

基于 CFAR 的 RADARSAT-1 南极 裸岩目标信息提取

朱婷婷¹ 李 斐^{1,2} 张胜凯² 袁乐先²

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

摘 要:裸岩分布信息是获取南极冰厚 0 等值线的重要方法和手段,同时也是极地遥感地面验证的重要数据,因而自动提取南极裸岩信息具有重要的研究意义。采用对岩石和冰川具有较好对比度的 RADARSAT-1 南极区域合成孔径雷达数据,基于恒虚警率(CFAR)的方法,实现了南极裸岩目标信息的自动化提取。该方法的研究以四种杂波分布模型为前提,从而分析不同分布模型的抗噪性能,并通过卡方检验准则验证了四种方法的有效性;在典型的实验样区上比较不同 CFAR 方法的裸岩检测性能,最终选定最优参数用于南极洲裸岩信息的自动检测。两组实验结果表明,采用 CFAR 结合 Weibull 分布的方法,南极山脉的裸岩提取精度可达 80% 以上并将错检率控制在 8% 以下,能够较为精确地提取裸岩信息。

关键词:南极;裸岩提取;SAR;CFAR;统计分布

中图法分类号:TP722;P208 **文献标志码:**A

南极山脉是南极洲重要的地表覆盖,而裸岩的覆盖率不足 1% 却是研究南极古气候以及全球气候变化重要的指示性地物,因而裸岩的目标信息提取具有重要的研究意义^[1,2]。通过遥感技术可监测到南极洲地表裸露的岩石,可为南极地形研究提供冰厚为 0 的等值线信息^[3]。微波遥感数据因其具有全天时、全天候、强穿透性的特点在南极复杂的气候环境中发挥重要作用^[4]。

RADARSAT-1 数据可用于提取南极大陆冰架的形态特征、裸岩信息以及海岸线等特征^[5]。对于南极山脉区域 SAR 图像中,裸岩具有较强的后向散射回波,SAR 图像中表现为明显的亮度区域,而其周围的冰雪区域的表面散射亮度值分布较为均匀,根据裸岩特征在后向的散射特性,采用恒定虚警率(CFAR)方法提取 RADARSAT-1 南极裸岩信息。然而南极洲大范围高分辨的 SAR 影像数据比较稀缺,且在高分辨率数据中,裸岩的类间差异较大,难以用单一模型和特征进行描述。为了提高 SAR 影像在岩石目标信息解译能力,本文提出基于 CFAR 的方法提取南极裸岩信息,并

对两个样区的裸岩提取结果进行精度验证。同时比较了不同 CFAR 方法的有效性,从不同杂波分布模型中选取最优分布模型,对比各种分布模型的目标检测精度。实验结果表明,基于 Weibull 分布的 SO-CFAR 方法的南极裸岩信息提取的结果表现最优。

1 基于 CFAR 南极裸岩信息提取算法

首先,假设 $p(x)$ 为 SAR 图像杂波分布模型的概率密度函数, P_{fa} 为给定的虚警率,则自适应检测阈值可以通过方程(1)求解^[6-8]:

$$1 - P_{fa} = \int_0^{I_c} p(x) dx \quad (1)$$

1.1 算法描述

基于 CFAR 的南极裸岩提取算法主要包括以下 3 个关键步骤。

1) 确定背景杂波的分布模型。首先基于已知的分布模型对图像进行表达,估计分布参数,然

后结合相应的最大信息熵准则作为评估标准,选取最小误差估计的分布模型作为背景杂波的统计描述。后续的实验首先用 Weibull 分布进行背景杂波建模。

2) 分布参数估计。确定背景杂波分布模型后,需要结合测试数据实现对统计分布模型的参数估计,采用对数累计^[9](MoLC)的方法来估计分布模型参数。对于随机变量 $x \in (0, +\infty)$ 的概率密度函数 $p(x)$,其梅林变换具有如下的形式:

$$\varphi(s) = MT[p](s) = \int_0^{+\infty} x^{s-1} p(x) dx \quad (2)$$

对式(2)求 $s=1$ 处的导数,可以得到变量 x 的对数矩估计:

$$l_i = \left. \frac{d^i \varphi(s)}{ds^i} \right|_{s=1} = \int_0^{+\infty} (\ln x)^i p(x) dx, \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots$

对式(2)取对数并求其在 $s=1$ 处的导数,可以得到变量 x 的对数累积量:

$$k_i = \left. \frac{d^i \ln \varphi(s)}{ds^i} \right|_{s=1}, i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

表 1 分布模型及对数累积量

Tab. 1 Distribution Models and Corresponding MoLC

分布模型	模型参数	对数累积量
瑞利分布	σ	$k_1 = (\ln 2 + \psi(1)) / 2 + \ln \sigma$
Gamma 分布	μ	$k_1 = \psi(L) - \ln L + \ln \mu$
对数正态分布	μ, σ	$k_1 = \mu \quad k_2 = \sigma^2$
Weibull 分布	b, c	$k_1 = \ln b - \frac{r}{c} \quad k_2 = \frac{\pi^2}{6c^2}$

因此,对于不同的统计分布模型,其对应的 MoLC 参数估计如表 1 所示。同时采用的评估准则为皮尔逊卡方检验准则^[10-11],用于检验观测数据和假设分布的拟合程度,检验的统计量表示为:

$$q = \sum_{i=1}^K \frac{(n_i - nq_i)^2}{nq_i} \quad (5)$$

其中, K 表示 n 个观测数据划分的统计检验子区间的个数, q_i 表示假设分布模型在第 i 个子区间的概率, n_i 表示第 i 个子区间中观测数据的个数。检验统计量 q 近似服从于 $\chi^2(K-s-1)$ 分布, χ^2 的自由度不依赖于观测数据的个数,而是取决于 K 和假设分布模型中未知参数个数 s ,表示为 $K-s-1$,因此观测数据服从于假设分布的概率可表示为:

$$P = \Pr\{\chi^2(K-s-1) > q\} = 1 - \Pr\{\chi^2(K-s-1) \leq q\} \quad (6)$$

3) CFAR 方法选择。均值类 CFAR 主要有以下 3 种策略:① 单元平均 CFAR(CA-CFAR);② 单元选大 CFAR(GO-CFAR);③ 单元选小 CFAR(SO-CFAR),而统计类 CFAR 常用的为有序统计量 CFAR(OS-CFAR)。本文实现了上述 4 种 CFAR 方法,分别从算法选择、滑窗性能、分布模型及参数估计方面进行了对比分析。

此外,南极的裸岩目标呈现出分布式特征,对于 CFAR 检测的二值结果,对应的裸岩像素难以形成联通区域,因此,本文通过聚类的后处理得到裸岩的提取结果。聚类过程先采用滤波器去除孤立点和小区的离散点,然后通过形态学滤波器进行后处理,最后采用尺寸滤波器进一步消除虚警像素。

1.2 框架

基于 CFAR 方法的南极裸岩信息提取流程如图 1 所示。首先对图像中的任意一个像素的背景杂波统计分布建模,通过卡方检验准则选取最佳的统计模型对背景杂波进行描述;其次,在模型参数估计中,结合基于 MoLC 的方法用于确定统计模型的分布参数;然后,在给定虚警率的前提下计算 CFAR 阈值;最后遍历整幅图像并将像素点检测结果聚类从而得到最终的检测结果。

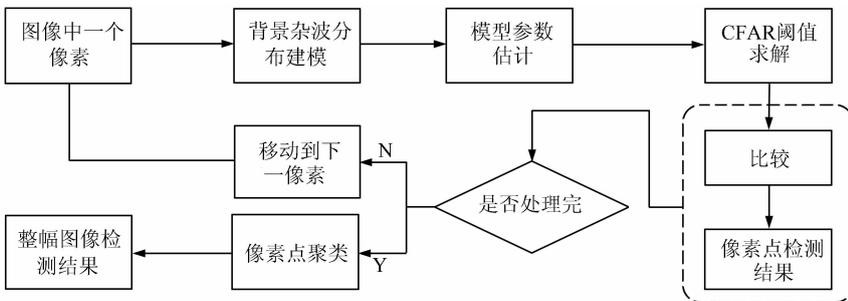


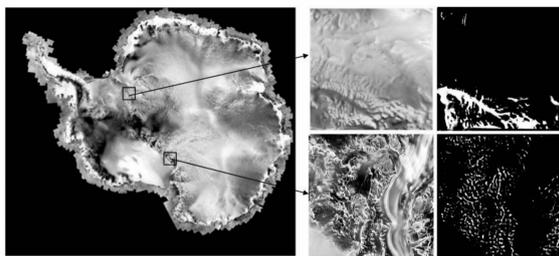
图 1 基于 CFAR 方法南极裸岩信息的提取流程

Fig. 1 Framework of Antarctica Rock Outcrop Extraction Based on CFAR Method

2 实验与讨论

2.1 实验数据描述

RADARSAT-1 数据是能够覆盖全南极洲的高分辨率 SAR 卫星数据,实验中使用的数据是美国伯德极地研究中心实验室的分辨率为 125 m 的 RADARSAT-1 数据,如图 2(a)所示。实验数据是从 RADARSAT-1 的南极洲全图数据中选取两个典型样区,两组实验样区大小均为 1 050 像素 \times 1 050 像素,左上角行列号分别为(21 991, 12 992)和(18 118, 19 503),两个样区分别位于南极山脉北部和中部地区,如图 2(b)。为了验证裸岩信息的提取效果,利用南极数据库提供的裸岩分布信息结合 RADARSAT-1 数据目视解译勾画出两个样区的地面验证参考影像,如图 2(c)所示。



(a) 全南极洲覆盖图 (b) 实验区域 (c) 参考影像

图 2 南极洲大陆裸岩实验数据

Fig. 2 Datasets of Antarctica Rock Outcrops

2.2 典型区域分析

选择 Weibull 分布的杂波分布模型,基于分布模型选择的 CFAR 南极山脉裸岩提取算法,选择 Weibull 分布的杂波分布模型用于对背景杂波建模。为了定量评价基于 Weibull 分布的 CFAR 算法的性能,和确定南极裸岩信息提取最佳的杂波分布模型,本文设计了两组典型实验样区的对比实验。第一组对比实验是在假设背景噪声服从 Weibull 分布的前提下,比较了 4 种 CFAR 方法的检测性能,同时分析了滑窗大小对检测性能的影响。第二组实验比较不同杂波分布模型的 SO-CFAR 检测结果,验证最优背景杂波分布算法的有效性。

1) 对比实验 1 结果

对比实验 1:为了选取最恰当的 CFAR 用于裸岩信息提取,实验基于背景杂波服从 Weibull 分布的假设,比较了 4 种 CFAR 方法的检测性

能。实验中,滑动窗口的大小为 36 像素 \times 36 像素,背景杂波窗口宽度为 5 个像素,滑窗的中心宽度为 4 个像素。

为了保证在多目标的情况下 CFAR 算法的有效性,本文设计的实验在假设背景噪声服从 Weibull 分布的前提下,基于均值类 CFAR 以及统计类的 CFAR 上设计的实验。实验结果如图 3 所示。从目视效果分析,两组数据的 CA-CFAR 和 OS-CFAR 方法出现较大的漏检现象,而 GO-CFAR 方法错检的裸岩比较多,采用 SO-CFAR 方法能够检测出更加完整的南极横断山脉裸岩,同时对于左上角的起伏不明显的裸岩也能检测出来,相比于其他的方法具有一定优势。因此,在后续的实验中都选取 SO-CFAR 的方法进行实验。为了进一步分析滑窗大小对检测性能的影响,实验中基于背景杂波服从 Weibull 分布的假设,比较了 4 种 CFAR 方法的检测性能。如图 4 所示,本文选择的窗口分析的范围是从 16 到 50,窗口大小为 36,基于 Weibull 分布的 4 种方法在两组数据集表现的检测率和虚警率的精度最高,因而选窗口 36 的大小为最佳窗口参数。

2) 对比实验 2 结果

对比实验 2:在统一的 CFAR 方法前提下采用不同的统计分布模型,用于确定最佳的杂波分布模型。在两组实验中,根据实验 1 的结论,滑动窗口的大小为 36 像素 \times 36 像素,背景杂波窗口的宽度为 5 个像素,滑窗的中心宽度为 4 个像素。为了探究不同杂波分布对于南极山脉裸岩检测的影响,结合实验 1 的结论,在选定 SO-CFAR 的前提下,比较不同杂波分布模型对裸岩的检测性能。实验结果如图 5 和表 2 所示。从图 5 中可以看出,检测结果在第一个实验区差异较为明显,基于 Weibull 的杂波分布模型存在一定的优势。

表 2 不同杂波分布模型 CFAR 裸岩检测结果

Tab. 2 Detection Accuracy Based on So-CFAR Method with Different Clutter Distribution Model

数据	方法	正确率/%	完整率/%
实验 1	瑞利分布	80.30	32.47
	Gamma 分布	82.47	81.59
	对数正态分布	79.53	57.84
	Weibull 分布	86.00	84.23
实验 2	瑞利分布	86.34	54.07
	Gamma 分布	82.18	83.39
	对数正态分布	78.44	77.54
	Weibull 分布	88.09	87.28

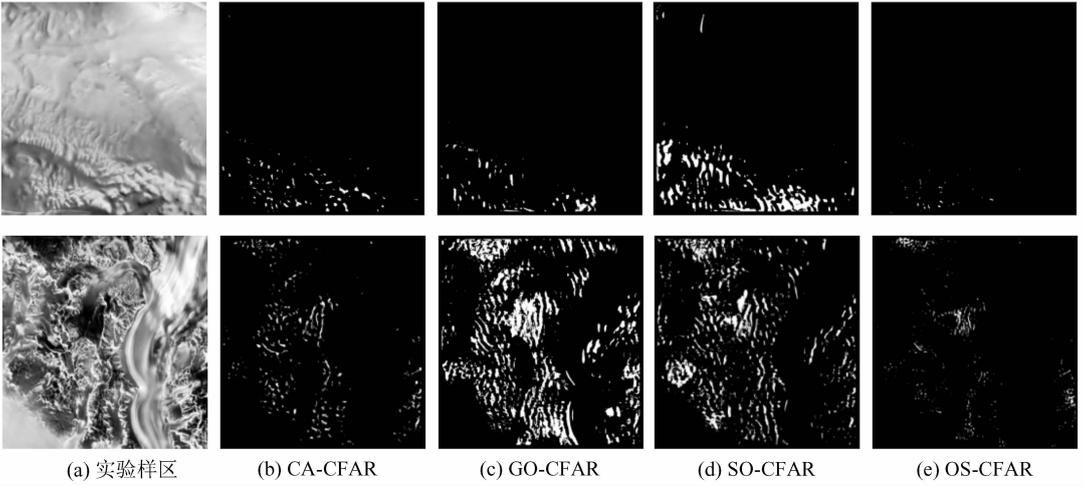


图 3 不同 CFAR 方法的裸岩提取结果

Fig. 3 Rock Outcrop Result of Different CFAR Methods

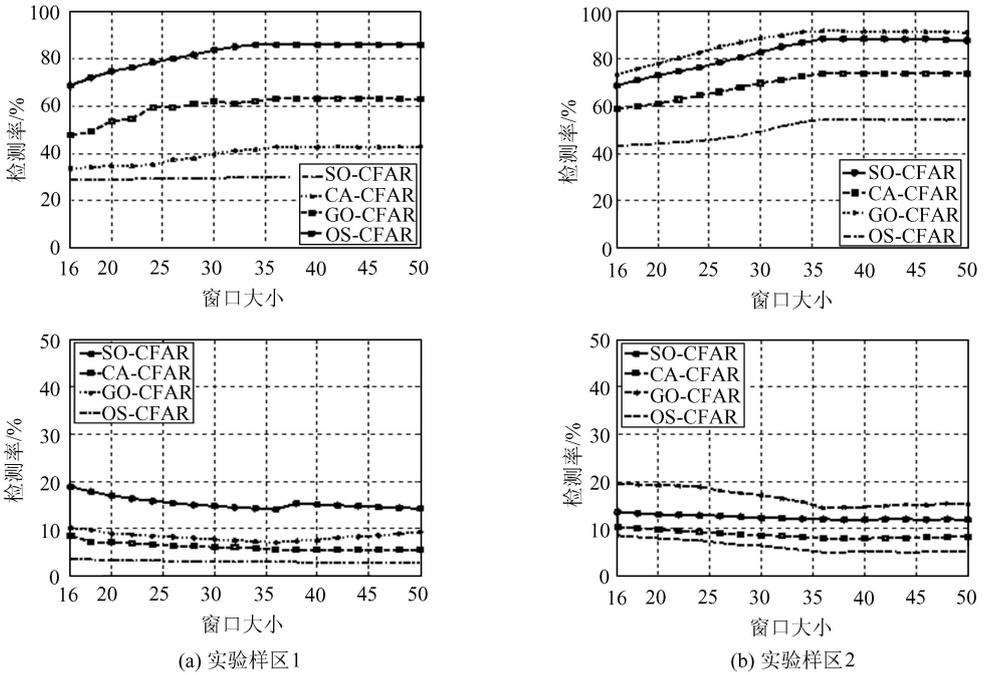


图 4 窗口敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity of Window Size on CFAR

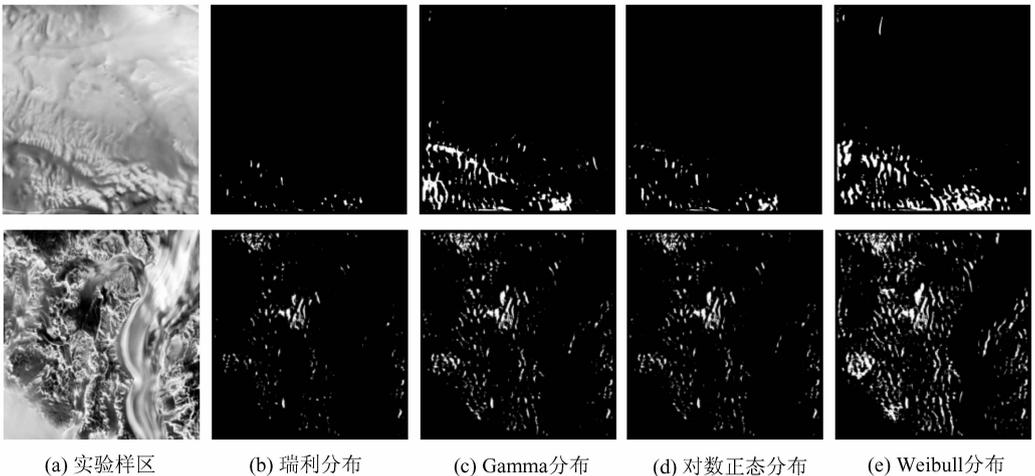


图 5 不同杂波分布的 SO-CFAR 南极裸岩提取结果

Fig. 5 Antarctica Rock Outcrops Extraction Results on SO-CFAR with Different Clutter Distribution Model

在第二个实验区,难以区分4种杂波分布模型的性能差异。为了便于比较,本文采用正确率和完整率对南极裸岩的提取结果进行定量评价,完整率是检出的正确的目标的像素与原图像中属于南极裸岩的总像素之和的比值;准确率是检测出的正确裸岩的像素之和与检测出的可能的目标总像素之和的比值。如表2所示,就目视效果而言,基于Weibull分布的SO-CFAR算法具有较高的检测正确率和完整率,能够检测出更完整的南极山脉的裸岩形态,该方法可以更好地将检测出的裸岩片段连接成整体,目标的结构信息保持的比较好,使检测结果更接近真实的裸岩形态,说明Weibull分布性能最优。为了探究不同分布模

型的抗噪性能,给出随着虚警率变化的敏感性分析结果,展现其不同分布模型的检测率和误检率,从而生成不同模型的抗噪特性曲线。虚警率设置范围从 10^{-8} 至 10^{-4} ,结果如图6所示。当虚警率较低时,几种分布模型的错检率比较小,但是随着虚警率提高,检测率和错检率都相应地变大,而Weibull分布的错检率最低,抗噪性能更好。当虚警率控制在 10^{-6} 时,不同杂波分布模型的虚警率均高于70%,错检率低于10%,达到裸岩目标提取精度要求;当虚警率大于 10^{-5} 时,随着虚警率的提高,检测率提升不是很明显,实验中将虚警率设置为 10^{-6} ,基于CFAR的南极裸岩信息提取的最优参数得以确定。

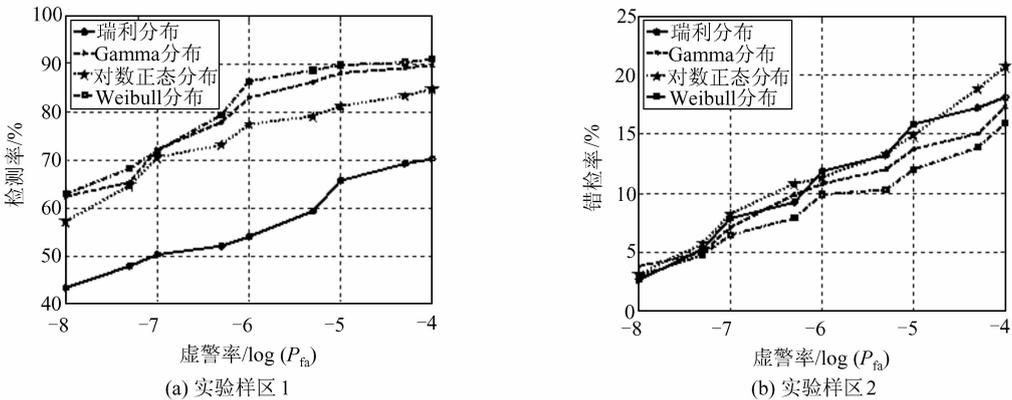


图6 抗噪特性曲线

Fig. 6 Characteristic Curves of Anti-Noise

3 结语

基于南极区域RADARSAT-1的SAR数据采用CFAR的方法自动检测南极山脉裸岩信息,考虑南极地区复杂多变的地形条件与气候条件,在背景杂波建模时,选取背景杂波的最佳描述分布模型,实验结果表明,基于Weibull分布的SO-CFAR方法能够有效地提取南极裸岩信息。裸岩的分布信息对于极地岩矿研究具有重要的意义,同时也是全球数值气候模拟的重要地面参数。未来的工作可以将提取的南极裸岩分布信息与对应的GPS数据相结合用于南极冰厚研究,并作为其他遥感传感器的定标或者配准的控制点,另外也可作为基于测高数据的南极冰盖变化信息研究的验证数据。同时考虑结合高光谱数据可以确定该区域的岩质形态,判断南极裸岩区域的岩貌状态。

参考文献

[1] Hall K, Andre M F. New Insights into Rock

Weathering from High-frequency Rock Temperature Data: An Antarctic Study of Weathering by Thermal Stress[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(1): 23-35

[2] E Dongchen, Zhang Xin, Wang Zemin, et al. Satellite Monitoring of Blue-ice Extent in Grove Mountains, Antarctica[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1 009-1 012 (鄂栋臣,张辛,王泽民,等. 利用卫星影像进行南极格罗夫山蓝冰变化监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011, 36(9): 1 009-1 012)

[3] Fretwell P, Pritchard H D, Vaughan D G, et al. Bedmap2: Improved Ice Bed, Surface and Thickness Datasets for Antarctica[J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(1):375-393

[4] Liu Hongxing, Jezek K C. A Complete High-resolution Coastline of Antarctica Extracted from Orthorectified Radarsat SAR Imagery[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70(5): 605-616

[5] Jezek K C. Glaciological Properties of the Antarctic

- Ice Sheet from RADARSAT-1 Synthetic Aperture Radar Imagery[J]. *Annals of Glaciology*, 1999, 29(11): 286-290
- [6] Jezek K C. Glaciological Properties of the Antarctic Ice Sheet from RADARSAT-1 Synthetic Aperture Radar Imagery[J]. *Annals of Glaciology*, 1999, 29(11): 286-290
- [7] Gao Gui, Liu Li, Zhao Lingjun, et al. An Adaptive and Fast CFAR Algorithm Based on Automatic Censoring for Target Detection in High-resolution SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(6):1 685-1 697
- [8] Qin Xianxiang, Zhou Shilin, Zou Huanxin, et al. A CFAR Detection Algorithm for Generalized Gamma Distributed Background in High-resolution SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 10(4):806-810
- [9] Zhou Jianxiong, Shi Zhiguang, Cheng Xiao, et al. Automatic Target Recognition of SAR Images Based on Global Scattering Center Model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3 113-3 829
- [10] Hofele F X. An Innovative CFAR Algorithm[C]. Radar, 2001 CIE International Conference on, Beijing, 2001
- [11] de Vore M D, Sullivan J A O. Quantitative Statistical Assessment of Conditional Models for Synthetic Aperture Radar[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(2): 113-125

Rock Outcrop Detection from RADARSAT-1 Datasets Based on Constant False Alarm

ZHU Tingting¹ LI Fei^{1,2} ZHANG Shengkai² YUAN Lexian²

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Microwave data has become the leading dataset in polar remote sensing research. In this paper, based on the CFAR algorithm, rock outcrop information is extracted from RADARSAT-1 synthetic aperture radar datasets, which yields high resolution imagery with good contrast between rock outcroppings and glacier ice. In order to choose the suitable parameters for the mountain range rock outcrop information extraction, evaluation of the effectiveness different models was conducted on representative datasets. In experiments, the results of Weibull distribution based SO-CFAR method demonstrate that the accuracy of rock outcrops detection ratio was larger than 80% and the overall error ratio was less than 8%, which verifies that the proposed method has a great potential for analyzing the rock outcroppings in the Antarctic.

Key words: antarctic; rock outcrop detection; SAR; CFAR; statistical distribution

First author: ZHU Tingting, PhD candidate, specializes in geodesy and polar remote sensing. E-mail: zhutingting62008@163.com

Corresponding author: LI Fei, PhD, professor. E-mail: fli@whu.edu.cn

Foundation support: The State Key Program of National Natural Science of China, No. 41531069; the National Basic Research Program of China, No. 2012CB957701; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation and Assessment Programs, No. CHIN-ARE2016.