析

为了定量分析布点方案及各参数对平差精度的影响, 本实验采用 2 组仿真数据进行分析。

第 1 组数据: 3 条航带, 6 景图像, 区域覆盖范

围 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 。图像分辨率为 0.2727 m , 模拟平缓地区, 平均高度 30 m 。第 2 组数据: 模拟地形起伏较大地区, 平均高度 280 m , 最高点 400 m , 最低点 200 m 。其他参数同第 1 组数据。

3.3.1 布点方案的影响 (1)平缓地区 根据误差方程系数矩阵的条件数^[9]及控制点个数综合考虑布点方案。采取 4 种布点方式, 如图 3 所示。

从表 3 可以看出单边布点时, 误差传递很明显, 第 3 条航带的误差达到了 35 个像素(9 m); 其次是中间布点方案; 四角布点时精度有了较大的改善; 四角加中间布点时, 误差最小, 且使用的控制点数量也最少。航带 1 与航带 3 的误差在 0.18 个像素左右, 第 2 航带的误差为 0.6 个像素左右。从表 3 的最后一列可以看出, 四角加中间布点条件数最小, 解最稳定。

(2)地形起伏较大地区 图 4 是第 2 组仿真数据的 3 维图, 共有 4 个山坡, 坡度从 3° 至 6° 。

在地形起伏较大的地区, 仍然对上述 4 种布点方案进行试验, 得到的结论相似, 但是高度越高、地形起伏越大的地区, 误差越大。表 4 比较了 GCP 在平面分布较为均匀的情况下, GCP 高度不同时的平差精度。

从表 4 分析可知, 控制点全部为高点时误差最大, 控制点全部为低点时次之, 后面 3 种情况的误差相近, 因此, 布点时除了要考虑平面均匀布放, 还要考虑高程上尽量均匀分布。

表 2 精度结果比较

	GCP/CP/TP 总数	地面检查点(CP)精度	航带间同名点(TP)精度
		X/Y/Z/总中误差(m)	X/Y/Z/总中误差(m)
GPS 求解外方位参数	0/187/31	-85.66/-146.0/170.5/240.26	22.37/30.40/18.85/42.18
各航带单独校正	30/98/32	6.24/9.22/6.27/12.77	11.64/8.48/11.40/18.367
二次多项式模型平差	11/98/32	10.58/13.81/9.54 /19.84	7.18/11.35/7.17/15.224
F.leberl 模型平差	9/98/32	5.58/9.57/7.54/13.401	6.67/8.75/5.23/12.182

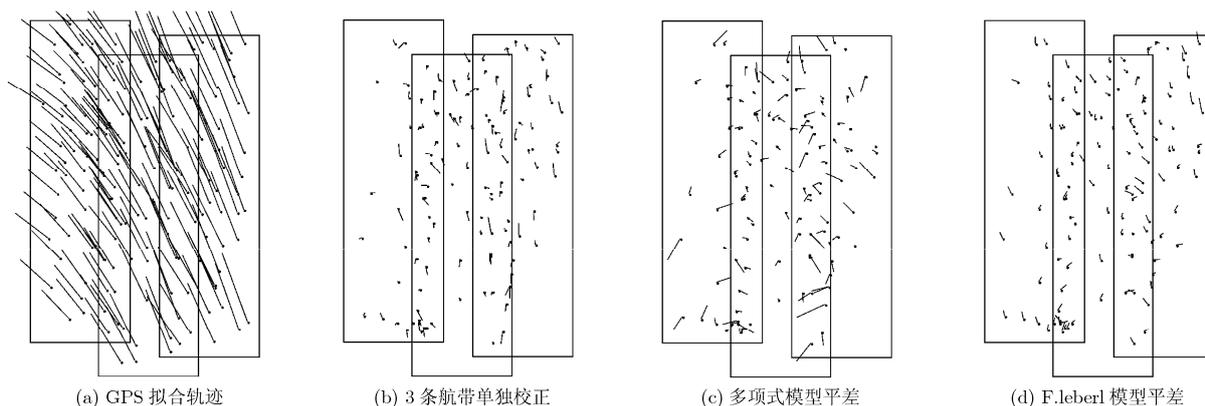


图 2 平差效果比较

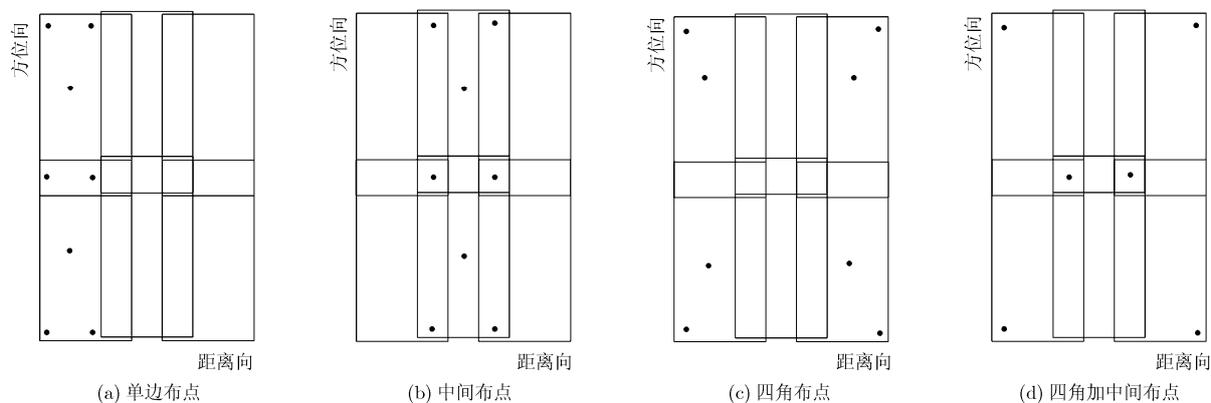


图 3 不同布点方案

表 3 不同布点方案平差精度比较

	GCP 个数	航带 1 X/Y/总中误差(m)	航带 2 X/Y/总中误差(m)	航带 3 X/Y/总中误差(m)	系数矩阵条件数
单边布点	8	0.0096/0.0207/0.022	3.37/0.32/3.38	9.67/0.907/9.721	7.51E+12
中间布点	8	2.50/0.144/2.51	0.012/0.008/0.015	2.27/0.29/2.291	1.90E+12
四角布点	8	0.013/0.02/0.021	1.35/0.054/1.351	0.014/0.012/0.022	2.05E+11
四角加中间布点	6	0.035/0.038/0.043	0.18/0.01/0.18	0.022/0.02/0.034	2.49E+10

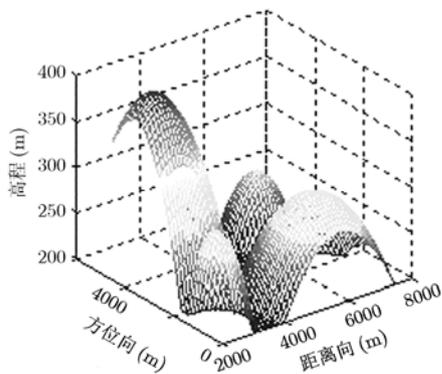


图 4 地形起伏较大地区仿真数据 3 维图

对于较平坦的地区，使用平均高程即可达到较好效果。但对于地形起伏较大的地区，要借助于 DEM 数据，才能得到较好结果。

3.3.2 误差分析 影响机载 SAR 影像区域网平差精度的主要因素除了布点方案及地形起伏外，还包括斜距测量误差，高程测量误差，以及飞机的位置与速度测量误差。由仿真数据，飞机飞行高度为 3282.1 m，近距点斜距为 3524.6 m，速度为 112.375 m/s。各参量测量均方误差与平差后检查点总中误差的关系如图 5 所示。

从图 5 分析可知：GPS 记录的飞机位置与速度

表 4 GCP 分布在不同高度时的平差精度

	全部为高点	全部为低点	1/4 高点, 3/4 低点	1/4 低点, 3/4 高点	1/2 低点, 1/2 高点
	总中误差(m)	总中误差(m)	总中误差(m)	总中误差(m)	总中误差(m)
航带 1	6.126261	5.149705	3.114304	4.01067	3.4858
航带 2	3.255888	2.924802	1.999783	2.084196	1.70741
航带 3	4.365295	3.262515	1.071574	1.108585	0.99276

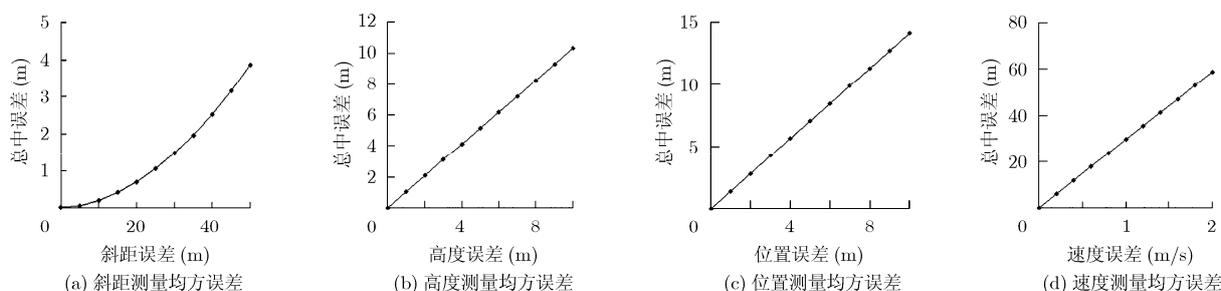


图 5 各种误差源对定位精度的影响

矢量中, 速度测量误差的影响最为显著, 位置测量误差影响不大。速度误差由加速度计的常值零偏和刻度因子误差造成。由 GPS 造成位置与速度的系统误差, 在平差过程中可以消除; 高度测量误差对平差精度有一定的影响, 它由脉冲时延测量的系统误差及与信噪比有关的随机误差和地形起伏导致; 飞机斜距测量误差的影响较小, 斜距测量误差由系统延时误差造成, 以系统误差为主。

4 结束语

实验结果表明, 本文提出的基于 F.leberl 模型的机载 SAR 影像区域网平差方法, 不仅减少了对控制点的需求, 而且有效减小了航带之间同名点坐标的误差, 平差精度可以达到单航带独立校正的水平; 本方法使用了交替趋近的思想, 迭代求解未知参数, 避免了平差运算中常常遇到的解算大规模矩阵方程时产生奇异矩阵的问题; 四角加中间的布点方式最理想; 人工选取 GCP 时, 由于客观条件及测量误差, 会造成 GCP 精度下降, 对平差精度会有一定影响。

对于地形起伏较大的地区, 地形起伏和中心投影方式引起的变形很复杂, 此时用最小二乘法求解最佳估值不一定是最好的方法, 对于这一问题还需要深入研究。随着机载 InSAR 的发展, 可以获得精确的 DEM 数据, 此时将加密点视为已知高程点, 再代入平差模型解算, 可以简化误差方程, 有望进一步提高平差精度。

参考文献

- [1] Thierry Toutin, Yves Carbonneau, and René Chénier. Block bundle adjustment of LANDSAT-7 ETM+ images photogrammetric engineering and remote sensing[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(12): 1341-1351.
- [2] 张力, 张继贤, 陈向阳, 等. 基于有理多项式模型RFM的稀少控制SPOT-5卫星影像区域网平差[J]. *测绘学报*, 2009, 38(4): 302-310.
- [3] 黄国满, 岳昔娟, 赵争, 等. 基于多项式正射纠正模型得的机载SAR影像区域网平差[J]. *武汉大学学报*, 2008, 33(6): 569-572.
- [4] Yue X J and Huang G M. Multi-photo combined adjustment with airborne SAR images based on F.leberl ortho-rectification model[C]. *The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Beijing, June 30-July 2, 2008: 357-360.
- [5] 钱李昌, 孙文峰, 马晓岩. 机载条带SAR F.leberl扩展模型无参考点定位[J]. *空军雷达学院学报*, 2008, 22(4): 256-258.
- [6] 黄国满, 郭建坤, 赵争, 等. SAR影像多项式正射纠正方法与实验[J]. *测绘科学*, 2004, 29(6): 27-30.

- Huang Guo-man, Guo Jian-kun, and Zhao Zheng, *et al.*. Rectification of SAR image base on polynomial ortho-rectification[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(6): 27-30.
- [7] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1984: 93-96.
- [8] 李康, 黄胜, 赵辉. GPS坐标系的转换及其在姿态求解中的应用[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(5): 113-116.
- Li Kang, Huang Sheng, and Zhao Hui. Transformation of GPS coordinate systems and its application in attitude determination[J]. *Command Control & Simulation*, 2008, 30(5): 113-116.
- [9] 张薇. 机载双天线干涉SAR定标方法研究[D]. [博士学位], 中国科学院电子学研究所, 北京, 2009.
- 马 婧: 女, 1984年生, 硕博连读, 从事雷达信息处理方面的研究工作.
- 尤红建: 男, 1969年生, 研究员, 从事机载遥感图像处理、GPS应用方面的研究工作.
- 龙 辉: 男, 1978年生, 副研究员, 从事遥感图像处理方面的研究.
- 丁赤飏: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 从事合成孔径雷达及信息处理方面的研究工作.