

文章编号: 1001- 2486(2008) 05- 0068- 05

# 基于散射机理分类与方位对称性判决的极化 SAR 人造目标提取\*

徐 牧, 王雪松, 肖顺平, 王 涛

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 由于极化 SAR 人造目标电磁散射的复杂性, 已有极化 SAR 人造目标提取方法难以完整地提取出感兴趣区域内不同类型的目标。针对这一不足, 提出一种基于散射机理分类与方位对称性判决的提取新方法, 充分利用目标与杂波在散射机理类型及方位对称性上的差异进行提取。与已有方法相比, 该方法对极化 SAR 图像中不同极化特征的人造目标都有较好的提取性能, 提取结果更为完整和准确。利用全极化 SAR 实测数据验证了本方法的有效性和优良性能。

**关键词:** 极化 SAR; 人造目标提取; 散射机理; 方位对称性

中图分类号: TN957 文献标识码: A

## Man-made Target Extraction Based on Scattering Mechanism Identification and Azimuthal Symmetry Decision of POLSAR Images

XU Mu, WANG Xue-song, XIAO Shu-ping, WANG Tao

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Owing to the complexity of the electromagnetic scattering characteristics of man-made targets, it is difficult for traditional extraction methods to discriminate all potential targets from polarimetric synthetic aperture radar (POLSAR) images. To overcome this shortcoming, a novel scheme based on scattering mechanism identification and azimuthal symmetry decision is proposed in this paper. The novel scheme is implemented based on the difference between man-made target, and natural clutter on scattering mechanism type and the property of azimuthal symmetry. Compared with traditional methods, our scheme has the advantage of obtaining a more successful result, and targets exhibiting different types of polarimetric characteristics can all be well extracted. The validity of the novel scheme is verified by fully polarimetric SAR data.

**Key words:** POLSAR; man-made target extraction; scattering mechanism; azimuthal symmetry

极化 SAR 图像中的目标按其属性可大致分为两类: 人造目标和自然杂波。前者主要包括坦克、装甲车等军用车辆及建筑物等人造设施, 后者主要指草地、森林等地物。建筑物及车辆等散射较强的人造目标通常是军事侦察的感兴趣目标。极化 SAR 图像人造目标提取可为情报获取及精确打击等提供强有力的技术支持, 已成为极化 SAR 图像解译系统的重要组成部分, 也是极化信息处理领域的前沿课题。

已有极化 SAR 图像人造目标提取方法可大致分为两类: 第一类为基于统计分类或图像分割的方法, 如利用模糊 C 均值聚类<sup>[1]</sup> 及利用“分裂- 合并”图像分割<sup>[2]</sup> 的提取方法; 第二类为基于散射机理特征的提取方法, 如  $H/\alpha/A$  分类方法<sup>[3]</sup> 及利用共极化相位差的方法<sup>[4]</sup> 等。散射机理与目标材质及结构等本质属性相关, 基于散射机理特征通常可获得更为准确的提取结果, 且利于后续的图像解译等处理, 第二类方法无疑更有优势。但是, 由于介质材料、雷达入射角及目标与 SAR 空间位置关系等诸多因素的影响, 人造目标极化散射具有复杂性、易变性等特点, 极化 SAR 图像中一些散射机理相同而空间取向不同的人造目标, 可能表现出不同的极化特征<sup>[5]</sup>, 这为目标提取及图像解译等造成了极大困难, 基于散射机理特征难以完全区分人造目标与自然杂波。

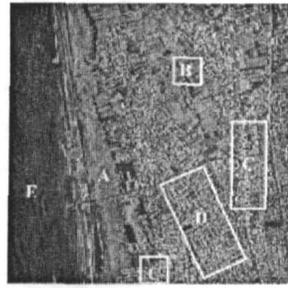
\* 收稿日期: 2008- 01- 02

基金项目: 全国优秀博士学位论文专项资金资助项目(08100101); 新世纪优秀人才计划项目资助(NCET- 04- 0997)

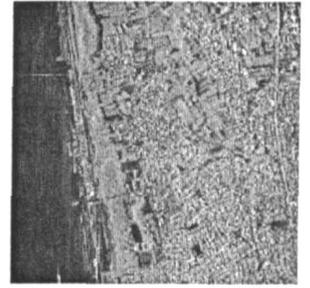
作者简介: 徐牧(1979-), 男, 博士生。

## 1 极化 SAR 人造目标散射复杂性分析

在具体介绍本文提出的人造目标提取方法前, 先通过实验分析人造目标极化散射的复杂性。图 1 为某一场景的极化 SAR 图像, 所选数据为日本 PI-SAR 全极化数据, 成像区域为日本新潟市的部分城区, 图像尺寸为 1500 像素  $\times$  1500 像素。图 1(a) 为该场景的极化散射总功率图, 由该场景地物类型的先验知识可知, A、B 两处分别为森林及平坦植被区, C、D 为代表性的建筑物目标, E 为海域。图 1(b) 为该场景的 Pauli 基伪彩色处理结果图。Pauli 基伪彩色处理是分析极化 SAR 图像目标极化特征的重要手段, 它将像素点散射矩阵在 Pauli 基下的分解系数作为伪彩色图中该点颜色矢量中的基本分量, 颜色矢量中的 R(红)、G(绿)和 B(蓝)分量分别对应  $|S_{hh} - S_{vv}|$ 、 $|S_{hv}|$  和  $|S_{hh} + S_{vv}|$  值<sup>[3]</sup>。由图 1(b) 可知, A、B 两处区域主要呈现为绿色, 这与植被区主要散射机理为体散射的结论相一致。E 处海域呈现为蓝色, 这与海域主要为表面散射机理的结论也是一致的<sup>[4]</sup>。下面重点分析建筑物等人造目标的极化散射特征。首先分析 C 代表的建筑物区域, 此类目标主要呈现为红色或粉色, 表现为明显的偶次散射特征, 主要对应建筑物墙体与地面形成的二面角结构。但是, 对于以 D 为代表的建筑物区域, 其合成结果则呈现为绿色, 表现为典型的体散射特征。D 处建筑物的构造与 C 处建筑物并无明显差别, 垂直墙体与地面间形成的二面角结构同样为极化散射的主要分量。实际上, 对于人造目标, 体散射机理几乎难以出现, 交叉极化分量的产生通常都是由于人造目标具有特定的空间取向。D 处建筑物之所以会呈现出类似于体散射的极化特征, 主要原因是建筑物整体取向与 SAR 飞行方向具有一定夹角, 散射结构的极化散射会出现一定的交叉极化分量<sup>[6]</sup>。图 1(b) 直观地说明了极化 SAR 图像人造目标极化散射的复杂性, 这一特点也为人造目标的准确提取及图像解译等带来了困难。



(a) 极化散射总功率图/dB



(b) Pauli 基伪彩色合成图  
(R:  $|S_{hh} - S_{vv}|$ , G:  $|S_{hv}|$ , B:  $|S_{hh} + S_{vv}|$ )

图 1 实测极化 SAR 图像

Fig. 1 Real POLSAR image

## 2 基于散射机理分类与方位对称性判决的目标提取

### 2.1 算法原理及流程

已有研究表明, 由于介质材料及几何结构等的不同, 人造目标与自然杂波的极化散射机理存在一定差异<sup>[3-5]</sup>: 一般而言, 人造目标的散射机理主要为偶次散射, 如车体上的二面角及建筑物墙体与地面形成的二面角等。此外, 人造目标也可能存在奇次散射, 如“墙体-地面-墙体”所成的三面角等。而自然杂波中最常见的散射机理为体散射, 也可能存在一定的奇次散射, 偶次散射则甚为少见。因此, 基于目标和杂波散射机理类型的差异可以进行目标提取, 已有基于散射机理特征的人造目标提取即是如此。

但是, 仅仅基于散射机理特征难以从自然杂波背景中准确提取出真正的人造目标。首先, 散射机理特征的提取通常都基于典型的极化分解方法, 已有典型极化分解方法所描述的目标散射机理类型非常有限<sup>[7]</sup>, 不同分解方法自身也存在一定不足, 这些因素导致了基于极化分解获得的散射机理特征难以完全区分人造目标与自然杂波。例如, 对于人造目标中的三面角结构和自然杂波中的树冠, 前者对应三次散射机理, 后者对应表面散射机理, 但在使用已有典型极化分解方法对二者的散射机理进行分类时, 都将二者归类为典型的奇次散射。其次, 正如第 1 节所述, 人造目标极化散射的复杂性也使得仅仅利用散射机理特征提取人造目标将存在一定的模糊性。因此, 在已有基于散射机理特征进行人造目标提取的基础上, 需从其他角度着手而引入新的判别特征, 以提高人造目标提取的准确性及完整性。

幸运的是, 人造目标与自然杂波在方位对称性方面的差异为目标提取提供了一条新途径。通常认为自然杂波的散射在垂直于雷达视线平面内具有一个对称轴, 共极化和交叉极化通道间的相关系数为

零,这一重要特性即为“方位对称性”。对于绝大多数自然杂波,这一假设都是成立的。但对于实测极化 SAR 数据中的人造目标,方位对称性的假设通常不再满足,即

$$\begin{cases} \langle S_{hh}S_{hv}^* \rangle = \langle S_{vv}S_{hv}^* \rangle = 0 & \text{杂波像素点} \\ \langle S_{hh}S_{hv}^* \rangle \neq 0, \langle S_{vv}S_{hv}^* \rangle \neq 0 & \text{目标像素点} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\langle g \rangle$ 表示集合平均处理。因此,对于散射机理分类获得的既可能为目标又可能为杂波的奇次散射和体散射像素点,通过对其进行方位对称性判决,找出其中不再满足方位对称性的像素点作为人造目标点,结合散射机理分类获得的偶次散射点,即可实现更为完整和准确的人造目标提取结果。

基于上述分析,本文提出基于散射机理分类与方位对称性判决的极化 SAR 人造目标提取方法,总体流程如图 2 所示。首先通过预处理剔除图像中的弱散射点。在此基础上,基于 Freeman 分解获得像素点的散射机理类型,并将像素点分成奇次散射、偶次散射及体散射三类。其中体散射类像素点实际的散射机理并不完全是体散射机理,还可能包括其他类型的散射机理,因表现出体散射的极化特征而被错误地判为体散射机理。然后,将偶次散射点作为“第一类人造目标点集”;对于奇次散射和体散射点,对其方位对称性进行判决,将不满足方位对称性的点作为“第二类人造目标点集”。最后,通过对第一类及第二类人造目标点集取“并集”的融合处理,即可获得最终的目标提取结果。

对于人造目标提取前的预处理,典型极化 SAR 目标检测方法包括极化 CFAR 检测<sup>[9]</sup>、极化白化滤波器检测等,本文选择其中性能较好的极化 CFAR 检测器。以下将详细阐述算法中基于 Freeman 分解的散射机理分类与方位对称性判决这两个关键步骤。

## 2.2 基于 Freeman 分解的散射机理分类

Freeman 分解方法将目标总散射分解为奇次、偶次散射及体散射等三种散射机理的非相干合成<sup>[8]</sup>,令 $P_s$ 、 $P_d$ 及 $P_v$ 分别为分解获得的目标极化散射的奇次、偶次和体散射分量,在此基础上即可构建基于 Freeman 分解的散射机理分类策略,即

$$p_{ij} \in \begin{cases} C_{odd} & P_s = \max\{P_s, P_d, P_v\} \& P_s > \eta * P_{total} \\ C_{even} & P_d = \max\{P_s, P_d, P_v\} \& P_d > \eta * P_{total} \\ C_v & P_v = \max\{P_s, P_d, P_v\} \& P_v > \eta * P_{total} \\ C_n & \max\{P_s, P_d, P_v\} \leq \eta * P_{total} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $p_{ij}$ 为当前像素点, $P_{total} = P_s + P_d + P_v$ 为像素点的散射总功率, $C_{odd}$ 、 $C_{even}$ 和 $C_v$ 分别表示奇次散射、偶次散射和体散射类, $0 \leq \eta \leq 1$ 为判决门限, $C_n$ 代表散射机理较为复杂的像素点,利用 Freeman 分解获得的三种基本散射分量或其中的两种可能具有接近的散射功率,像素点不存在明显的主散射机理。利用 Freeman 分解进行像素点散射机理类型分析,当散射最强的散射分量占总散射的比例超过一定门限时,则认为像素点存在主散射机理,并将散射最强分量对应的散射机理作为该像素点的散射机理类型;否则,认为像素点散射机理类型不明显。当散射最强分量的散射功率超过总散射的 50% 时,认为像素点存在主散射机理是完全合理的,这一门限选取准则在文献[5]中也有所阐述。因此,本文在实际应用中取 $\eta = 0.5$ 。

## 2.3 基于方位对称性判决的第二类人造目标提取

对于经极化 CFAR 检测预处理及散射机理分类后被归为奇次散射和体散射这两类既可能为目标,

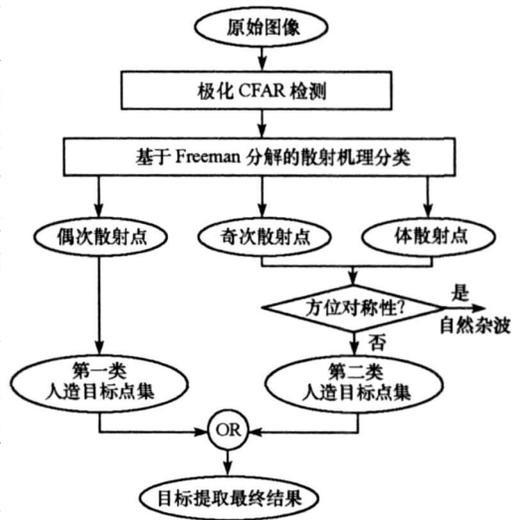


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the novel extraction scheme

又可能为杂波的像素点, 可通过对其方位对称性的判决进一步提取其中属于人造目标的像素点。由式(1)可知, 方位对称性判决等价于对“共极化与交叉极化通道间的极化相关性”的判决。文献[6]给出了不同极化通道间的“归一化极化相关系数”的定义, 即

$$Cor(a, b) = \frac{\langle ab^* \rangle}{\sqrt{\langle aa^* \rangle \cdot \langle bb^* \rangle}} \quad (3)$$

其中  $a, b$  表示目标复散射矩阵中  $HH, HV, VV$  等不同极化通道的元素。由于人造目标两个共极化通道与交叉极化通道相关性通常都比较强, 可以综合考虑  $HH, HV$  及  $VV, HV$  间的极化相关性, 以此进行方位对称性判决, 并基于判决结果提取真正的人造目标。具体的判决准则可表述为

$$p \in \begin{cases} C_{man-made} & p \in C_v \cup C_{odd} \& \varepsilon > Th \\ C_{clutter} & else \end{cases} \quad (4)$$

其中  $p$  为当前像素点,  $Th$  为方位对称性的判决门限,  $C_{man-made}$  表示人造目标类,  $C_{clutter}$  为杂波类,  $\varepsilon$  为“方位对称性判决量”, 其定义为

$$\varepsilon = 0.5 [Cor(S_{hh}, S_{hw}) + Cor(S_{hw}, S_{vv})] \quad (5)$$

其中  $Cor(\cdot)$  的定义如式(3)所示。  $\varepsilon$  越小, 表明共极化与交叉极化通道之间的极化相关性越差, 即其方位对称性越好, 反之亦然。式(4)的判决准则可描述为: 对于散射机理分类后被判为奇次散射和体散射的像素点, 分析其共极化和交叉极化通道间的归一化极化相关系数, 将其中不满足方位对称性条件(即归一化极化相关系数较大)的像素点作为第二类人造目标点。

### 3 实验结果及分析

本节基于 PE-SAR 全极化 SAR 实测数据验证本文所提方法的有效性和优良性能, 仍将图 1(a) 作为实验图像, 为便于对比不同方法的提取结果, 将其重新显示为图 3(a)。为说明本文方法的有效性和优良性能, 分别使用本文方法与传统的基于  $H/\alpha/A$  分类的提取方法对图像中的建筑物目标进行提取, 并对提取结果进行对比。为使对比具有同等条件, 在利用两种方法进行目标提取前, 采用相同的极化 CFAR 检测预处理。其中检测所需杂波极化特性的统计样本区域选择图 3(a) 中“E”所示海域中的小块区域, 虚警率设为  $10^{-4}$ 。

图 3(b) 为基于  $H/\alpha/A$  分类的提取结果。提取过程采用文献[3]的思想, 首先基于  $H/\alpha/A$  进行散射机理分类, 然后将偶次散射点作为人造目标候选点, 图中白色点即为提取的人造目标点。  $H/\alpha/A$  平面的划分参考了经典文献中所采用的经验划分方法<sup>[10]</sup>。对比图 3(a) 和图 3(b) 易知, 利用  $H/\alpha/A$  分类进行人造目标提取, 虽然提取结果中自然杂波虚警较少, 但提取建筑物的数量有限。对图 3(a) 中整体取向与 SAR 飞行方向基本平行的建筑物的提取效果较好(如 C 区域), 而对图中整体取向与 SAR 飞行方向成一定角度的建筑物未能成功提取(如 D 区)。下面根据本文方法的处理流程提取图 3(a) 中的建筑物。图 3(c) 为基于 Freeman 分解的散射机理分类结果, 对比图 3(a) 和图 3(c) 易知, 图 3(a) 中部如 D 所示建筑物区域的极化特征与体散射机理相类似, 因此被错误归类为体散射点。图 3(d) 为提取散射较强的偶次散射点而获得的第一类人造目标点集。由图易知: 大多数取向与 SAR 飞行方向平行的建筑物都被有效提取出来, 而整体取向与 SAR 飞行方向成一定角度的建筑物未能被有效提取。

图 3(e) 为根据式(5)计算获得的方位对称性判决量, 对比图 3(a) 和图 3(e) 易知: 整体而言, 建筑物区域的方位对称性判决量较大, 无论其取向与 SAR 飞行方向是否平行; 而自然杂波区域判决量的数值较小, 与本文前面的分析结论相一致。在利用式(4)的判决准则提取第二类人造目标点的过程中, 需要合理选择式(4)中的判决门限  $Th$ 。  $Th$  越大, 则提取获得的人造目标点越少, 反之亦然, 已有方法也都为经验取值<sup>[6]</sup>。对于中、低分辨率极化 SAR 图像, 更为关注人造目标 ROI 区域的整体分布, 此时可设置较低的判决门限, 以保证提取获得更多的人造目标点, 以形成一定像素规模的 ROI 区域。不失一般性, 选择  $Th = 0.5$ , 图 3(f) 即为此时对应的人造目标最终提取结果, 提取的人造目标如图中白色像素点所示。对比图 3(a) 及图 3(f) 易知, 经过本文方法处理后, 不仅整体取向与 SAR 飞行方向平行的人造目标被有效地提取出来, 即便整体取向与 SAR 飞行方向成一定角度的目标也获得了较好的提取效果, 目标提取

数量大为增加。而且,在提取性能提高的前提下,并未引入过多的杂波虚警,提取效果明显优于传统的仅利用散射机理特征的方法。实验结果也表明,当  $Th$  在一定范围内取值时,本文方法最终的提取结果会略有差异,但都优于仅基于散射机理特征的提取结果。因此,本实验即充分验证了本文方法的有效性和优良性能。

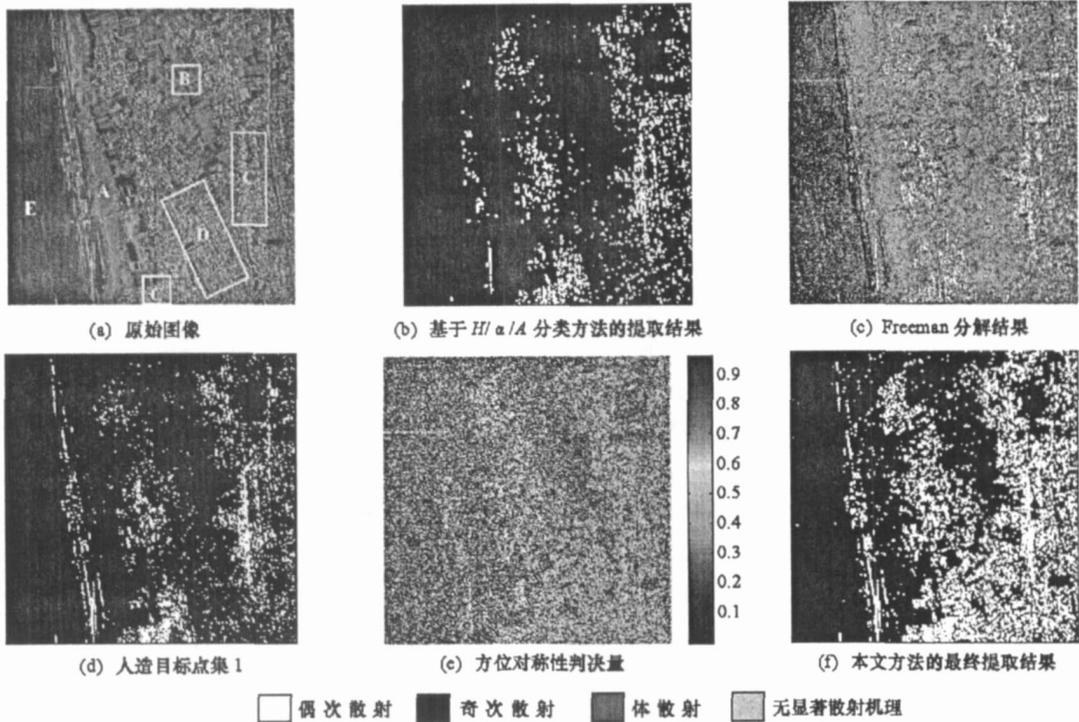


图 3 已有方法及本文方法的人造目标提取结果对比

Fig. 3 Comparison of the traditional and novel extraction methods

## 4 结论

本文研究了极化 SAR 图像人造目标提取问题,针对已有提取方法难以提取具有不同极化特征目标的不足,提出了一种基于散射机理分类与方位对称性判决的提取新方法。通过融合散射机理分类及方位对称性判决,提高了人造目标提取的准确性及完整性,利用 PI-SAR 全极化 SAR 实测数据验证了该方法的有效性及其优良性能。需要说明的是,在方位对称性判决过程中,为满足自动化程度高、实用性好的图像解译系统的实际需要,本文门限的设置仅参考已有的经验值进行选取,这也是非监督目标提取方法通常的处理方法。在条件允许下,通过有监督的学习和训练等方法可以获得更为合理的门限取值。

## 参考文献:

- [1] Yu Y J, Huang S J, Torre A. Development of an Automatic Target Detection and Characterisation System in Polarimetric SAR Images[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995(3): 1822-1824.
- [2] Lombardo P, Sciotti M, Pellizzeri T M, et al. Optimum Model-based Segmentation Techniques for Multi-frequency Polarimetric SAR Images of Urban Areas[J]. IEEE Trans. on GRS, 2003, 41(9): 1959-1975.
- [3] Sauer S, Famil L F, Reigber A, et al. Characterisation of Building Using Polarimetric Interferometric Multiple Track L-band SAR Data[C]// 2005 European Radar Conference, Oct. 2005: 205-208.
- [4] Van Zyl J J. Unsupervised Classification of Scattering Behavior Using Radar Polarimetry Data[J]. IEEE Trans. on GRS, 1989, 27(1): 36-45.
- [5] Lee J S, Grunes M R, Pottier E, et al. Unsupervised Terrain Classification Preserving Polarimetric Scattering Characteristics[J]. IEEE Trans. on GRS, 2004, 42(4): 722-731.
- [6] Moriyama T, Uratsuka S, Umehara T, et al. A Study on Extraction of Urban Areas from Polarimetric Synthetic Aperture Radar Image[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004(9): 703-706.
- [7] Cloude S R, Pottier E. A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry[J]. IEEE Trans. on GRS, 1996, 34(2): 498-517.
- [8] Freeman A, Durden S L. A Three-component Scattering Model for Polarimetric SAR Data[J]. IEEE Trans. on GRS, May 1998, 36(3): 963-973.
- [9] Novak L M, Halversen S D, Owirka G J, et al. Effects of Polarization and Resolution on the Performance of a SAR Automatic Target Recognition System[J]. The Lincoln Laboratory Journal, 1995, 8(1): 49-67.
- [10] Cloude S R, Pottier E. An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR[J]. IEEE Trans. on GRS, 1997, 35(1): 68-78.