

文章编号:1004-9037(2014)04-0603-06

基于 Otsu 与海域统计特性的 SAR 图像海陆分割算法

陈 祥 孙 俊 尹奎英 于俊朋

(南京电子技术研究所,南京,210039)

摘要:合成孔径雷达图像海陆分割在海面目标检测、海岸线提取等海洋应用方面具有重要的意义。针对合成孔径雷达图像的特点,本文提出了粗阈值与精确阈值相结合的海陆分割算法,并提供了一套完整的海陆分割方案。首先利用改进的 Otsu 法计算粗阈值,获得大致海域范围;然后根据海域统计特性近似高斯分布的特点,在分析了高斯分布统计特性的基础上,结合粗阈值分割结果,提出了计算出精确的分割阈值的方法,进而获得准确的海陆分割图像;最后通过去除杂散点进一步完善分割结果。实验结果表明,本文提出的方法具有较高的处理精度和较快的处理速度。

关键词:合成孔径雷达;海陆分割;Otsu 法;高斯分布

中图分类号:TN957.52

文献标志码:A

Sea-Land Segmentation Algorithm of SAR Image Based on Otsu Method and Statistical Characteristic of Sea Area

Chen Xiang, Sun Jun, Yin Kuiying, Yu Junpeng

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing, 210039, China)

Abstract: The sea-land segmentation of SAR image is important in the marine applications, such as target detection, coastline extraction, etc. According to the characteristics of SAR image, this paper puts forward a threshold segmentation algorithm combining rough threshold with accurate threshold, and provides a complete set of sea-land segmentation scheme. Firstly, Otsu method is used to calculate a rough threshold, and then the rough sea area can be obtained. Secondly, according to the feature that statistical characteristic of sea area similar to Gauss distribution, an accurate threshold can be calculated on the basis of rough threshold segmentation, then the accurate sea-land segmentation image can be obtained. Finally, the segmentation result can be improved by the operation of removing speckle. The experiment results show that the proposed algorithm has high processing precision and quick processing speed.

Key words: synthetic aperture radar(SAR); sea-land segmentation; Otsu method; Gauss distribution

引 言

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)图像海陆分割是利用 SAR 图像对沿海区域的海面目标进行检测的重要步骤之一;同时,通过海陆分割获得的海岸线信息可以应用于自动导航、目标定位、地图绘制等诸多领域。因此,海陆分割技术的发展长期以来一直受到人们的关注。但是,利用 SAR 图像进行海陆分割需要克服很多方面的

问题。首先,由于合成孔径雷达的成像机理以及海风、海浪的影响,海面的回波信号有时甚至大于陆地地区的回波信号,使得海洋与陆地的对比度较弱,边界不清晰。其次,由于 SAR 图像的成像过程和内容具有特殊性,成像的过程产生了严重的相干斑噪声,给后继分割处理带来很大的干扰^[1]。

20 世纪 80 年代以来,国内外提出了多种海陆分割的方法。这些方法可以大致分为以下几种^[2]: 阈值分割算法、边缘检测分割算法、区域生长和分裂合并的分割算法、Markovian 分割算法、水平截

集算法等。这几种算法各有各的优缺点,往往需要根据实际情况选择合适的算法。阈值法^[3]是一种常用的并行区域分割技术,具有计算简单、速度快等优点,但是对噪声较敏感,阈值较难确定。边缘检测法^[4]较直观,简便易行,但是有时不能够提供较好的区域结构,往往不能得到很好的分割效果。区域生长和分裂合并法对复杂图像的分割效果较好,但是一般需要人工给定种子点,是一种半自动分割算法,而且当目标较大时,分割速度较慢。Markovian 分割法^[5]基于 Markov 随机场模型,引入了模拟退火法计算,存在计算量较大等问题。水平截集算法^[6]基于活动轮廓法检测边界的思想,计算变量较多、迭代方式复杂,因此检测速度较慢。

随着合成孔径雷达分辨率的不断提高,SAR 图像将越来越大,由于计算量大导致的处理速度慢的问题会变得越来越明显,处理精度与处理速度的矛盾将日益突出。因此,本文在研究了这些分割算法的后,本文提出了一种阈值分割算法,并相应提供了一套切实可行的全自动海陆分割方案,保证处理速度的同时可以获得较高的分割精度。

1 海陆分割算法及方案

考虑既要保证分割精度又要保证分割速度,本文提出如图 1 所示的 SAR 图像海陆分割方案流程。其中,预处理部分主要包括图像均衡、相干斑抑制等;阈值确定是整个海陆分割的核心部分,即计算出合理的分割阈值;图像分割部分即通过阈值进行二值分割,取与图像边界连接的最大连通域确定为海域,确定海陆二值图像;去除杂散点部分则用于去除海域中剩余的一些大小杂散点。此时,已完成海陆分割的目的,得到了海陆二值图像。若要确定海岸线,则只需要对其进行边界跟踪即可。因此,本文主要介绍阈值确定与去除杂散点两个关键步骤。

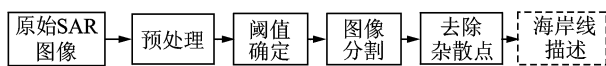


图 1 SAR 图像海陆分割流程图

Fig. 1 Flow diagram of SAR image sea-land segmentation

1.1 阈值确定

分割阈值的确定分为粗阈值确定和精确阈值确定两部分。通过改进的 Otsu 法确定粗阈值,由粗阈值分割后获得大致的大海域。然后,由根据海域的统计特性分析得出的精确阈值公式,可计算出最

终的精确阈值。图 2 为阈值确定的具体流程。

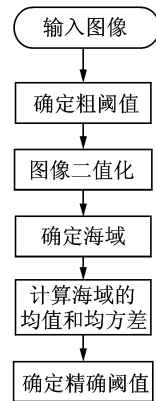


图 2 分割阈值确定流程

Fig. 2 Flow diagram of segmentation threshold determination

1.1.1 粗阈值确定

1.1.1.1 最大类间方差算法

最大类间方差算法(即 Otsu 法)是日本人大津于 1979 年提出^[7]。Otsu 法利用图像的灰度直方图,以背景与目标的类间方差最大为阈值选取准则,计算图像的最佳分割阈值。该算法具有计算简单、稳定有效等优点。

设一幅图像的灰度范围为 $0 \sim L-1$,灰度为 i 的像素个数为 n_i ,总的像素个数为 N ,则灰度 i 的出现概率为 $p_i = n_i/N$ 。假设阈值 T 将灰度分为两类: $C_0 = \{0, 1, \dots, T-1\}$ 和 $C_1 = \{T, \dots, L-1\}$,其出现的概率分别为 $P_0(T)$ 和 $P_1(T)$,灰度均值分别为 u_0 和 u_1 。定义类间方差为

$$\sigma_B^2 = P_0(u_0 - u)^2 + P_1(u_1 - u)^2 \quad (1)$$

式中: $P_0 = \sum_{i=0}^{T-1} p_i$; $P_1 = \sum_{i=T}^{L-1} p_i = 1 - P_0$; $u_0 = \sum_{i=0}^{T-1} ip_i/P_0$; $u_1 = \sum_{i=T}^{L-1} ip_i/P_1$ 。 u 为整个图像的平均灰度,即 $u = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i = P_0u_0 + P_1u_1$ 。

最佳阈值 T 应使类间方差最大,即

$$T^* = \text{Arg} \max_{0 \leq T \leq L-1} (\sigma_B^2) \quad (2)$$

1.1.1.2 改进的最大类间方差算法

根据传统的 Otsu 法所求的最佳阈值是使目标类与背景类离图像中心最远时所对应的灰度值^[8]。对于 SAR 图像而言,具有场景大、边界模糊、存在大片阴影区域等特点,使得图像的中心不理想,从而导致求得的最佳阈值与实际需求相差较大,分割效果较差。因此,国内外研究者相继提出了很多的改进算法。本文采用由付忠良^[9]提出的基于图像方差信息的改进 Otsu 法,即用方差代替

Otsu 方法下的均值,最佳阈值 T 应符合

$$T^* = \text{Arg} \max_{0 \leq T \leq L-1} [P_0(\sigma_0^2 - \sigma^2)^2 + P_1(\sigma_1^2 - \sigma^2)^2] \quad (3)$$

$$\text{其中 } \sigma_0^2 = \sum_{i=0}^{T-1} (i - u_0)^2 p_i / P_0, \sigma_1^2 = \sum_{i=T}^{L-1} (i - u_1)^2 p_i / P_1, \sigma^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - u)^2 p_i$$

实验表明,改进的 Otsu 法具有更好的自适应性,不受灰度值的线性变化(图像的对比度变化)和平移变化(图像的亮度变化)的影响^[10]。应用改进的 Otsu 法计算粗阈值,此时与实际最佳分割阈值已比较接近,可以获得大致海域范围。

1.1.2 精确阈值确定

通过上文所述的改进 Otsu 法可以计算出粗略的分割阈值,根据此阈值可得到海陆二值化图像(陆地为 1,海洋为 0)。将此二值图像取反后,取与图像边界连接的最大连通域,将其确定为海域。此时,海域的大致范围基本确定,只是在海陆分界区域存在一定的偏差。因此,本文将通过海面背景的特性进一步确定精确的分割阈值。

由于海面杂波单元内包含大量的散射体且没有绝对占优的强散射体存在,根据中心极限定理,其合成回波应服从高斯分布。对于高分辨率雷达,由于杂波单元变小,包含的散射体数目减少,中心极限定理往往不再成立,使得海面杂波幅度分布表现出长“拖尾”特性。

因此,国内学者也相继提出用 K 分布等模型更好地拟合海杂波分布。但是,在海陆分割中,“拖尾”现象对分割的影响相对较小,因为其表现出的幅度分布将与陆地部分重叠。而且, K 分布等模型的计算复杂度相对较高。因此,本文假设海面背景符合高斯分布。

高斯分布的概率密度函数 $f(x)$ 如式(4)所示,累积分布函数 $F(x)$ 如式(5)所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (5)$$

式中: μ 为均值, σ^2 为方差, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布的分布函数。令 $t = (x-\mu)/\sigma$, 根据 $\Phi(\cdot)$ 的特性, x, t 与 F 的关系如表 1 所示。

由表 1 可知,随着阈值的增大,检测概率(将海洋区域准确地判定为海洋区域的概率)得到增加。但是分析可知,虚警率(将陆地区域错误地判为海洋区域的概率)也会同时增大。根据以上分析,海

陆分割的精确阈值 T 的具体计算公式如式(6)所示,式中 μ 和 σ 的定义如式(7)和式(8)所示。

表 1 高斯分布的累积分布函数 F 与 μ 和 σ 的关系

Table 1 Relationship between the CDF of Gauss distribution

F, μ and σ					
x	$\mu + \sigma$	$\mu + 1.5\sigma$	$\mu + 2\sigma$	$\mu + 2.5\sigma$	$\mu + 3\sigma$
t	1	1.5	2	2.5	3
$F(x)$	0.841	0.933	0.977	0.994	0.999

$$T = \mu + t\sigma \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x_j \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} (x_j - \mu)^2} \quad (8)$$

式中: M 为由粗阈值分割后确定的海域像素点个数, x_j 为海域中第 j 个像素点的灰度值。因此, μ 为海域的灰度均值, σ 为海域的灰度均方差。式(6)中,参数 t 为可调整的参数,经验值取 2,也可以根据海情略作变动, t 值与粗细阈值分割结果的关系如表 1 所示。由于 SAR 图像没有完全准确的海岸线,因此允许 t 值的波动。

应用上文所述的方法可计算出精确的分割阈值,利用此分割阈值对 SAR 图像进行分割便可获得较准确的海陆二值图像。但是,此时的结果还存在一定的问题,需通过下面的方法进一步处理。

1.2 杂散点去除

SAR 图像经过预处理和阈值分割后,取与图像边界连接的最大连通域,将其确定为海域,其他所有像素点确定为陆地,如此便可消除陆地上阴影区域的影响,但是海域内仍然存在较多的杂散点。此时,运用以下两步操作可消除海域内存在的大小杂散点,达到较好的去噪效果。

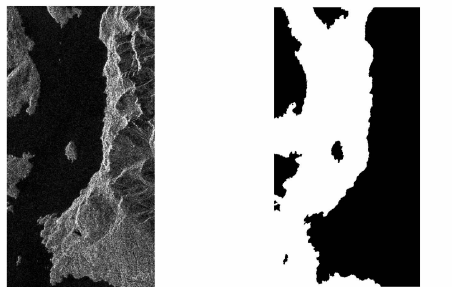
对于海域内存在的数量较多的细小杂散点,可以通过形态学处理中的开运算(即对图像进行先腐蚀再膨胀的过程,具有消除细小物体、在纤细处分离物体等作用)进行处理,便可将其消除。

对于海域内存在的数量较少但面积较大的杂散点(舰船包括在内),可通过面积特征去除此类杂散点。具体的面积阈值需要根据 SAR 图像的分辨率确定,从而在去除杂散点的同时保留海洋中岛屿的存在。

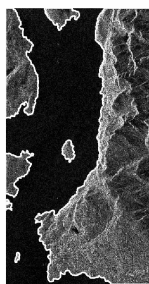
2 实验结果及分析

以一幅 3 m 分辨率,大小为 1600×3200 的 SAR 图像为例,图 3 给出了海陆分割的结果。图 3

(a)所示为原始 SAR 图像,图像中海洋区域存在大小岛屿,陆地区域存在山脉的阴影,右侧海岸线两侧海陆对比度较大,左侧海岸线两侧海陆对比度较小。图 3(b)所示为海陆分割结果,其中 0 代表陆地,1 代表海洋。图 3(c)所示为对图 3(b)进行边缘检测得到的海岸线(图中白色亮线部分),由图可见,本文所述的方法获得了较好的海陆分割效果。



(a) 原始SAR图像 (b) 海陆分割二值图像
(a) Original SAR image (b) Binary image



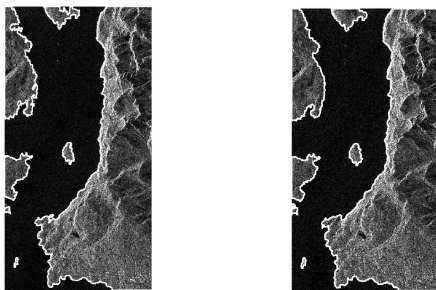
(c) 海岸线图像
(c) The coastline image

图 3 本文算法的海陆分割结果

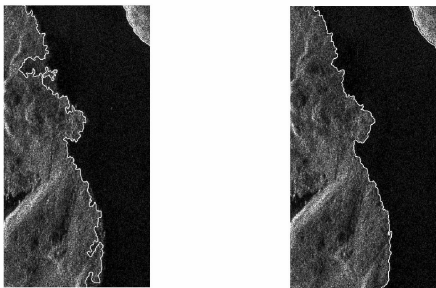
Fig. 3 Sea-land segmentation result with the algorithm of this paper

图 4(a)所示为使用双阈值 Otsu 法^[11]对图 3(a)所示原始图像进行海陆分割得到的结果,由图可见,由于右侧海岸线两侧海陆对比度较大,分割效果与图 3(c)基本一致;由于左侧海岸线两侧海陆对比度较小,分割效果明显出现偏差。图 4(b)所示为本文算法的分割结果,由图可见,分割获得的左右侧海岸线都比较贴合实际海岸线。图 4(c)和图 4(d)所示分别为两种算法分割结果的局部区域。图 4(b)中,由于分割阈值偏大,导致陆地部分一些灰度较小的区域被分割进海洋部分。图 4(c)中由于分割阈值恰当,分割效果较好。

为客观比较上述两种分割算法的实际性能,提出分割品质的定义^[11]如式(9)所示,其融合考虑了虚警率与漏警率,最优值为 1。则图 4(a)和图 4(b)所示分割结果的分割品质分别为 99.73%(双



(a) 双阈值Otsu分割结果 (b) 本文算法分割结果
(a) Segmentation result with double threshold Otsu algorithm (b) Segmentation result with the algorithm of this paper



(c) 双阈值Otsu局部区域 (d) 本文算法局部区域
(c) Local area of the result with double threshold Otsu algorithm (d) Local area of the result with the algorithm of this paper

图 4 本文算法与双阈值 Otsu 法分割比较

Fig. 4 The comparison of the algorithm of this paper and double threshold Otsu algorithm

阈值 Otsu 算法)和 99.97%(本文算法)。由于图像中的海域面积比较大,虽然分割品质都达到了 99%以上,但相差的像素数非常明显,本文算法的分割品质明显优于双阈值 Otsu 算法。因此,本文算法在处理速度与双阈值 Otsu 法相当的情况下(运行时间都在 4 是 s 左右),获得了较好的处理精度。

$$quality = \frac{\text{提取的水域像素数}}{\text{实际像素个数} + \text{提取的虚假像素个数}}$$

图 5(a)所示为一幅海陆对比度较弱的 SAR 图像,大小为 600×500。图 5(b)所示为使用种子点增长算法^[12](此处的种子点增长算法属于半自动的区域生长法的分割方式,通过已知的海域确定下一步分割阈值,进行逐个像素判断分割)得到的分割结果;图 5(c)所示为本文所述算法得到的分割结果。由图可知,两种方法分割效果基本一致。在主频为 2.99 GHz,内存为 2 GB 的 PC 上处理时间分别为 26.3 s(种子点增长算法)和 0.9 s(本文算法),因此,本文算法在处理精度与种子点增长法相当的情况下,具有较快的处理速度。

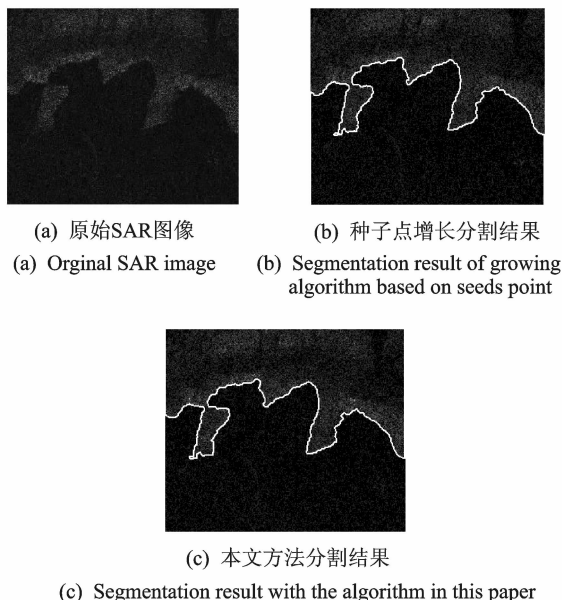


图5 本文方法与种子点增长算法分割比较

Fig. 5 The comparison for the algorithm of this paper and growing algorithm based on seeds point

对于大小为 $M \times M$ 像素的 SAR 图像,使用以上所述 3 种算法,采用未经优化的 Matlab 代码,在主频为 2.99 GHz,内存为 2 GB 的 PC 上处理的时间对比如图 6 所示。由图可知,种子点增长算法的时间明显过长,本文算法与双阈值 Otsu 算法都比较短,这与理论分析相一致。即由于种子点增长算法逐个像素处理及其种子搜寻方式的原因,随着图像尺寸的增长,其处理时间的增加将非常明显。但是,由于本文算法与双阈值 Otsu 算法都基于全局阈值,因此即使图像尺寸变大,其处理时间的增加相对较小。综上所述,相比其他分割两种算法,本文算法的同时具有分割精度高、处理时间短的优点,更加符合实际应用需求。

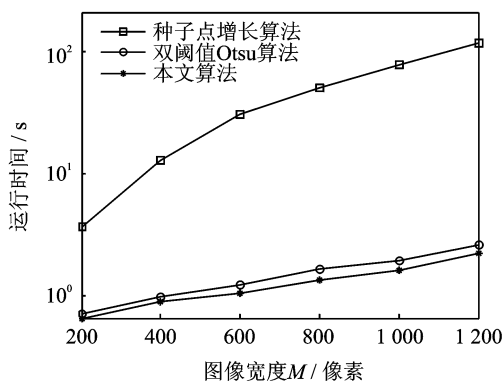


图6 各算法分割速度比较

Fig. 6 The comparison of segmentation speeds

3 结束语

本文提出了基于 Otsu 法与海域统计特性的海陆分割算法及相应的实现方案,其原理简单,易于实现。利用改进的 Otsu 法计算粗阈值,从而分割获得大致海域范围。然后根据海域统计特性近似高斯分布的特点,确定了精确的分割阈值。最后通过去除杂散点等操作获得准确的海陆分割图像。通过与双阈值 Otsu 法和种子点增长算法的分割效果相比较,表明本文方法获得了较好的处理速度与处理精度。海陆分割后的二值图像以及海岸线信息都有较高的实用价值。

参考文献:

- [1] Oliver C. Understanding synthetic aperture radar images[M]. Boston London: Arrech House, 1998:88-204.
- [2] 周树道,王敏,叶松. 基于 SAR 图像的海洋舰船目标检测技术[J]. 微计算机应用,2010,31(2):61-65. Zhou Shudao, Wang Min, Ye Song. Ocean ship target detection technology based on SAR Image[J]. Microcomputer Applications,2010,31(2):61-65.
- [3] 尹奎英,刘宏伟,金林. 快速的 Otsu 双阈值 SAR 图像分割法[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,41(6):1760-1765. Yin Kuiying, Liu Hongwei, Jin Lin. Fast SAR image segmentation method based on Otsu adaptive double threshold[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2011,41(6):1760-1765.
- [4] Kekre H B, Saylee Garge. SAR image segmentation using co-occurrence matrix and slope magnitude[J]. International Conference on Advances in Computing, Communication and Control, 2009,28(6):368-372.
- [5] Descombes X, Moctezuma M, Maitre H. Coastline detection by a Markovian segmentation on SAR images[J]. Signal Processing, 1996(5):123-132.
- [6] 东野长磊,郑永果,苏杰. 基于 Chan-Vese 模型的 SAR 图像分割[J]. 数据采集与处理,2012,27(2):37-42. Dongye Changlei, Zheng Yongguo, Su Jie. SAR image segmentation based on Chan-Vese Model[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012,27(2):37-42.
- [7] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1):62-66
- [8] Arora S, Acharya J, Verma A. Multilevel thresholding for image segmentation through a fast statistical

- recursive algorithm[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(11):119-125.
- [9] 付忠良. 图像阈值选取方法—Otsu 方法的推广[J]. 计算机应用, 2000, 20 (5):37-39.
Fu Zhongliang. The method for image threshold selection—the popularization of Otsu's method [J]. Computer Applications, 2000, 20 (5):37-39.
- [10] 万磊, 白洪亮, 戴军. 扩展的 Otsu 最优阈值图像分割的实现方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24 (3):326-329.
Wan Lei, Bai Hongliang, Dai Jun. Extended optimal Otsu thresholding method of image segmentation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24 (3):326-329.
- [11] 安成锦, 牛照东, 李志军. 典型 Otsu 算法阈值比较及其 SAR 图像水域分割性能分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9):2215-2219.
An Chengjin, Niu Zhaodong, Li Zhijun. Otsu threshold comparison and SAR water segmentation result analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(9):2215-2219.
- [12] 谢明鸿, 张亚飞, 付琨. 基于种子点增长的 SAR 图像海岸线提取算法[J]. 电脑开发与应用, 2006, 19 (6):2-6.
Xie Minghong, Zhang Yafei, Fu Kun. Coastline detection algorithm of SAR image based on seeds growing [J]. Computer Development and Application, 2006, 19(6):2-6.
- 作者简介:**陈祥(1987-),男,硕士研究生,研究方向:SAR 图像处理, E-mail: southeastchen@yahoo.com.cn; 孙俊(1974-),男,博士,研究方向:雷达模式识别及数据处理; 尹奎英(1977-),女,博士,研究方向:SAR 图像解译; 于俊朋(1984-),男,硕士,研究方向:SAR 成像及图像处理。

