

引文格式: WANG Xinshuang, CHEN Erxue, LI Zengyuan, et al. Multi-temporal and Dual-polarization Interferometric SAR for Land Cover Type Classification[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(5): 533-540. (王馨爽, 陈尔学, 李增元, 等. 多时相双极化合成孔径雷达干涉测量土地覆盖分类方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(5): 533-540.) DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130244

多时相双极化合成孔径雷达干涉测量土地覆盖分类方法

王馨爽^{1,2}, 陈尔学¹, 李增元¹, 姚顽强³, 赵磊¹

1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 国家测绘地理信息局陕西基础地理信息中心, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054

Multi-temporal and Dual-polarization Interferometric SAR for Land Cover Type Classification

WANG Xinshuang^{1,2}, CHEN Erxue¹, LI Zengyuan¹, YAO Wanqiang³, ZHAO Lei¹

1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, CAF, Beijing 100091, China; 2. Shaanxi Geomatics Center of NASG, Xi'an 710054, China; 3. Department of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: In order to study SAR land cover classification method, this paper uses the multi-dimensional combination of temporal, polarization and InSAR data. The area covered by space borne data of ALOS PALSAR in Xunke County, Heilongjiang Province was chosen as test site. A land cover classification technique of SVM based on multi-temporal, multi-polarization and InSAR data had been proposed, using the sensitivity to land cover type of multi-temporal, multi-polarization SAR data and InSAR measurements, and combining time series characteristic of backscatter coefficient and correlation coefficient to identify ground objects. The results showed the problem of confusion between forest land and urban construction land can be nicely solved, using the correlation coefficient between HH and HV, and also combining the selected temporal, polarization and InSAR characteristics. The land cover classification result with higher accuracy is gotten using the classification algorithm proposed in this paper.

Key words: multi-temporal; polarization; InSAR; land cover classification

Foundation support: The National High-tech Research and Development Program of China(863 Program)(Nos. 2011AA120405; 2011AA120404)

摘要: 综合采用时相、极化和干涉3种维度的SAR数据进行土地覆盖分类。以黑龙江省逊克县多时相ALOS PALSAR数据覆盖区为研究区,利用不同时相极化SAR、干涉SAR信号对地物特征的敏感性,结合后向散射强度和干涉相干的时变特征进行地物解译,发展了基于多时相、多极化、干涉SAR数据的SVM土地覆盖分类方法。研究表明,引入双极化SAR中不同极化(HH-HV)间的相干系数,并结合所选择的时相特征、极化特征以及干涉相干特征进行分类,可解决双极化SAR影像中林地与城市及建设用地的混分问题,得到更高精度的土地覆盖分类结果。

关键词: 多时相; 极化; 干涉合成孔径雷达; 土地覆盖分类

中图分类号: P227

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2015)05-0533-08

基金项目: 国家863计划(2011AA120405; 2011AA120404)

1 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)以其全天时、全天候、强穿透的成像能力,已经成为光学遥感的有益补充,有时甚至是数据获取的唯一手段^[1]。目前,利用极化SAR(polarimetric SAR,

PolSAR)数据进行土地覆盖分类在国际遥感领域受到高度重视,已成为SAR的主要研究方向之一,也取得了较好的分类精度^[2-8]。然而,由于相干斑噪声和地形等方面的影响,单维度SAR影像识别地表覆盖类型效果并不理想,尤其是散射机制类似的森林和城市区域^[9]。随着新型SAR传感器的相

继升空,微波遥感数据的获取方式已由单波段、单极化、单角度等发展到多频率、多极化、多角度、多时相等综合获取方式,这就为 SAR 土地覆盖分类的研究和应用提供了前所未有的潜力和机遇,也给数据处理和应用方法提出了挑战。

目前,支持向量机(support vector machine, SVM)是一种较好的监督分类算法,可有效地避免经典分类方法中维数灾难、过学习、局部极小等问题,在 SAR 影像分类中也得到了广泛应用^[10-12]。利用单时相 PolSAR、干涉 SAR(interferometric SAR, InSAR)影像进行地物分类在国内外也有了一定的研究成果,但是,基于多时相 InSAR 数据的分类研究还比较少见。文献^[13]采用 InSAR 技术提取出地物参数,并使用重轨 InSAR 及多时相 InSAR 数据进行地表覆盖类型的区分,取得了较好的分类结果。文献^[14]采用多时相的 RADARSAT-2 极化 SAR 数据,发展了一种基于规则和面向对象的 SVM 分类方法,结果表明综合采用不同时相极化总功率对于城市土地覆盖制图有很好的效果。文献^[15]使用 Envisat ASAR 多时相单极化数据对念青唐古拉山脉西段的地表覆盖进行分类研究,结果表明各种地物雷达后向散射系数具有明显的时相差异,可有效区分草原、草甸、裸岩、水体及终年积雪。文献^[16]利用 ERS-1/2 获取的多时相干涉数据可识别出水体、林地、旱地等不同的土地类型,初步探讨了时间序列上地表特征的变化情况。

以上研究已经较好地时将时相及干涉相干特征应用到土地覆盖分类中,但尚未有研究综合考虑地物的极化信息以及不同时相、极化之间相干性。因此,本文从时相、极化、干涉 3 个维度出发,并引入不同极化之间的相干系数,结合模式识别中经典的 SVM 方法,提出一种基于多时相、多极化、干涉 SAR 数据的 SVM 土地覆盖分类方法。

2 研究区与数据源

2.1 研究区

研究区位于黑龙江省小兴安岭中段北麓的逊克县境内,该县与俄罗斯阿穆尔州隔江相望,地处 $127^{\circ}24'E-129^{\circ}17'E$, $47^{\circ}58'N-49^{\circ}36'N$, 面积 $17\,344\text{ km}^2$, 海拔高度为 $180\sim 560\text{ m}$, 属于寒温带大陆性季风气候。地表覆盖类型多样,包括林地、耕地、水体、城市及建设用地等,其中林地覆盖率达 64% ,由天然林和人工林组成。耕地内农作

物大多为大豆,5月20日左右播种,9月30日开始收割。大豆从播种之日起大约 18 d 开始出苗;7月22日左右 12 叶 1 心,豆苗基本成型,为初花期;8月5日开始进入终花期,豆苗开始逐渐变黄直到收割。本文截取了小范围区域开展土地覆盖分类研究工作,如图 1 方框所示。

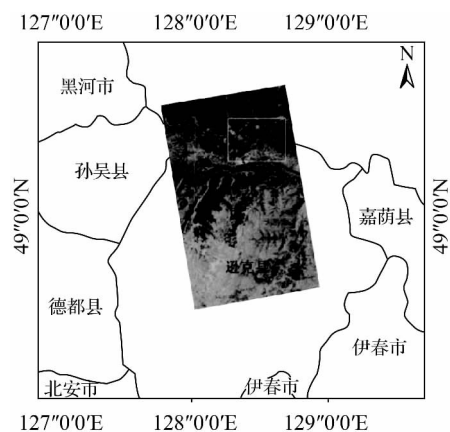


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 The geographic location of test site

2.2 数据源

目前获取一个时间序列的机载 SAR 数据成本太高,比较可行的方案是采用星载多时相 SAR 数据进行研究。由于 L 波段数据多极化的观测能力比较适合生态环境监测相关领域的遥感应用。因此,本研究选取日本 JAXA ALOS 卫星 PALSAR 数据,卫星重访周期为 46 d。获取了逊克县 2007 年 6 月 22 日、2007 年 8 月 7 日和 2007 年 9 月 22 日 3 个时相的 PALSAR 双极化 (HH/HV) Level1.1 级产品数据,已经经过距离向和方位向压缩,方位向、距离向像元大小分别为 4.49 m 、 9.6 m ,本文进行多视化和重采样后像元大小为 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$ 。由于该数据所使用的 L 波段波长较长,时间去相干相对较轻,在植被覆盖区仍然可得到有效的 InSAR 数据。

为了更精确地获取分类所需要的训练样本及检验样本。在逊克县林业局的协助下,获取了 2003 年研究区 TM 影像土地利用分类图和 2003 年逊克县森林资源二类调查图,并于 2012 年 9 月对研究区范围内的土地类型进行了详细调查,获取了 188 个样点,同时对研究区的主要地类进行了定位和拍照,获得了可靠的地面实况数据。ALOS PALSAR 影像的获取时间为 2007 年,通过询问当地林业局,得知对于地物类型而言,2007—2012 年

基本没有变化,只是耕地中的农作物类型略有变化。因此,影像获取时间与实测数据获取时间的差别对于分类结果及精度评价影响甚微。

3 分类方法

3.1 分类系统

本研究参照文献[17],同时综合考虑极化 SAR 影像的地物识别能力以及研究区地表自然属性特征,将分类系统确定为林地、耕地、水体、城市及建设用地四大类。

3.2 数据预处理

不同时相极化 SAR 影像之间的相干系数是本文所要获取的重要参数之一。相干系数是指两幅单视复数(single look complex, SLC)影像间相关程度的高低,反映了主辅影像获取时间间隔内地物目标的变化信息,与不同地物类型、体散射模型等都有一定的关系,可进行地表覆盖分类研究,甚至开展森林植被类型的细致识别。两幅影像 s_1 和 s_2 之间的相干系数 γ 定义为^[18]

$$\gamma = \frac{\langle |s_1 s_2^*| \rangle}{\sqrt{\langle |s_1 s_1^*| \rangle \langle |s_2 s_2^*| \rangle}} \quad (1)$$

式中, $*$ 代表共轭转置。该系数反映了影像之间的相关程度,取值范围是 $[0, 1]$ 。若主辅影像接收到的雷达信号完全一致,则 γ 为最大值 1;若接收到的信号完全不一致,则 γ 为 0。

本研究采用 GAMMA 软件对 ALOS PALSAR 双极化数据进行预处理。该软件包括了整个雷达影像处理的全部功能,如从 SAR 原始信号处理到 SLC 影像、多视处理、滤波、正射校正、影像配准、DEM 提取及形变分析等。研究中主要采用地理

编码模块和干涉处理模块,进行辐射定标、多视化、相干性估计、滤波、地理编码等预处理,最终得到一个时间序列的强度影像和干涉影像。

3.3 典型地物 SAR 时变特征分析

PALSAR 影像中每一类地物的各项参数值随着时间的变化而有所改变,如农作物物候期变化、气候变化所引起的水体变化、风力条件改变及降水所引起的土壤湿度变化、地表介电常数变化等^[19]。所引起的雷达后向散射系数及干涉相干系数的变化,都可以为地物目标解译提供有效信息。因此,本研究参考森林资源二类调查及地面实测数据,对多极化、多时相影像中各个地类的 SAR 后向散射特征和干涉相干性进行细致的分析,得到后向散射系数、干涉相干系数统计信息以及两个参数的时变特征统计信息。

首先,通过选取感兴趣区域(ROI)定量的分析不同时相、极化影像中林地、耕地、水体和城市及建设用地 4 种类型的后向散射系数。为了能直观地表示 4 种类型后向散射系数的可分离性,分析了其在多通道数据中的统计直方图,如图 2 所示(见后文)。图 3 反映了 6 月、8 月及 9 月 3 个时相每类地物后向散射系数的变化信息。

基于各个地物后向散射特征的分析,可以看到,所有特征中,林地和水体都能很好地区分开来,而林地和城市及建设用地存在混淆现象,对这两种地物的区分是本文需要解决的关键问题。另外,6 月份获取的 HH 以及 HV 极化,9 月份的 HV 和 HH 极化影像是区分森林和农田的最佳特征;而 8 月份获取的 HH、HV 极化影像是区分耕地水体的最佳特征。

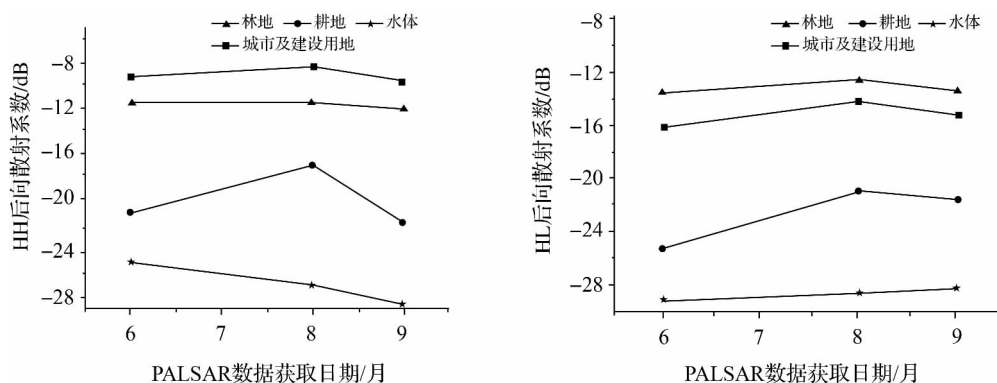


图3 PALSAR 双极化影像土地覆盖类型后向散射系数时变特征

Fig.3 Time series characteristics of multi-temporal and dual-polarization SAR image in backscatter coefficient of land cover types

另外,对两个时相的 PALSAR 影像进行干涉,可获取相干系数和相位两个重要参数。相位信息已用于 DEM 生成、植被高度反演及地表沉降等物理参数的获取研究中,对于地物解译贡献甚小,而相干系数这一重要参数已被应用于地物

特征的基础性分析中。因此,基于同样的 ROI 分析 4 种地类在不同时相的干涉相干系数,如图 4 所示(见后文)。不同极化土地覆盖类型干涉相干系数的时变特征如图 5 所示。

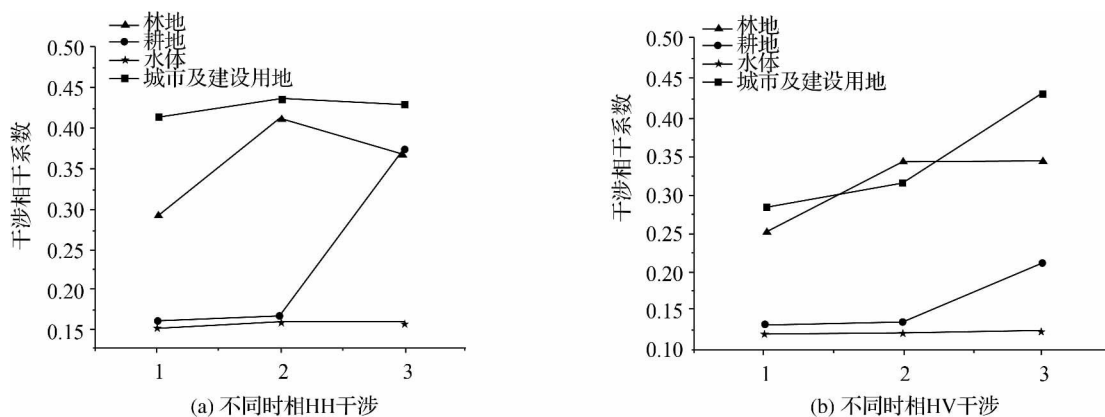


图 5 PALSAR 双极化影像土地覆盖类型干涉相干性时变特征分析

Fig.5 Time series characteristics of multi-temporal and dual-polarization SAR image in correlation coefficient of land cover type

由图 4 和图 5 可得如下结果:

(1) 林地和城市及建设用地具有较高的相干性。这是因为 L 波段雷达波可以穿透冠层,主要照射到森林树干及其下垫面,而这些物质不像树冠层容易受风等因素的影响,具有相对比较稳定的物理结构;城市及建设用地也受时间及环境因素影响较小,所以这两种地物具有相对较高的相干性。

(2) 耕地的相干性相对较小,8 月和 9 月两个月份的干涉相干性变大。耕地由于大豆的生长及农民耕作活动会引起作物及地表状况的改变,失相干较严重,由研究区中关于大豆物候期介绍可知,这在 6—8 月更为严重,而从 8 月至 9 月,大豆已经进入成熟期,没有太大的变化,因此相干系数相对其他时相最大。

(3) 水体的相干性最低。这是因为水体表面容易受风等自然因素的影响,是极其不稳定的散射体,在所有时相的干涉中几乎都没有相干性。

鉴于以上分析,地表的变化程度不同,从而引起各类地物相干性也不同,这就为地类的区分提供了有效的信息。其中,林地、耕地、水体都具有一定的可分性,2007-8-7 与 2007-9-22 HH 极化干涉相干性影像中,森林与城市及建设用地表现出了相比于强度信息更好的可分离性。因此,相比于单极化、单时相特征,综合采用多时相的双极化、

干涉信息可以更好地进行 SAR 土地覆盖解译。

3.4 基于多时相、多极化、干涉 SAR 的 SVM 分类

由典型 SAR 地物的时变特征分析结果可知,林地和城市及建设用地仍然存在较严重的混发现象。已有研究表明,不同极化之间的相干系数与地物介电连续性参数及粗糙表面后向散射参数有一定的敏感性^[20]。经过多次试验及分析,发现 PALSAR 双极化影像复协方差 $[C_2]$ 矩阵的相关系数 ρ_{ij} 对林地和城市及建设用地有一定的可分离性,该参数表示了 HH 与 HV 极化之间的相关程度,如式(2)所示, i 表示 HH 极化; j 表示 HV 极化

$$\rho_{ij} = \frac{\langle c_{ij} \rangle}{\sqrt{\langle c_{ii} \rangle \langle c_{jj} \rangle}} \quad (2)$$

图 6 所示的统计直方图可以清楚地看到该参数对林地与城市及建设用地的有效分离性(见后文)。因此,为了使观测空间得到进一步的扩展,更好地识别林地和城市及建设用地,本研究将 3 个时相不同极化(HH-HV)间的平均相干系数 ρ_{HH-HV} 作为分类的一个有效特征引入 SVM 分类器中。

与此同时,去掉对分类不利的冗余参数,选择与各个土地覆盖类型相关性好的极化、干涉共 6 个特征,分别为 8 月份 HH 极化后向散射强度

σ_{8_HH} 、6 月份 HV 极化后向散射强度 σ_{6_HV} 、2007-6-22 与 2007-9-22 HH 干涉相干系数 ρ_{6_9HH} 、2007-8-7 与 2007-9-22 HH 干涉相干系数 ρ_{8_9HH} 、2007-6-22 与 2007-8-7 HV 干涉相干系数 ρ_{6_8HV} 。将这 6 个特征引入 SVM 分类器进行土地覆盖分类,应该能够从极化特性、相干特性、时变特性等不同的角度最有效地识别土地覆盖类型。

4 结果与分析

SVM 分类器在建模的过程中,核函数类型及惩罚因子 c 、 γ 等参数的不同会直接影响模型的精度。对于参数的选择,尤其是核函数类型的选择,尚没有明确的理论指导,需要根据试验确定。因此,为了得到更好的分类精度,需要对分类器参数进行优化。在土地覆盖及林地类型中,每类地物分别选取 15 个样本,提取样本的 10 种特征值,10 种特征值的数值范围各不相同,需要将样本的特征值归一化到一个区间内。然后,采用交叉验证的方法验证模型的精度,将模型精度最大时的参数作为最优参数。本试验中,得到的最优核函数类型为 RBF 核函数,最优 c 为 2.0,最优 γ 为 0.5,最优模型精度为 97%,参数优化过程如图 7 所示。

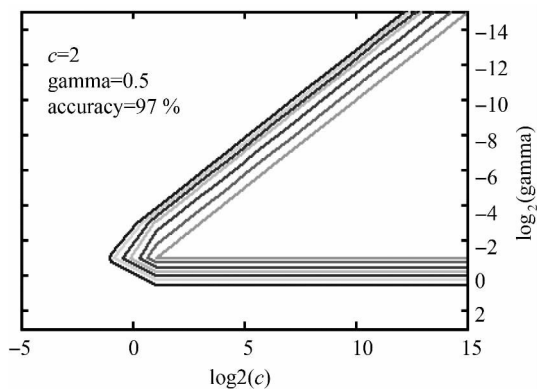


图 7 参数优化结果
Fig.7 Result of parameter optimization

根据确定的最优参数再次建立模型,并采用训练样本归一化方法对数据进行归一化处理,最后执行分类。通过优化后的模型,最终得到的分类结果如图 8 所示(见后文),并选择了 4 种地类可分离性最好的单时相影像(8 月份 HH-HV 双极化)的分类结果作为比较,如图 8(a)所示。可以看到,由于维度信息量较少,采用分离度最好的单时相极化 SAR 影像得到的分类结果并不理想。

而将 ρ_{HH-HV} 、时相、极化、强度、干涉相干系数等有效的多维度特征参数引入 SVM 分类器后可以很大程度上改善分类结果。

得到分类结果之后,需要依据外业调查的地面实况数据进行精度评价,通过混淆矩阵验证分类结果与地面真实样本训练区影像之间的吻合程度。由于实际中获取条件的限制,通过地面调查得到所有验证点存在很大的困难,故采用均匀抽样的方法,以各个类型的部分像元代替整幅影像来评价精度。

为了使检验样本更精更准,还参考了研究区的森林资源二类调查数据以及光学 TM 影像作为参考。研究中共均匀选取了 77 个样本训练区,得到的精度验证结果如表 1 所示。可以看到,通过引入有效的特征参数以及优化后的 SVM 分类模型,分类总精度为 91.37%,Kappa 系数为 0.87,比单时相的分类结果提高了 7.7%。本文所发展的 SVM 分类方法取得了较为满意的地类解译结果。

表 1 土地覆盖分类精度验证表
Tab.1 Accuracy validation of land cover type classification results

分类方法	林地 / (%)	耕地 / (%)	水体 / (%)	城市及建设用地 / (%)	总精度 / (%)	Kappa 系数
单时相 SVM	96.34	92.96	51.39	81.88	83.72	0.74
多时相-极化-干涉 SVM	97.82	93.87	85.55	92.15	91.37	0.87

5 结 论

地表覆盖分类研究对国土资源调查及评估具有基础性和关键性的意义。本文首先,对所获数据进行辐射定标、配准、滤波等预处理,得到一个时间序列的后向散射强度影像,同时对相邻时相的数据进行干涉处理,得到一个时间序列的 SAR 相干影像。其次,分析各个地类 SAR 后向散射系数、干涉相干系数的时相变化特征,并引入对于区分林地和城市及建设用地有效的极化相干系数 ρ_{ij} ,同时对 SVM 分类器进行参数优化,发展了基于时间序列多极化、干涉 SAR 的 SVM 土地覆盖分类方法。最后,采用地面实况数据,并参考研究区的森林资源二类调查数据以及光学 TM 影像进行精度评价,得到以下 3 点结论:

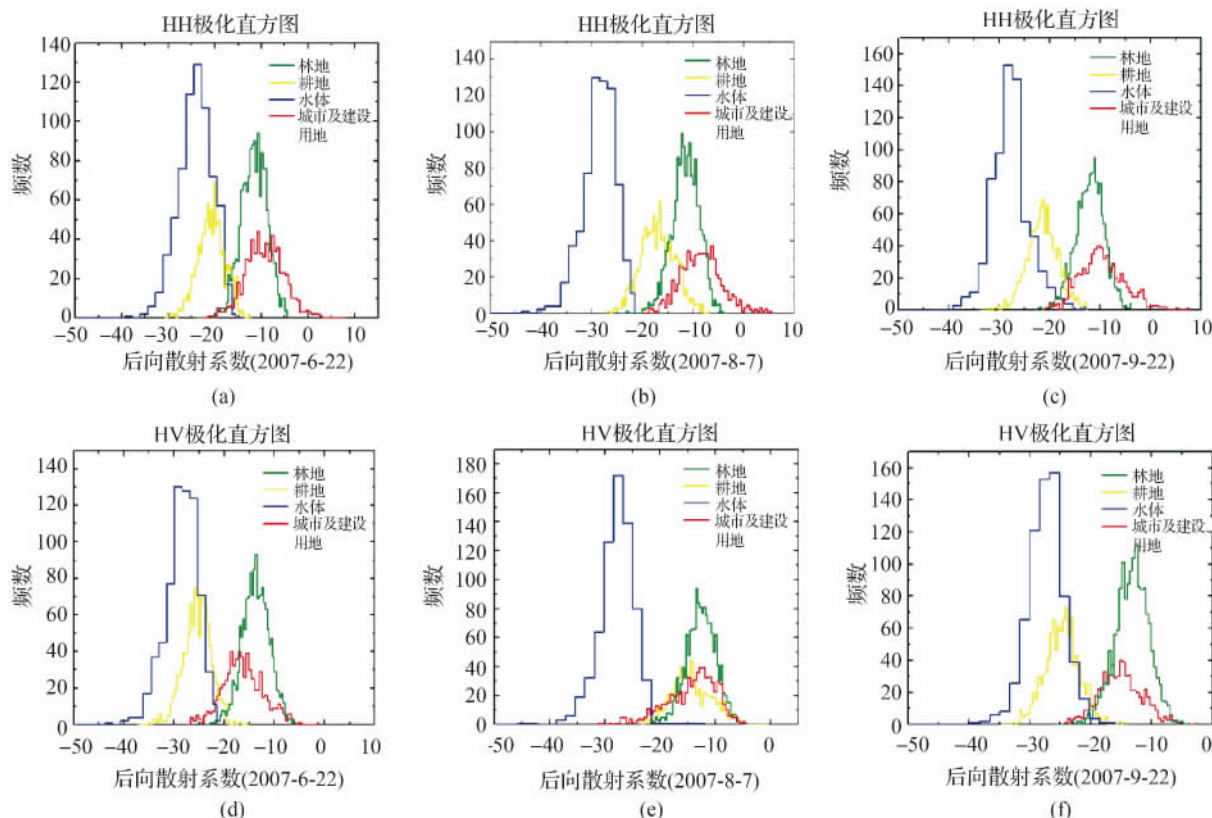


图2 多时相双极化影像地物类型后向散射系数直方图

Fig.2 Histogram of multi-temporal and dual-polarization SAR image in backscatter coefficient of land cover types

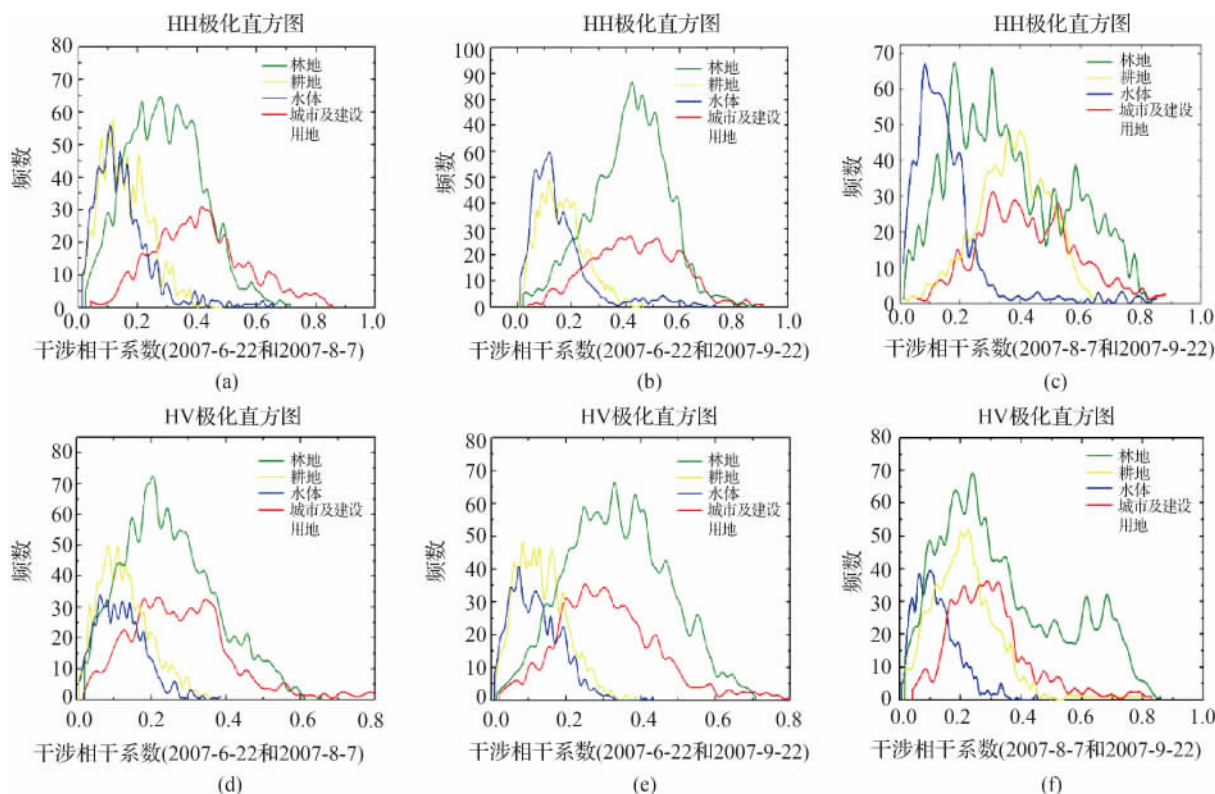


图4 多时相双极化影像土地覆盖类型干涉相干系数直方图

Fig.4 Histogram of multi-temporal and dual-polarization SAR image in correlation coefficient of land cover type

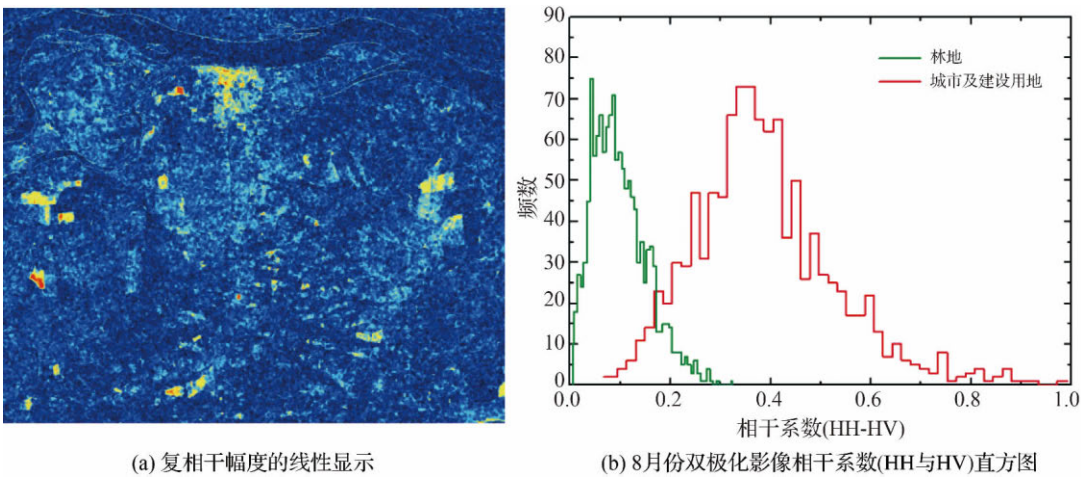


图 6 不同极化通道间的相干系数特征

Fig.6 The correlation coefficient between different polarization channel characteristics

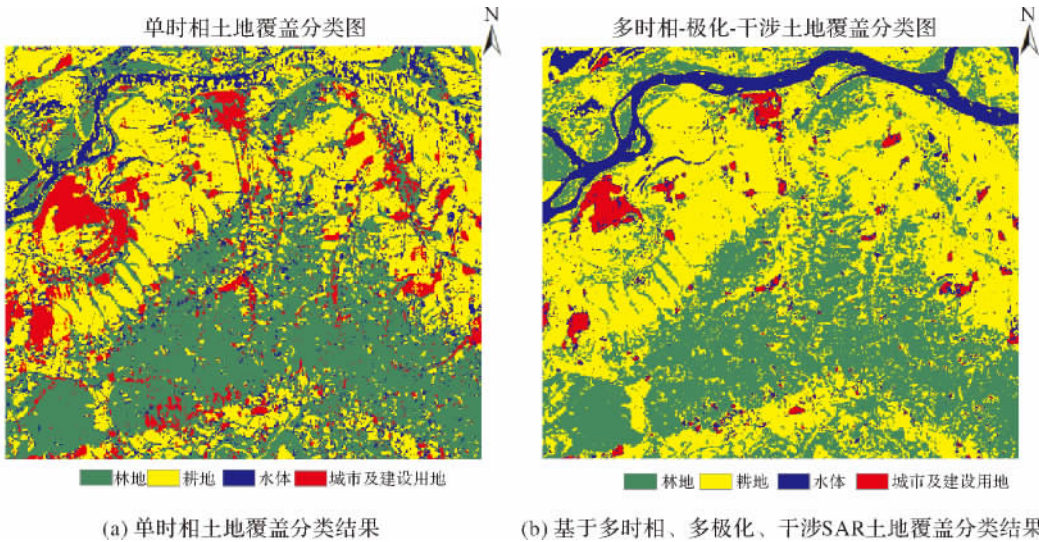


图 8 不同方法的分类结果

Fig.8 The classification results of different methods

(1) HH 极化影像中水体具有较为明显的时变特征,因此,HH 极化的多时相影像对于识别水体非常有利。

(2) 综合采用多时相极化信息与不同时间间的干涉相干信息,可使耕地、水体与其他两类地物更好地区分开来。

(3) 引入多时相 HH 与 HV 极化之间的相关系数,可使林地更好地与城市及建设用地区分开来。本文所发展的基于多时相、多极化、干涉 SAR 测量的 SVM 土地覆盖分类方法得到的分类总精度为 91.37%,Kappa 系数为 0.87,比最优单时相的分类结果提高了 7.7%,取得了较好的分类结果。

文中对于各类地物后向散射特征和干涉相干性已进行了详细的理论分析说明,能够较好地支撑

所得的 3 点结论。由于数据获取的限制,未能用多种类型的数据依次验证,从而得到最好的适用性。如降雨、风等自然条件可能引起地物后向散射以及干涉相干系数的微小变化,这种影响程度对于不同地物也不尽相同,甚至有利于地物的区分,因此,这些因素对于本文结论影响不大。另外,本研究中对林地区域的 HH、HV 干涉统计直方图中均出现了两个波峰,表明相干性对于林地类型的进一步精细分类具有一定的潜力。下一步可就干涉相干性对林地类型识别的敏感性开展更深层次的研究。

参考文献:

[1] CHEN Erxue, Development of Forest Biomass Estimation Using SAR Data[J]. World Forestry Research, 1999, 12 (6): 18-23. (陈尔学,合成孔径雷达森林生物量估测研究进

- 展[J].世界林业研究,1999,12(6):18-23.)
- [2] CLOUDE S R, POTTIER E. An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(1): 68-78.
- [3] QI Z, YEH A, LI X, et al. A Novel Algorithm for Land Use and Land Cover Classification Using RADARSAT-2 Polarimetric SAR Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118: 21-39.
- [4] HE Chu, LIU Ming, FENG Qian, et al. PolInSAR Image Classification Based on Compressed Sensing and Multi-scale Pyramid[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(7): 820-827. (何楚, 刘明, 冯倩, 等. 基于多尺度压缩感知金字塔的极化干涉 SAR 图像分类[J]. 自动化学报, 2011, 37(7): 820-827.)
- [5] LANG Fengkai, YANG Jie, ZHAO Lingli, et al. Polarimetric SAR Data Classification with Freeman Entropy and Anisotropy Analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(4): 556-562. (郎丰铠, 杨杰, 赵伶俐, 等. 基于 Freeman 散射熵和各向异性度的极化 SAR 影像分类算法研究[J]. 测绘学报, 2012, 41(4): 556-562.)
- [6] SHI L, ZHANG L, ZHAO L, et al. The Potential of Linear Discriminative Laplacian Eigen Maps Dimensionality Reduction in Polarimetric SAR Classification for Agricultural Areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 86: 124-135.
- [7] LI Z, PANG Y, SCHMULLIUS C, et al. Forest Mapping Using ENVISAT and ERS SAR Data in Northeast of China[C]//Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]: IEEE, 2005(7):5670-5673.
- [8] SKRIVER H. Crop Classification by Multitemporal C-and L-band Single-and Dual-polarization and Fully Polarimetric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(6): 2138-2149.
- [9] LEE J S, PAPATHANASSIOU K P, HAJNSEK I, et al. Applying Polarimetric SAR Interferometric Data for Forest Classification[C]//Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S. l.]: IEEE, 2005, 7: 4848-4851.
- [10] SHAH H R, ENTEZARI I, HOMAYOUNI S, et al. Classification of Polarimetric SAR Images Using Support Vector Machines [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2011, 37(2): 220-233.
- [11] FU Zhongliang, ZHANG Wenyuan, MENG Qingxiang. SAR Image Classification Based on SVM with Fusion of Gray Scale and Texture Features [J]. Journal of Applied Sciences, 2012, 30(5): 498-504. (付仲良, 张文元, 孟庆祥. 灰度和纹理特征组合的 SAR 影像 SVM 分类[J]. 应用科学学报, 2012, 30(5): 498-504.)
- [12] HUANG L, LI Z, TIAN B, et al. Recognition of Supraglacial Debris in the Tianshan Mountains on Polarimetric SAR Images[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 145: 47-54.
- [13] WEGMULLER U, WERNER C. Retrieval of Vegetation Parameters with SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997 (35): 18-24.
- [14] NIU X, BAN Y. Multi-temporal RADARSAT-2 Polarimetric SAR Data for Urban Land-cover Classification Using an Object-based Support Vector Machine and a Rule-based Approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(1): 1-26.
- [15] CAO Yungang. Study on Land Classification Using Multi-temporal A SAR Data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(5): 103-105. (曹云刚. 多时相 ASAR 数据的地表覆盖分类研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 103-105.)
- [16] LIAO Jingjuan, GUO Huadong, SHAO Yun. Surface Feature Detection Using Multi-temporal SAR Interferometric Data [J]. Remote Sensing Technology Application, 2005, 20(6): 543-545. (廖静娟, 郭华东, 邵芸. 多时相 SAR 干涉测量数据探测地表特征变化[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(6): 543-545.)
- [17] Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. TD/T1010—1999 The Procedure of Land Use Monitoring by Remote Sensing [S]. Beijing: Geosciences Press, 1999. (中华人民共和国国土资源部. TD/T1010—1999 土地利用动态遥感监测规程[S]. 北京: 地质出版社, 1999.)
- [18] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333-382.
- [19] ULABY F T, MOORE R K, FUNGA K. Microwave Remote Sensing: Microwave Remote Sensing Fundamental and Radiometry [M]. [S. l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
- [20] BORGEAUDM, WEGMULLER U. On the Use of ERS SAR Interferometry for the Retrieval of Geo- and Biophysical Information[C]//Proceedings of the Fringe 96 Workshop, Zurich; [s.n.], 1997: 83-94.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2013-12-10

修回日期: 2014-12-01

第一作者简介: 王馨爽(1988—),女,助理工程师,主要研究方向为微波遥感影像分类。

First author: WANG Xinshuang (1988—), female, assistant engineer, majors in classification of microwave remote sensing.

通信作者: 陈尔学

Corresponding author: CHEN Erxue

E-mail: chenex@caf.ac.cn