

基于目标散射相似性的 POLSAR 图像无监督 地物散射分类新方案

陈 强, 蒋咏梅, 陆 军, 匡纲要

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 针对 H-Alpha 散射分类存在的不足, 本文提出了一种基于目标散射相似性的 POLSAR 图像地物散射分类新方案. 该方案首先利用散射随机性将地物分为高散射随机性、中散射随机性和低散射随机性三类, 然后根据散射相似性参数对这三类进一步细分. 由于该方案根据散射相似性参数自动确定散射类别, 克服了采用 Alpha 人工确定散射类别的不足; 散射相似性参数计算简便, 克服了 H-Alpha 散射分类运算量偏大的不足. 作为一种实际应用, 在新方案框架下, 本文给出了一种基于球面散射、偶次散射和体散射相似性参数, 以及散射随机性的度量参数——极化散射熵的散射分类新方法. 该方法在利用极化散射熵将地物分为三类基础上, 根据三个散射相似性参数进一步将地物分为十类. 由于这三种典型散射对应实际地物散射, 该方法的十种散射类别能很好地描述实际地物情况. 实测极化数据的实验结果, 验证了新方案的可行性和新方法的有效性.

关键词: 散射相似性; 地物分类; H-Alpha 分类法

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2729-06

A New Scheme of Unsupervised Terrain Classification for POLSAR Imagery Based on Target Scattering Similarities

CHEN Qiang, JIANG Yong-mei, LU Jun, KUANG Gang-yao

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of the H-Alpha based classification, a new scheme of unsupervised terrain classification is proposed based on target scattering similarities. This new scheme divides terrain scattering into three classes with target scattering randomness firstly; and then subdivides these three classes with target scattering similarities ulteriorly. As terrain scattering class is determined by target scattering similarities automatically, the deficiency of the arbitrarily fixed linear decision boundaries of Alpha angle is overcome. As an application, a new method of unsupervised terrain classification is also presented under the frame of the new scheme. After the partition of terrain scattering with target entropy which is a measure of target scattering randomness, the new method subdivides three classes into ten classes with surface scattering similarity, double scattering similarity and volume scattering similarity ulteriorly. As surface scattering, double scattering and volume scattering are the inherent characteristics of terrain physical scattering mechanisms, the classification result of the new method is consistent with the real terrain scattering. With the real polarimetric data of San Francisco, the feasibility of the new scheme and the validity of the new method are validated.

Key words: scattering similarity; terrain classification; H-Alpha based classification

1 引言

极化合成孔径雷达(POLSAR)是当今广泛使用的一种遥感设备. 现今的大多数 SAR 系统, 尤其是机载 SAR 系统均具有极化测量能力. 因此, 基于这些 POLSAR 系统测量数据的实际应用研究也越来越受到世界各国所关注.

在 SAR 极化测量时, 通常发射一对正交极化的电磁波照射目标, 然后采用一对正交极化的天线接收目标

散射回波, 进而得到目标四个测量参数. 由这些参数构成的 2×2 复极化散射矩阵描述了入射波极化到散射回波极化的变换, 雷达极化中该变换俗称为目标变极化效应. 对于分布式目标而言, 该变极化效应常采用相干矩阵或其它二阶统计量矩阵描述.

为便于理解目标散射过程, 许多学者对极化散射矩阵或相干矩阵进行了数学分解或模型分解, 即极化分解^[1~7]. 在众多极化分解算法中, Cloude 等提出的非相

干目标分解是目前应用最为广泛的^[8]. 该分解将目标相干矩阵表示成三个相互正交的散射机制的加权和, 权重系数为相干矩阵特征值. 对于该数学分解, Cloude 等给出了一个合理解释, 即将目标散射理解为某种主散射机制上的随机起伏, 其中主散射机制采用 Alpha 角表征, 散射随机性采用极化散射熵 H 表征, 并利用这两个参数来对目标进行散射分类. 目前, 基于这两个参数的目标散射分类已成为 POLSAR 图像处理软件中的标准模块.

尽管如此, 基于 H-Alpha 平面的散射分类方法仍存在以下不足: (1) 在 H-Alpha 平面上, 人工确定类别边界可能导致同一区域上包含多种散射类别, 边界散射类型模糊等问题; (2) Cloude 分解为数学分解, 基于 H-Alpha 平面的散射类别不能很好地对应实际地物散射情况; (3) H 和 Alpha 参数的提取需进行相干矩阵特征值和特征矢量分解, 算法运算量较大, 不利于大数据量的 POLSAR 图像实时处理.

基于以上认知, 以设计运算效率高、性能优良为目的, 本文提出了一种基于散射相似性的 POLSAR 图像地物散射分类新方案. 该方案根据球面散射、偶次散射、体散射相似性参数大小, 并结合目标散射随机性将地物散射情况分为 10 种散射类别. 由于目标主散射机制是由散射相似性参数大小确定, 克服了 Alpha 角人工确定类别边界的不足; 采用目标与球面散射、偶次散射、体散射的相似性参数, 使散射分类结果能够很好地对应实际地物散射情况. 同时, 由于散射相似性参数运算量小, 因而新方法具有运算效率高等特点. 实测极化数据的实验结果验证了新方案的有效性.

2 目标散射相似性参数

所谓的目标散射相似性, 是指目标散射与某种典型散射的相似程度. 文献[9]于 2000 年首次提出了该概念, 并定义了一种度量目标散射相似性的参数——相似性系数. 由于该参数采用极化散射矩阵定义, 无法直接应用于分布式目标. 为此, 这里给出一个度量分布式目标散射与某种典型散射相似性的新参数, 即

$$r(\mathbf{k}_p, \mathbf{T}) = \frac{\mathbf{k}_p^H \mathbf{T} \mathbf{k}_p}{\text{Trace}(\mathbf{k}_p \cdot \mathbf{k}_p^H) \cdot \text{Trace}(\mathbf{T})} \quad (1)$$

式中 \mathbf{T} 为目标相干矩阵, \mathbf{k}_p 为某种典型散射的 Pauli 基矢量, $\text{Trace}(\cdot)$ 为矩阵迹运算, 上标 H 为矢量共轭转置运算. 对于确定性目标而言, 由于相干矩阵可表示为 $\mathbf{T} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k}^H$, 上式可退化为文献[9]中相似性系数的定义形式; 对于分布式目标而言, 分布式目标是由许多空间上随机分布的、相互独立的非相干散射中心组成, 新参数度量的是所有散射中心散射与典型散射的相似程度平均体现. 可见, 新参数定义包含了相似性系数定义, 或

相似性系数为新参数的一个特殊情形.

与相似性系数一样, 新参数的取值范围介于 0 和 1 之间, 且具有尺度无关性等性质. 作为一种实际应用, 利用新参数定义形式也可提取目标与不同典型散射的相似性参数. 目前, 已有的典型散射包括球面散射 (surface scattering)、偶次散射 (double scattering)、体散射 (volume scattering) 等, 它们分别对应金属球体、 0° 取向和 45° 取向角反射器的散射. 任意目标与这几个典型目标的散射相似性参数可分别表示为

$$r_s = \frac{2A_0}{2(A_0 + B_0)}, r_d = \frac{B_0 + B}{2(A_0 + B_0)} \text{ 和 } r_v = \frac{B_0 - B}{2(A_0 + B_0)} \quad (2)$$

式中 A_0 , B_0 和 B 为 Huynen 参数, $2(A_0 + B_0)$ 为目标散射回波的总功率, $2A_0$ 对应球面散射回波功率, $B_0 + B$ 对应偶次散射回波功率, $B_0 - B$ 对应体散射回波功率. 这样, r_s , r_d 和 r_v 可依次理解为球面散射、偶次散射和体散射对目标总散射的贡献. 当然, 利用新参数定义还可获得目标与其它典型目标的散射相似性参数. 不过, 上述目标散射相似性参数不仅计算简便, 而且具有实际物理意义.

3 基于散射相似性的目标散射分类新方案

根据前文研究可知, 由于目标散射相似性参数表征了目标散射与典型散射的相似程度, 利用它可实现目标散射分类, 但仅根据单个散射相似性参数只能对目标散射进行粗略分类, 即当散射相似性参数较大, 接近或等于 1 时, 目标以典型散射为主; 反之, 目标不以典型散射为主. 为对目标进行更准确地散射分类, 就必须增加典型散射考虑的个数, 即根据多个散射相似性参数实现目标散射分类. 其基本思路为: 在目标与 N 个典型目标的散射相似性参数中, 选取散射相似性参数最大对应的典型散射作为目标散射类型. 然而, 由于实际地物散射的复杂性, 简单地用某种散射机制来刻画目标散射类别, 即目标以某种散射机制为主或目标为某种散射的描述同样过于粗糙.

从目标极化分解观点, 目标散射可看成是几种典型散射的非相干叠加^[4], 而散射随机性则是这些典型散射对后向散射贡献的相对大小关系的表征. 依据几种典型散射对后向散射贡献的相对关系, 目标散射随机性可分为高、中、低三种情形. 对于低散射随机性情形, 存在一种典型散射对目标后向散射贡献占绝对主导, 故可采用该种散射机制来描述目标后向散射; 对于中散射随机性情形, 少数几种典型散射对目标后向散射贡献均较大, 因而可采用它们联合表征目标散射; 对于高散射随机性情形, 所有典型散射对目标后向散射贡献几乎相等, 再区分目标散射机制已无意义.

基于以上分析,这里考虑将散射相似性和散射随机性相结合的目标散射分类方案.其大致思路为:首先,根据散射随机性将目标分为高、中、低三种情形;然后在低散射随机性情形,根据多个散射相似性参数,将相似性参数最大的典型散射作为目标散射类别;在中散射随机性情形,同样根据多个散射相似性参数,选取相似性参数较大的几种典型散射作为目标散射类别.例如,若球面散射相似性参数大于偶次散射相似性参数,偶次散射相似性参数又大于体散射相似性参数,且前两种散射对后向散射贡献绝对占优,则目标散射可描述为:球面散射 > 体散射;在高散射随机性情形,目标散射类别描述为高熵散射.

不过,在采用上述新方案进行地物目标散射分类时,需注意以下点:

典型散射选取:(1)被选取的典型散射应能较好地反映实际地物散射情况,这样才能使分类结果与实际地物散射很好的吻合;(2)被选取的典型散射,它们相互之间的相似性应尽可能的小,以减少出现目标与这些典型散射相似性参数相等或接近的可能;(3)典型散射选取的个数要适当,过少无法有效的将不同散射的地物目标进行区分,过多增加了大量运算.

散射随机性度量:在雷达极化中,度量目标散射随机性参数较多^[8,10~13],其中最为合理的是极化散射熵 H .根据 Cloude 分解^[4],相干矩阵可写为

$$T = \lambda_1 \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^H + \lambda_2 \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2^H + \lambda_3 \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3^H \quad (3)$$

式中 $\mathbf{e}_i, i = 1, 2, 3$ 表示某种散射机制, $\lambda_i, i = 1, 2, 3$ 为对应的权重系数.若令 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, 则 \mathbf{e}_1 为主散射机制, \mathbf{e}_2 为次散射机制, \mathbf{e}_3 为最次散射机制.令 $p_i = \lambda_i / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$, 极化散射熵定义为

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i) \quad (4)$$

考虑到 $p_1 + p_2 + p_3 = 1$, 式(4)可改写为

$$H = -p_1 \log_3(p_1) - p_3 \log_3(p_3) - (1 - p_1 - p_3) \log_3(1 - p_1 - p_3) \quad (5)$$

图 1 给出了 H 在 (p_3, p_1) 平面上的等高线图.图中可知,当 $H < 0.5$ 时,主散射机制对目标后向散射最小贡献超过了 75%, 此类目标散射为低散射随机性,其散射可采用主散射机制表征,而其它次要散射机制则可忽略;当 $H > 0.95$ 时,几种散射机制对目标后向散射贡献接近,此类目标散射为高散射随机性,其散射无法采用某种散射机制表征;介于这两种情形之间的则为中散射随机性,此类目标的主散射机制和次散射机制对后向散射机制贡献之和占绝对主导,因而可联合这两种散射机制表征目标散射.鉴于极化散射熵运算量偏大问题,计算时可采用文献[12]中替代参数.

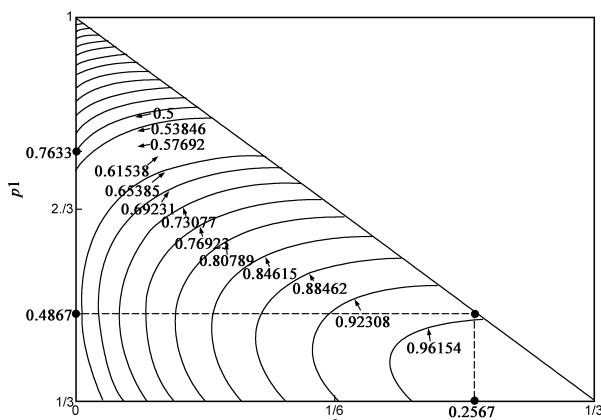


图 1 极化散射熵在 (p_3, p_1) 平面上的等高线图

4 新方案详细流程

作为一种实际应用,若以球面散射、偶次散射、体散射相似性参数为例,图 2 给出了在新方案框架下的散射分类的具体流程,即

(1)若原始 POLSAR 图像数据没有经过相干斑抑制处理,或缺乏足够的多视平均,可采用 IDAN 滤波^[15]对其进行相干斑抑制处理.

(2)计算 POLSAR 图像对应的极化散射熵、球面散射相似性参数 r_s 、偶次散射相似性参数 r_d 和体散射相似性参数 r_v .

(3)根据极化散射熵取值,将 POLSAR 图像中像素划分为低散射随机性 ($H < 0.5$)、中散射随机性和高散射随机性 ($H > 0.9$) 三类.

(4)根据散射相似性参数进一步细分上述三类,即对于低散射随机性情形,利用最大散射相似性参数进一步将像素划分为以球面散射 ($r_s > r_d$ 且 $r_s > r_v$)、偶次散射 ($r_d > r_s$ 且 $r_d > r_v$) 或体散射 ($r_v > r_d$ 且 $r_v > r_s$) 为主的三类散射.

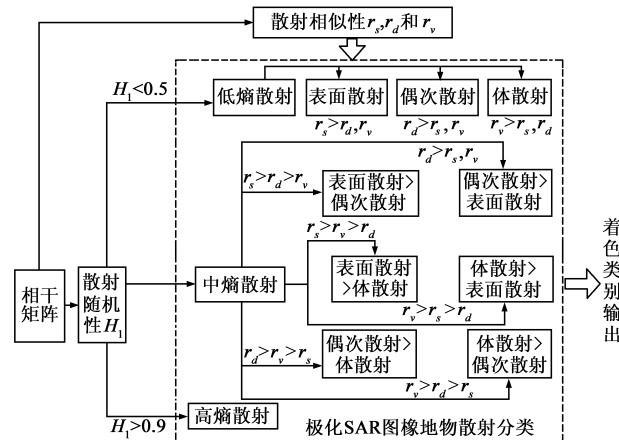


图 2 基于散射相似性和散射随机性的 POLSAR 图像目标散射分类流程

(5)对于中散射随机性情形,利用较大的两个散射相似性参数进一步将像素划分为六类,即若 $r_s > r_d > r_v$,则像素散射类别为:表面散射 > 偶次散射,其它散射类别参见表 1.

(6)对于高散射随机性情形,不做进一步处理,将该情形所有像素看成一个散射类别.

当然,上述分类流程是根据新方案进行散射分类的一次大胆尝试,且上述分类方法并不是唯一的一种.根据典型散射选取的不同,类似的散射分类方法可以有多种,这里以球面散射、偶次散射、体散射相似性参数为例,主要是演示新的分类方案的流程.

5 实验与分析

为了验证新的散射分类方案,这里选取 NASA/JPL AIRSAR 于 1994 年对 San Francisco 海湾地区成像的 L 波段全极化数据作为演示数据.图 3(a)给出该地区的光学图像.显然该地区主要包含海洋、城区、植被等三类典型地物.该地区 AIRSAR 原始 POLSAR 图像经过 4-视处理.为抑制图像相干斑噪声,这里采用 IDAN 滤波对其进一步滤波.图 3(b)给出了滤波后的 span 总功率切片图.图像尺寸为 600×600 ,图中标识了一些具体的地物目标:海洋、高尔夫球场、城区、金门公园和马球场.

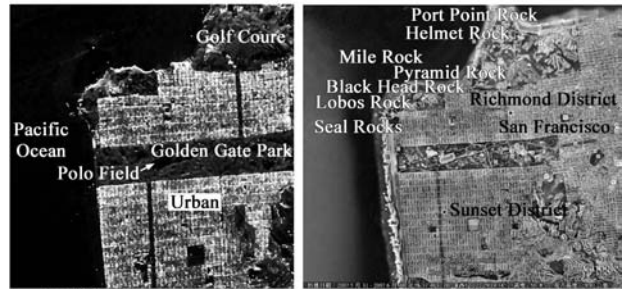


图3 San Francisco海湾地区 (a) 滤波后的Span总功率图 (b) 光学图像

5.1 散射分类效果比较

为对该地区地物进行散射分类,这里首先分别计算该地区地物的极化散射熵、以及球面散射、偶次散射和体散射相似性参数,并在海洋、城区和植被区域分别选取一块矩形切片数据进行分析.图 4(a)给出了这三个切片区域极化散射熵的直方图拟合曲线.由该图可知,海洋区域的 H 基本上集中在 0.1 至 0.3 之间,城区的 H 主要集中在 0.1 至 0.95 之间,植被区则主要集中在 0.6 至 1 之间.也就是说,海洋区域为低散射随机性,城区为中散射随机性,植被为高散射随机性.

图 4(b) ~ (d) 分别给出了三个切片区域相似性参数统计直方图拟合曲线.表 2 给出了三个切片区域对应的散射相似性参数均值和标准差.从图表可看出:(1)在海洋区,球面散射相似性参数远大于其它两个散射相似性参数,说明球面散射对目标后向散射贡献远大于其它两种散射;(2)在城区,球面散射、偶次散射的相似性参数取值比较接近,说明二者对目标后向散射的贡献相当;(3)在植被区,三种散射相似性参数取值差别很小,说明三种散射对后向散射的贡献差别不大.

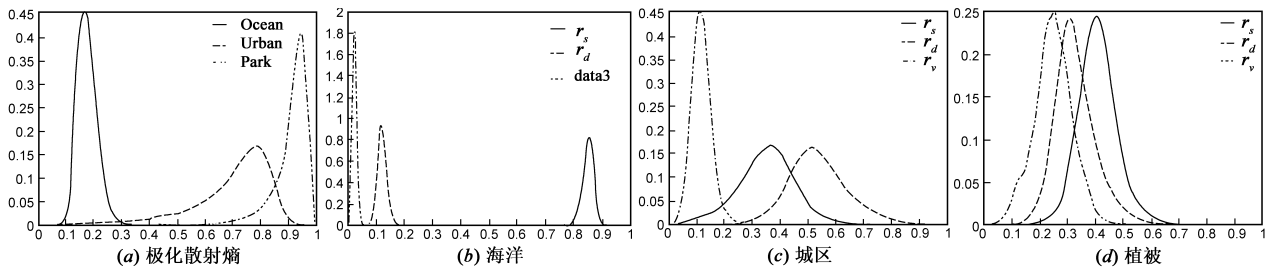


图4 不同地物的极化散射熵和散射相似性的直方图拟合曲线

表 2 不同地物的散射相似性参数的均值和标准差

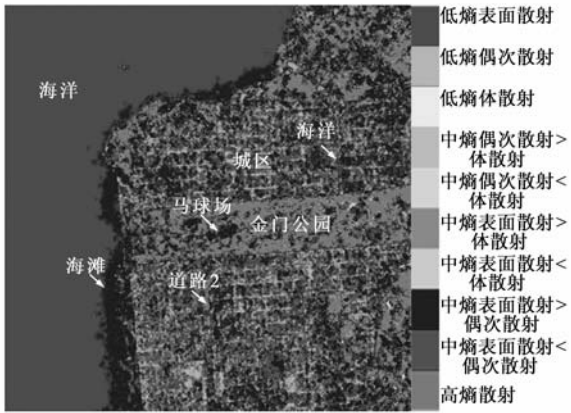
地物	表面散射相似性		偶次散射相似性		体散射相似性	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
海洋	0.8613	0.0264	0.3486	0.1022	0.0250	0.0081
城区	0.3486	0.1022	0.5349	0.1069	0.1165	0.0365
公园	0.4112	0.0709	0.3360	0.0797	0.2528	0.0695

可见,对低散射随机性海洋区,采用球面散射表征其散射是合理的;对中散射随机性城区,采用球面散射和偶次散射联合表征其散射更为合理;对高散射随机

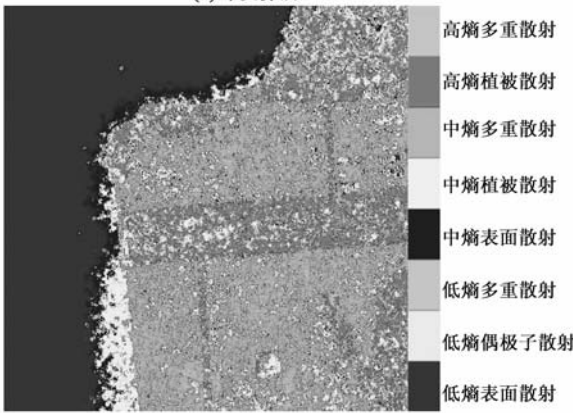
性植被,区分目标散射已无意义.显然,这与前文分析是一致的.

基于上述四个参数对该地区地物进行散射分类.图 5(a)给出了本文算法的散射分类结果.由该图可知:(1)海洋区被分为低熵球面散射,因海洋区几乎只有球面散射;(2)城区被分为低熵偶次散射、中熵偶次散射 > 表面散射和中熵偶次散射 < 表面散射三种散射情形.鉴于该区域包含了墙体与地面的偶次散射、以及墙体、地面、屋顶等的表面散射,故这种划分是合理的;

(3) 植被区被分为高熵散射, 因植被包含树冠层的体散射、树干和地面的偶次散射、以及树叶、树枝、树干和地面的球面散射, 散射情况较为复杂, 散射随机性较大. 显然本文算法的散射分类结果能较好地对应实际地物散射情况, 从而验证了该分类方法是有效的, 也说明了新散射分类方案是可行的.



(a) 本文算法



(b) 基于H-Alpha平面的分类方法

图5 旧金山地区地物散射分类结果

作为比较, 图 5(b) 给出了基于 H-Alpha 平面的散射分类结果. 显然, 由图 4 的分类结果可知, 两种方法的分类结果均能有效地将该地区三种典型地物区分开. 然而, 基于 H-Alpha 平面的散射分类结果却出现了误分, 例如海滩被分为中熵植被散射. 实际上, 由于该地物为松软沙地结构 (如图 6 所示), 应以表面散射为主的散射. 本文算法将其分为中熵表面散射 > 体散射是合理的. 不仅如此, 从分类细节上看, 本文算法的分类结果中城区与植被的边界更加明显; 城区中的道路更加清楚; 城区的平行或



图6 旧金山地区海滩

垂直结构也能有所体现. 也就是说, 本文算法的散射分类能更准确地体现实际地物的散射差异. 其原因在于本文算法根据散射相似性参数大小确定类别, 克服了人工确定 Alpha 类别边界带来的不足; 球面散射、偶次散射和体散射为地物固有散射类型, 选取与这几种散射的相似性参数进行散射分类, 其分类结果能很好的对应实际地物散射情况.

5.2 运算性能分析

为便于比较 H-Alpha 算法与本文算法的运算性能, 首先给出 H 和 Alpha 参数计算公式

$$\begin{cases} \det(\mathbf{T} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \\ (\mathbf{T} - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{X}_i = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 p_i a \cos(x_{i1}) \\ H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{X}_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3}]^T$, \mathbf{I} 为 3×3 单位矩阵. 可见, 对于每个像素来说, 求解 H 和 Alpha 参数需先计算 \mathbf{T} 的特征值 λ 和归一化特征矢量 \mathbf{X}_i . 其中求解特征值需计算一个一元三次方程, 利用盛金公式计算, 则共需 19 次加法和 52 次乘法; 求解特征矢量需计算三个三元一次方程组, 采用消元法求解则共需 21 次加法和 39 次乘法. 得到特征值和特征矢量之后, 采用式 (6) 计算又需 6 次加法和 15 次乘法. 因此, 计算 H 和 Alpha 总共需要 46 次加法和 106 次乘法.

对于本文算法来说, 需计算 r_s, r_d, r_v 和 H' 四个参数. 其中前三个参数的计算式还可写为

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{T_{11}}{T_{11} + T_{22} + T_{33}}, r_d = \frac{T_{22}}{T_{11} + T_{22} + T_{33}} \text{ 和} \\ r_v &= \frac{T_{33}}{T_{11} + T_{22} + T_{33}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 T_{ii} 为 T 对角线元素. 而替代参数计算式为^[14]

$$H' = \frac{3}{2} (1 - \|\mathbf{N}\|_2^2) = \frac{3}{2} \left(1 - \sum_{ij} |N_{ij}|^2 \right) \quad (8)$$

式中 $\mathbf{N} = \mathbf{T} / \text{Trace}(\mathbf{T})$, N_{ij} 为 \mathbf{N} 的元素. 结合式 (7) 和式 (8), 对于每个像素来说, 本文算法共需 8 次加法和 14 次乘法. 若假设加法和乘法运算量相当, 则本文算法仅为 H-Alpha 算法的 1/7 倍. 考虑到 H-Alpha 算法中反余切和对数等非线性运算的运算量远大于乘法运算, 本文算法运算量远小于 H-Alpha 算法.

在计算机硬件环境为 Intel (R) Pentium (R) 2.5GHz CPU, 1.5GB 内存, 软件环境为 Matlab 7.1.0.246 (R14) Service Pack3, 采用未优化的 Matlab 代码分别运行本文算法和 H-Alpha 分类法. 其中本文算法在计算极化散射熵时, 采用的是文献 [14] 中的替代参数. 从运算时间来看, 本文算法的运算时间仅为 3.0470 s, 不到 H-Alpha 分类法运算时间的 1%. 考虑到 Matlab 程序编译时间因素, 这与前文理论分析是一致的.

6 总结

针对基于 H-Alpha 平面的散射分类法存在的不足, 本文提出了一种基于散射相似性的 POLSAR 图像地物散射分类新方案. 该方案的基本思想为: 首先根据散射随机性将目标分为高散射随机性、中散射随机性和低散射随机性三类, 然后利用散射相似性参数对这三大类进一步细分. 作为一种实际应用, 在新方案的框架下, 本文提出了一种基于球面散射、偶次散射和体散射相似性参数, 以及散射随机性度量参数极化散射熵的 POLSAR 图像地物散射分类新方法. 由于新方法根据球面散射、偶次散射和体散射相似性参数自动确定地物散射类别, 克服了采用 Alpha 人工确定散射类别带来的不足; 散射相似性参数计算简便, 克服了 H-Alpha 散射分类法运算量偏大的不足; 球面散射、偶次散射和体散射为地物固有散射, 使得新方法分类结果能很好的对应实际地物散射. 旧金山地区 AIRSAR 实测极化数据的实验结果表明: (1) 新方法分类结果较 H-Alpha 散射分类结果能更好的体现出不同散射地物差别; (2) 新方法运算效率更高.

参考文献:

- [1] Huynen J R. Phenomenological theory of radar target [D]. Netherlands: Technical University Delft, 1970.
- [2] 刘秀清, 杨汝良. 基于全极化 SAR 非监督分类的迭代分类方法 [J]. 电子学报, 2004, 32(12): 1982 - 1986.
LIU Xiu-qing, YANG Ru-liang. The iteration classification method and experiment study based on unsupervised classification of fully polarimetric SAR image [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12): 1982 - 1986. (in Chinese)
- [3] 曹芳, 洪文, 吴一戎. 基于 Cloude-Pottier 目标分解和聚合的层次聚类算法的全极化 SAR 数据的非监督分类算法研究 [J]. 电子学报, 2008, 36(03): 543 - 546.
CAO Fang, HONG Wen, WU Yi-rong. An unsupervised classification for fully polarimetric SAR data using cloude-pottier decomposition and agglomerative hierarchical clustering algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(03): 543 - 546. (in Chinese)
- [4] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1996, 34(2): 498 - 518.
- [5] Krogager E. A new decomposition of the radar target scattering matrix [J]. Electro Lett, 1990, 26(18): 132 - 143.
- [6] Cameron W L. Feature motivated polarization scattering matrix decomposition [A]. IEEE International Radar Conference [C]. Arlington, VA, USA: IEEE, 1990. 549 - 557.
- [7] Freeman A, Durden S L. A three-component scattering model

for polarimetric SAR data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 36(2): 963 - 973.

- [8] Cloude S R. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 35(1): 68 - 78.
- [9] Yang J, Peng Y N, Lin S M. Similarity between two scattering matrices [J]. Electro Lett, 2001, 37(3): 193 - 194.
- [10] van Zyl J J, Zebker H A, Elachi C. Imaging radar polarization signatures: theory and observation [J]. Radio Science, 1987, 22(4): 529 - 543.
- [11] van Zyl J J. On the importance of polarization in radar scattering problems [D]. Pasadena, CA, USA: California Institute of Technology, 1985.
- [12] Zebker H A, van Zyl J J, Held D N. Imaging radar polarimetry from wave synthesis [J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(B1): 683 - 701.
- [13] Durden S L, van Zyl J J, Zebker H A. The unpolarized component in polarimetric radar observations of forested areas [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1990, 28(2): 268 - 271.
- [14] Praks J, Koeniguer E C, Hallikainen M T. Alternatives to target entropy and alpha angle in SAR polarimetry [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2007, 35(1): 68 - 78.
- [15] Vasile G, Trouve E, Lee J S, et al. Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 44(6): 1609 - 1620.

作者简介:



陈强 男, 1980 年生, 博士生, 目前主要从事极化 SAR 图像的斑点抑制、目标增强、极化检测及散射特性分析等方面的实用化研究。
E-mail: cq9822090@163.com



蒋咏梅 女, 1970 年生, 副教授, 目前主要从事 SAR 图像解、SAR 图像目标检测与识别等方面的研究。
E-mail: jyms4@sina.com

陆军 男, 湖北仙桃人, 1970 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事雷达信号处理领域的研究工作. 在国内外学术刊物上发表 20 多篇学术论文。
E-mail: lujun@nudt.edu.cn

匡纲要 男, 1966 年生, 博士, 教授, 主要从事雷达信号处理、SAR 图像判读、多光谱图像目标识别、雷达目标特性分析等领域的研究工作. 在国内外学术刊物上发表 50 余篇学术论文。