

文章编号:1001-9014(2012)01-0085-05

## 浅海水下地形检测算法

王珂<sup>1,2,4,5</sup>, 洪峻<sup>3,4</sup>, 张元<sup>1</sup>, 明峰<sup>3,4</sup>

- (1. 河南工业大学 信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001;  
2. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;  
3. 微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;  
4. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 5. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 自动化检测算法是实现浅海水下地形动态监测的关键技术. 提出了浅海水下地形特征变化方向的提取方法, 证明了其提取的方向与 SAR 图像特征基本一致. 研究了不变矩区域描述方法, 证明了采用不变矩来描述浅海水下地形的区域特征, 具有可行性和适应性. 提出了 SAR 图像中浅海水下地形的检测算法, 其中采用了平均不变矩并重新定义了不变矩的距离. 最后实验验证了该检测算法具有一定的准确性.

**关键词:** SAR 图像; 浅海水下地形; 检测算法

**中图分类号:** TP751 **文献标识码:** A

## Algorithm for detection of shallow water bottom topography

WANG Ke<sup>1,2,4,5</sup>, HONG Jun<sup>3,4</sup>, ZHANG Yuan<sup>1</sup>, MING Feng<sup>3,4</sup>

- (1. School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;  
2. Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China;  
4. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
5. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Developing automatic shallow water bottom topography detection algorithm is a key technique for coastal ocean monitoring. A new method was proposed to retrieve the orientation of shallow water bottom topography from SAR imagery, and the result was in accordance with SAR image characteristic. The feasibility and adaptability of using invariant moments to describe region of shallow water bottom topography were studied. We proved that this method can be used to detect a region with or without shallow water bottom topography. Finally, we proposed a shallow water bottom topography detection algorithm for SAR images based on average invariant moments and redefined distance of invariant moments with reasonable accuracy.

**Key words:** SAR image; shallow water bottom topography; detection algorithm

**PACS:** 07.05.Pj

### 引言

合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)可遥感探测浅海水下地形, 能实现对浅海地质环境的快速、动态、大范围监测, 对此国内外已开展了大量的理论和实验研究<sup>[1-5]</sup>. 在有些特定条件下, SAR也可遥感观测到深海(水深 > 500 m)水下地形<sup>[6]</sup>. Hennings<sup>[2]</sup>的现场实验表明浅海水下地形有迁移现

象发生, 即在潮流运动的作用下, 水下地形沿特征变化方向会移动一定距离. 对浅海水下地形进行动态监测, 需要自动化检测算法, 以快速处理大量的、长期的 SAR 遥感图像. 但有关 SAR 图像中浅海水下地形的检测算法, 国内外少有论述. 本文根据 SAR 图像特征, 提出了浅海水下地形特征变化方向的提取方法. 研究了不变矩区域描述方法在浅海水下地形 SAR 图像中的应用效果. 最后综合提出了 SAR

收稿日期: 2011-02-01, 修回日期: 2011-12-31

基金项目: 国家自然科学基金重大项目资助(60890071)

Foundation item: Supported by National Natural Science Foundation of China (60890071)

作者简介: 王珂(1981-), 男, 河南郑州人, 讲师, 博士, 主要从事 SAR 遥感信息处理与应用方面的研究. E-mail: email\_of\_paper@yahoo.com.cn.

Received date: 2011-02-01, revised date: 2011-12-31

图像中浅海水下地形的检测算法.

### 1 特征变化方向的提取方法

浅海水下地形 SAR 遥感图像的主要特征是相间的亮暗条纹. 大量的观测实验<sup>[1]</sup>表明, 典型的浅海水下地形(即水下沙坡)的间距(即 SAR 图像上亮暗条纹的距离)大部分在几百米到几公里, 并且亮暗条纹的强度变化远大于通常的 SAR 海浪图像. 所以, 考虑可在频域中提取浅海水下地形的特征变化方向.

SAR 反演海面风场时, 通常海面风向与 SAR 图像上由大气边界层涡旋引起的风条纹方向是一致的, 于是 SAR 图像上风条纹的二维波数谱峰值连线的垂线方向就是风向<sup>[7]</sup>. 利用二维快速 Fourier 变换(FFT), 可计算 SAR 图像的波数谱<sup>[7]</sup>. 即使 SAR 图像上有海浪条纹, 但由于风条纹的尺度为几公里的数量级, 远大于 SAR 图像上海浪的尺度(几百米的数量级), 可较为准确地区分开.

类似地, 可提取出 SAR 图像中亮暗条纹的变化方向, 即为浅海水下地形的特征变化方向, 提取方法的流程如图 1 所示.

SAR 图像的斑点噪声会影响图像质量和信息提取, 考虑到空域滤波不会影响频域特征<sup>[8]</sup>, 所以采用空域中值滤波<sup>[9]</sup>来抑制斑点噪声. 中值滤波能在抑制斑点噪声的同时不使图像边缘模糊<sup>[9]</sup>, 有利于保护水下地形的亮暗条纹信息. 对于利用二维 FFT 获得的波数谱, 需要首先进行可视化处理. 将 FFT 变换的原点移动到频谱中心, 由于频谱取值通常具有很大的动态范围, 可使用对数变换来处理, 进行视觉增强. 经此可视化处理后, 便能直观地观察到波数谱的频域特征. 下面对波数谱进行归一化和峰值选择. 首先将波数谱的取值归一化为 0 ~ 1; 然后对每列取值进行由大到小的排列, 配合对波数谱归一化取值的直方图统计分析, 可确定峰值选择的阈值, 以挑选出较强的峰值, 同时去掉频谱中的直流分

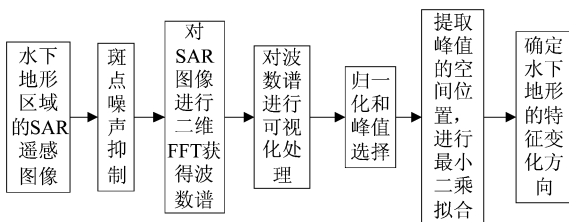


图1 提取方法的流程图  
Fig. 1 Flow chart of the retrieval method

量. 对挑选出的峰值, 提取其空间位置坐标, 然后进行最小二乘线性拟合. 其中阈值应满足: 即使该值增大后, 直方图统计中大于该值的峰值拟合出的方向没有明显的变化. 由拟合结果, 即可确定水下地形的特征变化方向.

下面以 ERS-2/SAR 遥感图像为例, 其成像时间为 2002 年 8 月 11 日, 地点为台湾浅滩海域, 极化方式为 VV 极化, 由中国科学院对地观测与数字地球科学中心接收处理<sup>[10]</sup>. 现场实测<sup>[5]</sup>证实了该图像中存在浅海水下地形区域, 如图 2(a) 所示. 采用如图 1 所示的提取方法, 可获得浅海水下地形的特征变化方向如图 2(c) 所示, 其给出了图 2(a) 中水下地形区域的平均朝向. 图 2(b) 给出了图 2(a) 的二维波数谱, 可见其具有中心对称的“双峰特征”, 谱峰值的连线方向已在图中用黑线标出, 它表示了水下地形区域的平均朝向. 综上所述, 本文方法提取的浅海水下地形特征变化方向与其 SAR 图像特征表现是基本一致的.

### 2 不变矩区域描述方法

矩在统计学中表示了随机量的分布, 若把灰度图像看作二维密度分布函数, 则可将矩概念用于描

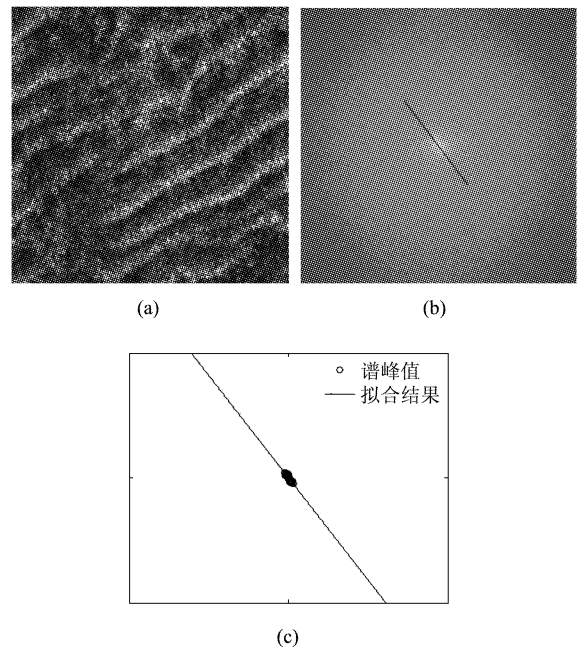


图2 提取水下地形的特征变化方向 (a) 水下地形 SAR 图像 (b) 波数谱及其峰值连线 (c) 提取的特征变化方向  
Fig. 2 The variation direction of the characteristic of shallow water bottom topography (a) shallow water bottom topography in SAR image (b) wave number spectrum and the line connecting its peak values, and (c) the variation direction of the characteristic

述图像的本质特征. Hu<sup>[11]</sup>利用中心矩构造了7个不变量,称为不变矩(或矩不变量),在图像发生尺度、平移、旋转、镜像等变换时具有不变性. SAR 图像在获取时包含了多种导致图像退化的因素,例如:阴影、散焦、斑点噪声、几何变形等. 不变矩在处理图像退化时有良好的适应性,因此已被广泛应用于 SAR 图像的目标识别和配准等<sup>[12]</sup>.

对于图像函数 $f(x, y)$ ,如果它分段连续且只在 $XY$ 平面内有限个点不为零,则可证明它的各阶矩存在. 图像区域的矩是用所有属于区域内的像素点计算出来的,因而不受噪声等影响. $f(x, y)$ 的二维 $(p+q)$ 阶矩<sup>[9,11]</sup>可定义为:

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y) \quad , \quad (1)$$

可证明, $m_{pq}$ 唯一地被 $f(x, y)$ 所确定;反之, $m_{pq}$ 也唯一地确定了 $f(x, y)$ . $f(x, y)$ 的 $(p+q)$ 阶中心矩可定义为:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad , \quad (2)$$

其中, $\bar{x} = m_{10}/m_{00}$ , $\bar{y} = m_{01}/m_{00}$ ,也就是区域重心坐标. $f(x, y)$ 的归一化中心矩可表示为:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\gamma} \quad , \quad (3)$$

其中 $\gamma = \frac{p+q}{2} + 1, p+q = 2, 3, \dots$ .

由归一化的二阶和三阶中心矩, Hu<sup>[11]</sup>给出了7个由中心矩表示的函数式,它们满足在尺度、平移、旋转、镜像等变换下的不变性,即为不变矩. 具体表达如下:

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \quad , \quad (4a)$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \quad , \quad (4b)$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad , \quad (4c)$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \quad , \quad (4d)$$

$$\phi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad , \quad (4e)$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} + \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \quad , \quad (4f)$$

$$\phi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{12} - \eta_{30})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad . \quad (4g)$$

由于计算出的不变矩通常具有很大的动态范围,而我们感兴趣的只是矩的不变性. 所以,实际应用时可对不变矩的计算结果先取绝对值,再用对数变换压缩其动态范围后取绝对值,以避免出现负的

不变矩,便于直观地观察到矩的变化.

由于浅海水下地形 SAR 图像具有亮暗相间的条纹特征,考虑采用不变矩来描述水下地形的区域特征. 下面以 ERS-2/SAR 遥感图像为例,任意选取其中两处水下地形区域,如图 3(a)、3(b)所示. 首先对两幅水下地形区域图像进行中值滤波以抑制斑点噪声. 由于二值图像比灰度图像在数学上更简单地表现了条纹特征,可先对图像二值化并求补后再计算其不变矩,结果如表 1 所示. 可见,两幅水下地形区域图像的不变矩结果比较接近,即表明它们的图像特征具有相似性. 因此,用不变矩来描述水下地形的区域特征具有可行性.

大量的观测实验和理论研究<sup>[4]</sup>表明,海面风场、潮流等气象、水文条件的改变会影响浅海水下地形的 SAR 成像,使其亮暗条纹特征的对比度(可视性)发生变化;有时水下地形产生的 SAR 图像条纹同潮流方向垂直<sup>[1]</sup>,而有时又会平行<sup>[3]</sup>. 因此,需要从图像处理的角度来考虑不变矩对此变化的适应性. 采用直方图变换方法<sup>[9]</sup>分别减弱和增强了水下地形图像 A 的对比度,如图 4 所示的图像 C、D;同样计算其不变矩,结果如表 2 所示. 通过对表 1 和表 2 的比较,可见不变矩对亮暗条纹特征的对比度变化,具有较好的适应性. 有利于不同气象、水文条件下对水下地形区域的描述.

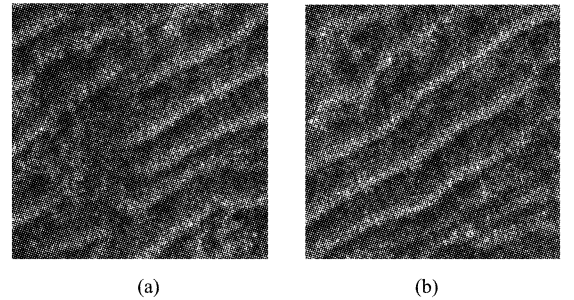


图 3 任选的两处水下地形区域 (a)水下地形区域图像 A (b)水下地形区域图像 B

Fig. 3 Two shallow water bottom topography regions chosen randomly (a) image A (b) image B

表 1 不变矩的计算结果

Table 1 Calculated results of invariant moments

SAR 图像不变矩	A	B
$\phi_1$	0.7553	0.7412
$\phi_2$	6.9723	5.6162
$\phi_3$	5.6290	6.8123
$\phi_4$	5.8609	6.5710
$\phi_5$	11.9026	13.3699
$\phi_6$	9.6284	9.6977
$\phi_7$	11.6690	13.4672

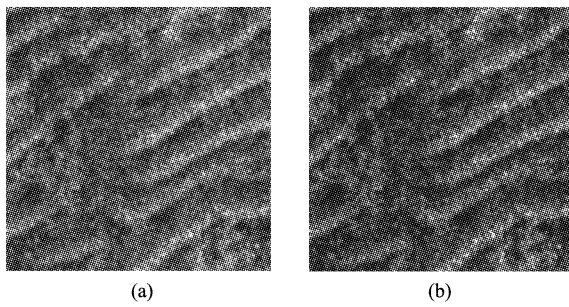


图4 改变图像A的对比度 (a)对比度减弱的图像C (b)对比度增强的图像D

Fig.4 The contrast of image A was decreased in image C (a), and increased in image D (b). (图中没有编号 ABCD)

表2 改变对比度后的不变矩

Table 2 Invariant moments for images with different contrasts

SAR 图像不变矩	C	D
$\phi_1$	0.7184	0.7687
$\phi_2$	6.0293	7.7390
$\phi_3$	4.8247	6.4491
$\phi_4$	5.1289	6.5734
$\phi_5$	10.3042	13.3654
$\phi_6$	8.2332	10.7187
$\phi_7$	10.2152	13.1535

综上所述,不变矩描述的是图像内容的相似性、是图像的统计特征;采用不变矩来描述浅海水下地形的区域特征,具有可行性和适应性. 这为复杂条件下对水下地形区域的检测创造了有利条件.

### 3 水下地形的检测算法

综合上述的水下地形特征变化方向提取方法和不变矩区域描述方法,提出了 SAR 图像中浅海水下地形的检测算法,其流程如图 5 所示.

选择 SAR 遥感已知水下地形区域图像,首先采用中值滤波来抑制斑点噪声. 然后采用水下地形特征变化方向提取方法获得水下地形的方向信息. 同时,采用不变矩区域描述方法获得水下地形区域的不变矩. 不变矩对于图像的尺度、平移、旋转、镜像等变换实际上并非完全不变,而是有“微小”变化的<sup>[9]</sup>;即使同一幅图像,经尺度等变换后,其不变矩也会变化,即有一定的误差范围<sup>[9]</sup>. 为了适应 SAR 图像中水下地形亮暗条纹的弯曲、宽窄等细节变化,并真正反映出不变矩的“不变性”,对进行了尺度、平移、旋转、镜像等任意变换组合的 6 组不变矩结果做平均处理,获得了平均不变矩. 由此可使不变矩的误差范围降低至少一个数量级,即加强了不变矩的

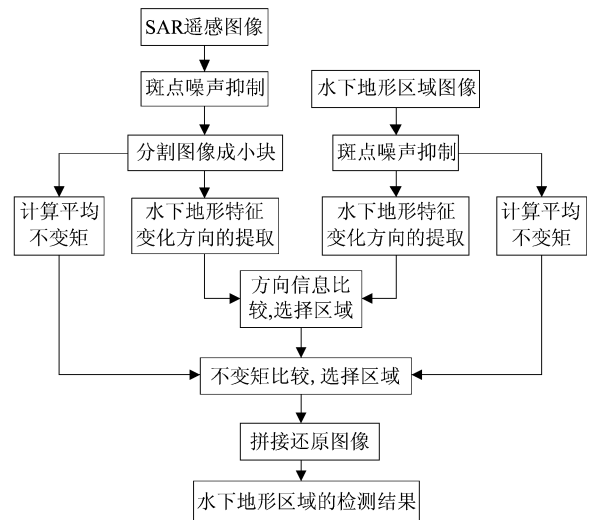


图5 水下地形检测算法的流程图

Fig.5 Flow chart of the algorithm for detection of shallow water bottom topography

“不变性”和对细节变化的鲁棒性,以免检测时产生误判. 这样确定下来的水下地形区域的 SAR 图像特征,将被用来检测输入的 SAR 遥感图像. 下面以台湾浅滩海域的 ERS-2/SAR 遥感图像为例,将其作为输入的待检测的 SAR 图像,同样采用中值滤波来抑制斑点噪声. 然后将整幅 SAR 图像分割成像素  $400 \times 400$  的小块子图像. 同样采用水下地形特征变化方向提取方法获得每幅子图像的二维波数谱的频域特征(表示了方向信息),采用不变矩区域描述方法获得每幅子图像的平均不变矩(表示了区域特征). 上述信息可用于对水下地形区域进行检测.

大量的观测统计<sup>[5]</sup>表明,浅海水下地形的特征变化方向具有明显的空间分布规律,即在待监测海域内由于近似的海洋地质环境和潮流运动,导致该海域内水下地形总体上沿一定方向分布. 根据观测统计<sup>[5]</sup>,可认为台湾浅滩海域内水下地形特征变化方向沿一定方向及其附近  $\pm 20^\circ$  内分布比较合理. 这既反映了水下地形的分布方向,又考虑了水下地形分布方向有部分弯曲、渐变的实际情况. 由此,可将每幅子图像的二维波数谱的频域特征(方向信息)与提取的已知水下地形区域的方向信息进行比较,其中符合沿一定方向分布的子图像区域将被保留,反之将被排除. 得到水下地形区域检测的初步结果,如图 6(a) 所示. 其中既包括了真正的水下地形区域,如图 6(c) 所示;又包括了一些非水下地形区域如图 6(b) 所示. 这主要是受海面风场、复杂海洋现象等因素的影响,因而需要采用不变矩区域描述方法进一步予以排除.

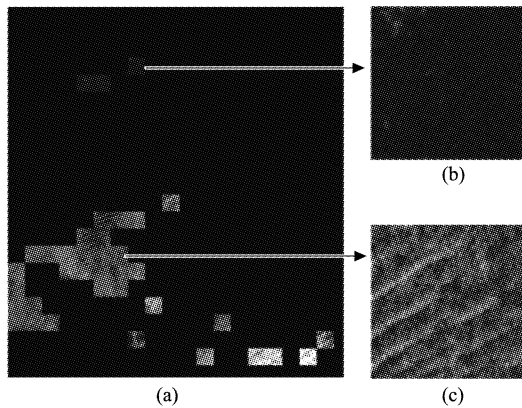


图6 检测的初步结果  
Fig.6 Primary result of detection

为了进一步排除非水下地形区域,下面对图6(a)初步检测结果的每幅子图像的平均不变矩进行比较.令 $\phi_k(k=1,2,\dots,7)$ 为参考图像的平均不变矩, $\phi_k(j)(k=1,2,\dots,7;j=1,2,\dots)$ 为输入图像的平均不变矩.国内外学者通常定义不变矩的距离为<sup>[12-13]</sup>:

$$d(j) = \sqrt{\sum_{k=1}^7 [\phi_k - \phi_k(j)]^2}, \quad (5)$$

$d(j)$ 是一个7维特征空间距离矩阵,它表示了两个图像区域的相似程度.根据最小距离分类器准则可知:距离越小,相似度越大.但实际应用时发现,由于水下地形图像区域的不变矩可在零点几到十几的大范围内变化,如表1所示;假设 $\phi_1$ 由0.7412变为1.7412、 $\phi_7$ 由13.1535变为14.1535,虽然两者都变化了1,但显然 $\phi_1$ 表示的图像变化程度更为剧烈.因此将不变矩(这里是平均不变矩)的距离重新定义为:

$$c_k(j) = \left| \frac{\phi_k - \phi_k(j)}{\phi_k} \right|, \quad (6a)$$

$$d(j) = \sum_{k=1}^7 \left| \frac{\phi_k - \phi_k(j)}{\phi_k} \right|, \quad (6b)$$

显然, $c_k(j)(k=1,2,\dots,7;j=1,2,\dots)$ 表示了平均不变矩各分量的变化程度.在比较平均不变矩时,对其7个分量 $c_k(j)$ 和总量 $d(j)$ 采取同时独立比较的方式,既控制分量距离差别又控制总量距离差别,使得两种距离差别都比较小的区域图像才能被保留,反之将被排除.实验表明,这样检测得到的水下地形区域具有更高的准确性.经过平均不变矩比较排除后,将检测得到的水下地形子图像按其在原始SAR图像中标注的位置进行拼接还原,便可直观地观察到原始SAR图像中水下地形区域的位置和分布.

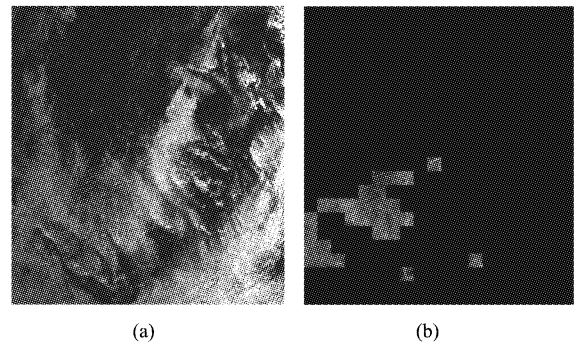


图7 检测算法的最终结果 (a)ERS-2/SAR 图像 (b)检测的最终结果  
Fig.7 Final result of the detection obtained with the proposed algorithm (a) ERS-2/SAR image (b) final result of detection

综上所述,对于具有复杂海洋现象表现的 ERS-2/SAR 遥感图像,如图7(a)所示;可得到其水下地形区域检测算法的最终结果,如图7(b)所示.同时,使用美国 ENVI<sup>[14]</sup> (The Environment for Visualizing Images) 软件对输入的原始 SAR 图像进行了逐块区域的人工目视判读,通过其与检测算法结果比较,证明了本文提出的检测算法具有一定的准确性,能有效地检测出具有亮暗条纹特征的浅海水下地形区域.

## 4 结论

针对浅海水下地形的 SAR 图像特征,研究了其自动化检测算法.首先提出了水下地形特征变化方向的提取方法,证明了其提取的方向与 SAR 图像特征基本一致.然后研究了不变矩区域描述方法,证明了采用不变矩来描述水下地形的区域特征,具有可行性和适应性.最后提出了 SAR 图像中浅海水下地形的检测算法,其中采用了平均不变矩并重新定义了不变矩的距离.通过实验,验证了即使 SAR 图像具有复杂海洋现象表现,检测算法仍具有一定的准确性. SAR 海洋图像中有可能存在与水下地形亮暗条纹十分相似的线性特征,这些线性特征是由内波等其它海洋现象引起的.其对浅海水下地形的检测可能产生影响,识别区分这些相似的线性特征将是以后的研究方向.

**致谢** 感谢中国科学院遥感应用研究所杨晓峰博士给予的支持和帮助!

## REFERENCES

- [1] Hennings I. A historical overview of radar imaging mechanism of sea bottom topography[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(7): 1447 - 1454.

- [2] Hennings I, Herbers D. Radar imaging mechanism of marine sand waves at very low grazing angle illumination caused by unique hydrodynamic interactions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**: 1 - 15.
- [3] LI Xiao-Feng, LI Chun-Yan, XU Qing, *et al.* Sea surface manifestation of along-tidal-channel underwater ridges imaged by SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(8): 2467 - 2477.
- [4] FU Bin. Shallow sea bottom topography mapping by SAR [D]. Qingdao: Ocean University of China (傅斌. SAR 浅海水下地形探测. 青岛: 中国海洋大学), 2005.
- [5] FAN Kai-Guo. Shallow water bathymetry surveys by SAR based on M4S for simulations of microwave imaging oceanic surface[D]. Qingdao: Ocean University of China (范开国. 基于海面微波成像仿真 M4S 软件的 SAR 浅海地形遥感探测. 青岛: 中国海洋大学), 2009.
- [6] LI Xiao-Feng, YANG Xiao-Feng, ZHENG Quan-An, *et al.* Deep-water bathymetric features imaged by spaceborne SAR in the Gulf Stream region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**: 1 - 6.
- [7] Vachon P W, Dobson F W. Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean[J]. *Global Atmosphere and Ocean System*, 1996, **5**: 177 - 187.
- [8] FENG Hong-Xiao, HOU Biao, WANG Shuang, *et al.* SAR image despeckling based on adaptive window and shape adaptive discrete wavelet transform[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (凤宏晓, 侯彪, 王爽, 等. 基于自适应窗和形状自适应小波变换的 SAR 图像相干斑抑制. 红外与毫米波学报), 2009, **28**(3): 212 - 217.
- [9] ZHANG Yu-Jin. *Image engineering* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (章毓晋. 图象工程. 北京: 清华大学出版社), 1999.
- [10] 中国科学院对地观测与数字地球科学中心. 存档卫星遥感数据 [EB/OL]. (2010-11-16) [2010-11-16]. <http://cs.rsgs.ac.cn/cs%5Fcn/>
- [11] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariant [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1962, **8**: 179 - 187.
- [12] KANG Xin, HAN Chong-Zhao, YANG Yi. Structure-driven SAR image registration[J]. *Journal of System Simulation* (康欣, 韩崇昭, 杨艺. 基于结构的 SAR 图像配准. 系统仿真学报), 2006, **18**(5): 1307 - 1310.
- [13] Flusser J. Object matching by means of matching likelihood coefficients[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1995, **16**(9): 893 - 900.
- [14] ITT Visual Information Solutions Company. ENVI [EB/OL]. (2010-11-18) [2010-11-18]. <http://www.ittvis.com/language/en-us/productservices/envi.aspx>

(上接 15 页)

#### 4 小结

采用 N-on-P 材料结构制备了  $640 \times 1$  延伸波长的 InGaAs 焦平面探测器. 器件峰值波长量子效率达到了 37.5%, 通过适当降低工作温度可以有效降低器件的暗电流、提高其信噪比, 在 240 K 温度下器件优值因子达到  $1000 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 信噪比达到 650; 将  $640 \times 1$  元光敏芯片与读出电路耦合制备的焦平面探测器, 在 1 ms 积分时间、TE1 条件下平均峰值探测率达到  $2.01 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ , 响应非均匀性和盲元率分别约为 8.77% 和 0.6%.

#### REFERENCES

- [1] Malchow Douglas S, Brubaker Robert M, Hansen Marc P. Development of linear array ROIC for InGaAs detector arrays with wavelength response to  $2.5 \mu\text{m}$  microns for NIR spectroscopy and machine vision[C]. *Proc. of SPIE*, 2008, **6940**, 69402V-1 - 11.
- [2] Porod W, Ferry D K. Modification of the virtual-crystal approximation for ternary III-V compounds[J]. *Phys. Rev. B*, 1983, **27**(4): 2587 - 2589.
- [3] Vander A R J, Hoogeveen R W M, Spruijt H J, *et al.* Low-noise InGaAs Infrared ( $1.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$ ) focal plane arrays for SCIAMACHY[C]. *Proc. of SPIE*, Vol. **2957**: 54 - 65.
- [4] Zhang Yonggang, Gu Yi, *et al.* Wavelength extended InGaAs/InAlAs/InP photodetectors using n-on-p configuration optimized for back illumination[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009(52): 52 - 56.
- [5] Robert F Pierret. *Semiconductor Device Fundamentals* [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2006, 197 - 198.
- [6] Howard W. Yoon, *et al.* Performance comparisons of InGaAs, extended InGaAs, and short-wave HgCdTe detectors between 1 m and  $2.5 \mu\text{m}$  [C]. *Proc. of SPIE*, 2006, Vol. 6297.
- [7] Goetz K-H, Bimberg D, Jurgensen H, *et al.* Optical and crystallographic properties and impurity incorporation of  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$  ( $0.44 < x < 0.49$ ) grown by liquid phase epitaxy[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(8): 4543 - 4552.
- [8] Zielinski E, Schweizer H, Streubel K, *et al.* Excitonic transitions and exciton damping processes in InGaAs/InP[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**(6): 2196 - 2204.