

文章编号: 1001-1595(2001) 01-0060-07

中图分类号: P237

文献标识码: A

星载 SAR 复数图像的配准

刘国祥, 晓利, 李志林, 陈永奇, 章国宝

(香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港)

Co-Registration of Satellite SAR Complex Images

LIU Guo-xiang, DING Xiao-li, LI Zhi-lin, CHEN Yong-qi, ZHANG Guo-bao

(Dept. of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) and Differential InSAR (DInSAR) have been demonstrated to be the very potential tools for generating large-area even or global DEM as well as measuring and monitoring Earth surface deformation, respectively. For the purpose of computing the accurate interferogram, the co-registration of satellite SAR complex images is one of the most important processing procedures involved in satellite SAR interferometry. Based on the discussion about transformations among several spatial coordinate systems associated with interferometric processes, this paper proposes the geometric co-registration scheme of SAR images depending on satellite orbit state vectors and SAR imaging geometry. On the other hand, the correlative co-registration algorithm that makes full use of amplitude information of image chips is also designed on the basis of initial results of geometric co-registration. Finally, the co-registration experiments are carried out using three types of complex SAR image pairs that were collected by ERS-1/2, JERS-1, and RADARSAT, respectively. Some significant comparisons and analyses are made.

Key words SAR complex images; geometric co-registration; correlative co-registration; radar interferometry

摘要: 星载干涉雷达测量已被证实用于生成大范围(乃至全球)的 DEM 或监测地表位移具有广阔的应用前景,其中 SAR 复数图像序列的精确配准是保证生成有效干涉相位图的重要环节之一。本文分析了卫星 InSAR 系统中所涉及的几种坐标系变换问题,并提出了基于此的几何配准方案,即基于卫星轨道状态矢量、SAR 成像几何进行配准的算法;同时,还设计了基于几何配准结果和能量影像相关技术的配准算法。最后使用 ERS-1/2、JERS-1 和 RADARSAT 卫星获取的 3 种 SAR 复数图像对分别做几何配准和相关配准试验和比较,并对卫星 SAR 图像质量和轨道数据质量作了定性分析。

关键词: SAR 复数图像;几何配准;相关配准;雷达干涉测量

1 引言

近十多年来,国际上掀起了对合成孔径雷达

干涉技术(Synthetic Aperture Radar Interferometry, 简称 InSAR)理论和应用研究的热潮。InSAR 具有从覆盖同一地区的 SAR 复数图像对提

收稿日期: 2000-01-04; 修回日期: 2000-04-29

基金项目: 香港理工大学研究设备基金(G-9025); 香港理工大学研究基金(G-V747)

作者简介: 刘国祥(1968-),男,湖南临澧人,西南交通大学测量工程系讲师,在读博士生,主要从事 InSAR 研究。

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

取干涉相位图,并借助于雷达成像时的姿态数据重建地表 3 维模型(即数字高程模型)的巨大潜力^[1~4],特别地,基于多幅 SAR 图像处理的差分干涉技术(Differential InSAR,简称 D-InSAR)可以用于监测地表形变,精度可达厘米级甚至更高,其监测空间分辨率是前所未有的^[5~7]。与机载 SAR 系统相比,星载 SAR 系统具有可操作性强、方便 SAR 图像相对廉价的优势,因而星载 SAR 图像是 InSAR 应用的主要数据源,故卫星 SAR 干涉处理也是目前研究的焦点。星载 SAR 系统一般使用单天线采集信号,故对某个局部地区来说一次卫星通过只能获得一幅影像,卫星以一定的时间间隔和轻微的轨道偏离重复对该地区成像,相邻轨道间隔构成合成干涉基线 B (可分解为平行于侧视方向的分量 $B_{\text{平}}$ 和垂直于侧视方向的分量 $B_{\text{垂}}$,如图 1 所示),一般为几十米至一公里左右。一般情况下,卫星轨道数据和传感器参数附在 SAR 图像上—并提供给用户^[2,3]。

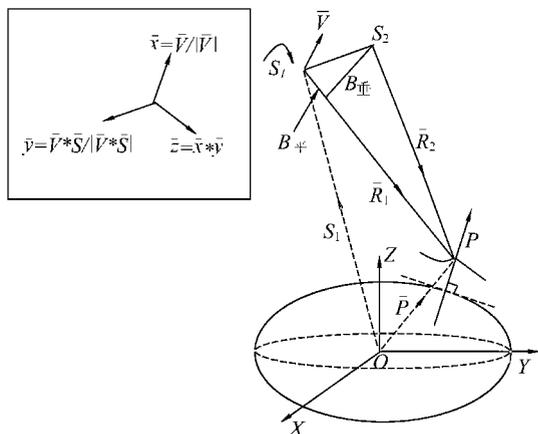


图 1 InSAR 几何

Fig. 1 InSAR geometric configuration

一般来说,InSAR 的后处理必须面临一个不可逾越而且是影响干涉相位图合成质量的至关重要的问题,即重复轨道复数图像的空间配准(co-registration)和重取样^[2,3]。已有一些学者建议完全采用基于影像匹配的方法来进行 SAR 图像的配准,只是他们各自所采用的相关测度不同而已^[1,8,9],但配准效率和可靠性方面还有待提高。而本文首先提出了完全通过卫星轨道的状态矢量(瞬时位置和速度)和成像几何作 SAR 图像空间配准的算法(后面称几何配准);随后设计了基于几何配准结果和能量影像信息相关技术的配准算法,即利用 Fourier 正反变换求互相关函数并以

此寻求相关峰值点,从而确定配准像素对(后面称相关配准);最后使用 ERS-1/2 JERS-1 和 RADARSAT 卫星^[10]获取的 3 种 SAR 复数图像对分别做几何配准和相关配准的试验及比较,对轨道数据质量作了定性分析。另外,通过相关配准点对的影像坐标差统计特性讨论卫星 SAR 图像的一般特征。值得指出的是,相关配准结果仍是最可靠也是最终的配准结果。

2 干涉处理中坐标系的转换

这里首先定义 3 种坐标系:①地球固定坐标系(Earth Centered Rotating, ECR),如图 1 中的 $O-XYZ$,这是卫星轨道状态矢量(瞬时位置 \vec{s} 和速度 \vec{v})的标准框架;②卫星 SAR 平台坐标系 $s-xyz$,以天线中心为坐标原点,坐标轴指向如图 1 中矢量表达式所定义,注意,这些矢量的参考系均是 ECR 系;③ SAR 图像坐标系,斜距向(即影像行向)垂直于卫星飞行方向,相邻像素具有一定的斜距间隔,如 ERS-1 SAR 的斜距取样间隔约为 7.9 m,而方位向(即影像列向)与卫星飞行方向平行,实际上对应于卫星的一个历元,如 ERS-1 SAR 的方位向取样时间间隔约为 0.000 595 s,对应于实地约 3.9 m。对于一幅 SAR 图像第一行对应于一个确定的卫星历元(时间 T_0),第一列对应于一个确定的从卫星到地面目标的斜距 R_0 。实际处理中,除了大地坐标和空间直角坐标的相互转换外,还有 SAR 影像坐标和大地坐标的相互转换,下面将以 SAR 平台坐标系为过渡说明 SAR 图像坐标和大地坐标的相互转换。

2.1 侧视方向(给定单位矢量 \vec{r})与地面的交点坐标计算

如图 1 所示,已知传感器中心 S 在 ECR 系下的位置矢量为 $\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)$,若已知雷达侧视方向(如图 1 中的 \vec{R}_1 或 \vec{R}_2)在 ECR 系下的单位矢量为 $\vec{r} = (r_x, r_y, r_z)$,则沿该方向与地面有且仅有一个交点 P (设地面大地高为 h), P 的 ECR 坐标 (X, Y, Z) 近似满足如下关系

$$\left(\frac{X}{a+h}\right)^2 + \left(\frac{Y}{a+h}\right)^2 + \left(\frac{Z}{c+h}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

其中, a, c 分别为椭球的长短半轴(如可以选用 WGS84 椭球)。另一方面,由矢量关系有

$$\vec{P} = (X, Y, Z) = \vec{S} + l\vec{r} = (S_x + lr_x, S_y + lr_y, S_z + lr_z) \quad (2)$$

其中, l 为传感器中心 S 至地面点 P 的斜距。联合

式 (1)、式 (2) 可容易解得 P 的 ECR 坐标 (X, Y, Z)

2.2 SAR 图像坐标到大地坐标的正反算

由于反算处理与正算类似, 在此只讨论正算问题。为计算方便, 定义一个以卫星 SAR 传感器中心为原点的直角坐标系 $s-xyz$, 使卫星速度矢量 \bar{v} 和其位置矢量 \bar{s} (如图 1 所示) 位于 xz 平面内。根据 SAR 成像的基本原理, SAR 图像的某一像素的 Doppler 频率 F 满足下列等式^[11]

$$F = 2|V| \cos K \lambda \quad (3)$$

其中, λ 为雷达波长, K 为卫星瞬时速度 \bar{v} 方向与雷达侧视方向 \bar{R} 的夹角 (如图 2 所示), 对于零多普勒投影有 $F = 0$, 对于非零多普勒投影 F 应根据 Doppler 中心系数求解^[3, 7, 11]。设从传感器中心至地面点的空间矢量为 \bar{R} , 根据图 2 中的矢量分解和矢量运算法则, 有

$$\begin{aligned} \bar{R} &= (\bar{x}R_x, \bar{y}R_y, \bar{z}R_z) = \\ &|\bar{R}| \cdot (\bar{x} \cos K \bar{y} \sin K \cos N \bar{z} \sin K \sin N) \quad (4) \\ \bar{x} &= \bar{V} / |\bar{V}| \quad \bar{y} = \bar{V} \times \bar{S} / |\bar{V} \times \bar{S}| \quad \bar{z} = \bar{x} \times \bar{y} \quad (5) \end{aligned}$$

其中, N 为 \bar{R} 在 yz 面上的投影与 y 轴的夹角, 一般称为俯角, 平台系三个坐标轴指向的单位矢量分别为 \bar{x}, \bar{y} 和 \bar{z} , 这里 (\times) 表示矢量的交叉积。

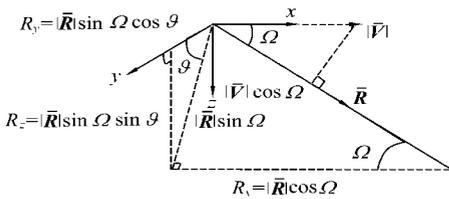


图 2 平台坐标系及雷达侧视矢量分解

Fig. 2 Platform coordinate system and decomposition of radar side-looking vector

给定像素点坐标 (设沿法线方向 \bar{n} 的大地高为 h , 相应斜距 时间为 (R, T) , Doppler 频率为 F), 从式 (3) 不难求出卫星瞬时速度 \bar{v} 方向与雷达侧视方向 \bar{R} 的夹角 K 。对于俯角 N 需迭代求解, 将 SAR 图像坐标转化为大地坐标 (U, L) 的处理可按如下步骤完成:

1. 由卫星轨道状态矢量传播器 (satellite orbit vector propagator) 计算在 ECR 系下卫星 T 时刻的瞬时位置和速度矢量 (\bar{s}, \bar{v}) , 按式 (5) 可计算卫星平台局部坐标系 3 轴的单位矢量 \bar{x}, \bar{y} 和 \bar{z} , 并根据 SAR 传感器参数给定初始俯角 N

2. 根据式 (4) 计算对应的侧视方向单位矢量 \bar{r} ;

3. 由式 (1) 式 (2) 求沿 \bar{r} 从传感器中心到地面点的斜距 l ;

4. 按一定的规律改变俯角 N , 重复 2 3 两步直到 l 与给定斜距 R 之差足够小为止;

5. 按式 (2) 求对应地面点的 ECR 坐标 (X, Y, Z) , 并可继而转化为大地坐标 (U, L)

3 基于卫星轨道数据和成像几何的 SAR 复数图像配准

如图 1 所示, 在 S_1 轨道上获取的图像称为主图像 (master), 在 S_2 轨道上获取的图像称为从图像 (slave)。选定主图像为目标空间, 将从图像配准到主图像空间的几何配准方案如下所述。

首先确定主从图像地理空间覆盖范围, 并计算出覆盖区域内主图像的斜距 时间坐标 (R, T) 范围 $\{[R_{\min}^{\min}, T_{\min}^{\min}]; [R_{\max}^{\max}, T_{\max}^{\max}]\}$, 并在此范围内设置一个 $M \times N$ 的格网 (如 6×6), 这些格网点被称为主点 (master points), 设主点在主图像中的斜距 时间为 (R_m, T_m) , 对应的像素坐标为 (r_1, t_1) , 已知斜距向取样间隔为 WR , 方位向时间间隔为 WT , 则有

$$R_m = R_{\min}^{\min} + r_1 WR \quad T_m = T_{\min}^{\min} + t_1 WT \quad (6)$$

实际处理时, 设主点的大地高为 0 然后, 根据上述算法将 (R_m, T_m) 转化为大地坐标 (U, L) , 最后由大地坐标反求在从图像中对应的斜距 时间 (R_s, T_s) , 继而求解出相应的像素坐标 (r_2, t_2) (一般为非整数值), 配准点对的斜距向和方位向像素坐标偏差分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta r^1 &= r_2 - r_1 \\ \Delta t^1 &= t_2 - t_1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当所有主点 (r_1, t_1) 对应的 $\Delta r^1, \Delta t^1$ 全部求解出来后, 采用两个多项式 (如双三次) 分别拟合斜距向和方位向像素坐标偏差, 并可利用最小二乘算法求解多项式系数

由于联系点高程数据一般难以得到, 上述处理中假设主点大地高为 0 实际上, 这一假定只会对斜距向的几何配准产生影响, 而对方位向配准不会产生影响, 对斜距像素偏差影响大小应是基线倾角 α 基线长度 B 地面高程 h 雷达侧视角和斜距的函数。如图 3 所示, 当地面点高程为 0 时, 雷达瞬时位置 S_1 和 S_2 到该点的斜距差 WR 可近似为

$$WR = R_2 - R_1 \approx -B \sin(\theta_0 - a) \quad (8)$$

当地面点高程变为 h 时,引起侧视角增量 $\Delta\theta_1$ (近似等于 $h / (R_1 \sin\theta_0)$),斜距差 WR' 可表示为

$$WR' = R_2' - R_1' \approx -B \sin(\theta_0 + \Delta\theta_1 - a) \approx -B \sin(\theta_0 - a) - B \cos(\theta_0 - a) \frac{h}{R_1 \sin\theta_0} \quad (9)$$

式(8)和式(9)相差可估计出因忽略高程造成的几何配准斜距偏差的误差 $\Delta\Delta r^1$

$$\Delta\Delta r^1 = [B \cos(\theta_0 - a) \frac{h}{R_1 \sin\theta_0}] / r_c \quad (10)$$

这里, r_c 表示雷达斜距取样间隔。以 ERS-1 SAR 系统为例,设基线长度 B 和倾角 a 分别为 200 m, 25° ,在最远、最近斜距处(雷达侧视角和斜距分别取 $24.5^\circ, 874$ km $21.5^\circ, 852$ km), $\Delta\Delta r^1$ 随高程 h 变化的趋势如图 4 所示,尽管 $\Delta\Delta r^1$ 与 h 有线性关系,但斜率很小。随斜距增大, h 对 $\Delta\Delta r^1$ 的影响变小;比如,高程为 1 km 时,误差接近 0.08 像素;高程达到 10 km 时,误差接近 0.8 像素。因此,对于大地高较小的地区,几何配准时假定联系点高程为 0,对斜距向配准的影响是可以忽略的。

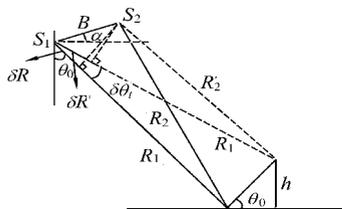


图 3 斜距差与高程的关系

Fig. 3 Relation between range difference and height

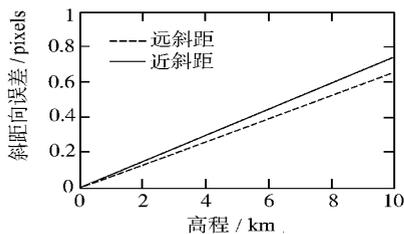


图 4 高程变化对斜距向配准误差的影响

Fig. 4 Effects of height variation on co-registered error of range dimension

4 基于能量影像的相关配准

相关配准单纯从影像能量互相关的角度来考察。在主从图像地理空间覆盖范围内的主图像空间设置一个 $K \times L$ 的格网(一般比几何配准时所

采用的格网要密,如 8×8),各格网点的影像坐标为 (r_1, t_1) ,利用几何配准时所估计的相应拟合多项式计算出在从图像中的影像坐标 (r_2, t_2) ,对应的初始坐标偏差为 $\Delta r^1, \Delta t^1$,这对点称为初始联系点(tie point);以此为基础采用下面的影像相关算法作配准,使配准精度达到子像素级

以联系点 (r_1, t_1) (r_2, t_2) 为中心分别从主从 SAR 图像提取一定窗口大小(如 256×256)的影像块(chips),设其能量描述函数分别为 $f_m(x, y), f_s(x, y)$,对应的频谱函数分别为 $F_m(U, V), F_s(U, V)$,根据信号相关定理(或称维纳-辛钦定理)^[12],两个影像块的互相关函数和互能谱是一个 Fourier 变换对,即

$$^a [R_{f_m f_s}(x_s, y_s)] = F_m F_s^* \quad (11)$$

$$R_{f_m f_s}(x_s, y_s) = \sum_{-M}^{+M} \sum_{-N}^{+N} f_m(x, y) f_s(x - x_s, y - y_s) \quad (12)$$

式中 a 表示 Fourier 变换, $(^*)$ 表示共轭复数, (x_s, y_s) 表示信号的空间位移(实际处理时有一个限定范围),采用快速 Fourier 变换将极大地提高求解相关函数的效率。基于信号相关定理配准的具体算法设计如下:

1. 分别在主从图像空间以初始联系点为中心提取两个复数影像块,分别计算各自对应的能量影像;对每一块作这样的处理:统计影像块的平均能量值和其标准偏差,并将能量值大于 3 倍标准偏差的像素点以平均能量值代替(即平滑处理),这样做会减少噪声点对相关结果的影响;根据下式计算相关系数^[11],

$$Coh = \frac{2 \langle R_{f_m f_s} \rangle}{R_{f_m f_m} R_{f_s f_s}} - 1 \quad (13)$$

如相关系数低于阈值(threshold,如 0.2),则此对联系点无效,移至下一对处理。相关系数低的原因可能是影像块落入阴影区(shadowing),雷达迭掩区(layover)或水域区等;

2. 当联系点对有效时,分别对经上述处理后的主从能量图像块做快速 Fourier 变换,并做共轭相乘,然后做快速 Fourier 反变换,即获得相关函数;

3. 寻求极值点(peak point),即获得近似最大相关配准点,并作可靠性检验,采用双二次多项式拟合法内插出子像素级精度的准确峰值点;值得指出的是,如果影像信号中包含高频窄带随机

噪声或包含特别强的高频信号,都会使互相关函数出现多个极值点^[12],因此,对求得的峰值作可靠性检验可防止错相关,这里采用峰宽和相对峰值两个标准控制。如果相关结果可靠,则主图像像素 (r_1, t_1) 在从图像中的精确配准点为 $(r_2 + \Delta r^2, t_2 + \Delta t^2)$,故精确配准后联系点对的斜距向和方位向像素坐标总偏差分别为:

$$\begin{cases} \Delta r = \Delta r^1 + \Delta r^2 \\ \Delta t = \Delta t^1 + \Delta t^2 \end{cases} \quad (14)$$

4. 重复 1~3 步,基于所有其他初始联系点对作相同的相关配准运算

5 配准实例及相应结果分析

为了验证上述几何配准、相关配准算法的可靠性,考察这两种配准结果的差异以及比较不同卫星 SAR 图像配准的情况,这里选取 3 种卫星 SAR 系统获取的图像对作为研究对象,其成像时间、覆盖区域、名义干涉基线分量和主图像中选择

的用于配准的范围如表 1 所示。图 5 显示了 ERS1-2 联合飞行方式获取的降轨 (descending orbit) 图像 (参数见表 1),为节约篇幅,显示影像经过了一次减少数据量的重取样,图像块覆盖香港元朗区,主从图像右上角和左下角是海区,信噪比很低且没有相关性。由于篇幅所限,其他的图像这里未给出。再次指出,相关配准结果是最终的配准结果,也是这里的评判标准。

按上述算法对 3 类图像对进行几何配准时均选择 6×6 的格网,即均匀分布在图像对重叠区域内的 36 个主点,而进行相关配准时选择 8×8 的格网,即 64 个联系点,两次配准统计结果如表 2 所示。表 2 中统计了 36 个主点经几何配准后,斜距向和方位向像素坐标差均值 $(\overline{\Delta r^1}, \overline{\Delta t^1})$ 、像素坐标差标准偏差 $(\mathbb{W}r^1, \mathbb{W}t^1)$;同时也统计了相关配准后的上述各项指标。值得注意的是,相关配准中依赖于联系点对的有效性和可靠性检验已剔除出不合格的联系点,有效的配准点对会小于 64

表 1 3 种 SAR 图像对试验数据

Tab. 1 Test data three types of SAR image pairs

SAR 图像对类型	覆盖区域	成像时间		名义基线分量 /m		主图像中被选择的范围 / (m° s ⁻¹)	
		主图像	从图像	$B_{\text{平}}$	$B_{\text{垂}}$	$R_{\text{min}}^{\text{min}}, T_{\text{min}}^{\text{min}}$	$R_{\text{min}}^{\text{max}}, T_{\text{min}}^{\text{max}}$
ERS-1/2	Yuen Long (香港)	(ERS-1) 1996-03-18	(ERS-2) 1996-03-19	80.09	99.05	860 300.443 m, 10 500.917 99 s	864 804.138, 10 503.435 56 s
JERS-1	Mount Fuji (日本)	1993-07-07	1993-08-20	644.16	510.48	717 933.260 m, 5 033.000 27 s	729 046.905 m, 5 034.155 94s
RADAR-SAT	Bathurst 岛 (加拿大西北部)	1996-03-04	1996-03-28	- 909.04	- 1 061.67	1 096 267.306 m, 46 960.349 65 s	1 107 994.184 m, 46 962.141 10 s

表 2 3 种 SAR 图像几何配准和相关配准结果比较

Tab. 2 Comparison of co-registration results among three types of SAR images

SAR 图像对	几何配准联系点统计			相关配准后联系点统计			Pix els
	$\overline{\Delta r^1}$	$\mathbb{W}r^1$	$\mathbb{W}t^1$	$\overline{\Delta r}$	$\mathbb{W}r$	有效点对	
	$\overline{\Delta t^1}$	$\mathbb{W}t^1$	$\mathbb{W}t^1$	$\overline{\Delta t}$	$\mathbb{W}t$	\mathbb{W}	
ERS-1/2	- 5.881 - 65.124	± 0.045 ± 0.021	± 0.026	- 5.978 - 66.230	± 0.014 ± 0.017	54	± 0.056
JERS-1	- 3.503 - 30.123	± 0.355 ± 0.176	± 0.10	- 5.156 22.380	± 0.279 ± 0.280	56	± 0.191
RADARSAT	- 3.940 - 7.494	± 0.772 ± 0.773	± 0.095	0.088 - 11.862	± 0.546 ± 0.575	49	± 0.134

对于主图像中的某一待配点来说,分别采用几何配准和相关配准算法在从图像中会得到不同的配准点。从斜距向和方位向像素坐标差均值之差 $(\overline{\Delta r} - \overline{\Delta r^1}, \overline{\Delta t} - \overline{\Delta t^1})$ 可以看出,对于 ERS-1/2 的 SAR 图像对,斜距向差值为 0.097 像素,方位向

差值为 1.106 像素;对于 JERS-1 的 SAR 图像对分别为 1.653 像素 - 52.503 像素;对于 RADARSAT 的 SAR 图像对分别为 - 4.028 像素、- 19.356 像素,显然 ERS-1/2 的差异最小。从几何配准点对像素坐标差标准偏差 $(\mathbb{W}r^1, \mathbb{W}t^1)$

来看, ERS-1/2 SAR 图像对仍然最小。参考式 (1) ~ 式 (5), 不难看出, ERS-1/2 卫星定轨数据精度

比 JERS-1 和 RADARSAT 卫星的精度确实要高。



(a) ERS-1 主图像 (4 300 × 587)
(a) Master SAR image acquired by ERS-1
(Size: 4 300 × 587)



(b) ERS-2 从图像 (4 230 × 571)
(b) Slave SAR image acquired by ERS-2
(Size: 4 230 × 571)

图 5 香港元朗区 ERS-1/2 SAR 图像

Fig. 5 SAR images acquired by ERS-1/2 and covered Yuen Long, Hong Kong

从相关配准点对像素坐标差标准偏差 (Δx_r , Δx_t) 来看, ERS-1/2 图像对相对最小, JERS-1 次之, RADARSAT 最大。但总体来说, 这 3 种影像配准点对像素坐标差在影像中分布较均匀, 表明卫星轨道较为平行, 取样的几何畸变较小, 因此, 使用多项式分别对斜距向和方位向坐标差进行拟合是可以表达相关配准结果的。试验中, 使用双三次多项式拟合, 根据拟合残差求出的拟合中误差 Δx 如表 2 所示。对于几何配准结果, 也使用了同样的拟合方法, 拟合中误差 $\Delta x'$ 如表 2 所示。

6 结 论

借助于上述几何配准和相关配准算法均可以对卫星 SAR 复数图像对做空间配准, 但由于卫星轨道数据的精度有限, 因而几何配准的结果显然和相关配准的结果存在差距, 因为 ERS-1/2 的轨道状态矢量精度最高, 故其差距相对于 JERS-1 和 RADARSAT 系统为最小; 几何配准结果可作为相关配准时提取影像块的依据, 减少了相关配准的盲目性, 因而提高了相关配准的效率; 3 类卫星 SAR 复数图像对的相关配准联系点像素偏差均较为一致, 表明卫星轨道平行度较高, 成像的几

何畸变较小, 使用多项式 (如双三次) 分别对斜距向和方位向像素坐标偏差进行拟合可以有效地表达相关配准结果, 并作为影像重取样和干涉图生成的基础。进一步研究的重点将放在考察借助少量地面控制点数据, 以几何配准像素偏差和相关配准像素偏差的差异平方和最小为优化函数, 对轨道数据进行精化, 进而探求一种求解干涉基线数据的新途径。

致谢 本文第一作者对香港理工大学提供的博士研究生奖学金表示感谢。此外, 对欧洲空间局及时提供的 SAR 图像数据库搜索软件 DESCW (Ver. 4.0) 和有关 SAR 图像数据深表谢意。

参考文献:

- [1] LIN Q, VESECKY J F, ZEBKER H A. Comparison of Elevation Derived from INSAR Data with DEM over Large Relief Terrain [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(9): 1 775-1 790.
- [2] SANTITAMNONT P. Interferometric SAR Processing for Topographic Mapping [D]. Hannover: Publication of Hannover University, 1998.
- [3] SMALL D. Generation of Digital Elevation Models.

- through Spaceborne SAR Interferometry [D]. Zürich: Publication of University of Zürich, 1998.
- [4] ZEBKER H A, WERNER C L, *et al.* Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 823-836
- [5] FUJIWARA S, ROSEN P A. Crustal Deformation Measurements Using Repeat-Pass JERS-1 Synthetic Aperture Radar Interferometry near the Izu Peninsula, Japan [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B2): 2 411-2 426.
- [6] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94 (B7): 9 183-9 191.
- [7] GENS R, VAN GENDEREN J L. Analysis of the Geometric Parameters of SAR Interferometry for Spaceborne Systems [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31 (B2): 107-110.
- [8] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from Sir-B [J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(5): 857-872.
- [9] LI F K, GOLDSTEIN R M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(1): 88-97.
- [10] SHU Ning. Elements of Radar Remote Sensing [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1996. 44-59. (in Chinese)
- [11] CURLANDER J C, MCDONOUGH R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1991. 13-49.
- [12] ZHANG Zu-xun, ZHANG Jian-qing. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Press of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1996. 144-153. (in Chinese)

全球定位系统技术应用协会第六次年会征集学术论文

中国全球定位系统技术应用协会第六次年会将于 2001 年 8 月召开,为推动 GPS 事业发展,鼓励广大会员、专业技术人员更好地交流经验,总结科研、应用成果,面向西部大开发,发挥 GPS 技术的作用,中国全球定位系统技术应用协会办公室将组织编辑学术论文集。在年会上将评选优秀论文,并对获奖者进行奖励。

论文范围包括技术、应用与管理。技术方面:空间数据基础设施(定位数据、数据的获取、存储更新、交换;数据网络;数据的管理和维护),高精度 DGPS WAAS 和 LAAS, GPS/GNSS/GLONASS 卫星系统研究,大气层影响,时间同步, GPS 天线与接收机,蓝牙 (Bluetooth) 技术, WRC-2000, GSM 与 GPS 的集成。

应用与管理方面: GIS 与 GPS 集成应用,陆地、航天、航海指挥调度、动态监控、自主导航等安全系统, GPS 与精细农业, GPS 与环境监测,工程(地壳、建筑物)形变监测, GPS 现代化, GPS 政策阐述。

要求参加评选的论文立论正确,有创新、文字通顺、图表清晰。已在公开刊物上发表的文章不得参加评选。今年拟评出一等奖 1 名,奖金 2 000 元,二等奖 2 名,奖金 1 000 元,三等奖 3 名,奖金 500 元,获奖论文均发给奖状,并安排在年会上作报告,向有关公开刊物推荐发表。

论文征集截止日期 2001 年 6 月 10 日。有关论文格式及其他要求,请与中国全球定位系统技术应用协会办公室联系,欢迎各界人士踊跃投稿。

地址:北京复外三里河路 50 号中国全球定位系统技术应用协会 邮编: 100045

联系人:王丽 韩丽华 联系电话:(010)68512952 E-MAIL: wangli@sbsm.gov.cn

中国全球定位系统技术应用协会