



面向对象高可信 SAR 数据精确处理

张继贤^{1,2} 黄国满² 程春泉²

1 国家测绘产品质量检验测试中心,北京,100830

2 中国测绘科学研究院,北京,100830

摘要:针对合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据在地形地物、森林植被等方面处理与解译难题,介绍了近年来利用多角度、多波段、多极化、极化干涉等多模态航空航天 SAR 数据,建立基于散射机理的地物特性知识库,构建地形辐射校正模型、极化干涉处理模型、立体测量模型、基于知识的解译模型等,开发出高分辨率机载极化干涉 SAR 数据获取系统和 SAR 影像高性能解译软件系统,实现了精度高、可靠性强、识别类型丰富的 SAR 影像高可信处理与解译的原理、技术与方法,同时对成果在测绘、林业等行业的应用情况进行了介绍,对研究中存在的问题和解决思路进行了探讨。

关键词:合成孔径雷达;处理系统;高可信;精确处理;SAR 解译

中图分类号:P237

文献标志码:A

当前,高空间分辨率、高时间分辨率、多波段、多极化及多角度的多模态航空航天合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据获取已经成为国际遥感领域的主流发展方向。各类型 SAR 的出现为对地观测提供了重要的数据源。长期以来,由于缺乏对 SAR 成像机理的深刻认识,缺乏定量化的处理手段,缺乏快速并行处理系统,使得 SAR 图像处理与解译的精度和效率低下,可判别的类别不够,解译可信度低,SAR 影像数据的应用受到极大限制。具体表现在,合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar, In-SAR)滤波和配准还没有很好地解决复杂地形下相干性较差引起的相位失真问题;SAR 影像的地形辐射校正没有考虑相位等其他信息,且未形成全极化 SAR 影像地形辐射校正方法;SAR 在地形复杂地区难以建立类似光学影像立体模型;在低相干地区,由于干涉处理的信息较少,受大气影响大,致使地形反演结果的可信度不高,森林参数反演困难;SAR 影像地物解译由于缺乏对各种地物与电磁波的相互作用机理的深入理解,主要依赖于后向散射强度信息,大都采用光学影像解译方法,再加上 SAR 影像固有的斑点噪声的影响,使得 SAR 影像特征提取有效性低,缺乏综合的地物类别散射知识库支持,SAR 影像分类、变化检

测、解译的精度难以满足实际需求。

SAR 数据处理与解译目前另一个显著问题是缺乏大型高效的 SAR 处理软件系统。ERDAS、ENVI 等国际主流遥感图像处理品牌软件主要针对光学影像处理,在 SAR 数据处理方面的能力不强;EarthView、Doris、StaMPS 主要针对干涉 SAR 处理;Gamma、ROI_PAC 软件具有成像、几何处理和干涉处理能力,但在极化处理方面涉及不多;PolSAR Pro 在极化处理方面较强,但在干涉处理、专题化制图方面能力较弱^[1]。在快速处理方面,当前国际上利用通用并行处理技术与系统进行光学遥感图像处理的研究得到了较好发展,针对 SAR 数据的高性能并行处理技术仍很少。因此针对海量多源 SAR 数据,迫切需要开发基于加速单元和高性能处理的、通用性强、功能全面的 SAR 处理系统。

为此,中国测绘科学研究院联合武汉大学、中国科学院、中国林业科学院等国内多家优势单位,在国家 863 主题项目“面向对象的高可信 SAR 处理系统”支持下,自 2011 年起,历时 5 年,从理论、技术和方法等多角度对高可信 SAR 核心技术进行了系统性攻关。研究以技术突破为关键,以系统构建为重点,以支撑发展为目标,以联合攻关为手段,开展研究和研发。研究围绕两条主线展开

关键技术攻关。一条主线是 SAR 影像高可信处理解译核心技术攻关,主要开展高分辨率 SAR 影像精确处理、高精度三维信息提取和面向对象的 SAR 地物高可信解译等关键技术研究,建立综合模型、影像、散射测量的典型目标知识库,并在知

识库的支持下,突破 SAR 影像高可信处理与地物解译中的核心技术;另一条主线是 SAR 影像快速并行处理技术的攻关,开展 SAR 影像处理算法加速单元研制和适合于大规模 SAR 影像快速处理的并行处理技术研究。总体技术路线见图 1。

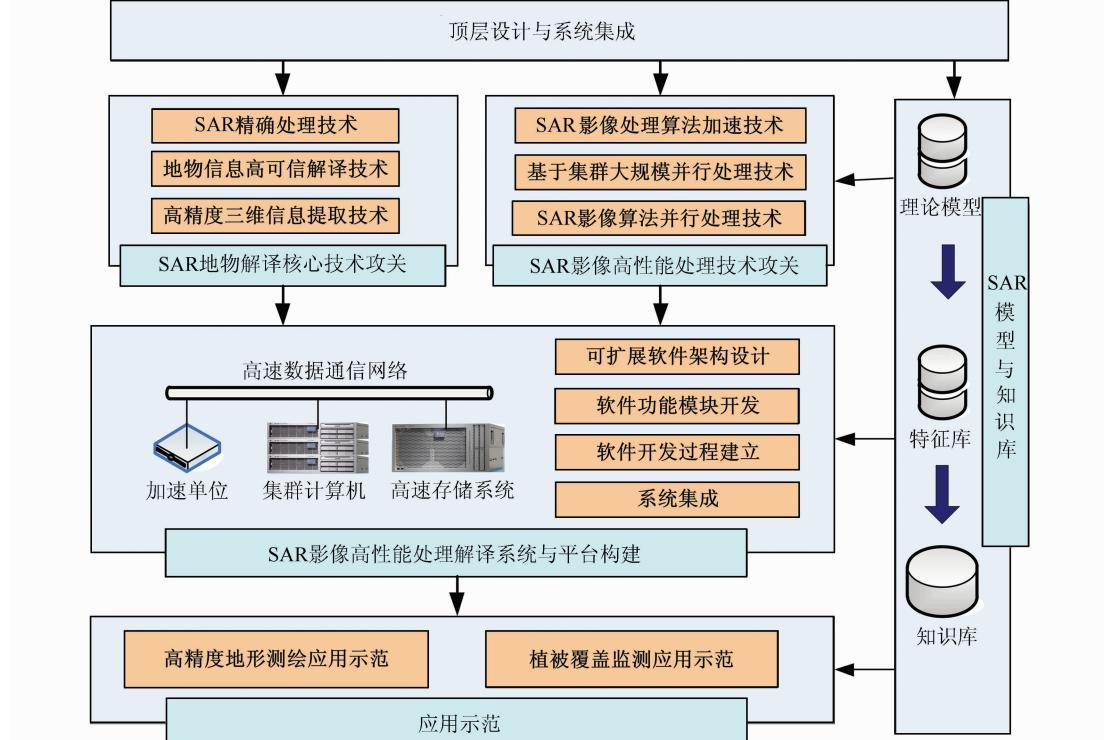


图 1 总体技术路线图

Fig. 1 Overall Technology Road Map

通过 SAR 影像高可信处理解译系统与总体技术、高精度三维信息提取技术、地物散射模型与知识库、面向对象 SAR 影像地物高可信解译技术以及应用示范 5 方面的攻关,突破了基于知识的 SAR 影像精准处理与解译等核心技术,研发 SAR 影像核心处理功能加速单元,开发了能处理国内外航空航天 SAR 数据、功能齐全、具有 PB 级影像数据管理和并行处理解译能力的 SAR 影像处理解译系统;开展了地形测绘、土地利用分类与植被覆盖监测等应用示范,并在相关行业推广应用,提升了 SAR 遥感数据处理解译及应用的技术水平。

1 面向对象的高可信 SAR 数据精准处理

1.1 SAR 影像精确处理技术

本文针对高可信解译对 SAR 精细化处理的要求,从信号和过程入手,突破了原子分解方法图像精细化、基于观测矩阵的 SAR 精细化成像技

术;发展了 SAR 影像自适应相位滤波与影像配准、多视角自适应归一化互相关系数和匹配,稀少控制点多源 SAR 影像联合定位,全极化 SAR 数据幅度相位地形补偿等系列技术,实现了 SAR 数据的精确处理,为高分辨率及极化干涉 SAR 数据在遥感测绘、植被和土地覆盖解译产品的精确处理和高可信解译提供了基础。

1) SAR 精细化成像方法

突破了原子分解图像精细化方法,发展了基于观测矩阵的 SAR 精细化成像算法。本文选取原子分解作为主要的参数提取手段和图像精细化方法,确定了几种主要原子的解析式及对应参数的字典库。信号调频斜率估计精度优于 98%,信号中心频率估计精度优于 1/20 雷达脉冲重复频率,信号中心时刻估计精度优于 1/10 信号周期,信号级典型场景分类正确率优于 70%,信号级几何特征分类正确率优于 80%,实现了该方法从仿真到实际数据的突破。同时从信号级入手,分析 SAR 回波的相位历史,建立距离向和方位向的观测矩阵,

结合矩阵求逆的处理奇异矩阵的策略,提出一种主分量分解的方法,有效地抑制了旁瓣效应,实现了比 Chirp Scaling 算法更为精细的 SAR 成像^[2]。

2) SAR 高精度配准与匹配

本文针对极化 SAR 影像斑点噪声问题,通过前置滤波提高了 InSAR 干涉对的相干性,基于多尺度、多方向的自适应中值滤波抑制了 InSAR 干涉图相位噪声;通过改进自适应 Goldstein 滤波,能够自适应地抑制 InSAR 干涉图相位噪声;通过分析极化 SAR 影像相邻像素间的强度、散射特性的匀质性特点,发展了极化 SAR 自适应滤波算法^[3-5]。为解决 SAR 立体影像间存在严重的辐射变化和几何畸变等问题,提出了适用于机载 SAR 影像的多视角自适应归一化互相关系数(sum of adaptive normalized cross coefficient, SANCC)和影像匹配方法,解决了大基高比机载立体 SAR 影像匹配难点,联合随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法和分块处理测量,提升了影像匹配正确率和匹配速度^[6]。

3) 多源 SAR 影像联合定位模型

在 SAR 影像几何处理与目标定位领域,本文构建了多源 SAR 影像几何定位联合平差模型,能适用于不同 SAR 影像的几何处理,通过对不同 SAR 传感器参数和影像平差参数的配置,实现了多源航空航天 SAR 影像的联合定位,突破了几何机载 SAR 多普勒参数估计方法^[7-11]。无地面控制点条件下,以连接点为基础,联合定位定姿系统(positioning and orientation system, POS)数据,通过多个航带的多景航空航天 SAR 影像的相对定向关系,实现航空航天 SAR 影像的自由网平差。有少量控制点时,通过地面控制点进一步提高区域网影像绝对定向精度,满足了少量控制点条件下大范围 SAR 影像定位和测图需求,解决了稀少或无地面控制点的多源 SAR 影像定位难题^[12]。

4) 全极化 SAR 地形补偿

本文构建了在宽波束角条件下的子孔径极化方位角偏移模型,通过极化散射角及距离向坡度估计值之间的相关图来产生权重,实现虚假地形变化校正方法,通过对二阶残留误差方程进行加权弱化了边界对高程估计的影响^[13]。利用自身获得的地表坡度值进行辐射校正,提出了基于 P 波段 SAR 的宽波束角的地形反演方法和综合地形辐射校正、阴影检测、极化方位角补偿的地形辐射校正和补偿方法,实现了不依靠外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行校正的极化 SAR 地形补偿方法^[14]。

1.2 高精度三维信息提取

本文从多模态 SAR 干涉、大范围地表低相干地区的差分雷达干涉测量(differential InSAR, D-InSAR)形变反演、立体与干涉 SAR 联合、多波段森林垂直结构参数反演等角度入手,解决了三维信息提取的多项关键技术,实现了复杂地形高精度三维信息反演与形变检测,实现不同 SAR 数据的森林垂直结构参数反演。

1) 立体与干涉 SAR 协同三维信息提取

针对 SAR 三维地形重建难点,构建了始于单视复数据的多模式 SAR 干涉提取 DEM 技术流程,分别实现了扫描模式与条带模式干涉,扫描模式与扫描模式干涉、交替极化模式与扫描模式干涉,以及交替极化模式与交替极化模式干涉。多模态 SAR 干涉显著提升了干涉 SAR 提取 DEM 的质量^[3,15]。本文发展了联合立体、干涉 SAR 技术的三维信息提取技术,通过建立 SAR 影像与纠正影像间的严格转换关系,实现了基于模拟纠正 SAR 立体影像匹配提取 DEM 方法;通过几何变换消除了 SAR 影像比例尺不均一,立体像对上下视差对立体观测的影响;通过构建 SAR 立体模型,获取良好的立体视觉,实现高精度立体量测^[16-17];通过将立体摄影测量方法引入干涉处理,协助解缠相位改正,消除失相干和叠掩、阴影等对 InSAR 三维信息提取的影响,改善 InSAR DEM 提取精度^[18-20],见图 2。

2) 大范围低相干 D-InSAR 高精度反演

为了解决大范围低相干地区的高精度地形反演问题,本文提出了基于幅度与相位的稳定点目标多级探测法,使提取的点目标不但具有稳定的幅度特征,而且具有较好的相位时序稳定特征,有利于在低相干地区甄别出高质量的点目标,从而最大程度上保证地表形变的反演精度^[21]。通过分析频谱偏移特征,发展自适应频谱滤波器,保留公共频谱,降低主辅像对的几何去相干影响,实现距离向自适应频谱滤波;针对主辅影像不同成像时刻的大气相位对干涉图的影响,通过利用多卫星的水汽产品数据,建立综合大气纠正模型,实现干涉图的大气纠正,实现多星协同的大气效应消除;发展稳定的高相干点目标提取方法,利用像元幅度、相位、相干系数多属性特征,提取稳定有效的点目标,形成大区域高可信地表形变反演技术^[4-5,22-23]。图 3 展示了使用 ENVISAT ASAR 多模式数据进行干涉处理得到的 2003 年 12 月 26 日伊朗 Bam Mw 6.6 级地震造成的地表形变差分干涉图。

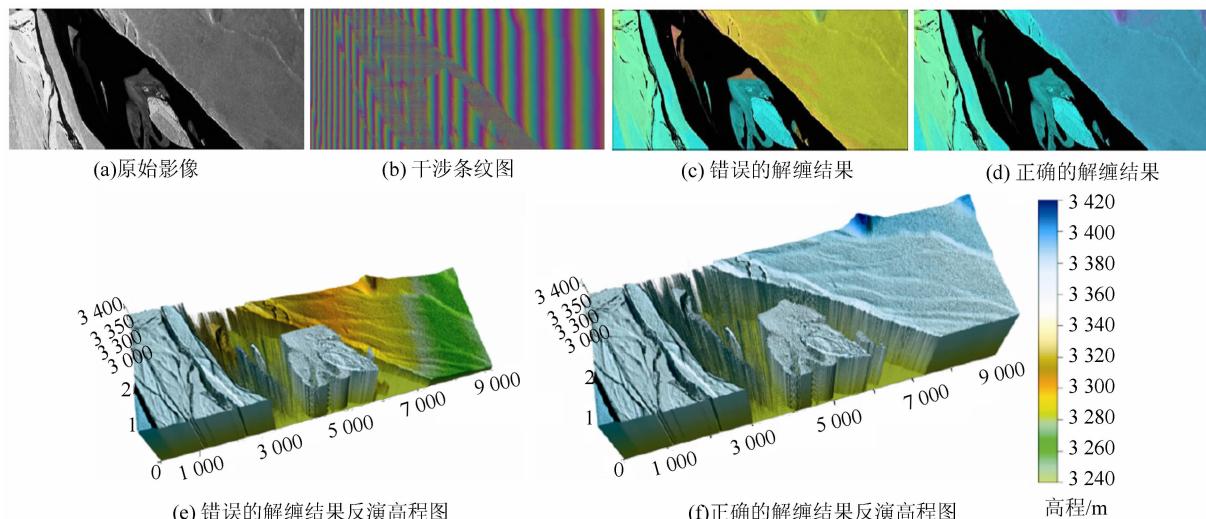


图2 立体摄影测量协同解缠的相位改正结果

Fig. 2 Stereo Photogrammetry Synergistic Unwrapping Phase Correction Results

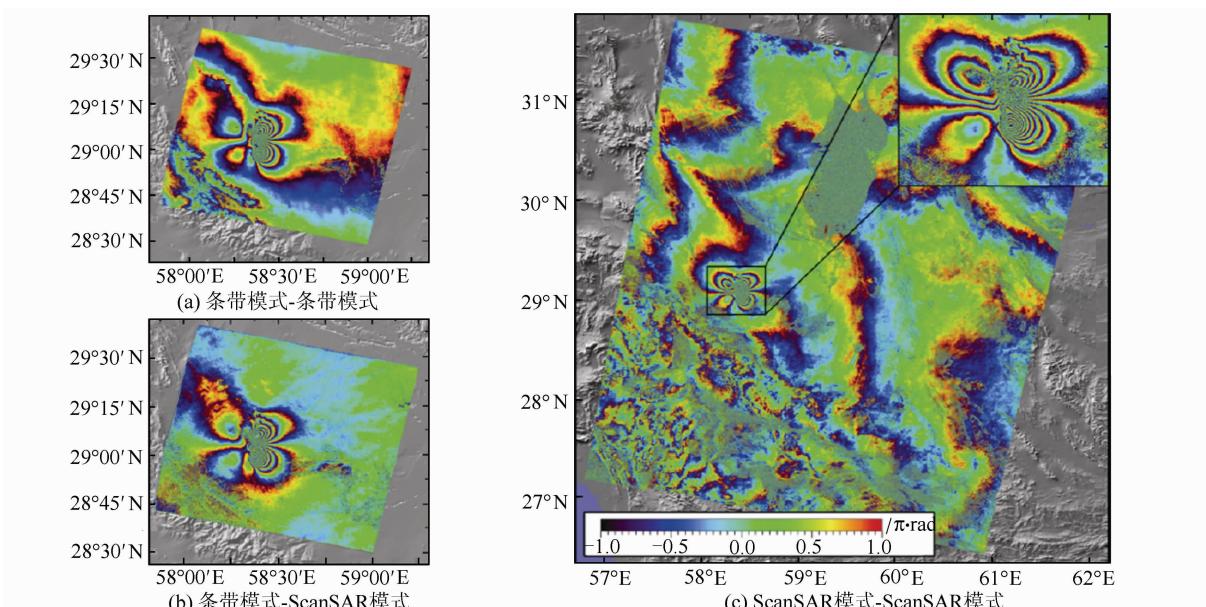


图3 ENVISAT ASAR 多模式数据伊朗 Bam Mw 6.6 地震差分干涉图

Fig. 3 Iran Bam Mw 6.6 Seismic Differential Interferogram of ENVISAT ASAR Multi-mode Data

3) 多维度森林垂直结构参数反演

本文同时构建了森林垂直结构参数反演模型和方法。针对复杂地形,基于P波段极化SAR (polarimetric SAR, PolSAR) 估测森林AGB (above-ground biomass) 3个极化的强度数据,引入局部入射角建立森林地上生物量估测模型,估测总精度达到82.47%。通过分析相干幅度和树高的相关性,建立模型关系式,基于干涉SAR,可快速有效地估测森林树高。利用不同轨道探测的高度构建森林垂直结构剖面及多轨InSAR数据构建森林垂直结构剖面,利用剖面参数有效地提高森林地上生物量的估测精度^[24-26]。

1.3 面向对象的高可信SAR解译

本文综合利用SAR影像的极化、纹理、干涉

等信息,建立了基于知识的SAR影像地物高可信解译、SAR影像高精度土地覆盖分类与森林类型识别、SAR影像地物高可信变化检测算法,在知识库的支持下,发展了一系列的针对线状、面状典型地物的面向对象的高可信解译方法和技术^[13]。

1) 基于知识的SAR影像地物高可信解译

从SAR影像分割与分类入手,提出了基于超級像素分割算法、扩展的广义均值漂移算法和统计区域融合分割算法,可直接应用于单极化和全极化数据,为面向对象的处理提供技术支持,具有细节保持能力强、运行效率高的特点^[27-32]。其中文献[31-32]在分割处理中提出的基于Mean Shift极化SAR影像滤波算法,在噪声抑制和细节保持方面均有很好的效果,在2015年被国际流

行 SAR 处理软件 PolSAR5.0 收录,开源供全球 PolSAR 研究者使用。在基于 SAR 影像噪声模型的高效分割方法基础上,提出了基于面向对象 PolSAR 影像纹理特征和极化特征的多种高精度分类算法,通过特征降维提高信息的利用程度,在 SAR 影像分割、模型和特征库支持下使分类总体精度优于 85%^[33-37]。

2 SAR 影像高精度土地覆盖分类与森林类型识别

在多时相极化 SAR 林地类型分类、极化 SAR 影像面向对象的森林植被类型分类识别方法、极化干涉 SAR 森林植被类型分类等方面,建立了高精度 SAR 影像林业一级精细地物分类识别算法,实现了林地植被覆盖类型的高精度分类。针对 SAR 影像不同地物类别特征混叠现象,利用知识库综合知识工具,通过类间最优化特征选择,构建了基于决策树的解译算法;针对典型地物,通过模型和后向散射特征,结合知识库,实现了对典型地物的高可信解译;针对线状地物,分别基于线目标的散射机理,结合知识库系统中的模型库,提出了偶极子线状地物检测方法,联合极化散射机理、特征、知识等,实现 SAR 影像线目标的快速解译^[38-40]。

3 SAR 影像地物高可信变化检测算法

在 SAR 典型地物高可信变化检测方面,本文提出了系列 SAR 影像变化检测算法。主要体现在基于模型的 SAR 影像变化检测、基于主成分分析(principal component analysis, PCA)变换的 SAR 影像变化检测、基于多尺度特征的 SAR 影像变化检测及不均匀杂波模型的 SAR 影像高可信变化检测技术,实现了实验区变化区域的高可信解译^[41-45]。图 4 为 P 波段全极化 SAR 获取的玉树震后 Pauli-RGB 影像。选择随机森林^[45]作为分类器,并从地面真实倒塌图中对每一倒塌等级随机选择 2% 样本训练分类器,最终得到的精度为 85%,Kappa 一致性系数为 0.76。图 5 为单时相监督性倒塌房屋解译结果。

2 面向对象高可信 SAR 精确处理成果

2.1 高可信 SAR 精确处理软件系统 SARplore

本文借鉴国内外商用软件先进的设计、开发和集成的理念,研究具有高扩展性和伸缩性的 SAR 影像高性能处理解译框架,集成了 SAR 精细处理、高精度三维信息提取技术和 SAR 影像地



图 4 P 波段全极化 SAR 获取的玉树震后 Pauli-RGB 影像

Fig. 4 Pauli-RGB Image of Yushu After Earthquake Acquired by P-Band Fully PolSAR

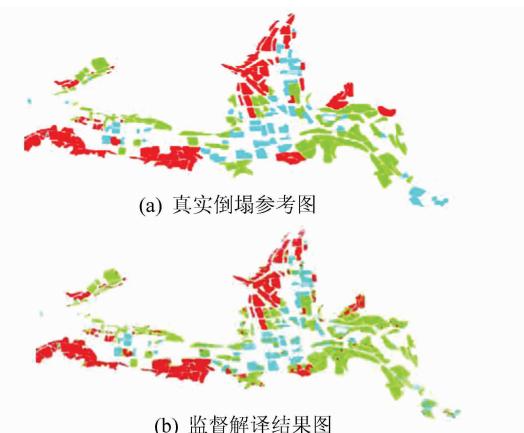


图 5 单时相监督性倒塌房屋解译结果

Fig. 5 Interpretation Results of Single-Phase Supervised Collapsed Houses

物高可信解译技术等研究成果,研发了高可信 SAR 处理解译系统 SARplore。软件系统采用模块化体系结构,可扩展性强,方便集成第三方的软件模块和插件,设计了统一的数据处理算法及作业流程,使用户界面更加简练和易于操作。该软件具有以下鲜明的特色。

1) SARplore 是目前国内外功能最全的 SAR 软件系统,包括基本工具、极化处理、辐射处理、几何处理和制图等 5 个具有 SAR 基本操作的软件模块,SAR 影像精确处理、SAR 影像三维信息提取、SAR 影像地物高可信解译和知识库调用接口 4 个高级软件模块;能够基于严密定位模型实现星载、机载 SAR 影像纠正与立体定位、多模式 SAR 干涉三维信息提取、大范围地表低相干地区的 DInSAR 形变反演、立体和干涉 SAR 联合提取三维信息、森林垂直结构参数反演功能、SAR 图像分割以及面向对象的高可信解译等功能^[46]。

2) SARplore 是目前国内外支持 SAR 数据类型最广的 SAR 软件系统,支持 ASAR、ERS1-2、TerraSAR-X、RADARSAT-2、COSMO-SkyMed、

ALOS/PALSAR、高分二号等多种星载 SAR 数据,支持 CASMSAR、AIRSAR、ESAR、PISAR、EMISAR、CONVAIR 等多种机载 SAR 数据^[3,47]。

3) SARplore 具有广泛的适用性,具备自动化和人工采编相结合的 SAR 立体快速测图能力,适用于单机、集群两个硬件平台。采用自动化处理与人工辅助相结合的方式,具备强大的解译、地形测图、植被监测等产品的生产能力,能够应用于国土、测绘、林业、军事和水利等多个领域。

4) 大容量 SAR 数据快速处理。分别基于功

能分解影像链驱动的快速处理、基于任务分解产品驱动的快速处理,以及基于图形处理器(graphic processing unit, GPU)加速平台的并行处理,研制了 3 种大容量 SAR 快速处理技术,计算效率提高了 8 倍;基于 GPU 的大幅面 SAR 影像的核外并行处理方法,充分利用 GPU 计算资源强大及每个像素处理步骤一致,具有高度并发性的特点,通过分块数据交换策略实现了大幅面 SAR 影像的快速处理,取得了 20~40 倍的加速比^[48]。SARplore 高性能处理解译系统功能图如图 6 所示。

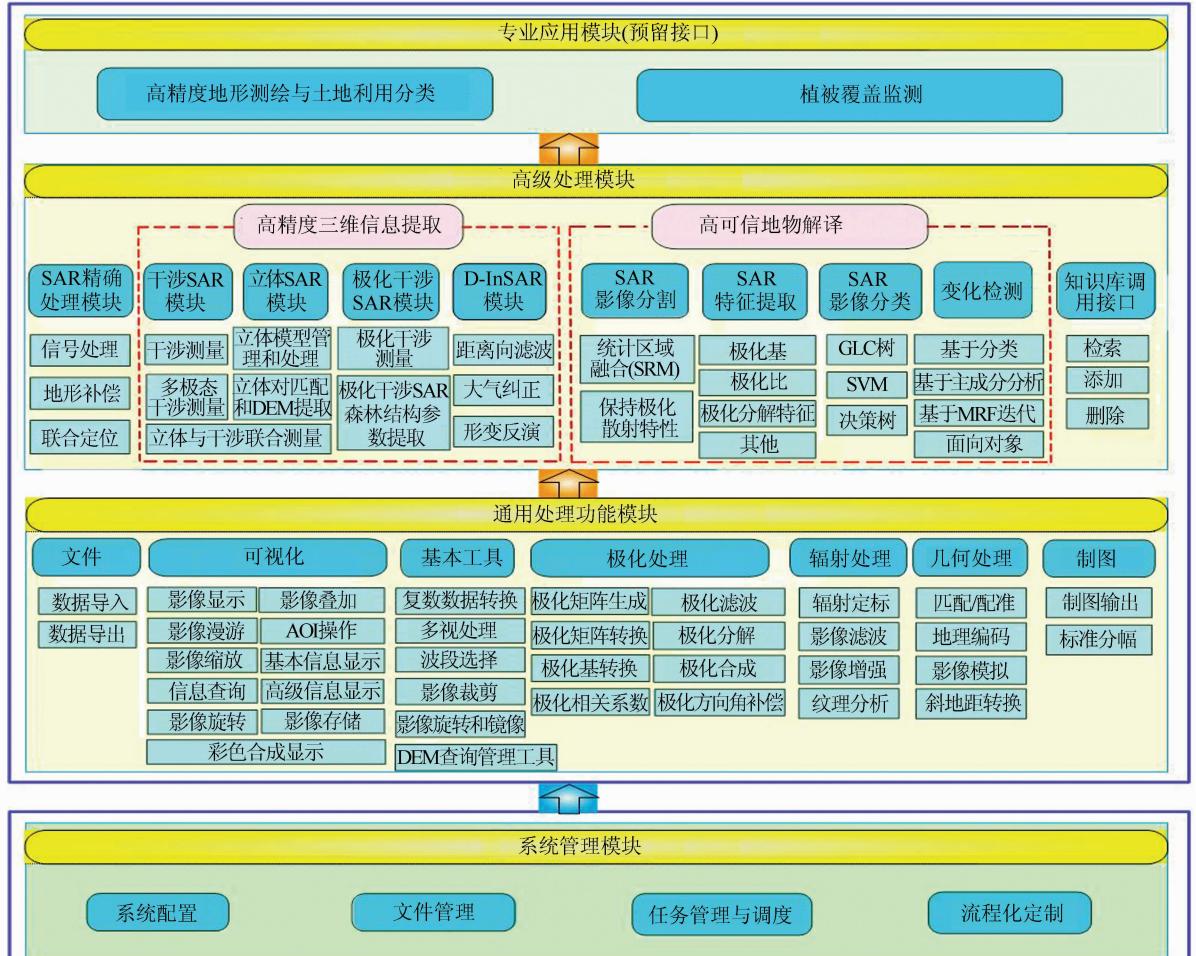


图 6 SAR 影像高性能处理解译系统功能图

Fig. 6 SAR Image High Performance Processing Interpretation System Function Chart

2.2 行业应用软件系统

针对具体应用,开发了两个行业应用软件系统,即高精度地形测绘和土地利用分类应用系统 TerraMapper 和 SAR 植被覆盖监测应用系统 VegMapper。利用 TerraMapper 系统,在地形测绘与土地利用分类应用示范区制作了 1:5 000、1:10 000、1:50 000 等 3 种比例尺 DEM、数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)、数字线划地图(digital line graphic, DLG)以及土地

利用专题产品;在像元分辨率优于 0.5 m、1 m、2.5 m 时,产品几何精度分别满足 1:5 000、1:10 000、1:50 000 地形测图精度要求^[14]。利用 VegMapper 系统,在植被覆盖监测应用示范区制作了满足 1:5 000、1:10 000、1:50 000 3 种比例尺的陆地覆盖森林植被类型分布图、森林地上生物量分布图^[29,47]。

通过对不同控制点布设方案、平差方案以及不同影像组合定位精度对比实验分析的基础上,

制定了航空航天 SAR 影像联合定位的技术规范和技术流程以及 1:5 000、1:10 000 地形图 In-SAR 航空摄影测量技术规定^[14]。为了支持 Veg-Mapper 系统、TerraMapper 系统以及 SARplore 的高效使用,首次在国内构建了星-机-地一体化遥感综合实验区数据库,包括 10 000 km² 的机载 SAR 数据和星载 SAR 数据,四川若尔盖实验区、内蒙古大兴安岭实验区的激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)、光学电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)、气象水文观测数据、解译样本和林地的样例数据等,实现各种数据库的数据共享。

2.3 高可信解译知识库

针对当前 SAR 数据解译中存在的效率低、精度差、人工干预程度大等困难,建立了国内首个民用领域包括影像库、模型库、后向散射特征库和知识规则的 SAR 知识库,为高可信度的 SAR 影像解译提供了可靠支撑^[49]。

基于微波观测与典型地物的相互作用机理,研究典型目标的介电模型和微波散射模型,建立了典型地物散射模型库,包括 6 种地类(土壤、林地、水稻、玉米、积雪和小麦)的散射模型和 3 种类别(土壤、植被和积雪)介电常数模型;基于散射计平台实验观测,制定了典型地物类别后向散射特性测量规范,并结合国内外已有观测资料,建立了典型目标后向散射特性数据库,已获得后向散射特性数据超过 15 000 条;面向 10 种不同地物类别(裸地、居民地、果园、小麦、水稻、玉米、针叶林、阔叶林、灌木林、积雪),基于地物目标多时相等多种参数特性,建立反映典型地物目标特性的航空航天 SAR 影像库。综合以上工作,建立散射模型库、后向散射特性数据库和典型地物 SAR 影像库,形成了综合知识规则和参数选择工具,并基于今后的工作需要,所有数据可更新、扩展^[34,50-52]。此外,提供了开放式的知识规则导入接口,以便用户可以更好地完善知识规则与参数选择模块。

3 综合实验及应用情况

3.1 X 波段极化干涉 SAR 数据获取系统

本文首次构建了 X 波段双天线极化干涉 SAR 获取技术及系统,具备高低空快速数据获取能力,可获取 0.3~2.5 m X 波段全极化干涉数据。XSAR 传感器子系统是利用电磁波的干涉原理,采用双天线结构进行载波相位测量,从而获得 DEM 数据的一种高精度主动探测装置,原理如图

7 所示。其主要功能是基于 X 波段双天线干涉原理来获取 HH、HV、VH、VV 4 种极化模式下的 SAR 原始数据及辅助数据。

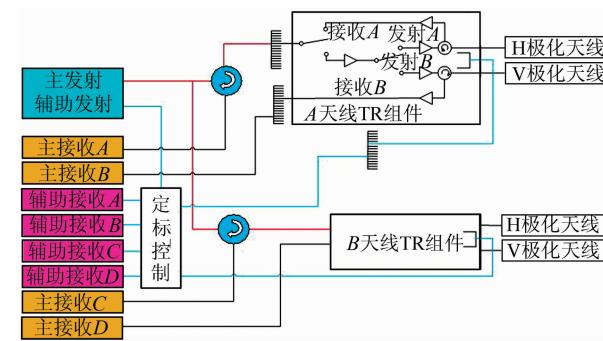


图 7 XSAR 传感器部件的工作原理

Fig. 7 Principle of XSAR Sensor Components Work

XSAR 主要参数为:中心频率 9.6 GHz,基线长度 2.2 m,雷达视角可安装视角 40°/45°/50°,工作模式包括线性调频、单发双收、乒乓、全极化、干涉和极化干涉,分辨率 0.29 m/0.60 m/1.27 m,测绘带宽 2.0 km/5.2 km/10.4 km。

针对国产 SAR 几何精度低、辐射质量差等问题,开展机载 SAR 几何定标、SAR 辐射定标、极化定标、干涉基线定标技术,改善了国产机载 SAR 几何精度和辐射质量。针对 SAR 影像静态误差(方位向开始时间、脉冲重复频率、距离向起点时间和距离间隔时间等)和动态误差(轨道误差、距离测量误差)特性,构建了高精度几何定标模型,通过角反射器像点高精度提取算法,实现 SAR 高精度几何定标^[22,52-54]。机载 SAR 数据获取系统能够获取高质量机载极化干涉 SAR 数据。依靠该系统可使我国 SAR 测图比例尺从 1:10 000 提升至 1:5 000。

3.2 综合实验与应用

本文选择典型综合示范区域开展星空地综合实地验证,获取综合实验区航空、航天 SAR 数据,对提出的模型、方法和系统进行精度、性能等方面验证,开展了高精度地形测绘、土地利用与植被覆盖信息提取应用示范。针对地形测绘、土地利用分类和植被覆盖监测应用,开发了相应的行业应用系统,形成了应用体系,促进了行业应用。

为了验证算法的有效性和可靠性,构建了星-机-地一体化遥感综合实验区,是国内首个星-机-地一体化遥感综合实验区数据库,在下列领域得到较好的推广和应用。

1) 教育、科研和生产领域

SAR 影像高性能处理解译系统已经在部分政府部门及公司投入 SAR 测绘生产,同时捐赠共计 150 余套系统给部分高校并共享了数据,用于

开展科研教学。在四川若尔盖地区1:10 000测图中成功应用该系统,完成了数据获取、图像处理、产品生产等一系列工作任务;在航天科技集团完成了11万km²基准图的制备等一系列推广和应用的工作;在山东省黄河三角洲地区完成了6.3万km²地表形变监测任务。

2) 国防领域

国防科学技术大学使用了星-机-地一体化遥感综合实验数据库中干涉SAR和全极化(HH、HV、VH和VV)SAR数据,并为国防项目提供了一个架次共20个航带的干涉SAR和全极化SAR数据。本项目为信息工程大学提供了X波段极化干涉数据和P波段极化数据,信息工程大学利用该数据开展了道路、水系、植被、建筑物等重要地物要素提取,地表覆盖图制作等实验,取得了良好的成果。

3) 重大国家工程领域

SAR影像高性能处理解译系统可同时获取0.3~2.5mX波段全极化干涉数据,成功破解了长期以来我国大范围常年云雾、冰雪覆盖区域地理信息难以获取的难题。在四川省地理国情监测等国家项目中得到成功应用,为在全国范围内开展全天时、全天候机载SAR监测积累经验提供技术指导。利用机载SAR这一高新技术手段,可为监测实施提供新技术支撑和有力的保障。

4) 应急测绘领域

作为应急监测不可或缺甚至是某些环境下唯一的遥感监测可用技术,SARplore在应急监测数据获取和数据处理中能够担任重要角色,发挥其独特的作用,服务于2017—2018年国家应急测绘保障建设。

4 分析与结论

4.1 存在的问题和对策

本文通过对SAR数据的精确处理,运用SAR干涉、极化等理论和方法,构建地物散射模型与知识库,实现面向对象的高可信SAR解译与处理,并将相应的成果在测绘、林业等领域实现示范和应用,取得了良好的效果。随着人工智能、计算机、通信等技术的发展,通过人工智能实现SAR影像的解译将是今后SAR解译发展的主方向;各类SAR数据的涌现和SAR应用的普及对SAR云服务平台提出了要求。具体技术上,也存在一些不足和有待进一步深入研究的问题。

1) 精确处理

如何针对不同模式、不同传感器获取的干涉数据生成的干涉图,根据相干性、条纹密度等信息进行智能、可靠的相位滤波处理是需要进一步探讨的问题。对新型InSAR相位滤波算法如小波滤波方法、马尔科夫随机场模型、高阶奇异值分解等还需进一步的研究。在植被区域、城市区域等存在大量干涉条纹不连续的现象,针对性的滤波算法是今后需要考虑的一个问题。多级配准算法,针对不同畸变大小的影像采用差别化的分级配准策略,以提高不同传感器、不同区域、不同拍摄时间SAR影像的配准效率是待解决的问题。为消除宽方位角模式下潜在的非各向同性散射现象引入的极化方位角估计误差对虚假的地形变化及后续的地形校正处理精度的影响,可从建立可信度更高的SAR影像幅度相位地形补偿处理流程入手。多源影像定位效率及影像定位定向自动化智能化的最终实现,对不同传感器和影像厂商提供统一的数据标准接口、规范化的影像产品也提出了要求。

2) 三维信息提取

如何开展不同卫星、不同模式、不同轨道方向获取的SAR影像间的干涉研究,基于极化干涉合成孔径雷达(polarimetric InSAR,PolInSAR)、基线干涉合成孔径雷达(base line InSAR,MB-InSAR)发展森林树高、蓄积量/生物量等垂直结构参数的反演模型,融合多基线InSAR、SAR立体测量等多种技术提取地形复杂区域的高可信DEM,利用多星协同的模式进行大区域地表形变高精度反演等是待研究的重点问题。4维/5维层析技术已经被用于城市建筑物均匀、非均匀形变监测和叠掩区域散射体分离^[55-57],但在地形比较复杂的森林区域,森林垂直结构反演方面还很少涉及。森林作为一个复杂的综合体,不仅水平结构复杂,垂直结构也是复杂多样。尤其是用SAR技术来监测森林垂直结构信息时,地形影响在目前的技术条件下还难以解决。4维层析技术能够解决叠掩区域散射体分离问题,为散射机制分离提供新的技术支撑,为复杂地形森林垂直结构参数反演及林下地形精确提取提供技术手段。当地形条件复杂时,分析SAR层析成像(tomographic SAR,TomoSAR)与差分层析在散射机制分离及森林垂直结构参数提取方面的差异,也成为将来森林垂直结构信息提取领域的一个重要研究方向^[58]。

3) 解译知识库

由于SAR成像机理的影响,导致了不同观测

入射角度、目标方位角度获取的 SAR 数据可能会呈现不同的后向散射特性,急需建立多种关键传感器参数完备的典型地物目标解译训练集。当前,各种平台 SAR 在定量化应用中发展的模型算法缺乏有效验证手段,有必要研究建立支持不同分辨率、波段、角度和极化等载荷的机载 SAR 验证平台系统,重点研究验证 SAR 尺度转换方法、不同目标观测视角依赖性以及应用模型的波段和极化适应性等关键技术,制定一套完善的、以 SAR 应用方法验证为目标的模型框架和技术手段。知识获取是知识辅助 SAR 影像目标识别解译中一个必须考虑的问题。对于复杂影像解译问题,从领域专家中得到的知识仍然有限,需要补充机器学习的方式来完成知识的自动获取。如何在丰富积累的 SAR 影像目标和背景环境数据的基础上,充分地挖掘其与目标属性之间的内在联系和规律,充分地利用多传感器源的信息,在知识的引导下合理地运用数据层、特征层、属性层等多层次的推理提高目标的识别能力,还需要进一步开展研究。

4) 高可信解译

在面向对象高可信 SAR 解译方面,特定应用下感兴趣的对象与 SAR 传感器解译这些对象的能力可能并不一致。极端的情况下,除非待区分的对象对于 SAR 传感器提供的参数能够测量出差别,否则就无法区分。另一种极端的情况是,微波与自然媒质相互作用的复杂特性可能导致单一对象的地物包含不同特性的子对象。这种情况下就很难找出满足应用需求的分类器。因此,任何形式的通用分类/解译方法不仅需要知道测量哪些参数,而且需要正确处理可能影响测量的物理因素。特征的选取是由数据的统计特性决定的,因此,全面评估分辨率、频率、极化、入射角和时间对 SAR 分类的影响,仅由现有的数据还不太可能实现。所以,研究建模与仿真以及地面实验设备的结果,对于提出合理的分类依据和准则是必须的。在基于知识的方法中,基于现有的经验数据,同时结合物理推理确定分类准则,可以得到不同覆盖类型的类别特征。这类方法强调 SAR 数据的物理内涵,必须考虑特定的条件,寻求鲁棒的、适用性广泛的分类方法是下一步的研究重点。

4.2 结语

SAR 技术是国家和区域减灾防灾与抗灾救灾中不可缺少的重要科技手段,在恶劣气象条件下,甚至是唯一的手段。我国目前所面临的国土资源过度消耗、水土流失、荒漠化、生态环境恶化、

人口快速膨胀、粮食相对匮乏等社会问题亟待治理和解决,为政府在解决这些问题的过程中提供及时、真实、有效的决策支持信息,是包括 SAR 技术在内的遥感技术的主要优势之一。迈出国门、走向世界、成为国际大家庭的大国和强国,是我国全球战略的重要内容,需要适时掌握全球热点地区与社会动荡地区、事关人类生存与发展的重要问题、全球能源、资源的动态信息。通过高性能、高可信的 SAR 地物解译系统,配合 SAR 对地观测系统,为我国准确了解国际动态形势,监测与预测全球能源、资源动态,实施我国全球经济战略提供了强有力的技术支撑。加强我国 SAR 数据综合处理能力,对于增强我国空间技术的应用水平和保障国土空间权益的综合能力和空间信息产业的国际竞争实力,提高行业部门对地观测信息应用能力和水平,促进国民经济社会信息化,以及提高我国对地观测信息提取与应用的能力,为国家全球战略提供技术支撑,促进社会经济可持续发展具有重要意义,值得人们继续为之努力。

参 考 文 献

- [1] Zhang Jixian, Huang Guoman, Liu Jiping. SAR Remote Sensing Monitoring of the Yushu Earthquake Disaster Situation and the Information Service System[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(5): 1 038-1 052
- [2] Zhu Bingqi, Wang Kaizhi, Liu Xingzhao, et al. Optimum Waveform Design and Simulation with Energy Constraint for Elastic Targets [C]. IEEE IGARSS, Melbourne, Australia, 2013
- [3] Zhu Chuanguang, Zhang Jixian, Deng Kazhong, et al. Multi-source Image Monitoring Three-Dimensional Displacement Field of Mining Buildings[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(4): 701-706, 725(祝传广, 张继贤, 邓喀中, 等. 多源影像监测矿区建筑物三维位移场[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(4): 701-706, 725)
- [4] Zhang Xiaojie, Zeng Qiming, Jiao Jian, et al. High Quality DEM Generation by Using Kalman Filtering Fusion of Multi-frequency InSAR Results [C]. Dragon 3 Mid-term Results Symposium, Beijing, China, 2014
- [5] Lang Fengkai, Yang Jie, Li Deren. Adaptive Enhanced Lee Filtering Algorithm for Polarimetric SAR Images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(7): 690-697(郎丰铠, 杨杰, 李德仁. 极化 SAR 图像自适应增强 Lee 滤波算法[J].

- 测绘学报, 2014, 43(7): 690-697)
- [6] Hua Fenfen, Zhang Jixian, Huang Guoman, et al. A Registration Method for Airborne Heavy Rail Interference Synthetic Aperture Radar Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(3): 298-305 (花奋奋, 张继贤, 黄国满, 等. 机载重轨干涉合成孔径雷达数据的一种配准方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(3): 298-305)
- [7] Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Deng Kazhong, et al. Radar Image Geometric Conformation Distance-Coplanar Equation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 38-49 (程春泉, 张继贤, 邓喀中, 等. 雷达影像几何构像距离-共面方程[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 38-49)
- [8] Cheng Chunquan, Zhang Jixian. Side-View Radar Image Distance-Coplanar Model Rigorous Positioning [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(5): 881-894 (程春泉, 张继贤. 侧视雷达影像距离-共面模型严密定位[J]. 遥感学报, 2012, 16(5): 881-894)
- [9] Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman, et al. SAR Image Distance-Coplanar Equation and Its Location Considering Doppler Parameters [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(6): 1 444-1 458 (程春泉, 张继贤, 黄国满, 等. 考虑多普勒参数的 SAR 影像距离-共面方程及其定位[J]. 遥感学报, 2013, 17(6): 1 444-1 458)
- [10] Cheng Chunquan, Huang Guoman, Yang Jie. POS and DEM Auxiliary Airborne SAR Doppler Parameter Estimation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(5): 510-517 (程春泉, 黄国满, 杨杰. POS 与 DEM 辅助机载 SAR 多普勒参数估计[J]. 测绘学报, 2015, 44(5): 510-517)
- [11] Huang Guoman, Yang Shucheng, Wang Ningna, et al. Airborne InSAR Regional Network Joint Geocoding Method Under Sparse Control [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(3): 397-403 (黄国满, 杨书成, 王宁娜, 等. 稀少控制下机载 InSAR 区域网联合地理编码方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 397-403)
- [12] Zhang Jixian, Yan Qin, Zhang Li, et al. Principles and Methods of Mapping Maps in Difficult Terrain in Western China [M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2013 (张继贤, 燕琴, 张力, 等. 西部地形困难区域测图的原理与方法 [M]. 北京: 测绘出版社, 2013)
- [13] Zhang Jixian, Zhao Zheng, Huang Guoman. Topographic Mapping Experiment with Chinese Airborne SARMapper [J]. *Earth Observing Systems XVI*, 2011, doi:10.1117/12.899126
- [14] Fu Sitao, Li Zhen, Tian Bangsen. Topographic Correction of Fully Polarized Synthetic Aperture Radar Image and Its Application in Snow Ice Mapping [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(1): 150-157 (符思涛, 李震, 田帮森. 全极化合成孔径雷达影像地形纠正及其在雪冰制图中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(1): 150-157)
- [15] Liang Cunren, Zeng Qiming, Jiao Jian. An Assessment of ScanSAR Interferometric Processing Using Full-Aperture Approach [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1 559-1 563
- [16] Zhang Jixian, Yang Shucheng, Zhao Zheng, et al. SAR Mapping Technology and Its Application in Difficulty Terrain Area [C]. IEEE IGARSS, Hawaii, USA, 2010
- [17] Wang Yachao, Zhang Jixian, Deng Kazhong, et al. Automatic Matching Method for Stereo SAR Image Based on Geometric Constraint [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(1): 164-169 (王亚超, 张继贤, 邓喀中, 等. 基于几何约束的立体 SAR 影像自动匹配方法[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1): 164-169)
- [18] Yang Shucheng, Huang Guoman, Zhao Zheng, et al. Extraction of Topographic Map Elements with SAR Stereoscopic Measurement [C]. International Symposium on Image and Data Fusion, Tengchong, China, 2011
- [19] Lu Lijun, Zhang Jixian, Wang Teng. A Complex Terrain Mapping Method Based on High Resolution Radar Image and External DEM Assistance [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(4): 459-463 (卢丽君, 张继贤, 王腾. 一种基于高分辨率雷达影像以及外部 DEM 辅助的复杂地形制图方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 459-463)
- [20] Yang Shucheng, Huang Guoman, Zhao Zheng. Method for Manufacturing SAR Stereo Model Using Image Simulation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(11): 1 325-1 328 (杨书成, 黄国满, 赵争. 一种利用影像模拟的 SAR 立体模型制作方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(11): 1 325-1 328)
- [21] Wang Mengmeng, Huang Guoman, Luo Xin, et al. Airborne Interferometric SAR Calibration Algorithm Based on Point Phase Correction [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(4): 97-101 (王萌萌, 黄国满, 罗新, 等. 基于点相位改正的机载干涉 SAR 定标算法[J]. 测绘科学, 2014, 39(4): 97-101)
- [22] Liang Cunren, Zeng Qiming, Jiao Jian, et al. On the Phase Compensation of Short ScanSAR Burst Focused by Long Matched Filter for Interferometric Processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 1 299-1 310

- [23] Zhang Xiaojie, Zeng Qiming, Jiao Jian, et al. Fusion of Multi-frequency Interferometric Results by Using Kalman Filter to Generate High Quality DEM [C]. IEEE IGARSS, Quebec, Canada, 2014
- [24] Li Wenmei, Chen Erxue, Li Zengyuan, et al. Application Performance Analysis of Spectrum Analysis Technology in Extracting Vertical Structure Information of SAR Forest [J]. *Chinese Journal of Electronic*, 2015, 43 (4) : 694-699 (李文梅, 陈尔学, 李增元, 等. 频谱分析技术在层析 SAR 森林垂直结构信息提取中的应用性能分析 [J]. 电子学报, 2015, 43 (4) : 694-699)
- [25] Li Zhen, Guo Ming, Wang Zhongqiong, et al. Forest-Height Inversion Using Repeat-Pass Spaceborne PolinSAR Data [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(6): 1 314-1 324
- [26] Li Zhen, Guo Ming, Wang Zhongqiong, et al. In-situ Heavy Rail Polarization Interference SAR Inversion of Forest Vegetation Height [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(4): 680-692 (李震, 郭明, 汪仲琼, 等. 星载重轨极化干涉 SAR 反演森林植被高度 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 680-692)
- [27] Zhu Teng, Yu Jie, Li Xiaojian, et al. Span-Pauli High Resolution SAR Image Classification Method Based on Superpixel [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, (7): 77-81 (朱腾, 余洁, 李小娟, 等. 基于超像素与 Span-Pauli 分解的 SAR 影像分类 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, (7): 77-81)
- [28] Li W, Chen E, Li Z, et al. Forest Aboveground Biomass Estimation Using Polarization Coherence Tomography and PolSAR Segmentation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(2): 530-550
- [29] Zou Pengfei, Li Zhen, Tian Bangsen. High Resolution Polarimetric SAR Image Level Set Segmentation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19 (12): 1 829-1 835 (邹鹏飞, 李震, 田帮森. 高分辨率极化 SAR 图像水平集分割 [J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(12): 1 829-1 835)
- [30] Liu Zhenyu, Yu Jie, Xie Donghai, et al. PolSAR Image Segmentation Using Regional Statistical Features [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(5): 789-797 (刘振宇, 余洁, 谢东海, 等. 应用区域统计特征的 PolSAR 影像分割 [J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(5): 789-797)
- [31] Lang Fengkai, Yang Jie, Li Deren, et al. Polarimetric SAR Image Segmentation Using Statistical Region Merging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 11(2): 509-513
- [32] Lang Fengkai, Yang Jie, Li Deren, et al. Mean-Shift-Based Speckle Filtering of Polarimetric SAR Data [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4 440-4 454
- [33] Xu Juan, Li Zhen, Tian Bangsen. Land Cover Classification of Quad-Polarimetric RADARSAT-2 SAR Image Based on Modified Subspace Method [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2014, 40(4): 271-277
- [34] Liu Li, Shao Yun, Zhang Fengli, et al. The Discrepancies Caused by Different Cluster Merging Algorithms in Fully Polarimetric SAR Classification [C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012
- [35] Liu Li, Yu Jie, Yan Qin, et al. Application of SSVM Algorithm Introducing Texture Features in Polarimetric SAR Image Classification [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(8): 7-10 (刘利, 余洁, 燕琴, 等. 引入纹理特征的 SSVM 算法在极化 SAR 影像分类中的应用 [J]. 测绘通报, 2012 (8) : 7-10)
- [36] Zhang Jixian, Lin Layue, Zhang Yonghong, et al. Object-Oriented Decision Tree PolSAR Image Classification Based on Target Decomposition [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2013, 32(5): 642-647 (张继超, 蔺腊月, 张永红, 等. 基于目标分解的面向对象决策树 PolSAR 影像分类 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2013, 32(5): 642-647)
- [37] Yu Jie, Liu Zhenyu, Yan Qin, et al. Semi-automatic Object-Oriented SAR Image Classification Under Multi-scale [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(3): 253-256 (余洁, 刘振宇, 燕琴, 等. 多尺度下的半自动面向对象 SAR 影像分类 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38 (3): 253-256)
- [38] Wang Xinshuang, Chen Erxue, Li Zengyuan, et al. Multi-temporal Dual-Polarization SAR Imagery Forest Land Classification Method [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(3): 83-91 (王馨爽, 陈尔学, 李增元, 等. 多时相双极化 SAR 影像林地类型分类方法 [J]. 林业科学, 2014, 50(3): 83-91)
- [39] Fu Xiyu, Zhang Fengli, Wang Guojun, et al. Automatic Road Extraction of High Resolution SAR Images Based on Fuzzy Connectivity [J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(2): 523-527 (符喜优, 张风丽, 王国军, 等. 基于模糊连接度的高分辨率 SAR 图像道路自动提取 [J]. 计算机应用, 2015, 35(2): 523-527)
- [40] Wu Hong'an, Zhang Yonghong, Guo Ming, et al. Monitoring Ground Deformation in Urumqi Using

- Small Baseline Time Series InSAR Technique[C]. SPIE 8th International Symposium on MIPPR, Enshi, China, 2013
- [41] Chen Quan, Zou Pengfei, Li Zhen, et al. Change Detection of Polarimetric SAR Images Based on the KummerU Distribution[OL]. <https://doi.org/10.1117/12.2069198>, 2014
- [42] Zhao Lingli, Yang Jie, Li Pingxiang, et al. Seasonal Inundation Monitoring and Vegetation Pattern Mapping of the Erguna Floodplain by Means of RADA-RSAT-2 Fully Polarimetric[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 426-440
- [43] Wu Tao, Chen Xi, Niu Lei, et al. Recent Advances in Unsupervised SAR Image Change Detection[J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28 (1): 110-118 (吴涛, 陈曦, 牛蕾, 等. 非监督 SAR 图像变化检测研究最新进展[J]. 遥感信息, 2013, 28(1): 110-118)
- [44] Liu Zhang, Wang Tang, Zhang Wu, et al. Polarimetric Aperture Radar Change Detection for Specific Landcover Types [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2015, 8(4): 334-344
- [45] Breiman L. Random Forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32
- [46] Lu Lijun, Zhang Jixian, Hua Fenfen, et al. Multi-mode PolInSAR Experiments Using an Airborne X-band SAR System in China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(5): 1 625-1 639
- [47] Zhang Jixian, Wang Zhang, Huang Guoman, et al. CASMSAR: An Integrated Airborne SAR Mapping System[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2012, 78: 1 110-1 114
- [48] Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, et al. GPU-Supported SAR Image Geometry Correction for Massively Parallel Processing[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(3): 374-385 (杨景辉, 程春泉, 张继贤, 等. GPU 支持的 SAR 影像几何校正大规模并行处理[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 374-385)
- [49] Liu Liming, Yu Jie, Wang Yanbing, et al. A Polarimetric SAR Image Classification Method Using Substance Scattering Characteristics for Subsequent Class Adjustment[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(1): 151-156 (刘利敏, 余洁, 王彦兵, 等. 一种利用地物散射特性进行后续类别调整的极化 SAR 影像分类方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 151-156)
- [50] Sun Qikai, Zhang Fengli, Shao Yun, et al. S-band Backscattering Analysis of Wheat Using Tower-Based Scatterometer[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012
- [51] Fu Sitao, Li Zhen, Tian Bangsen, et al. Fast Glacier Volume Change Detection Based on Least Squares 3D Surface Matching of DEM[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, 17(1): 12 134-12 139
- [52] Tian Bangsen, Li Zhen, Xu Juan, et al. Mapping Mountain Meadow with High Resolution and Polarimetric SAR Data [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, 17(1): 12 076-12 081
- [53] Wang Mengmeng, Huang Guomang, Hua Fenfen, et al. Airborne Dual Antenna InSAR Joint Calibration Algorithm[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)
- [54] Yun Ye, Zeng Qiming, Jiao Jian, et al. Airborne Dual Antenna InSAR Joint Calibration Algorithm [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(1): 74-82 (云烨, 曾琪明, 焦健, 等. 基于参考 DEM 的机载 InSAR 定标方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(1): 74-82)
- [55] Lombardini F. Differential Tomography: A New Framework for SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43: 37-44
- [56] Stoica P, Moses R. Spectral Analysis of Signals [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2005: 263-285
- [57] Zhu X, Bamler R. Super-Resolution for 4D SAR Tomography via Compressive Sensing[C]. The 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Aachen, Germany, 2010
- [58] Li Wenmei, Li Zengyuan, Chen Erxue, et al. Present Status and Development Trend of Inversion of Forest Vertical Structure Parameters by Chromatographic SAR[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(4): 741-751 (李文梅, 李增元, 陈尔学, 等. 层析 SAR 反演森林垂直结构参数现状及发展趋势[J]. 遥感学报, 2014, 18 (4): 741-751)

Object-Oriented Accurate Processing for SAR Images

ZHANG Jixian^{1,2} HUANG Guoman² CHENG Chunquan²

1 National Quality Inspection and Testing Center for Surveying and Mapping Products,
Beijing 100830, China

2 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: Aiming at the difficulty of synthetic aperture radar (SAR) images processing and interpreting in topography, forest vegetation identification, this paper employs the work and progress made by the research group in recent years. Using multi-angle, multi-band, multi-polarization, polarimetric interferometric, and other multi-mode aviation, aerospace SAR data, the terrain features library based on the scattering mechanism are established, and the terrain radiation correction, polarization interference processing, stereoscopic measurement and knowledge based interpretation model is constructed. The high resolution airborne polarization interference SAR data acquisition system and the SAR image high performance interpretation software system are developed. The principle, technology and method of high confidence processing and interpretation of SAR images with high precision, strong reliability and rich recognition type are realized. At the same time, this paper introduces the application of research results in the surveying and mapping, forestry and other industries, and discusses the problems and solutions in the research.

Key words: SAR; processing system; high confidence; accurate processing; SAR image interpretation

First author: ZHANG Jixian, PhD, professor, majors in photogrammetry and remote sensing, geographic information system and geographical situation monitoring. E-mail: zhangjx@casm.edu.cn

Foundation support: The National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China, No. 2011AA120400.