

文章编号: 1672-2892(2011)02-0127-06

一种改进的极化 SAR 图像四成分分解方法

殷君君¹, 安文韬¹, 杨健¹, 张新征²

(1.清华大学 电子工程系, 北京 100084; 2.目标与环境电磁散射辐射国防科技重点实验室, 北京 100854)

摘要: 目标分解是极化合成孔径雷达(SAR)应用的重要基础, 其中四成分分解算法在对城市等复杂地物的分析中有很好的应用。原四成分分解得到的体散射分量通常较大, 这是由于所应用的体散射模型不能完全描述实际复杂地物的随机散射过程造成的。为了更好地分析地物的实际物理散射特性, 结合新的体散射模型, 提出了一种改进的全极化 SAR 图像四成分分解算法。对目标散射相干矩阵进行定向角旋转, 利用新的体散射模型对目标矩阵进行分解, 在分解过程中加入功率限制以防止分解中负功率的出现。最后对 NASA/JPL 实验室 AIRSAR-L 波段的旧金山数据, 以及 ALOS/PALSAR 的北京地区极化数据进行了分析, 实验结果验证了该方法的有效性。

关键词: 四成分分解; 合成孔径雷达; 去定向角; 体散射模型; 雷达极化

中图分类号: TN958

文献标识码: A

A modified four-component model-based scattering decomposition method of polarimetric SAR images

YIN Jun-jun¹, AN Wen-tao¹, YANG Jian¹, ZHANG Xin-zheng²

(1.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2.National Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: Target decomposition is a key point for polarimetric Synthetic Aperture Radar(SAR)'s applications, where the four-component decomposition has been successfully applied to the analysis of urban areas and some other complex areas. However, the decomposed volume scattering component is relatively large when the four-component decomposition is applied. It is caused by the volume scattering model which is not good for characterizing totally random scatters. In order to accommodate the targets' real physical scattering characteristics, a modified four-component decomposition based on a new volume scattering model is proposed in this paper. First, the deorientation process is applied to the coherency matrix. Then, with the new volume scattering model, a modified decomposition algorithm is proposed with a power constraint for avoiding the emergence of negative powers. Finally, the NASA/JPL AIRSAR L-band polarimetric data of San Francisco and the ALOS/PALSAR polarimetric data acquired over Beijing area are used for analysis; the experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: four-component decomposition; Synthetic Aperture Radar; deorientation theory; the volume scattering model; radar polarimetry

合成孔径雷达(SAR)是遥感图像应用的重要组成部分。在极化合成孔径雷达(PolSAR)的各类应用中, 目标分解可以更好地帮助人们分析和理解各类地物的实际物理散射机制。目标分解的方法主要有 2 种^[1]: 一种是基于散射矩阵的相干分解, 例如 Pauli 分解和 Krogager 分解等; 另一种是基于散射相干矩阵的非相干分解, 例如 Huynen 分解、Cameron 分解、极化特征值分解^[2-3]以及基于模型的分解等。在基于模型的分解中, Freeman 和 Durden 提出的三成分分解方法^[4]在对自然分布的地物分析中有着很好的应用, 他们认为散射相干矩阵是一次散射分量、二次散射分量以及体散射分量贡献的结果。随后, Yamaguchi 提出了四成分分解方法^[5], 在以上 3 种成分的基础上增加了螺旋体散射分量, 使得分解结果更具有通用性(例如更适合城市等不满足反射对称性假设的区域), 并改进了体散射模型, 使目标分解更具有有一般性。但由于四成分分解得到的体散射功率往往过大, 使得分解得到的一次

收稿日期: 2010-11-12; 修回日期: 2010-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40871157); 国防科技预先研究基金资助项目

散射成分或二次散射成分的功率小于零,这是不符合实际情况的。出现负功率主要是因为所应用的体散射模型与实际完全杂乱无序的随机散射过程不一致,因此本文在四成分分解中采用了一个新的体散射模型^[6],它能较好地符合完全去极化的散射过程;同时在分解过程中加以功率限制,以防止在对实际极化数据分析过程中产生负功率。

目标的雷达回波大小与雷达视线方向、目标的摆放姿态、形状、介电性质等因素有关。相同的目标由于摆放姿态的不同会产生不同的后向散射矩阵,散射目标的这种绕着雷达视线方向旋转的角度就称作目标的定向角^[7]。解定向角的目的是为了除去目标的这种随机旋转对雷达波后向散射系数的影响,以使解定向后的散射矩阵能够更好地描述目标的散射特性。对于目标的散射相干矩阵,解定向角就是使旋转后的矩阵中共极化通道的能量达到最大,交叉极化通道的能量达到最小。

本文在对目标进行分解之前,先对其进行定向角旋转以减小随机取向对各散射分量参数提取的影响,之后利用新的体散射模型对目标进行四成分分解。最后利用2个实验对分解的结果进行验证。

1 极化定向角的检测

对于散射相干矩阵 T , 将其绕着雷达视线旋转一定的角度 θ , 得到旋转后的矩阵 T_θ 为:

$$T_\theta = QTQ^H; \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中上标 H 代表转置共轭。

散射相干矩阵为式(2), 它是一个非负定的 Hermitian 矩阵, T_{11}, T_{22} 和 T_{33} 分别代表目标 Pauli 分解的一次散射成分、二面角散射成分以及 45° 二面角散射成分:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}|S_{HH} + S_{VV}|^2 & \frac{1}{2}(S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \\ \frac{1}{2}(S_{HH} + S_{VV})^*(S_{HH} - S_{VV}) & \frac{1}{2}|S_{HH} - S_{VV}|^2 & (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \\ (S_{HH} + S_{VV})^* S_{HV} & (S_{HH} - S_{VV})^* S_{HV} & 2|S_{HV}|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{12}^* & T_{22} & T_{23} \\ T_{13}^* & T_{23}^* & T_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了使旋转之后 T_θ 中的 T_{33} 达到最小, 解定向的角度为:

$$\theta = \frac{1}{4} \arctan \frac{2\operatorname{Re}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}}, \quad \theta \in \left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right) \quad (3)$$

虽然通过这种方法旋转之后的散射相干矩阵将能量都集中在共极化通道上, 但共极化通道有2个, 以线极化波为例, 水平极化通道和垂直极化通道。通过这种旋转得到的结果并不确定, 安文韬提出了1个确定解定向角的方法^[6], 使得旋转之后的能量集中在垂直通道上: 如果旋转后的 T'_{12} 的实部小于零, 则 θ 为所求的角度; 否则, $\theta = \theta \pm \pi/2, \theta \in (-\pi/2, \pi/2]$ 。通过加入这个条件, 定向角的旋转具有唯一性。

2 四成分分解方法

2.1 原始的四成分分解方法

对多视的极化 SAR 数据, Yamaguchi 在 2005 年提出了基于模型的四成分分解^[5], 认为1个相干矩阵包含4种散射分量: 一次散射分量 T_{surface} 、二次散射分量 T_{double} 、螺旋体散射分量 T_{helix} 以及体散射。

$$T = f_s \cdot T_{\text{surface}} + f_d \cdot T_{\text{double}} + f_v \cdot \langle T \rangle_{\text{volume}} + f_c \cdot T_{\text{helix}} \quad (4)$$

式中 f_s, f_d, f_v 和 f_c 分别是4种散射成分的系数, 它们正比于各个分量的功率, 且为非负。根据不同的散射机理, α 是对二面角散射体进行建模时所得到的散射参数, β 是利用一阶布拉格模型对一次散射目标建模时得到的散射参数, $T_{\text{surface}}, T_{\text{double}}$ 以及 T_{helix} 的相干矩阵模型分别为:

$$T_{\text{surface}} = \begin{bmatrix} 1 & \beta^* & 0 \\ \beta & |\beta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, |\beta| < 1; \quad T_{\text{helix}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \pm j \\ 0 & \mp j & 1 \end{bmatrix}; \quad T_{\text{double}} = \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha & 0 \\ \alpha^* & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, |\alpha| < 1 \quad (5)$$

体散射分量有3个模型, 不同模型之间的选择依据2个共极化通道之间的能量比 $10 \cdot \log \frac{|S_{VV}|^2}{|S_{HH}|^2}$ 来决定,

$$10 \cdot \log \frac{|S_{VV}|^2}{|S_{HH}|^2} \quad \begin{array}{c} -2 \text{ dB} \quad \quad \quad 2 \text{ dB} \\ \hline \end{array}$$

$$\langle \mathbf{T} \rangle_{\text{volume}} = \frac{1}{30} \begin{bmatrix} 15 & 5 & 0 \\ 5 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{30} \begin{bmatrix} 15 & -5 & 0 \\ -5 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad (6)$$

当四成分分解方法被应用到实际的极化 SAR 数据中时,有时会产生如下问题:1) $f_v < 0$; 2) $f_s < 0$ 或 $f_d < 0$ 。第 1 个问题的产生是因为相干矩阵中螺旋体散射分量过大,这种情况主要发生在城市地区;第 2 个问题的产生主要是因为分解中体散射分量过大,这也是在分解中产生负功率的主要原因。一种功率限制的改进方法可以克服负功率的产生^[8],这种基于功率的分解方法的主要原则是:如果分解得到的功率小于零,则令该成分分量为零,并且使分解得到的各个分量的总和等于散射相干矩阵的总功率 $span$ 。

$$span = \frac{1}{2} |S_{HH} + S_{VV}|^2 + \frac{1}{2} |S_{HH} - S_{VV}|^2 + 2 |S_{HV}|^2 \quad (7)$$

2.2 体散射模型

基于功率限制的方法虽然可以确保分解得到的功率非负,但是分解得到的一次散射分量以及二次散射分量的功率通常较小,而体散射分量的功率较大,这主要是由体散射模型与实际的完全随机散射不相符造成的。为此,本文利用另外一种体散射模型对散射相干矩阵进行分解:

$$\langle \mathbf{T} \rangle_{\text{vol}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

选用这个体散射模型的主要原因有 2 个:

1) 体散射可以被认为是一群混乱无序的散射状态的集平均,它不能描述任何一种确定的散射过程。根据 Cloude 和 Pottier 提出的极化熵理论^[2],完全随机的散射具有最大的极化熵 $H(H \in [0,1])$ 。式(6)中的 3 种体散射模型的熵分别是 0.87, 0.946 4, 0.87; 而所采用的 $\langle \mathbf{T} \rangle_{\text{vol}}$ 具有最大的极化熵,为 1。

2) 共极化通道之间的相关性可以用相关系数表示:

$$\rho = \frac{\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH}|^2 \rangle + \langle |S_{VV}|^2 \rangle}} \quad (9)$$

根据电磁波的极化理论,如果后向散射波是完全极化的,那么水平极化通道和垂直极化通道之间是完全相关的,即相关系数 $|\rho| \approx 1$; 如果后向散射波是完全非极化的,各个正交通道所接收的能量与极化状态无关,即 $|\rho| \approx 0$ 。以式(6)体散射模型的中间散射模型为例,它的共极化通道之间相关系数为 $|\rho| \approx 1/3$,这不符合完全去极化散射的假设情况。而式(8)中的体散射模型, $|\rho| \approx 0$ 。

根据以上分析,选取式(8)模型作为描述完全随机散射过程的体散射模型。

2.3 改进的四成分分解

将式(5)和式(8)中的 4 种散射模型分别代入式(4)中,通过比较式(4)两端的系数,可以直接得到螺旋体散射以及体散射成分的功率:

$$\begin{cases} f_c = \text{Im} \langle (S_{HH} - S_{VV}) S_{HV}^* \rangle, & P_c = 2f_c \\ f_v = 2 \langle |S_{HV}|^2 \rangle - f_c, & P_v = 3f_v \end{cases} \quad (10)$$

式中 P_v 和 P_c 分别代表体散射成分的功率和螺旋体散射成分的功率。

四成分分解的流程见图 1,通过此方法分解得到的各成分功率是非负并且功率总和等于 $span$ 。这里 F 代表 T_{23} 的虚部。在对目标矩阵进行分解之前,先对其进行定向角旋转,解定向角可以使得 T_{23} 的实部为零,而 T_{23} 的虚部具有旋转不变性,所以对旋转之后的散射相干矩阵做四成分分解,只忽略掉了 T_{13} 部分。在分解的过程中要注意:1) 如果螺旋体散射分量 f_c 大于 T_{33} ,会使 f_v 小于零。由于 F 具有旋转不变性,这就是说在散射相干矩阵中,螺旋体散射分量是一个常数,所以在分解中认为如果 $f_v < 0$,则 $P_v = 0$ 。事实上,这种现象主要发生在城市地区或者 2 种具有不同散射类型的地物交汇处;2) 当 $|T_{12}|^2 > AB$ 时,原四成分分解会产生负的 P_s 或者 P_d 。这里依据分解总功率不变的方法,认为当 $|T_{12}|^2 > AB$ 时,只有一次散射分量或只有二次散射分量,散射分量的判决取决于 T_{11} 和

$T_{22}-f_c$ 的大小; 当 $|T_{12}|^2 < AB$ 时, 则认为一次散射分量与二次散射分量都存在, 其中一种散射成分占主要地位, 这部分的分解方法与原四成分分解方法相同。

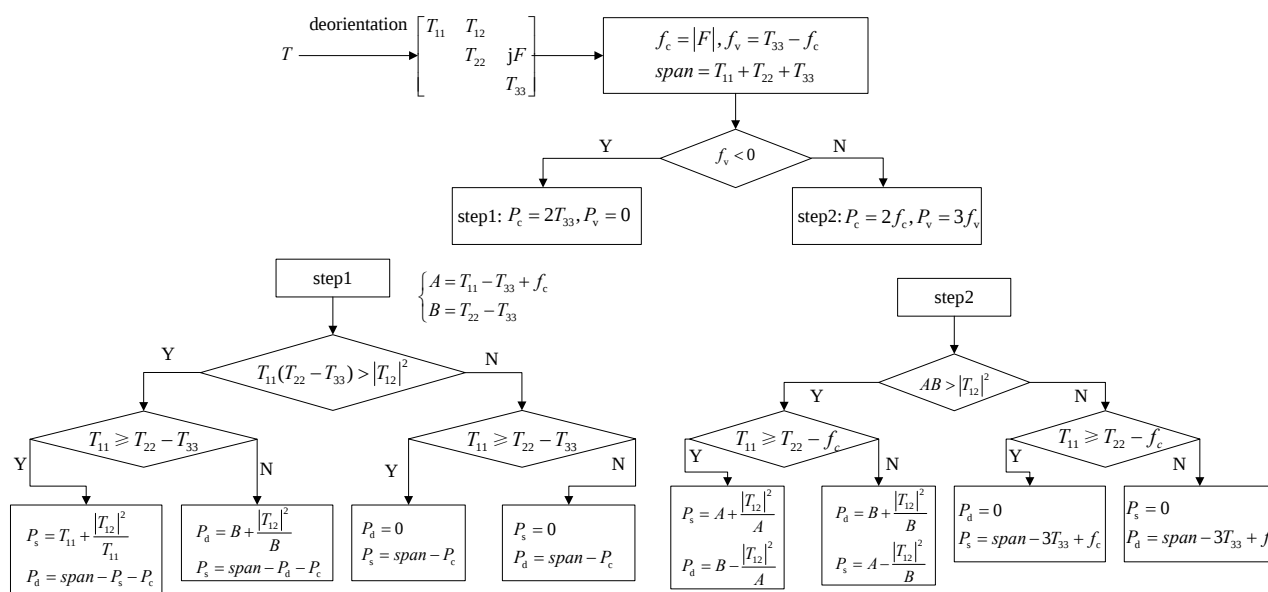


Fig.1 Flow chart of the modified four-component decomposition

图1 改进的四成分分解流程图

3 实验结果与分析

将所提出的改进四成分分解方法用于2幅实测的全极化SAR数据当中, 1幅是ALOS/PALSAR的L波段北京地区2009年4月份数据, 另1幅是JPL/AIRSAR旧金山L波段的数据。

3.1 四成分分解在SAR图像分析中的应用

这部分主要是利用2种四成分分解方法对城市地区的主要物散射成分的分析进行比较, 在对目标散射矩阵进行分解之前, 先对目标进行定向角旋转。原四成分分解方法采用功率限制的四成分分解方法^[7]。图2是北京主城区全极化数据的Pauli分解图, 该数据的大小是650×1001。图3(a)和图3(b)分别是原四成分分解和改进的四成分分解方法得到的结果, 其中 P_d 用红色表示, P_v 用绿色表示, P_s 用蓝色表示。

对比图3(a)和图3(b)分解结果, 可以发现图3(b)比图3(a)要红一些, 这说明改进的四成分分解方法比原分解方法分解得到的二次散射成分分量要大。结合实际的地物散射类型, 城市地区主要发生的是偶次散射过程, 所以这种现象与实际相符。为了进一步验证本文所提出的方法, 选取图2中的3个小区域进行分析。这3个小区域主要表示了不同的地物类型: 区域A的主要地物是玉渊潭, 一次散射分量应该比较大; 区域B的主要地物是丰台城区, 二次散射成分的比重应该比较大, 且应该伴随有螺旋体散射分量; 区域C的主要地物是天坛公园, 由于是春季, 所以粗糙表面的散射分量应该占主要成分。

图4示意了3个小区域不同散射类型的功率分布情况, 其中上面的3幅图是用原四成分分解方法得到的结果, 下面3幅图是用本文提出的改进四成分分解方法得到的结果。对比图4的上下2部分, 虽不知道各类散射分量在每个小区域所占比重的确切大小, 但直观上从2种方法分解结果的对比中看, 改进的方法对实际地物散射特性的分析要准确一些。首先, 4月份时市区内的树木主要是枝干, 发生在地面以及树干之间的二次散射过程比较多; 其次, 在主要的城区, 螺旋体散射分量应该是存在的, 而用原始方法对B区域进行分析时, 螺旋体散射分量几乎为零, 这与实际情况不相符。

3.2 四成分分解在SAR图像分割中的应用

第2个实验是利用Chan-Vese水平集模型^[9-11]对SAR图像四成分分解的结果进行分割。SAR图像分割是图像解释的基础, 这里选用的分割方法是基于统计活动轮廓模型的Chan-Vese水平集分割算法^[12]。Chan-Vese是一种基于区域分割、采用分片光滑的数学模型, 可以同时适用于灰度图像以及多通道图像, 但对于灰度相近的2个区域难以进行区分。本实验采用旧金山AIRSAR图像, 首先对该图像进行定向角旋转以及四成分分解; 之后利用Chan-Vese模型对由 $[P_s, P_d, P_v, P_c]$ 构成的多通道图像进行分割。原始的全极化SAR数据以及分割的结果见图5, 图5(c)所利用的数据是原四成分分解的结果, 图5(d)所利用的数据是改进的四成分分解方法的结果, 图5(a)和图

5(b)分别是2种四成分分解结果的彩色合成图,其中 P_d 用红色表示, P_v 用绿色表示, P_s 用蓝色表示。

对比图5(a)和5(b),图5(b)的城市地区要比图5(a)的城市地区更红一些,表明改进的方法对地物散射类型的分解较为准确。对比图5(c)和5(d),虽然2幅图像中主要地物类型均可以被较好地分割出来,主要区域的轮廓定位也比较准确,但图5(c)的分割结果不如图5(d)的分割结果均匀,区域分割的完整性保持得不好。对于不同种类的地物,它们的散射类型相差很大,以一次散射成分为例,城市地区以及森林地区在 P_s 图上的灰度差异会很大,所以在应用多通道的Chan-Vese模型对四成分分解的功率图进行分割时,不同地物散射特征的差异越大,分割的效果越好;差异越小,则利用Chan-Vese模型很容易将具有不同散射类型的地物分割到1个区域。通过对比以上实验结果,可以看出改进的四成分分解方法更加符合地物的实际物理散射机制,并且可以提高地物的分类效果。

4 结论

本文提出了一种改进的极化散射相干矩阵四成分分解方法,该分解模型符合完全非极化散射现象的假设。根据定向角旋转理论,螺旋体散射分量具有旋转不变性,且旋转后矩阵对于相同的散射体具有唯一确定性。所以本文在对散射相干矩阵进行四成分分解之前,先将其进行定向角旋转,之后利用新的体散射分量进行分解,分解的流程确保了分解的各功率非负。最后,通过对实测的极化SAR数据进行分析,表明了该方法的结果与实际地物的散射类型相吻合,从而验证了该改进方法的有效性。

参考文献:

- [1] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996,34(2):498-518.
- [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] 陈体刚,李彦佐. 全极化 SAR 图像中相干矩阵特征值及其应用[J]. 信息与电子工程, 2005,3(3):161-166. (CHEN Tigang, LI Yanzuo. Coherent matrix eigenvalue and eigenvalue index of polarimetric SAR images and its application of Bayes classification[J]. Information and Electronic Engineering, 2005,3(3):161-166.)
- [4] Freeman A, Durden S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998,36(3):963-973.
- [5] Yamaguchi Y, Moriyama T, Ishido M, et al. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005,43(8):1699-1706.
- [6] AN W, CUI Y, YANG J. Three-component model-based decomposition for polarimetric SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,46(6):2732-2739.
- [7] XU F, JIN Y. Deorientation theory of polarimetric scattering targets and application to terrain surface classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005,43(10):2351-2364.
- [8] Yajima Y, Yamaguchi Y, Sato R, et al. POLSAR image analysis of wetlands using a modified four-component scattering power decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008,46(6):1667-1673.
- [9] Chan T F, Vese L A. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001,10(2):266-277.
- [10] Chan T F, Sandberg Y B. Active contours without edges for Vector-valued image[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2000,11(2):130-141.
- [11] Chan T F, Vese L A. A multiphase level set framework for image segmentation using the Mumford and Shah model[J]. International Journal of Computer Vision, 2002,50(3):271-293.
- [12] WANG X, LI C. Multiphase segmentation of SAR images with level set evolution[C]// Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent systems. Xiamen:[s.n.], 2009:447-452.

作者简介:



殷君君(1983-),女,黑龙江省七台河市人,在读博士研究生,主要从事极化SAR图像的目标检测与分类算法的研究. email:yinjj07@gmail.com.

杨健(1965-),男,湖北省襄樊市人,教授,博士生导师,主要从事雷达极化、雷达遥感等理论的建模、最优极化处理以及模糊理论等。

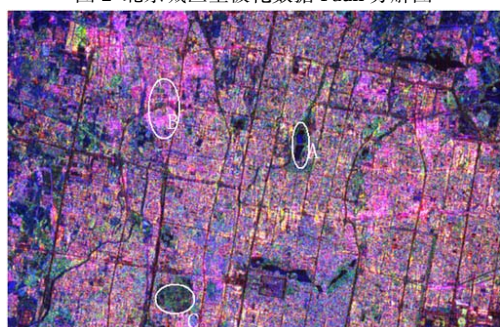
安文韬(1981-),男,河北省唐山市人,博士,主要从事极化SAR的数据处理。

张新征(1978-),男,山东省聊城市人,副教授,博士,主要研究方向为SAR目标特性及在检测识别中的应用、高分辨SAR成像等。

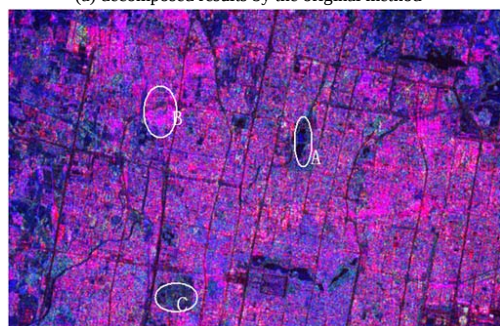


Fig.2 Pauli-basis image of the original fully polarimetric data over Beijing area

图2 北京城区全极化数据 Pauli 分解图



(a) decomposed results by the original method



(b) decomposed results by the modified method

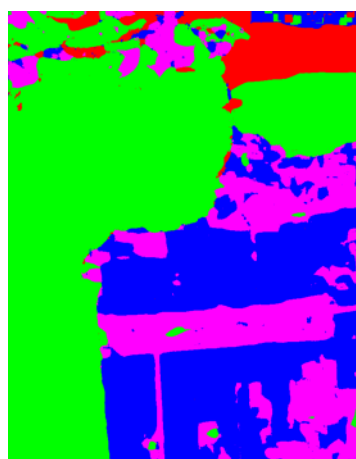
Fig.3 Color-coded composite images of the decomposed powers
图3 分解结果的彩色合成图



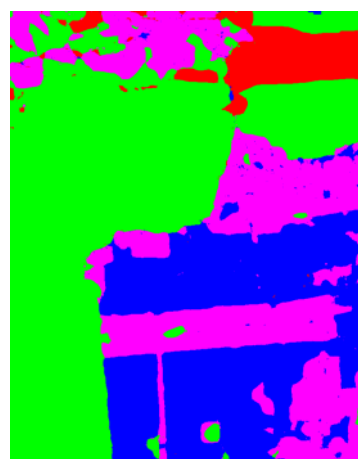
(a) decomposed results of the original four-component decomposition algorithm



(b) decomposed results of the modified four-component decomposition algorithm



(c) segmentation results with the decomposed powers of the original method



(d) segmentation results with the decomposed powers of the modified method

Fig.5 Segmentation results of San Francisco

图5 旧金山地区地物分割结果

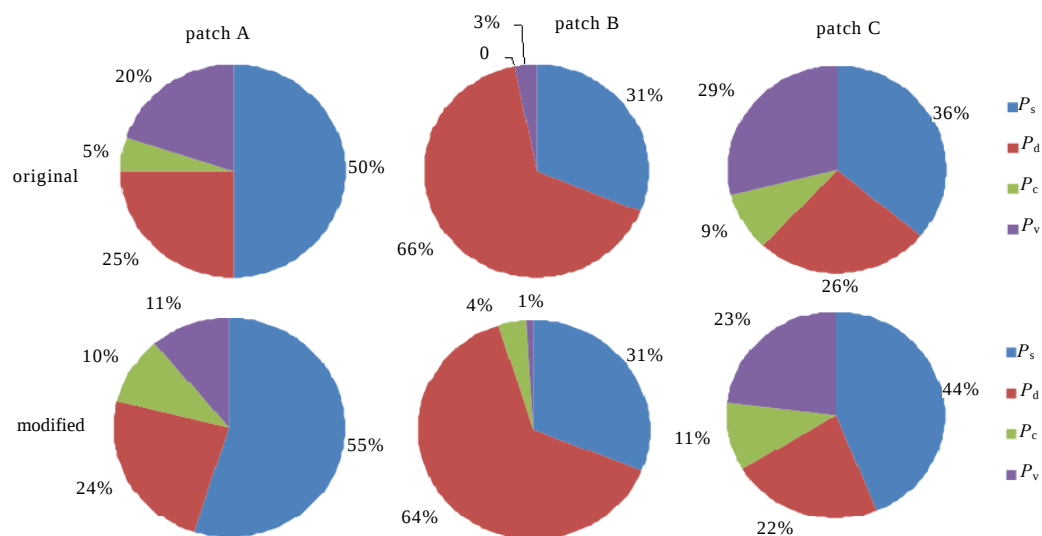


Fig.4 Power distribution of the three patches
图4 3个小区域的散射类型功率分布图