

# 基于二维连续小波变换的 SAR 图像海洋现象特征检测

陈 捷<sup>1,2</sup>, 陈 标<sup>1</sup>, 许素芹<sup>1</sup>

(1. 海军潜艇学院, 山东青岛 266071; 2. 第二炮兵工程学院, 陕西西安 710025)

**摘 要:** 本文对合成孔径雷达(SAR)图像中存在的多种海洋现象,如内波,海洋锋等进行讨论,提出了一种基于二维连续小波变换及能谱思想的新的海洋现象检测方法.针对各种海洋现象在 SAR 中反映出来的海浪波形的不同,采用不同的连续小波变换基提取 SAR 图像中五种典型的海洋现象.通过大量试验,证实了该方法在多种海洋现象的定位检测中的有效性.

**关键词:** 合成孔径雷达; 海洋现象; 二维连续小波谱

**中图分类号:** TP751      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 09-2128-06

## Detection of Ocean Features in SAR Images with 2D Continuous Wavelet Power Spectrum

CHEN Jie<sup>1,2</sup>, CHEN Biao<sup>1</sup>, XU Su-qin<sup>1</sup>

(1. Navy Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266071, China; 2. The Second Artillery Engineering College, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

**Abstract:** The ocean features, i. e., internal waves, ocean fronts, present in SAR (synthetic aperture radar) images are discussed. A new detection method, the two dimensional (2D) continuous wavelet power spectrum, which is based on the two dimensional (2D) continuous wavelet transform and the idea of power spectrum, is proposed. According to the wave difference of the ocean features, we use three different wavelets to extract five typical kinds of ocean features namely the internal waves, the ocean fronts, the ocean eddies, the ship wakes and the wind waves in the SAR images. The experimental results demonstrate that this algorithm's utility in the localization of various ocean features.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR); ocean features; 2D continuous wavelet power spectrum

## 1 引言

自从 1978 年美国发射 Seasat 卫星以来,合成孔径雷达(SAR)技术在海洋学中的应用潜力逐渐被人们发现.已有许多例子表明,合成孔径雷达能对海洋现象,例如海洋风生海浪及涌浪,温度锋、涡等进行观测.另外,一些人类活动,例如运动舰船能引起复杂的波-波作用,改变海面波浪场,其中的某些异常也能被 SAR 探测到.虽然在低海况情况下,海洋现象较易通过人工方法辨识,但海洋 SAR 数据量极大,人工辨识的效率太低,急需一种自动化的方法对大范围的海洋区域进行海洋现象分布的分析和统计.

统计和探测海洋现象在社会生产和军事应用方面都有广泛的应用前景.在社会生产方面,主要有外海石油钻井及矿物开采、舰船航路规划、渔业、水文调查等.

在军事应用方面,海洋现象的存在不仅会改变声信号的传播路径,使传统的声纳探测设备无法正常工作,而且也会改变海洋的遥感特性,使一些新型探测敌方舰船方式无法很好实现.因此海洋现象的自动检测具有及其重要的军事意义.

在海洋现象特征检测方面,已有很多学者引入了不同的方法对其进行不同程度的分析和检测,但是,大部分方法几乎全都是对某一种海洋现象进行检测的<sup>[1-4]</sup>,本文则尝试采用某种较为统一的方法对多种海洋现象进行检测与区分.

## 2 理论基础

### 2.1 二维连续小波变换

在信号处理领域,一维连续小波变换是一种常用的工具,其定义为<sup>[5]</sup>

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi_{a,b}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

其中  $a$  是尺度因子,  $b$  是平移因子.

由于图像是二维信号, 一维连续小波变换的方法不能完全适用, 于是文中引入了一个方向因子  $\theta$  将一维连续小波变换转换为二维变换:

$$Wf(a, b, \theta) = \iint_{\mathbb{R}^2} f(\mathbf{x}) \Psi_{(a,b,\theta)}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2)$$

可以看出, 图像的二维连续小波变换有三个变化量. 为了使问题简化, 本文中只对  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两个方向进行小波变换, 并将这两个变换过程相结合, 这样, 二维连续小波变换等同于对图像  $f(i, j)$  按行按列分别进行一维连续小波变换, 得到一系列不同尺度的二维连续小波变换图像  $W_a(i, j)$ .

## 2.2 二维连续小波能谱

一维小波变换是能量守恒的, 也就是说在时域和小波域中, 信号的能量是相等的. 这一点可以由式(3)反映出来:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |W(a, b)|^2 * \frac{1}{a^2} da db \quad (3)$$

其中  $|W(a, b)|^2 / C_{\Psi} a^2$  可以被定义为信号在  $(a, b)$  之间的能谱密度.

$$\text{令 } E(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W(a, b)|^2 db \quad (4)$$

其中  $E(a)$  为小波能量在尺度轴上的分布.

由上可得信号的能量为:

$$E_f = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |W(a, b)|^2 \frac{1}{a^2} da db = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E(a)}{C_{\Psi} a^2} da \quad (5)$$

对于图像这种二维信号来说, 能量守恒法则依然存在, 二维信号的能量守恒公式如式(6)所示.

$$E_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(i, j)|^2 di dj = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E_2(a)}{C_{\Psi} a^2} da \quad (6)$$

其中,  $E_2(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_a(i, j)|^2 di dj$

由于  $E_2(a)$  反映了图像的二维连续小波能量在尺度轴上的分布情况, 本文中把它称为图像的二维连续小波尺度-小波能谱.

## 3 试验分析

### 3.1 试验图像

本文中试验采用的图像主要是 1998 至 2003 年间的 ERS2/SAR 低海况图像(C 波段, VV 极化, 入射角  $\approx$

$23^\circ$ , 图像分辨率为  $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ ). 本文处理时, 通过一个  $1024 \times 1024$  像素的窗口将图像分解处理以提高检测的性能. 海洋现象子图像主要被分为五类典型的 SAR 图像海洋现象, 分别为: 风浪图像、海洋内波图像、海洋锋图像、海洋涡旋图像和舰船尾迹图像. 海洋内波的图像主要取自中国南海北部, 海洋锋和海洋涡旋图像主要取自中国黄海. 对于以上提及的这五种典型海洋现象, 在本文中为别给出  $1024 \times 1024$  像素的一幅例图, 如图 1 所示.

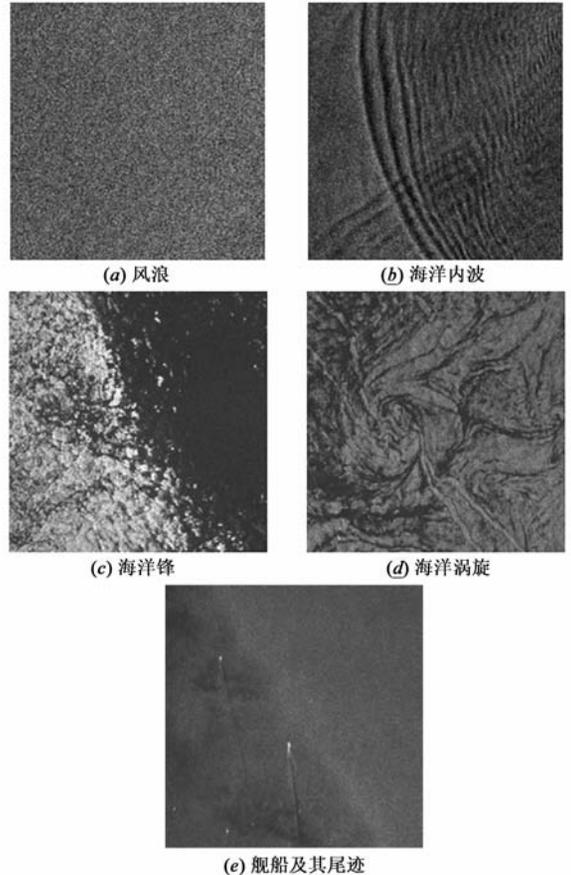


图1 海洋现象典型例图

## 3.2 检测方法分析

### 3.2.1 海洋现象初步分离

二维连续小波变换的系数反映了当前信号与小波基的匹配程度, 小波系数越大, 说明信号的波形与小波波形的吻合性越高. 二维连续小波变换的主要功能就是在多种变换尺度下检测和分析海洋现象图像.

由于成像时间的不同和成像条件的差异, SAR 图像的后向散射系数在整体灰度上可能会存在显著不同. 由于二维连续小波变换主要反映图像灰度变化的规律, 因此, 整体灰度的不同并不会影响检测效果, 在处理时, 可先对分析区域的数据进行去平均值处理.

尺度变换因子  $a$  在检测中起着非常关键的作用, 在每个变换尺度下, 小波变换计算该尺度下小波与图像信

号波形的相似度.因此,在本文的检测方法中,采用什么样的小波及小波变换的尺度是两个关键的因素.

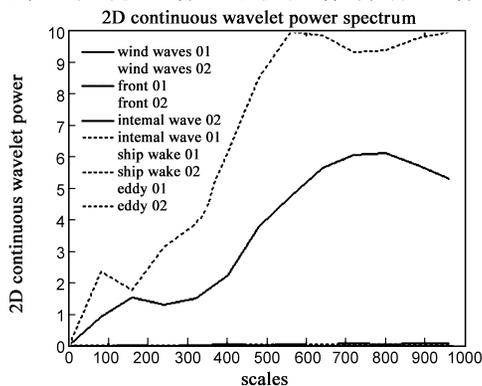
由于海洋表面所反映的海洋现象十分复杂,同时存在着细微结构的信息和大尺度范围的信息,连续变化的信息和突变的信息,这使得小波基和变换尺度的选择很难做到周全的程度,而只能选择最能反映问题关键的参数.

与离散小波变换相比,由于连续小波基的限制条件相对较少,二维连续小波变换所能选取的小波基范围更大.小波基的波形决定了它们所适合检测和处理的领域.例如, Daubechies 小波更适用于处理细节信号,高斯小波更适用于处理连续渐变信号.

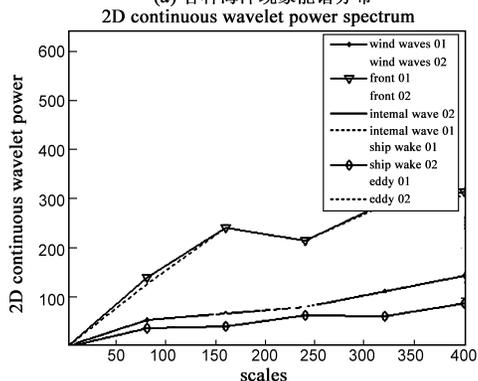
在现有的分析型小波,例如 Mexican hat 小波、Morlet 小波和 Optical 小波等中,本文选取 Morlet 小波作为海洋现象初步分离的小波基.这是因为它对于具有方向性的信号具有更强的方向选择性,对细节频率信号的变换能力更强.这一点已被 J.-P. Antoine and P. Carette (1993) 等人所证实<sup>[6]</sup>.

本文首先选用 Morlet 小波对大量典型海洋现象图像进行检测统计.

为了从整体上粗略区分各种海洋现象,首先选取相对较大的变换尺度范围和步长.尺度变化范围为 1~1024,步长为 80.当采用 Morlet 小波进行二维连续小波变换时,海洋内波图像的小波能谱与其他图像能谱有



(a) 各种海洋现象能谱分布



(b) 去除海洋内波能谱线的其他海洋现象能谱分布

图2 Morlet小波二维连续小波变换能谱

明显差异.如图 2(a)所示为 10 幅典型图像的 Morlet 二维连续小波谱分布图,可见海洋内波小波能谱值在中等变换尺度下远远大于其他海洋现象小波能谱值.虽然其他海洋现象能谱相对较小,但他们之间也有差异存在,如图 2(b)所示是去掉海洋内波小波能谱线后其他海洋现象的能谱分布图,可以看出海洋锋和海洋涡旋图像在中等变换尺度下的小波能谱值高于风浪图像和舰船尾迹图像的小波能谱值.

显然,采用 Morlet 小波对图像进行中等尺度(例如变换尺度在 250 左右)的二维连续小波变换,能够粗略地将典型的海洋现象分为三个大类,一是海洋内波类,二是海洋锋和海洋涡旋类,三是海面风浪和舰船尾迹类.在变换尺度为 250 左右时,这三大类海洋现象的二维连续小波变换系数具有显著的差异,因此,本文选取变换尺度为 220~260,步长为 10 的 Morlet 二维连续小波变换对这三大类海表特征进行检测和区分.

为了实现对海洋现象的自动检测,必须建立一定的阈值将各种现象进行区分.在本文研究过程中,采用欧氏距离统计的方法建立阈值.通过对大量低海况海洋图像的二维连续小波变换分析,得到不同类海表特征的二维连续小波变换检测阈值.

建立两类海洋现象的特征阈值时,首先对每个变换尺度分别计算每类图像小波能谱的均值及最大值和最小值之间的欧氏距离.设在尺度  $a$  时,第一类图像的变换系数均值为  $\bar{P}_{a1}$ ,最大值与最小值的欧氏距离为  $d_{a1}$ ,第二类图像的变换系数均值为  $\bar{P}_{a2}$ ,最大值与最小值的欧氏距离为  $d_{a2}$ ,则在尺度  $a$  上的阈值  $T_a$  可由下式计算得到:

$$T_a = \min(\bar{P}_{a1}, \bar{P}_{a2}) + |\bar{P}_{a1} - \bar{P}_{a2}| \times \frac{d}{d_1 + d_2} \quad (7)$$

其中,  $d$  的取值与  $\bar{P}_{a1}, \bar{P}_{a2}$  的大小有关,当  $P_{a1} \leq P_{a2}$  时,  $d = d_1$ , 否则  $d = d_2$ .

### 3.2.2 海洋锋与海洋涡旋的区分检测

海洋锋和海洋涡旋都是海洋中尺度现象,在上述 Morlet 小波检测时,它们的值十分接近,不能相互区分.但是由于它们各自特有的海洋物理特性,无论在民用领域还是军事领域,海洋锋和海洋涡旋的区分检测都十分重要.

通过对海洋锋和海洋涡旋图像的观察分析我们可以知道,在 SAR 图像中,海洋锋往往会呈现一条明显的锋线,在锋线的两边其灰度值明显不同,往往一侧较亮,另一侧较暗,这就让我们想到了 Haar 小波,Haar 小波也在某一点处呈阶跃状.基于这一考虑,本文尝试采用较大尺度上的 Haar 小波二维连续小波变换对海洋锋和海洋涡旋图像进行区分.

对海洋锋和海洋涡旋试验图像的 Haar 小波二维连续小波变换能谱分布如图 6 所示. 采用的变换尺度为 980~1020, 步长为 10. 两类现象间阈值的建立与式(7) 相同得到海洋锋与海洋涡旋之间的检测阈值曲线, 如图 3 中 threshold3 指示所示.

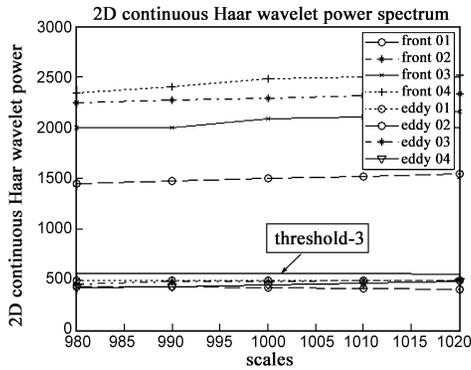


图3 海洋锋与海洋涡旋的区分检测

### 3.2.3 舰船尾迹与海面风浪的区分检测

在 SAR 图像中, 舰船往往会表现为由一些亮点组成的亮斑, 利用这些亮斑可以对舰船目标进行检测. 在本文中, 我们更关注于舰船航行时对海面造成的扰动, 也即舰船尾迹在 SAR 图像中的特征. 关于舰船尾迹的检测, 也已经有了一些检测方法, 例如基于 Hough 变换的方法、离散小波检测方法等, 其中有一些方法已能对某些舰船尾迹进行较好的检测. 在近海区域, 人类的活动越来越频繁, 因此, 在本文中, 我们把舰船尾迹认为是 SAR 海面现象的一种. 本文同样利用二维连续小波能谱的方法将舰船尾迹与其他海洋现象进行区分检测.

就像前面提到的那样, 舰船尾迹和海面风浪在采用中等尺度的小波变换时不能被区分. 由于舰船尾迹往往具有一些灰度突变的线型特征, 在高频部分必然会与海面风浪有所不同. 由于高频对应于较小的变换尺度, 因此本文尝试采用较小尺度的二维连续小波能谱对舰船尾迹和海面风浪进行区分检测.

在已有的一些小波基中, Daubechies 小波是一组正

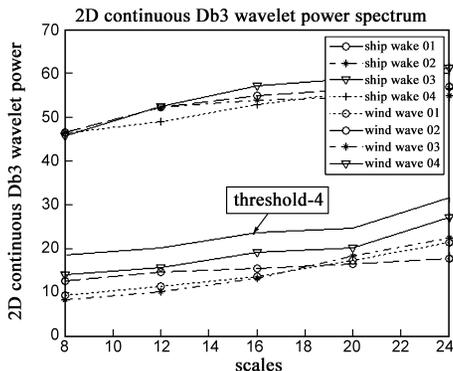


图4 舰船尾迹与海面风浪的区分检测

交小波, 具有良好的检测突变信号的能力, 常常被用于检测边缘及图像增强. 因此, 本文尝试采用 Db3 小波在较低变换尺度下将舰船尾迹图像从海面风浪图像中提取出来. 本文中用的变换尺度为 8~14, 步长为 4. 从图 4 可以看出, 小尺度 Db3 小波二维连续小波变换能有效地区分舰船尾迹图像还海面风浪图像. 两类图像间的检测阈值如图 4 中 threshold4 指示所示.

### 3.3 检测流程概括

本文所述的检测算法总体上分为三个步骤, 其检测流程可大致由如图 5 概括.

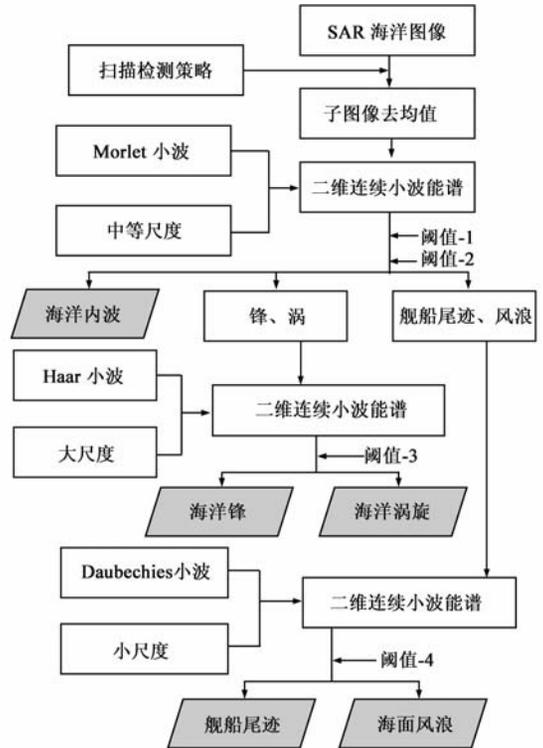


图5 SAR图像海洋现象二维连续小波能谱检测总流程

通过以上这些步骤, 可以基本定位典型海洋现象存在的区域, 这能够节省大量的人工检测时间, 为海洋现象的进一步深入分析奠定基础.

### 3.4 试验结果与讨论

#### 3.4.1 本文方法检测实验

通过前面的试验与分析, 得出对海洋现象 SAR 图像进行区分检测所应采用的方法、小波基、变换尺度、阈值等具体的检测细节. 将这种方法用于对 ERS2 合成孔径雷达图像实际检测, 取得了良好的效果. 本文中给出应用该方法的两组检测结果.

如图 6 所示为一景 RadarSat 拍摄的黄海 10020 × 6067 像素 SAR 图像, 其空间分辨率为 30 × 30 米, 也就是说图像的覆盖范围约为 300 × 182 公里. 在处理过程中, 该景图像数据区域被分为 28 个子图像进行扫描检测. 每个子图像的大小为 1024 × 1024 像素, 子图像的

扫描策略如图 6 中的小方格所示.采用本文提出的二维连续小波能谱方法对图像进行检测,采用一组阿拉伯数字对检测结果进行标注,数字“1”代表检测结果为海洋内波图像模式,“2”代表检测结果为海洋锋图像模式,“3”代表检测结果为海洋涡旋图像模式,“4”代表检测结果为舰船尾迹图像模式,“5”代表检测结果为海面风浪图像模式.检测结果表明,图 6 所示的该景图像中有三种海洋现象被检测了出来,分别是海洋海洋锋、海洋涡旋和海面风浪,这与我们的肉眼观测结果十分吻合.由于我们的检测步骤中总共分为三个分步实现检测,因此海洋内波检测的优先权最高,海洋锋次之,接下来是海洋涡旋和舰船尾迹,海面风浪的优先权最低.

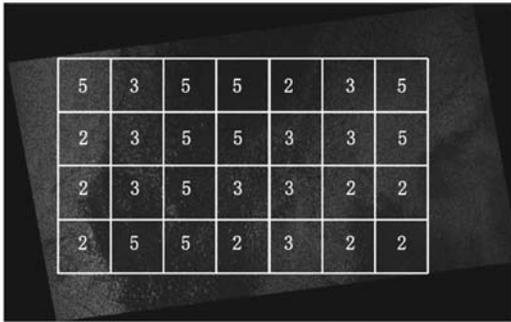


图6 RadarSat我国东海SAR图像及检测结果(中心位置为东经121.1,北纬35.2.数字表示检测结果,“2”代表锋,“3”代表海洋涡旋,“5”代表海面风浪)

图 7 所示为一景 2003 年 7 月拍摄的东海西部 8255 × 7500 像素 SAR 图像,其空间分辨率为 12.5 × 12.5 米,也就是说图像的覆盖范围约为 103 × 93 公里.这景图像与前一景图像相比,海面更平滑一些,中间位置有一明显的舰船尾迹.该图像同样被分为 56 个子图像进行扫描检测.每个子图像的大小为 1024 × 1024 像素,子图像的扫描策略如图 7 中的小方格所示.检测结果表明,该

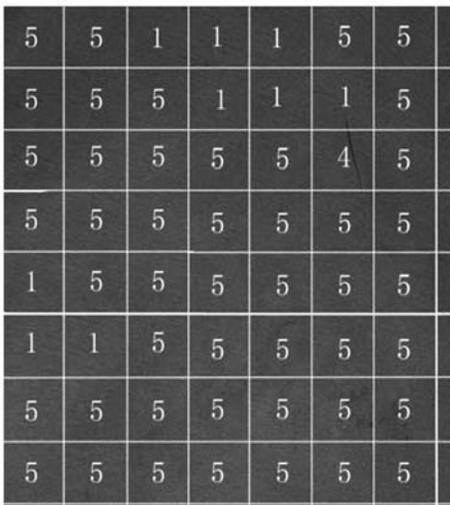


图7 2003年7月东海西部SAR图像及检测结果(中心位置为东经123.1,北纬34.7.数字表示检测结果,“1”代表海洋内波,“4”代表舰船尾迹,“5”代表海面风浪)

图像的大部分区域为海面风浪,舰船尾迹被准确地检测了出来,同时,还检测出了一些存在海洋内波的区域.通过肉眼仔细观察,在这些区域中发现了一些较微弱的海洋内波特征.这就表明,本文提出的方法对较为微弱的海洋特征检测同样有效.

### 3.4.2 与离散小波检测方法的比较

本文同时采用小波能谱的思想,利用多种符合离散小波变换条件的小波基对各种海洋现象进行传统的离散小波变换进行检测试验.由于离散小波变换能够采用的小波基约束条件高<sup>[7]</sup>,必须满足正交性、紧支撑等条件,因此可选择的小波基相对较少,无法选择非正交的 Morlet 小波或 Haar 小波等对图像进行离散小波变换处理;另外,由于离散小波变换的尺度只能是 2 的幂次方,对信号波长的变化及不敏感,因此当采用离散小波能谱的方法对几组 SAR 图像数据进行检测时,无法对多种海洋现象进行区分.这充分说明了二维连续小波变换的海洋现象区分检测中的优势.

但是,二维连续小波变换检测方法也存在先天的弱点,即其计算量相当大,检测的实时性不高.但这一弱点可以通过固定变换尺度的方法来克服.即,当我们对海量 SAR 图像进行检测统计后,基本可以确定海洋现象区分检测的特征尺度,例如,假设通过对海量 SAR 数据进行二维连续小波变换法检测后,确定海洋内波的 Morlet 小波特征尺度为 250,那么当系统进行业务化运行时,不需要对图像进行所有尺度的二维连续小波变换,而只需要作尺度为 250 的二维 Morlet 小波变换并求其小波能谱特征,即能将海洋内波与其他海洋现象分离出来,定位 SAR 图像中存在海洋内波的图像区块.

## 4 结论与进一步研究方向

本文提出了一种新的检测方法即二维连续小波谱算法,来检测几种典型的 SAR 海洋现象.由于结合了连续小波和能谱的思想,该方法能对各种海洋现象波形特征进行最佳匹配,采用小波能谱分析海洋现象波形与采用的连续小波基的匹配情况,从而能够有效地从 SAR 图像中检测和区分各种海洋现象.通过实验验证,得出以下结论:

(1) 本方法提供了一种能对 SAR 图像中五种最为常见的海洋现象进行有效检测的新手段.

(2) 与传统的离散小波检测方法相比,本文的方法对 SAR 图像中的海洋现象更为敏感,能够对 SAR 图像中的多种典型海洋现象进行自动区分检测.这对海量卫星数据的自动分析和图像筛选具有重要意义.

(3) 由于本文提出的二维连续小波能谱对纹理特征十分敏感,它为其它领域的纹理检测提供了一种新的思路.

(4)海洋卫星图像十分复杂,本文列出的五种典型海洋现象只是几种最常见的海洋现象,除此之外还有许多其他的海洋现象,有一些海洋现象如溢油等,能轻易地采用本文提出的方法进行检测,但也有一些更为复杂的海洋现象还需要本文方法与其他方法相结合来共同检测。

我们下一步的研究将在本研究成果的基础上,致力于研究检测混合海洋现象的图像,例如同时含有舰船尾迹和海洋内波的图像,同时含有海洋涡旋和内波的图像等。在精确定位海洋现象区域后,对各种海洋现象的特征参数,例如海洋内波的波长及内波源位置,海洋涡旋的中心,舰船航行的速度等等进行更为精确的检测。本文的研究工作为下一步的卫星图像海洋现象研究奠定了良好的基础,也是激励我们进行更为深入的研究的动力。

#### 参考文献:

- [1] Liu A. K, Peng, CY. SAR application for ocean eddy monitoring [A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1993. I-GARSS '93. Better Understanding of Earth Environment [C]. Tokyo, Japan, 1993. 547 - 549.
- [2] 薛存金, 苏奋振, 周军其. 基于小波分析的海洋锋形态特征提取[J]. 海洋通报, 2007. 26(2): 20 - 27.  
Xue Cunjin, Su Fenzhen, Zhou Junqi. Extraction of ocean fronts based on wavelet analysis[J]. Marine Science Bulletin, 2007. 26(2): 20 - 27. (in Chinese)
- [3] 杨劲松, 黄韦良, 周成虎等. 利用 SAR 图像计算内波深度和振幅的可行性研究[J]. 国土资源遥感, 2003. 55(1): 29 - 32.

Yang Jinsong, Huang Weigen, Zhou Chenghu. The feasibility of applying SAR imagery to the estimation of wave depth and amplitude[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003. 55(1): 29 - 32. (in Chinese)

- [4] 种劲松, 朱敏慧. SAR 图像舰船及其尾迹检测研究综述[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1356 - 1360.  
Chong Jingsong, Zhu Minghui. Survey of the study on ship and wake detection in SAR imagery[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1356 - 1360. (in Chinese)
- [5] S Mallat. A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. New York: Academic Press, 1998. 469 - 472.
- [6] J P Antoine, P Carette, R Murenzi, B Piette. Image analysis with two-dimensional continuous wavelet transform[J]. Signal Processing, 1993. 31(3): 241 - 272.
- [7] 李春庚, 栾秀珍, 王百锁. 自适应小波的构造及其在信号处理中的应用[J]. 电子学报, 35(1): 2007.  
Li Chungeng, Luan Xiuzhen, Wang Baishuo. Self-adapted wavelet construction and its application to signal Processing [J]. Acta Electronica Sinica, 35(1): 2007. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈 捷 女, 1980 年生于浙江海盐. 博士研究生. 研究方向为遥感图像处理与检测.  
E-mail: grass2009@163.com

陈 标 男, 1959 年生于江苏盐城. 教授. 研究方向为物理海洋学与遥感图像处理.