

# SAR 遥感数据用于岩性识别与分类的研究

谭衢霖

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 利用新疆北部山区雷达遥感数据, 通过遥感数字图像处理与增强, 生成雷达遥感假彩色合成影像应用于岩性判释。对不同岩性岩石, 利用极化雷达提供的地表岩石的多种散射信息作为输入进行计算机神经网络分类, 岩性识别分类的总精度为 62.6%。与常规雷达数据分类对比, 分类精度与岩石识别正确率均有显著提高。

**关键词:** SAR; 遥感解译; 岩性识别; 计算机分类

**中图分类号:** P627; TR75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2009)04-0349-05

## 1 概述

遥感调查与制图具有速度快、质量高、节省人力物力的技术优势, 尤其是地面调查困难、地形地质条件复杂但地表稳定且裸露良好的山区, 遥感技术的应用具有显著的技术经济效益。

合成孔径雷达(SAR)是一种主动式遥感器, 具有全天时、全天候、主动成像、高分辨率等对地观测能力, 它不仅具有一定的地表穿透性, 而且通过调节观测视角, 对目标地物具有良好的空间位置、形态探测能力。这些独特的优势使得雷达遥感在岩性识别、地质填图、矿产勘探、线性构造、火山、断裂识别与调查等方面具有良好的识别效果<sup>[1,2]</sup>。在我国, 雷达遥感数据的应用研究已逐渐受到重视。但至今为止, 由于雷达遥感图像独特的成像机理、斑点噪声和影像几何特征<sup>[3]</sup>, 其地质应用在我国相对而言仍较少。当前, 随着新型成像雷达遥感技术(极化雷达、干涉雷达)的出现与蓬勃发展, 雷达遥感获取的地表地物信息越来越多, 越来越全面, 这些丰富的信息有利于改善雷达遥感对地表地物的识别能力, 从而提高雷达遥感数据计算机图像分类的精度<sup>[4]</sup>。为了推进雷达遥感数据在我国地质领域中的应用, 本文以岩性判释与填图应用为例, 利用极化雷达数据丰富的信息, 试验分析雷达遥感图像计算机岩性分类的

精度。

## 2 SAR 图像处理与解译

雷达数据为美国“奋进号”航天飞机装载的 SIR-C 极化雷达于 1994 年 10 月获取的 L 及 C 波段多视复矩阵数据, 研究区位于新疆北部阿尔泰地区。为便于岩性遥感目视判释, 应根据雷达图像的成像机理与特征, 充分利用数字遥感图像处理与增强技术, 制作色彩丰富、反差明显、清晰易辨的解译图像。对经过处理、增强及合成后的雷达解译图像进行解译, 可以充分利用雷达图像的色调、纹理、形状、大小等标志, 结合典型岩石的图像特征解译经验进行目视判释<sup>[3]</sup>。研究区 SAR 解译图像制作主要包括斑点噪声抑制、纹理与边界信息增强、直方图均衡与对比增强、假彩色合成等步骤。

雷达图像实质上是不同地物对雷达发射信号回波强度的分布图。由于雷达发射的是相干波, 这些相干波与地物相互作用, 产生的散射往往造成雷达图像出现斑点噪声, 影响图像的质量和使用。因此, 滤除雷达图像中的斑点噪声是雷达图像处理的重要任务之一。平抑斑点噪声可以在雷达信号级和图像级分别进行处理。雷达信号级的处理方法是多视平均算法。研究区数据已经过 4 视平均处理, 图 1 是研究区 L 波段后向散射强度图像, 图像中斑点噪声

收稿日期: 2008-11-17; 改回日期: 2009-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801121)资助。

作者简介: 谭衢霖(1975), 男, 江西宁都人, 副教授, 博士, 2003 年于中国科学院遥感应用研究所获博士学位, 地图学与地理信息系统专业, 研究方向为遥感技术与应用。通信地址: 北京交通大学土木建筑工程学院; 邮编: 100044; E-mail: qltanbjtu@163.com

仍然较为严重。为了平抑雷达图像的斑点噪声影响,便于图像的目视判释与解译,需进行图像级的噪声滤波处理。本图像处理中采用 Sigma 滤波方法。



图1 L波段后向散射强度图像

Fig. 1 Backscattering intensity image of L band

其次,对于雷达图像的岩性识别,纹理是一个极其有效的地物识别标志。因此,在平滑噪声的同时应尽可能地保留或增强纹理边界信息,研究中采用 $5 \times 5$ 大小窗口对图像做纹理分析,进一步抑制斑点噪声,突出地物纹理特征。为了增强视觉效果,对研究区L和C波段的多种极化数据也都进行了直方图均衡与对比度增强处理。

此外,在一般的裸露山区,由于长期的地表风化过程,不同岩性岩石的地表几何形态及介电特性存在着很大的相似性,作为常规雷达(单/多波段、单/多极化)重要地表探测因子的后向散射强度(灰度)差别不大。此时,依靠目视解译进行岩石界限划分



图2 假彩色合成 SAR 解译图像

Fig. 2 False color composite SAR image

和地质填图存在较大困难。而且单波段、单极化雷达图像只具有灰度显示的视觉效果,灰度值差别小的地物难以区分。同时成像的多波段多极化 SAR 系统使得所成图像可以进行假彩色合成,从而具备彩色显示的视觉效果。更为重要的是,不同波段、不同极化状态的雷达入射波对同种地物的探测效果各不相同,这必然大大提高对地表地物的识别能力。研究中选择经过上述处理后的L波段VV极化图像、C波段HV极化图像和L波段HV极化图像分别输入R、G和B通道进行假彩色合成,获得研究区岩性解译彩色图像(图2)。

各类岩石物理化学性质及成分的差异,不仅使岩石具有不同的介电常数,重要的是经过长期的风化、剥蚀作用,岩石表面呈现各自复杂的几何形状,为雷达识别岩性提供了可能<sup>[2]</sup>。在雷达图像上识别和分析岩石类型,主要利用岩石的表面粗糙度、风化特点和地貌形态。粗糙度是岩石的表现特征,它是决定岩石图像色调的重要因素,不同岩性的岩石由于风化的作用会形成不同的地表形态,反映在雷达图像上则是不同的纹理。研究区位于新疆北部清河地区,清河从右侧蜿蜒流过,河道已干枯,河床中有矮小植被分布。河道周围为平坦的冲积平地,粗糙度小,植被稀少。除河道与冲积平地外,多为无植被覆盖的裸露山区,区内共有7种不同的岩石类型:硬砂岩、玢岩、砾岩、片岩、硬砂质长石砂岩、黑云母花岗岩、白云母花岗岩。其中,黑云母花岗岩为区内的巨大圆形岩体,由于抗风化能力比周围的玢岩弱,显示为负地形,地面平坦,粗糙度较小。而白云母花岗岩则相反,由于抗风化能力较周围岩石强而呈正地形。

### 3 计算机岩性分类

#### 3.1 分类数据源

极化雷达遥感数据以散射矩阵的形式记录了地物在任意一种极化状态的散射回波信息,既有散射幅度信息,也有相位信息。因此,极化 SAR 数据能提取更多的地物极化信息,如除最常用的极化散射强度外,还可以提取相同极化相位差、HH-VV 相关系数、总功率、同极化比等<sup>[2]</sup>。

在无植被覆盖山区的岩性分类方面,虽然岩石的岩性不同,但地表几何特征与介电特性的差别不明显,回波散射强度类似,地表不同岩石类别的后向

散射差别不大,以散射幅度为主要探测因子的常规雷达遥感数据不利于岩性分类。另一方面,尽管极化雷达数据包含的目标地物信息源增多有利于提高岩性分类的精度。但是,由于极化椭圆表面分布的连续性,代表极化状态的方位角和椭率角的大小有一个渐变的趋势。因此,地物在不同极化状态的散射回波之间存在着很大的相关性,这必然带来数据冗余的问题。数据冗余在一定程度上混淆不同岩石的散射差异,将降低岩性分类的精度<sup>[4]</sup>。

基于上述极化 SAR 数据的特点及岩性分类中可能存在的问题,在分类前将研究区极化 SAR 数据进行目标分解得到 4 种类型的图像数据:单向散射强度,双向散射强度,交叉散射强度和散射熵<sup>[4]</sup>。极化目标分解后的 4 种数据互不相关,并且大大降低与线性极化后向散射强度的相关性,有利于岩性分类。实验区 L 及 C 波段极化数据经目标分解后,得到 8 种分解数据,即 L 与 C 波段的单向散射、双向散射、交叉散射和散射熵。

由于地表几何形态的复杂性,即使是同一种地物,分解出的同种散射过程在不同像元也会有很大差别。所以,如果仅用目标分解数据进行岩性分类仍会产生较大的误差,有必要结合极化 SAR 数据中提取的其他类型图像数据进行分类。不失一般性,引入线性极化后向散射系数  $\sigma_{Lhh}^0, \sigma_{Lhv}^0, \sigma_{Lvw}^0, \sigma_{Chh}^0, \sigma_{Cvv}^0, \sigma_{Cvw}^0$ , 同极化相位差  $\Delta\varphi_{hh-w}$  和同极化相关系数  $\rho$ 。这样,与前述的极化分解数据加在一起总共 16 种数据。在进行计算机分类前,为便于描述及计算机分类标识,将干枯河道和冲积平地也列入待分类的岩石类型中。这样,与前面解译的 7 种岩石类型一起,试验区总共有 9 种待分类岩性类别。

### 3.2 神经网络分类

为充分利用极化数据的多种类型数据源,并减少计算复杂性,采用目前分类算法中最好的多源分类技术——神经网络分类。神经网络具有自组织、自学习和对输入数据具有高度容错性等功能,在解决复杂的、非线性问题时具有明显的优越性<sup>[5]</sup>。尤其能够通过例子进行学习和概括的能力使在遥感监督分类中得到人们的重视。实践表明,神经网络在数据处理速度和地物分类精度上均优于最大似然分类方法的处理速度和分类精度。当前,在 3 大类神经网络(前馈网络,后馈网络,自组织网络)中,遥感分类应用最多的是多层前馈网络的反向传播(BP)学习算法。

由于传统的 BP 算法存在学习常数 and 动量因子

难以事先选定以及收敛速度慢的问题。研究中采用改进的多层感知器网络(MLPN)快速递推最小二乘算法(Recursive Least Squares Algorithm, RLSA),简称快速 RLS-BP 学习算法<sup>[6]</sup>。该算法基于误差梯度为 0 的递推最小二乘(RLS)算法来递推实现网络连接权值的训练。优点是不需要选择任何人为的学习控制参数,迭代的方向性比传统的以最小均方(LMS)为基础的 BP 算法更强,收敛的速度更快,且更易于实际应用、更具稳健性。

分类中神经网络算法采用 3 层(输入层、隐含层和输出层)网络拓扑结构。输入层神经元数目与输入的极化数据源相对应。输出为欲分类的 9 种岩性类别。

在假彩色合成的 SAR 解译图像上选取 9 种岩性类别的训练样区学习样本,每种类别的训练样区 200 个样本点(像元)。为减少数据冗余,提高分类速度,对训练样本的 16 种数据进行散点分析,确定采用 L 波段单向散射、L 波段交叉散射、L 波段散射熵、C 波段单向散射、 $\sigma_{Lvw}^0, \sigma_{Lhv}^0, \sigma_{Chv}^0$  等 7 种数据组合。由于这 7 种数据都属于与散射强度(后向散射系数)有关的数据,另外,也为了充分利用极化雷达包含的丰富信息,再补充选择相关系数和相位差两种数据作为输入。这样,利用多种极化信息源进行神经网络岩性分类的数据输入端为:L 波段单向散射+L 波段交叉散射+L 波段散射熵+C 波段单向散射+ $\sigma_{Lvw}^0 + \sigma_{Lhv}^0 + \sigma_{Chv}^0 +$  相关系数  $\rho +$  相位差  $\Delta\varphi_{hh-w}$  共 9 种数据。分类时,先用训练区数据对网络进行训练,在终止误差为 0.001 的情况下,迭代次数达 1 500 次后网络稳定可用于研究区进行岩性分类。

为对比分析多种极化信息源分类与常规雷达数据分类结果的精度,采用完全同一种神经网络分类技术及同样的训练区像元,仅将对应的数据输入变为: $\sigma_{Lvw}^0 + \sigma_{Lhv}^0 + \sigma_{Chv}^0$  3 种后向散射强度数据组合,对实验区重新进行岩性分类,分类结果见图 3 和图 4。

尽管计算机分类结果图中存在较大的噪声,但不同岩性的岩石类型在一定程度上被划分了出来。其中干枯河道,冲积平地,玢岩、黑云母花岗岩分类效果明显优于其他岩石。片岩的分类效果最差,在分类图上已基本被白云母花岗岩替代。常规雷达数据岩性分类明显夸大了砾岩的分布,降低了长石砂岩的分布;多种极化信息源分类则相反,夸大了长石砂岩的分布,而减少了砾岩的分布。除干枯河道和冲积平地外,其他几种岩性分布也有不同程度的夸大与降低。



图3 多种极化信息源岩性分类结果

Fig. 3 Classification map using combined polarization information

1. 河道 2. 冲积平地 3. 硬砂岩 4. 玢岩 5. 砾岩 6. 片岩  
7. 硬砂质长石砂岩 8. 黑云母花岗岩 9. 白云母花岗岩



图4 常规雷达数据岩性分类结果

Fig. 4 Classification map using conventional information

1. 河道 2. 冲积平地 3. 硬砂岩 4. 玢岩 5. 砾岩 6. 片岩  
7. 硬砂质长石砂岩 8. 黑云母花岗岩 9. 白云母花岗岩

### 3.3 分类精度评价

计算机遥感分类结果的质量评估对于实际应用至关重要。一般,粗略评估可以采用简单的视觉检查来评估分类结果的质量,如前面关于分类结果的评价,但这仅仅是一个主观定性的方法。为了定量比较和评价分类对于特定应用的适用性,必须借助精度指标来评价。

当前应用最广泛的指标是通过混淆矩阵(confusion matrix)或误差矩阵(error matrix)计算的特征值来表示,主要有:①总精度指标 OA (overall ac-

curacy): 它表示计算机正确分类的像元占有参考总像元的比例;总精度指标是一个整体精度指标,它并没有表示出哪一种地物类具有较好的分类精度;实际上,即便某一次分类具有较低的分类总精度,也可能出现某一地物分类具有很高精度的情况;

②生产者精度指标 PA (producer's accuracy): 它表示参考分类中某特定类别的像元能被正确识别分类的可能性(概率);或者说,某一类的生产者精度是计算机正确分类的像元数与参考分类中该类的像元总数之比;③使用者精度指标 UA (user's accuracy): 生产者精度指标对于分类的生产者来说,是一个反映真实分类准确性的指标,它反映了待评价分类在多大程度上与参考分类是一致的;然而,对于使用分类结果的用户而言,它并没有表示出计算机分类结果中某一地物类别本身的正确程度(可信程度)如何,即计算机分类结果图中某类别像元真实、正确的像元分类概率为多大;这是分类结果图使用者最感兴趣的指标,因此,这种概率的计算值称为使用者精度指标;具体来说,它是待评价分类与参考分类都一致的某类像元数与计算机分类中该类别的所有像元总数之比。

本次研究采用的分类精度评价样本(参考分类)选择了9类岩石共计1800个像元进行。总精度计算即为所有1800个像元中被正确识别分类的像元所占比例;生产者精度为每种岩性参考评价样本内被计算机分类为该种岩石的像元占该参考评价样本总像元的比例;使用者精度是指每种岩性参考评价样本内被计算机分类为该种岩石的像元占有参考评价样本中计算机分类为该种岩石的总像元比例。由此,计算常规雷达数据岩性分类和多种极化信息源岩性分类的精度指标值见表1。

分析可知,在裸露山区,由于干枯河道和冲积平地不是真正的岩石类型,在2种分类中精度都较高。除干枯河道及冲积平地外,常规多极化雷达数据可用信息源少,因此分类精度较低(总精度为51.57%),岩石识别正确率相对而言也较低;多种极化信息的组合使得信息源大量增多,因此,多种极化信息分类精度明显提高(总精度为62.6%),岩石识别正确率也有明显提高,但由于数据增多,数据冗余和相关性使个别岩石类别的分布甚至严重夸大或缩减。除干枯河道和冲积平地外,多种极化数据源分类生产者精度最大可达88.5%(玢岩),而岩石识别正确率(使用者精度)最大可达99.1%(硬砂岩)。

表 1 分类精度对比

Tab.1 Comparison of classification accuracy measures

岩性类别	常规雷达数据分类精度		多源极化数据分类精度	
	生产者精度(%)	使用者精度(%)	生产者精度(%)	使用者精度(%)
1. 河道	84.6	97.8	92.7	98.5
2. 冲积平地	94.3	99.0	93.9	99.3
3. 硬砂岩	12.4	96.3	25.2	99.1
4. 玢岩	68.8	95.4	88.5	93.8
5. 砾岩	51.3	87.2	37.1	97.0
6. 片岩	11.7	97.7	25.8	97.2
7. 硬砂质长石砂岩	20.1	96.2	67.0	89.7
8. 黑云母花岗岩	78.2	85.5	86.8	89.9
9. 白云母花岗岩	42.7	90.2	46.4	97.1
总精度	51.57		62.6	

## 4 结论

当前,由于雷达遥感具有光学遥感一些不可替代的独特优势(如全天候、全天候及良好形态探测能力),雷达遥感已成为国内外发展最为迅速和最为重要的对地观测技术之一。本研究尝试利用新疆北部山区航天飞机雷达遥感数据,通过遥感数字图像处理与增强生成雷达遥感假彩色合成影像,应用于岩性判释与填图。研究结果表明,极化雷达不仅具有多波段多极化 SAR 数据可以假彩色合成,从而具备彩色显示的能力。更为重要的是,极化 SAR 数据能提取更多的地物极化信息,而由于不同波段、不同极化状态的数据对同种地物的探测效果各不相同,因此这些丰富的信息可极大地提高对不同地物的识别能力。就岩性判释与填图而言,更有利于制作最好判释效果的雷达遥感彩色合成解译图像。

对不同岩性岩石,本研究利用极化雷达提供的地表岩石的多种散射信息作为输入进行计算机神经网络分类,使用者精度或岩石识别正确率较高(达

89.7%以上),岩性识别分类的总精度为 62.6%。不同岩性岩石生产者分类精度有高有低,最高达 88.5%(玢岩),最低达 25.2%(硬砂岩)。总体上,与常规雷达数据分类对比,分类精度与岩石识别正确率均有显著提高。

### 参考文献:

- [1] 郭华东. 雷达地质及其进展[C]. 见: 郭华东. 雷达图像分析及地质应用. 北京: 科学出版社, 1991: 1-10.
- [2] 谭衢霖, 邵芸. 成像雷达(SAR)遥感地质应用综述[J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(1): 59-65.
- [3] 郭华东, 邵芸, 王长林, 等. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 王翠珍, 郭华东. 极化雷达目标分解方法用于岩性分类[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 219-223.
- [5] 黄德双. 神经网络模式识别系统理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.
- [6] Sadjadi M R A, Liou R J. Fast learning process of multiplayer neural networks using recursive least squares method[J]. IEEE Trans. SP, 1992, 40(2): 446-450.

## APPLICATION OF SAR REMOTE SENSING DATA TO LITHOLOGICAL IDENTIFICATION AND ROCK CLASSIFICATION

TAN Qu lin

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The interpretation and application of optic remote sensing images, including aerial photos and satellite images, had become the indispensable tool for geological survey. In the paper, SAR remote sensing data were used to identify different rocks and survey the lithological distribution in the north of Xinjiang Province. Firstly, the multi-frequency and multi-polarization data were used to produce the false color composite image for visual interpretation and lithological mapping by remote sensing digital image processing and enhancement. Secondly, the various backscattering data of containing abundant information about rock's characteristics were put into the computer Neural Network Classifier. The overall accuracy is 62.6%.

**Key Words:** SAR remote sensing; image interpretation; geological survey; railway engineering