

星载高分辨率合成孔径雷达影像纠正技术

尤淑撑^{①,②},刘顺喜^②,徐宗学^①

(^① 北京师范大学水科学研究院,北京 100875;^② 中国土地勘测规划院,北京 100035)

摘要:为检测 TERRASAR、COSMO SkyMed、RADARSAT-2 等星载高分辨率合成孔径雷达影像(SAR)在土地利用调查监测中的适用性,该文针对高分辨率 SAR 数据和产品特性,提出了控制点选取方法,分析了不同纠正模型的应用效果。试验表明高分辨率 SAR 几何纠正一般需要 10~15 个控制点,1m 聚束模式纠正中误差约 3m~5m,3m 条带模式纠正中误差约 5m~8m,分别满足 1:1 万和 1:2.5 万土地调查监测几何精度要求。研究结果为构建基于高分辨率 SAR 数据土地利用调查监测应用技术和促进高分辨率极化 SAR 数据业务化应用奠定了基础。

关键词:遥感;SAR;土地利用遥感影像图

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.06.012

中图分类号: P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)118-0057-04

Geo-rectification Method of High Spatial Resolution SAR Data

YOU Shu-cheng^{①,②}, LIU Shun-xi^②, XU Zong-xue^①

(^① College of Water Sciences, Beijing 100875;

^② China Land Surveying & Planning Institute, Beijing 100035)

Abstract: In order to test suitability of the high spatial resolution SAR (1m/3m) for land dynamic change monitoring, in this paper the TERRASAR, COSMO SkyMed and RADARSAT-2 data were used for deep study. The critic problems of geo-rectification of the high spatial resolution SAR data are analyzed; the principle and method of GCP collection are proposed; different SAR geometric correction models are used for comparison and their suitability is discussed. The results show that 10-15 GCP is required to obtain a good result of geometric correction. Suggested geometric correction method can obtain good result, that RMSE for 1m spot-line mode SAR data is 3-5m and 5-8m for 3m strip mode SAR data which are suitable for 1:10,000 and 1:25,000 mapping scales respectively. The results are very important to make good use of SAR data in land use dynamic change monitoring project.

Key words: remote sensing; SAR; land use image

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是 20 世纪 50 年代末研制成功的一种微波传感器,作为一种主动式传感器,不受光照和天气条件的限制可实现全天时、全天候对地观测,可以透过地表和植被获取地下信息^[1~2]。目前,我国土地利用遥感调查监测中应用最普遍的是光学遥感数据,但我

国南方特别是西南地区,由于气候湿润、多云多雨,极大地限制了光学遥感数据的及时获取和应用效果。雷达遥感可以作为多云多雨地区土地利用调查与监测重要的补充遥感数据源^[2~3],长期以来由于 SAR 数据空间分辨率限制,其几何定位精度难以满足业务应用需要。2007 年以来相继出现了一批高空间分辨率合成孔径雷达卫星,如 TERRASAR、COSMO SkyMed 和 RADARSAT-2 等,极大地提高了

收稿日期:2010-11-09 修订日期:2011-01-27

基金项目:国土资源部百名科技人才计划项目(2008),国家科技支撑计划(2008BAJ11B06),国家高技术研究发展计划(2007AA12Z181-2)。

作者简介:尤淑撑(1975~),男,浙江临海人,博士,高级工程师,从事遥感技术土地调查监测应用研究,北京中国土地勘测规划院,100035。

E-mail: youshucheng@mail. clspi. org. cn

SAR 数据在土地利用调查监测领域的应用能力。

土地利用调查监测工作需要获取确切的地物空间位置信息,并需要对多时相、多源信息进行综合分析,所以必须对遥感影像进行精确的几何校正处理,形成反映以土地利用特征为目的,几何精度满足要求的影像图。然而,当前 SAR 影像业务处理集中在增值产品生产方面,如德国 DLR 发展了能够生产地理编码增值产品的 SAR 处理和归档系统,包括地理编码镶嵌、叠掩和阴影掩模影像、入射角影像、立体影像产品、多传感器融合产品等,但地理编码产品无法达到业务应用精度要求。虽然土地利用动态遥感监测建立了针对光学遥感数据业务化纠正技术流程,但由于 SAR 成像模式和数据特性与光学遥感不同,光学遥感数据影像纠正技术流程不能完全适用于 SAR 数据处理^[4~6]。本文主要针对高分辨率 SAR 数据和产品特性,分析利用高分辨率 SAR 数据制作高分辨率 SAR 影像图的技术难点,根据土地遥感影像纠正的关键技术环节,着重研究控制点选取方法,以及不同纠正模型的适用条件和范围,为建立基于高分辨率 SAR 数据土地调查监测业务化应用流程提供技术参考。

2 高分辨率 SAR 影像纠正技术

2.1 技术方法

SAR 影像直接定位就是由 SAR 影像的行列号 (i, j) 出发,根据定位模型解算出该像元在某一确定的大地椭球表面上的大地坐标的过程。SAR 影像几何校正方法可以归结为两大类:①基于雷达共线方程法,这种方法基于简化的雷达成像几何关系建立 SAR 共线方程,模型参数的设置及解法主要采用数字摄影测量学的方法;②基于距离—多普勒(Range-Doppler, RD)定位模型方法,根据 SAR 成像机理求解模型参数,是目前标准 SAR 图像产品的生产方法^[7~8]。根据所采用地球表面模型的不同分为两种地理编码方法:一种是不考虑地形的变化,将地球表面看成一个具有固定高程的椭球面,根据定位模型将 SAR 影像变换到该假设的地球表面上,这种地理编码方法称为椭球表面校正地理编码(Geocoding of Ellipsoid Correction, GEC);另一种是利用影像覆盖区的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)描述地形的连续变化,通过定位模型将 SAR 影像变换到真实的地球表面上,这种地理编码方法称为地形校正地理编码(Geocoding of Terrain Correction, GTC)^[9~10]。

2.2 控制点选取

控制点选取是保证高分辨率 SAR 影像图精度的关键技术环节。控制点选取过程就是精确地从参考数据中准确地定位和 SAR 影像上同名地物点的坐标,即控制点不仅要求在 SAR 影像上容易辨识,而且在参考数据上也必须容易辨识和定位。若是通过 GPS 外业测定,则该控制点必须是容易测量的。一般而言,高分辨率 SAR 影像纠正的控制点主要来源于地形图和经过正射校正的已有高分辨率 SAR 影像图。由于 SAR 为斜距成像,存在顶底倒移等现象,在控制点选取时需进行严格控制。

(1)以地形图作为参考数据获取控制点。可以考虑选择那些自身高度可以忽略的控制点,如常年不变的小路的交叉点,比较稳定的小河支流分叉点,水体中孤立的体积足够小的硬目标点等。值得注意的是不能选择自身具有一定高度的地物,如铁塔,在 SAR 影像上应该确定塔基座为控制点,而不应该是塔顶。当墙和飞行方向平行时,由于顶底倒移和阴影,该墙在 SAR 影像上要比其实际宽度大得多,若要利用其和一条小路的交叉点作为控制点,就必须根据墙的影像特征估计出墙在 SAR 影像上的实际位置。

(2)利用已经正射校正过的光学遥感影像作为参考获取控制点。若作为参考的遥感影像和 SAR 影像获取时间相差不大,两幅影像的地物特征将比较相似,一些田块的位置信息、道路的交叉点信息就可以作为很好的控制点。由于光学遥感影像和 SAR 影像几何形变规律不同,地形高程引起的影像位置误差在正射校正过程中可以得到改正,如果地物本身高度引起的误差没有得到有效改正,选择具有高程的地物作为控制点可引入定位误差。

(3)以经过正射校正的 SAR 影像作为参考获取控制点。这种情况下,很多在两幅影像上可以明确辨识的地物点都可以作为控制点。但两幅 SAR 影像可能采用不同的升/降轨模式,入射角也可能有较大差别,参考影像的正射校正处理不可能将地物本身的高度进行改正,因此高出地面的地物不应该作为控制点。

纠正控制点要求在整幅影像区域均匀分布,因为利用控制点优化正射校正模型过程就是采用最小二乘法对模型参数进行估计。在一个小区域选择控制点,会使得模型在高维参数空间中求得局部最优,而不是全局最优。由于控制点信息包括三维信息,除了保证控制点在影像上均匀分布外,在高程上也要均匀分布,即不同高程的控制点都要有;由于高精度的控制点获取较难,实际应用中通常需要选取足

够数量的控制点,在一定程度上避免控制点量测引起的偶然误差。

2.3 纠正模型选择

SAR 数据产品根据处理级别不同,可分为单视复数产品、精确地距产品、地球椭球地理编码产品和增强的地理编码产品。单视复数产品以复数形式记录影像信息,为斜距产品;精确地距产品做过多视化处理,按地距存储。地球椭球地理编码产品(Geocoding of Ellipsoid Correction, GEC)利用卫星轨道信息,将地表抽象为一个没有地形变化的椭球面,将 SAR 影像投影到该椭球面上,因此得到的影像是一幅经过系统几何校正处理的影像。增强的地理编码产品(Enhanced Ellipsoid Correction, EEC)利用低精度 DEM(如美国 SRTM)进行系统几何校正处理^[11~12]。

不同产品级别适用的纠正模型不同,单视复数产品、精确地距产品可选择正射校正或多项式等线性、非线性变换模型;地球椭球地理编码产品、增强的地理编码产品仅能选择多项式等变换模型^[13~14]。

地球椭球地理编码产品精度取决于卫星轨道的测控精度,由于假设一个固定的高程,在地形有较大变化的区域,即使实际高程与固定高程不一致引起的定位误差仍然存在^[8~11]。对于平坦地形区域,可进一步采集控制点,利用多项式进行进一步的精校正处理。增强的地理编码产品可以达到几米到十几米的精度,具体精度大小主要取决于 DEM 精度、卫星轨道精度、WGS 84 与当地大地测量系统之间的偏差,几何畸变并没有得到很好的校正,需要进一步采集控制点,利用多项式方法进行进一步的精校正处理^[15]。

为保证纠正精度,单视复数产品、精确地距产品一般采用基于数字高程模型的正射纠正。在 DEM 精度足够高、非平坦覆盖区域面积比例较大(60%~80%以上)情况下,很难通过人工获取足够数据的控制点,可采用基于 SAR 影像模拟的纠正策略,由于模拟结果影像和真实 SAR 影像具有较高的相关性,可通过影像匹配获取控制点^[16~17]。

3 应用试验

3.1 纠正控制点对纠正精度的影响

采用北京 TerraSAR 条带模式 3m 空间分辨率数据进行试验,分别采用 9、11、13、15、17、19、24、28 个均匀分布的控制点对 SAR 影像采用距离-多普勒定位模型进行正射纠正,选择 10 个明显特征地物点采用 GPS 获取平面坐标,作为精度检查点,对纠正后的 SAR 影像进行精度评价,结果如图 1 所示。

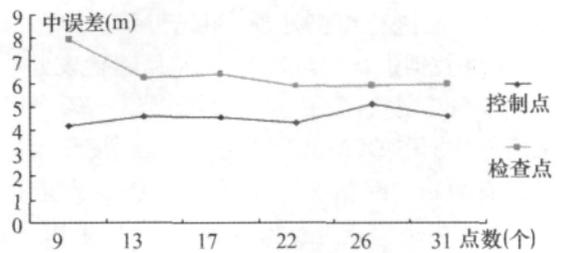


图 1 不同控制点数量纠正误差变化曲线图

由图 1 可知,随着控制点数量的增加,检查点中误差呈减少趋势,当控制点数为 9 时,检查点中误差为 7.95m;当控制点数量增加到 15 个,检查点中误差基本保持不变;当控制点数量增加到 22 个,检查点中误差为 5.88m。TerraSAR 聚束模式 1m 空间分辨率数据纠正结果及误差变化趋势基本相同。由此可见,10~15 个纠正控制点基本可以满足高分辨率 SAR 正射纠正要求。

3.2 纠正模型对纠正精度的影响

采用北京 TerraSAR 聚束模式 1m 空间分辨率数据进行试验,采用距离-多普勒定位模型和几何多项式进行纠正,分别选择了 11、14、18、22 个纠正控制点,并通过选取 10 个检查点进行统计如图 2,其中正射纠正点位中误差在 4.62m~5.54m 之间;一次多项式纠正点位中误差在 4.08m~5.17m 之间;二次多项式纠正点位中误差在 4.71m~5.68m 之间;三次多项式纠正点位中误差在 5.03m~5.52m 之间。

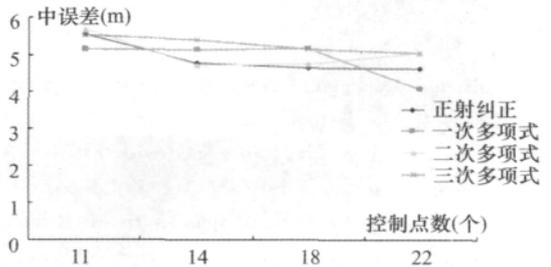


图 2 不同纠正模型检查点中误差变化曲线图

由图 2 可知,随着控制点数量的增加,一次几何多项式的检查点的较差并没有出现明显的起伏,纠正误差较大;二、三次几何多项式和正射纠正的检查点当纠正控制点数量较少时,误差较大,随控制点数量增加误差呈下降趋势,当控制点数量增加到 15 个以上时,纠正误差基本保持不变;平原区采用二次或三次多项式模型可以达到较高的纠正精度,但山区纠正误差较大,为保证高分辨率 SAR 影像图精度,需要在高精度 DEM 支持下、采用正射纠正模型进行逐像元误差改正。

3.3 不同产品纠正效果对比分析

分别对北京 TerraSAR 1m 聚束成像模式 EEC 产

品、MGD 产品进行纠正处理。由于 MGD 产品没有采用 DEM 数据进行几何改正,下垫面起伏较大地区有透视收缩等现象,控制点选取较困难。EEC 产品由于采用低分辨率 DEM 进行改正,在地形变化大的地方局部有地物位移情况。采用 12 个控制点进行纠正,15 个同名地物点进行精度检查,分别采用一次、二次、三次多项式纠正模型对 EEC 产品进行纠正,从整景误差统计结果来看,二次几何多项式的中误差最小,为 4.27m;MGD 采用 1:5 万 DEM、经过雷达共线方程法或距离—多普勒定位模型正射纠正处理,纠正后影像山体形态走势基本得到校正,检查点中误差为 3.51m,由于采用的 DEM 为 25m 采样成 1m,纠正后影像存在明显的欠采样问题。

同时对北京同区域 TerraSAR 3m 条带成像模式 EEC 产品、MGD 产品进行相同试验,采用 15 个控制点进行纠正,14 个同名地物点进行精度检查。3m 条带成像模式 EEC 产品三次多项式误差最小,检查点中误差为 6.08m;MGD 采用 1:5 万 DEM、经过正射纠正处理,检查点中误差为 4.85m。

由此可见,平原区可采用 EEC 产品,通过多项式纠正提高定位精度;山区必须采用精确地距产品,采用高精度 DEM 进行地形改正,试验表明 1m 聚束成像模式最好选用 1:1 万 DEM,3m 条带成像模式可选用 1:5 万 DEM。

4 结束语

试验研究表明,保证 TERRASAR、COSMO SkyMed、RADARSAT-2 等高分辨率极化 SAR 纠正精度每景需要 10~15 个纠正控制点;平原区采用二次或三次多项式模型可以达到较高的纠正精度,但山区纠正误差较大,为保证高分辨率 SAR 影像图精度,需要在高精度 DEM 支持下、采用正射纠正模型进行逐像元误差改正,1m 聚束成像模式最好选用 1:1 万 DEM,3m 条带成像模式可选用 1:5 万数字高程模型。

SAR 正射校正模型参数迭代优化过程需要利用人工寻找的控制点。如何自动或半自动获取控制点信息,以提高地理编码效率成为 SAR 影像处理技术领域的研究热点。此外对于山区 SAR 影像,利用人工判断的方法难以获取大量的精度较高的控制点。采用模拟 SAR 影像在山区的纹理特征和实际 SAR 影像最为逼近,可弥补山区控制点的不足,提高控制点定位和纠正精度。

由于人工获取山区控制点很难且定位精度误差大,实际上只能获取平坦地区的控制点,因此人工获取的控制点一般都分布于高程变化不大的影像区域,控制点的高程分布不均匀,会使模型参数优化过程出现偏差,影响实际校正效果。

参考文献

- [1] Adrian J. Luckman. Correction of SAR imagery for variation in pixel scattering area caused by topography[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1998, 36(1): 344-350.
- [2] Bamler, R., Breit, H. Experience with ERS-1 SAR signal processing at the German PAF[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1992, 2(1): 1353-1355.
- [3] Curlander J C. Location of space-borne SAR imagery[J]. IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing, 1982, 20(3): 359-364.
- [4] Dowman, I. J. Precision geocoding from SAR data and the combination of SAR with other data sets[C]// Radar 92, International Conference, 1992, 20(1): 367-370.
- [5] 黄明祥, 史舟, 李艳. SAR 遥感技术在农业土地利用遥感调查的应用[J]. 农业工程学报, 2004, 20(06): 133-135.
- [6] 钱永兰, 杨邦杰, 张松岭, 等. 四种用于雷达遥感图像融合的空间分量提取方法[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 98-101.
- [7] 李勇, 朱岱寅, 朱兆达. 环视 SAR 成像处理中的几何失真校正算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(02): 232-237.
- [8] 俞根苗, 邓海涛, 吴顺君. 弹载 SAR 图像几何失真校正方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(03): 386-389.
- [9] 张帆, 白璐, 洪文, 等. 基于计算机图形学的干涉 SAR 成像几何仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(08): 2195-2200.
- [10] 秦志远, 张宝印, 靳国旺, 等. 基于 DEM 和地物分类信息的 SAR 图像模拟[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(08): 2437-2440.
- [11] 李燕平, 邢孟道, 井伟, 等. 一种双基 SAR 的 SR-ECS 成像算法[J]. 自然科学进展, 2008, 18(03): 323-333.
- [12] 周钊, 何小海, 李国利, 等. SAR 成像的变换线性调频尺度(C/S)算法研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2005, 34(06): 122-126.
- [13] 傅文学, 郭小方, 田庆久. 星载 SAR 距离—多普勒定位算法中地球模型的修正[J]. 测绘学报, 2008, 37(01): 59-63.
- [14] 吴从暉, 朱彩英, 徐青. 机载 SAR 图像的快速几何纠正算法及应用[J]. 解放军测绘学院学报, 2008, 16(4): 267-270.
- [15] 周金萍. 星载 SAR 图像的两种实用化 R-D 定位模型及其精度比较[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 191-197.
- [16] 张永红, 林宗坚, 张继贤, 等. SAR 影像几何校正[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 134-138.
- [17] 朱彩英, 徐青, 吴从暉, 等. 机载 SAR 图像几何纠正的数学模型研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 112-117.