

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0507-04

极化干涉 SAR 数据地表土地类型分类

李新武, 郭华东, 杨 虎, 王长林, 廖静娟, 范 典

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 基于新疆和田地区 1994 年 10 月 9 日和 10 日 SIR-C-L 波段全极化雷达数据, 首先对极化干涉测量的基本原理和数据处理流程进行了详细的阐述, 接着, 用 Cloude 相干最优算法得到了与 3 种地物散射机制相对应的 3 个最优相干图, 并且就地物相干性对极化的强烈依赖和 3 种散射机制中地物的最优相干特性进行了分析, 具有最高相干值的相位图在提取 DEM 方面较有利, 具有最低相干值的相干图在地物识别方面较有利。最后, 在对最优相干系数、后向散射系数和熵进行数据相关性分析基础上, 利用得到的最优相干系数、熵和后向散射系数数据进行了土地类型的识别和分类, 得到了很好的效果。

关键词: 极化干涉; 最优相干; 识别和分类

中图分类号: TP722.6/TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

极化干涉 SAR 是一种集极化和干涉 SAR 技术于一体的新的对地观测技术。由于极化干涉雷达既具有干涉雷达对地表植被散射体的空间分布和高度很敏感的特性, 同时又具有极化雷达对植被散射体的形状和方向很敏感的特性, 因此极化干涉雷达在提取地表植被垂直结构信息方面具有比单独的干涉和极化雷达更大的优越性。用极化干涉雷达数据提取地表植被特别是森林的垂直结构参数是当前极化干涉研究的热点问题^[1]。

由于极化干涉 SAR 提供了比单纯的干涉和极化 SAR 更多的信息, 除了在提取地表植被垂直结构参数中的应用以外, 本文在对极化干涉 SAR 提供的信息进行分析 and 选择的基础上, 利用极化干涉 SAR 数据提供的地物的最优相干系数、地物的散射熵和地物的后向散射系数数据, 参考研究区域的土地利用图, 进行了极化干涉雷达数据地表土地类型的识别和分类的研究。

2 试验区概况及数据源

研究区域位于新疆南部塔里木盆地西半部和昆仑山北坡的和田地区, 研究区域中心为北纬 37°07', 东经 79°36', 本区由冲积扇盆地和边缘山地两大地貌组成, 地势西南高东南低, 由山顶至冲积扇, 盆地具有明显的环带状结构, 主要的地物类型有耕地、戈壁/沙砾、裸土、荒漠草地、水体。其他地物有果园、林地等, 但数量较少、分布稀疏。主要水体为喀拉喀什河, 流量主要集中在夏季, 枯水期流量较小, 甚至断流。

实验数据为 1994 年 10 月 9 日和 10 日的 SIR-C (数据条带为 154.20 和 170.20) L 波段散射矩阵单视复数据。

同时收集了本研究区域 1987 年的中国土地利用图。

3 极化干涉测量的基本原理

全极化雷达系统测量的是每个像元的 2×2 复散射矩阵 $[S]$, 为方便对干涉相位和相干性的表达,

收稿日期: 2001-09-07; 修订日期: 2001-12-28

基金项目: 国家自然科学基金重点基金项目(49989001), 中国科学院知识创新工程重要方向课题 KZCX2-312, 中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室创新项目(CX000022)。

作者简介: 李新武(1973—), 男, 中国科学院遥感应用研究所博士生, 1999 年毕业于中国地质大学应用地球物理专业。主要从事雷达遥感应用基础研究。已发表或接收论文 6 篇。

使用相干散射矢量 \underline{k} , 它等同于散射矩阵 $[S]$ 的矢量化, 如果媒质是互易的, 则

$$\underline{k} = \frac{1}{2} \text{Trace}([S] \psi_p) \\ = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV}, S_{VV} - S_{HH}, S_{HV} + S_{VH}]^T \quad (1)$$

这里 T 指矩阵的转置算子, $S_{ij}(i, j = H, V)$ 代表 HV 极化基 j 极化发射, i 极化接收的复散射系数, ψ_p 是 2×2 的 Pauli 基正交复矩阵。从以上的相干散射矢量 \underline{k} 出发, 可得到极化干涉 SAR 相干系数的矢量表达式^[2]:

$$\gamma = \frac{|\langle \underline{\omega}_1^{*T} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_2 \rangle|}{\sqrt{\langle \underline{\omega}_1^{*T} [T_{11}] \underline{\omega}_1 \rangle \langle \underline{\omega}_2^{*T} [T_{22}] \underline{\omega}_2 \rangle}} \quad (2)$$

式(2)中 $\underline{\omega}_1, \underline{\omega}_2$ 代表两种散射机制,

$$T_{11} = \langle \underline{k}_1 \underline{k}_1^{*T} \rangle, T_{22} = \langle \underline{k}_2 \underline{k}_2^{*T} \rangle, \\ \Omega_{12} = \langle \underline{k}_1 \underline{k}_2^{*T} \rangle.$$

$\underline{k}_1, \underline{k}_2$ 分别是图像 1 和图像 2 的相干散射矢量。 T_{11} 和 T_{22} 是标准的 Hermitian 相干矩阵, 分别包含了图像 1 和图像 2 的全极化信息。 Ω_{12} 不是 Hermitian 矩阵, 但是它包含了两幅图像的极化信息和干涉信息。由于相干性对于极化的强烈依赖^[3], 因此需要寻求式(2)在特定极化状态组合下的最优相干性, 它归结为对式(2)的最优化问题, 通过一定的变换, 可以归结为对式(3)的复 Lagrangian 函数 L 求最大值的问题。

$$L = \underline{\omega}_1^{*T} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_2 + \lambda_1 (\underline{\omega}_1^{*T} [T_{11}] \underline{\omega}_1 - C_1) \\ + \lambda_2 (\underline{\omega}_2^{*T} [T_{22}] \underline{\omega}_2 - C_2) \quad (3)$$

令式(3)偏导数为 0, 解这个最大值问题, 得到:

$$[T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} [T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] \underline{\omega}_2 = v \underline{\omega}_1 \quad (4)$$

$$[T_{11}]^{-1} [\Omega_{12}] [T_{22}]^{-1} [\Omega_{12}]^{*T} \underline{\omega}_1 = v \underline{\omega}_2 \quad (5)$$

式(4)和(5)归结为两个 3×3 复特征值问题, 具有共同的特征值 $v = \lambda_1 \lambda_2^*$, 这两个矩阵不是 Hermitian 的, 但可以证明式(4)和(5)属于一个古典的 Hermitian 特征值问题, 有实的非负特征值, 矩阵的 3 个特征值 v_1, v_2, v_3 与 3 个相干系数值 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 的关系为:

$$\gamma_1 = \sqrt{v_1} \quad \gamma_2 = \sqrt{v_2} \quad \text{和} \quad \gamma_3 = \sqrt{v_3} \quad (6)$$

式(6)的 3 个相干系数值分别对应于地物 3 种散射机制^[4](单向散射、双向散射和交叉散射)的最优相干系数。

4 极化干涉雷达数据相干最优分析

4.1 数据处理

极化干涉 SAR 的数据处理包括以下几个步骤:

(1) 选取定标的 SLC 数据处理区域。

(2) 复图像配准。对于重复轨道极化干涉 SAR 数据, 由于每景图像的 HH, HV, VH 和 VV 4 个通道的数据都具有相同的几何结构, 因此分别将图像 1 和图像 2 的 4 个对应通道进行配准, 主要是考虑到同一通道的信号的差异较小。

(3) 进行距离向和方位向滤波, 以消除基线和多谱勒中心偏移造成的去相关的影响。

(4) 利用第 2 节中的(4), (5)两式计算矩阵的特征值, 得到对应于地物 3 种散射机制的最优相干系数。

4.2 极化干涉 SAR 相干最优分析

图版 I 图 1 是用 1994 年 10 月 9 日和 10 日的 SIR-C 全极化数据得到的 L 波段 HH-HH, HV-HV, HH-VV 干涉对的相干系数图, 在 HH-HH 相干图中, 地物的相干性一般只受时间去相干的影响, 由图版 I 图 1 可见在有水体的地方相干性低。在图版 I HV-HV 相干图中, 在有水体或低矮植被的地方相干性较低。在图版 I HH-VV 相干图中, 在地表植被较发育的地方去相干较为严重, 主要是由于地表植被体散射引起的, 在图 1(右)的上方相干性很低, 主要是由于该区域是冲积扇盆地, 有昆仑山融化雪水的灌溉, 形成一个农业区, 地表植被较为发育, 去相干主要由散射体的散射中心高度差引起。从上面的分析可见, 地物的相干性对极化有强烈的依赖。图版 I 图 2 是由 3 个特征值得到的 3 个对应的相干系数图, 图像值从黑到白的变化范围是 0—1 之间。上方为冲积扇, 地表植被较为发育, 图版 I 图 2 的下方(W 形)沿喀拉喀什河的两边地表植被也较发育, 因此从相干系数图可以看到大部分区域 $\gamma_1 \approx \gamma_2 \approx \gamma_3$, 表明存在 3 种独立的散射机制。位于图版 I 图 2 中部的裸土地区由于有 $\gamma_1 \gg \gamma_2 \approx \gamma_3$, 表明地表只存在一种主要的散射机制。在戈壁地区从相干图上可见它们的这种关系不太明显, 可能是由于地表粗糙度和地表含水量的变化。从图版 I 图 2 还可以看到对于由第一特征值得到的相干系数, 它代表尽可能接近的点散射体的散射机制, 减小了有效散射中心的高度分布, 能最大限度的消除体散射效应的影响, 因此从图中可见各种地物的相干系数差别较小, 对于地物的识别是不利的, 但对于干涉数据 DEM 的提取是有利的, 因为它消除了地表植被的影响。

图版 I 图 3 左是本区域 1994 年 10 月 9 日的雷达数据的熵值图, 由图中可见上部对应于农业区的

地方去极化作用很明显。而裸土或戈壁地区的去极化作用较弱。对于有水体的地方去极化作用最弱。各种地物去极化作用的差别较明显,对地物识别是有利的。

图版 I 图 3 中是本区域 1994 年 10 月 9 日的 HV 通道的后向散射系数,由于 HV 通道对地表植被较敏感,对地表植被的识别有利。

5 极化干涉 SAR 数据地表土地类型分类

极化干涉雷达提供了比单纯的极化和干涉更多的信息,这些信息极大的丰富了人们对不同地物的识别能力,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 ψ 和椭率角 χ 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。这就造成了数据冗余。数据冗余不利于地物的识别。利用 Cloude 相干最优算法得到的 3 个相干系数对应于 3 种不同的散射

机制,它们是互相垂直的即互不相关的。另外散射介质的熵描述了地物散射中以上 3 种散射过程的混合程度,可以从宏观上分析地物散射的复杂性。这 4 种数据是互不相关的,对于地物的识别是有利的。虽然这些数据之间具有低的相关性,但由于地表几何形态的复杂性,即使同一地物,分解出的同种散射过程在不同像元也会有较大的区别,分解图像上显示出严重的噪声影响,因此单靠相干最优信息分类会产生较大的误差,有必要对其他类型的数据加以考虑。在此引入线性极化的后向散射系数 σ_{LHH}^0 , σ_{LVV}^0 , σ_{LHV}^0 。对以上的 7 种数据 γ_1 , γ_2 , γ_3 , σ_{LHH}^0 , σ_{LVV}^0 , σ_{LHV}^0 , 和熵进行数据相关性分析,找出区分每一种地物适合的数据类型。最后选定用以上数据的 γ_3 , 熵, σ_{LHV}^0 作为地物分类的输入数据,参考本区域的中国土地利用图^[5], 利用最大似然分类方法对数据进行分类,分类结果图见图版 I 图 3。从分类混淆矩阵(表 1)可见裸土分类精度最高,为 95.41%,其

表 1 分类结果混淆矩阵

Table 1 Confusion matrix of classification result

	戈壁/沙砾	耕地	裸土	荒漠草地	水体	其他	样点数/个
戈壁/沙砾	80.62	5.32	4.38	6.05	3.14	0.50	7806
耕地	4.43	82.28	0.00	7.83	4.47	0.99	10179
裸土	1.96	0.04	95.41	1.89	0.01	0.69	8265
荒漠草地	14.30	16.56	3.37	63.12	2.18	0.46	5453
水体	0.84	5.04	0.00	0.00	93.28	0.84	119

次是水体分类精度为 93.28%,戈壁/沙砾、耕地的分类精度为 80.62%,82.28%,由于耕地的地表较为复杂如有裸露的土壤、植被等,与荒漠草地和戈壁/沙砾易混淆,所以分类精度稍差。由于戈壁/沙砾的地表粗糙度和含水量的变化较大,分类精度也稍差。对于荒漠草地,它主要分布于靠近山地的地方且较为稀疏,训练样区的选择较困难,并且它与水浇地、戈壁/沙砾中植被极易混淆,因此分类精度最差。这几类地物的平均分类精度为 82.94%,总体分类精度为 82.04%。

6 结论和讨论

首先,本文利用 1994 年的 SIR-C L 波段全极化雷达数据,用 Cloude 的相干最优算法得到了反映地表单向散射、双向散射和交叉散射机制的地物的最优相

干系数,对各种地物在 3 种散射机制下的最优相干特性进行了分析,对于地表植被较发育的地区,它们的相干性相差较小,而对于非植被地区则相差较大。由于由第一个特征值得到的相干系数主要反映的是地表面单向散射机制,这一点对于用干涉 SAR 进行 DEM 的提取是有利的,因为它消除了地表植被引起的有效散射中心高度分布的影响,而对于地物的识别和分类是不利的。

其次,由于极化干涉 SAR 提供了比单纯的极化和干涉 SAR 更多的信息,对于地物的识别和分类是有利的。从众多的数据源中选取相关性较小的数据源进行分类是个关键的问题。由于本研究区域典型地物的种类相对较小,因此用最大似然法对地物进行了分类,就能取得很好的分类精度。对于地物种类丰富的研究区域可以利用极化干涉 SAR 提供的丰富信息进行多源数据分类(如神经网络方法),应能取得更

好的效果。

参 考 文 献 (Reference)

- [1] K P Papathanassiou, S R Cloude, A Reigber, W M Boerner. Multi-baseline Polarimetric SAR Interferometry for Vegetation Parameters Estimation[A]. Proc. of Geos. Remote Sensing, IEEE[C]. 2000, 6: 2762—2764.
- [2] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1998 36(5): 1551—1565.
- [3] Papathanassiou K P, Moreira J R. Interferometric Analysis of Multifrequency and Multipolarization SAR Data[A], Proc. of Geos. Remote Sensing, IEEE[C]. 1996, 4: 1227—1229.
- [4] Shane Robert Cloude. A Review of Target Decomposition Theorem in Radar Polarimetry[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1996: 34(2): 498—518.
- [5] Editorial Committee of 1:1000000 Land-use Map of China. Hotan(J-44) 1:1000000 Land-use Map of china, 1987[C]. Beijing: Science Press, 1987. [1:1000000 中国土地利用图编辑委员会。1:1000000 中国土地利用图和田幅(J-44)[C]. 北京:科学出版社, 1987.]

Classification of Land Cover of Polarimetric SAR Interferometry

LI Xin-wu, GUO Hua-dong, YANG Hu, WANG Chang-lin, LIAO Jing-juan, FAN Dian

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the SIR-C L-band fully polarimetric SAR data of hotan area of Xinjiang Province, on October 9 and 10, in 1994, first, the basic principles of polarimetric SAR interferometry measurement and data processing scheme are detailedly discussed. Then, three optimized coherence map related to three scattering mechanism are obtained by Cloude optimization algorithm. Furthermore, the strong dependency of interferometric coherence on the polarization and the coherence signatures of land cover related to three scattering mechanism are analysed, the interferometric phase corresponding to highest coherence map is useful in DEM extraction, the lowest coherence map is useful in identification of land cover. At last, based on the data correlation analysis of optimized coherence coefficient, backscattering coefficient and polarimetric entropy, making use of optimized coherence, polarimetric entropy and backscattering coefficient data, Identification and classification of land cover is implemented and evaluated. The good result is obtained.

Key words: polarimetric SAR interferometry; optimized coherence; identification and classification