

一种新的 SAR 图像内波检测与参数估计方法

陈捷^{1,2)} 陈标²⁾ 许素芹²⁾

¹⁾(第二炮兵工程学院, 西安 710025) ²⁾(海军潜艇学院, 青岛 266071)

摘要 提出了一种 SAR 图像海洋内波检测与参数估计的新方法。通过对传统的 Radon 变换进行改进,将图像在椭圆区域内进行积分归一化,达到海洋背景下弱直线检测的目的。利用滑动窗口的思想结合椭圆域归一化 Radon 变换检测内波区域,通过对变换域的数据进行分析处理与计算,得到内波传播方向和内波波长参数。通过对实测 SAR 图像数据进行处理的结果可知,采用该方法对内波 SAR 图像进行处理不需要人工干预,能很好地定位内波位置,获得的内波参数与观测结果相符。

关键词 合成孔径雷达 Radon 变换 内波检测 内波参数估计

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)01-0040-05

A Novel Method on Internal Wave Detection and Parameter Estimation from SAR Images

CHEN Jie¹⁾, CHEN Biao²⁾, XU Su-qin²⁾

¹⁾(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025) ²⁾(Navy Submarine Academy, Qingdao 266071)

Abstract A new solution to internal wave detection and parameter estimation in SAR ocean image is presented in this paper. It improves the traditional Radon transform through normalizing the Radon coefficients in an ellipse region and thus can detect the inconspicuous lines with ocean background. Making use of the idea of glide windows we use the proposed transform to detect the internal wave region, and then we can estimate the wave direction and the wavelength simply through dealing with the Radon coefficients. The experiment on real SAR images show that the proposed method can process the SAR images automatically, it can detect the internal wave region correctly and the estimated parameter is consistent to the real observation.

Keywords SAR, Radon transform, internal wave detection, internal wave character estimation

1 引言

海洋内波是发生在层化水体内部的波动。内波在海洋的物质、动量和能量传输中扮演着重要的角色,在整个海洋动力学的理论研究中占有重要地位。不仅如此,海洋内波还与海洋声学、海洋生物学、海洋沉积学、军事海洋学、海洋工程学等学科有着密切的联系,对水下航行、海洋观测也有显著影响。因此,海洋内波的研究对海洋科学的理论研究、海洋军

事和海洋工程方面有着重要的意义。

合成孔径雷达(SAR)不受天候、云层的影响,成为内波研究的一个重要手段。大量的内波 SAR 图像为研究内波提供了丰富的资料。在 SAR 图像中,内波呈现为明暗相间的条纹。利用这些条纹可以获得内波的波长估计值和内波的传播方向。这些特征参数除了验证内波理论以外,还可以结合海域历史观测资料反演内波波速、振幅、越层深度等,进而计算一些水动力学参数,获取海水的层化结构信息。

目前,国内外已有不少学者对内波检测和内波

收稿日期:2007-07-09; 改回日期:2008-01-07

第一作者简介:陈捷(1980~),女。第二炮兵工程学院指挥自动化专业博士研究生。研究方向为图像处理、目标识别。E-mail:chenjie.

参数提取进行了研究,但在内波参数的提取过程中绝大部分都还需要人工干预^[1-4],这对于处理日益激增的 SAR 海洋数据来说显然是不够的。本文采用一种新的思路对 SAR 图像海洋内波区域进行检测,同时获得某一区域内波传播方向和内波波长的估计值,整个检测和计算过程由程序自动完成。

2 椭圆域归一化 Radon 变换

2.1 标准 Radon 变换

在 2 维欧几里德空间中, Radon 变换定义为

$$R_{\theta}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy' \quad (1)$$

式中,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

在平面图像域中, Radon 变换沿任何可能存在的直线将其像素亮度进行积分,图像域的亮线对应 Radon 域中的峰值点,暗线对应 Radon 域中的谷值点。平面图像域和 Radon 域的映射关系如图 1 所示。

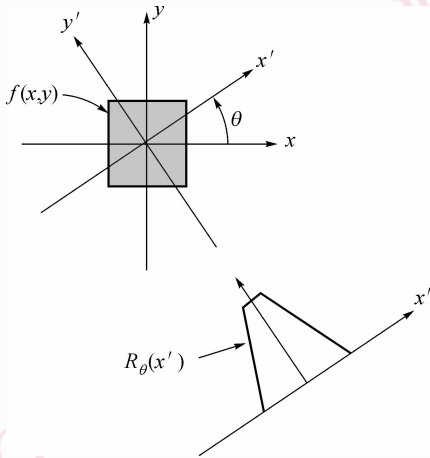


图 1 Radon 变换映射关系示意图

Fig. 1 The relation mapping of Radon transform

2.2 利用椭圆域归一化 Radon 变换检测弱直线

在 Radon 变换中,图像上位于不同位置直线上的像素点各不相同,位于图像对角线上的像素最多。这样一来,即使对不含任何直线的均匀图形在 Radon 域对应角线的位置也会出现峰值,即呈现“对角线效应”。

由于合成孔径雷达固有的成像特点,在 SAR 图像中往往会存在较强的斑点噪声,对于 SAR 内波图像来说,内波条纹往往会淹没在海洋背景中,背景和条纹的亮度区分不大。此时,若采用传统的 Radon 变换,内波条纹对应的直线往往会由于“对角线效应”而无法正确检测。如图 2 (a) 所示,仿真图中有一条亮线和一条暗线,由于强斑点噪声的干扰,这两条线在图像中模糊不清,图 2 (b) 是将图 2 (a) 进行普通 Radon 变换后的结果,可见亮线对应的 Radon 域中的点完全被淹没于“对角线效应”所形成的亮斑中,用肉眼都无法辨识。

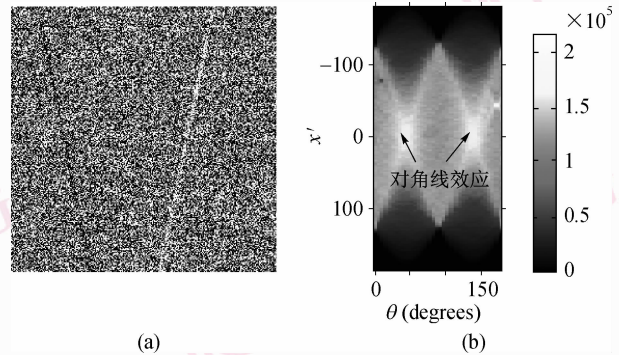


图 2 Radon 变换的“对角线效应”

Fig. 2 The diagonal effect of Radon transform

针对 Radon 变换的这一弱点,提出一种椭圆域归一化的 Radon 变换新方法。其基本思路和步骤如下:

- (1) 对图像进行 Radon 变换。
- (2) 为去除对角线效应,计算原始图像均值,形成一幅与原始图像同样大小,灰度值为均值的均匀图像,并对该图像也进行 Radon 变换。
- (3) 用步骤 2 中的 Radon 域系数对步骤 1 得到的 Radon 系数值进行点除,从而得到归一化 Radon 系数值。

(4) 在图像 4 个角处由于进行积分的像素很少,进行归一化后很容易由于强噪声等原因而在归一化 Radon 域中出现峰值,形成“角点效应”。这里在检测直线时,将 Radon 域上下两部分置零,这样对于直线检测没有明显影响且有效地除去了“角点效应”。这样处理的结果对应到图像域中也即取图像域的最大椭圆内区域进行处理,因此该方法称为“椭圆域归一化 Radon 变换”。

这里用对图 2 (a) 中仿真图像的处理说明椭圆域归一化 Radon 变换的思路和结果,如图 3 所示。

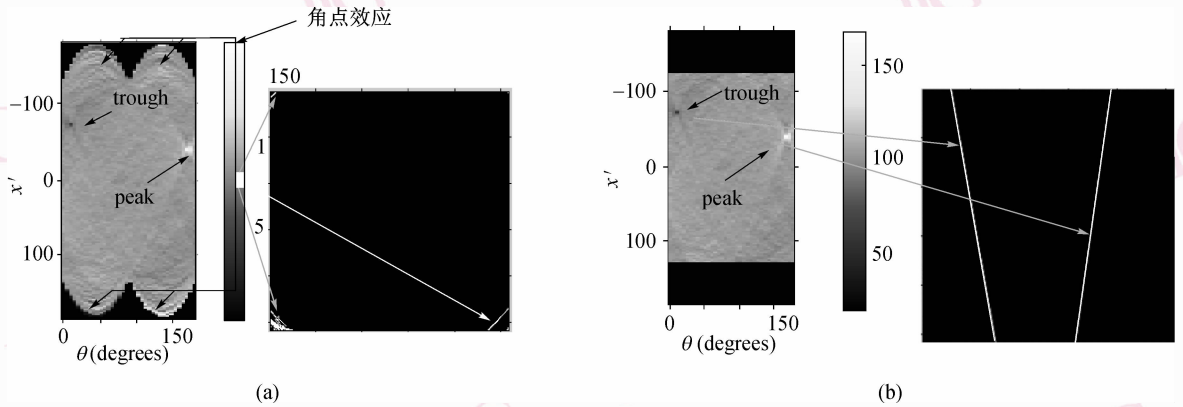


图 3 椭圆域归一化 Radon 变换

Fig. 3 Ellipse region normalized Radon transform

其中,图 3 (a) 所示为对 Radon 变换图像采用步骤 2、3 方法归一化后得到的结果(左)和直线提取结果(右),可见提取的图像存在“角点效应”,仍不能正确检测出直线。图 3(b) 所示为采用步骤 4 中所述的椭圆域归一化 Radon 变换得到的变换图像和直线提取结果。可见椭圆域归一化 Radon 变换去除了“对角线效应”和“角点效应”,能在强噪声中检测出明线和暗线。

3 内波检测与参数提取

3.1 内波区域检测

由于内波图像区域内可能存在陆地,为了去除陆地对内波检测的干扰首先要将陆地部分屏蔽。屏蔽陆地的方法有多种,可以根据 SAR 图像经纬度信息结合实地海岸线经纬度将陆地屏蔽,也可采用图像处理的方法分割陆地和海洋^[3]。本文采用第一种方法将陆地部分屏蔽。

由于在 SAR 图像中,内波表现的条纹往往呈曲线状,直接采用 Radon 变换无法检测直线。本文汲取了文献[6]中滑动窗口的思想对图像进行局部 Radon 变换实现内波亮条纹检测。这里,窗口大小的选取对于能否检测内波曲线及后续的参数提取是至关重要的。一般的,我们取典型内波波长的 1/2 ~ 1 倍最为适宜。在这样的窗口中,内波曲线表现为局部直线特征,也避免了由于窗口太小造成的虚警。对每一个窗口,采用本文提出的椭圆域 Radon 变换获得对应窗口的 Radon 域系数。

为了判断窗口内是否存在内波,需要在 Radon

域设置阈值 T ,其计算方法如下式所示:

$$T = \text{trough} + k(\text{peak} - \text{trough}) \quad (2)$$

式中, peak 是所有窗口 Radon 域峰值最大点, trough 是所有窗口谷值最小点。 $0 < k < 1$, 它的大小影响检测率和虚警率,是两者的一个折中。

所有在 Radon 域含有高于阈值 Radon 系数的窗口可以被初步判定为含有内波,将其对应到图像域便可定位内波区域在图像中的具体位置。由于将滑动窗口取为典型内波波长的 1/2 ~ 1 倍,含有内波的窗口在图像域中一般会有邻窗口,对于某些孤立窗口块,我们可认为是虚警而将其排除。

3.2 内波参数计算

本文中内波参数的提取主要是某一内波区域内波传播方向和内波波长的提取。

通过前面的椭圆域归一化 Radon 变换并经过阈值处理后,内波亮纹在 Radon 域表现为某些亮斑,为了后续内波参数提取的需要,在 Radon 域对这些亮斑进行收缩操作,直到这些亮斑收缩成为 Radon 域的单像素点。

要提取某一区域内波传播方向是简单易行的,只要提出 Radon 域中亮斑对应的 θ 值便可推导内波传播方向。

计算内波波长按以下步骤进行:

(1) 计算内波区域内所有窗口 θ 值平均 $\bar{\theta}$ 。

(2) 若 $|90^\circ - \bar{\theta}| \geq 45^\circ$ 取内波区域横向窗口数目最多,且上下邻域内波窗口数目和最大处一排窗口区域,否则取竖向窗口最多且左右邻窗口数目和最大处一排窗口区域进行后续处理。

(3) 统计步骤 2 中所得窗口区域内 θ 值,排除

远离 θ 值统计中心的点,计算 θ 值密集处所有点的 θ 平均 $\bar{\theta}'$,并将这些点平移到 $\bar{\theta}'$ 处。

(4) 计算亮条纹间距。图 4 以 $|90^\circ - \bar{\theta}| \geq 45^\circ$ 的窗口为例,说明其计算原理。

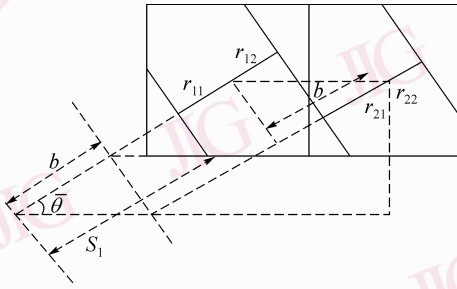


图 4 亮纹间距几何关系图

Fig. 4 The geometric relation of the bright lines

根据图中几何关系可得 $b = a \cos \bar{\theta}$,其中, a 是窗口宽度, b 是单位窗口在波长方向上的增量。

根据下式:

$$S_i = \frac{a}{2 \sin \bar{\theta}} + mb + r_{mi} \quad (3)$$

式中, r_{mi} 表示第 m 个窗口中第 i 个亮点(对应空间域中的一条亮线)处的 Radon 变换值。

计算 Radon 域每一亮点处的 S_i 值,其中, i 是亮点号, m 是横向窗口号,把这些值按由小到大的顺序排列(去除重复的值),并计算其间距平均 \bar{D} , \bar{D} 即所要求的亮纹平均间距。

(5) 由内波波长计算公式^[5]

$$\bar{D} = 0.66L \quad (4)$$

计算内波波长值 L 。

4 实验结果

以 ERS-SAR 网站提供的直布罗陀海峡 $2\,048 \times 1\,974$ ERS-1 SAR 图像(如图 5 所示)为例,进行内波检测与参数估计实验。为了验证本文方法的有效性,并估计最佳 k 值范围,将本文检测结果与传统的人工方法的检测结果进行比对,以人工方法为基准,计算本文方法的检测率与虚警率。人工方法将图像分成与本文方法所取的滑动窗口同等大小的小块,用目视的方法判断块内有无内波,用手动方法测量整个图像内的内波波长,对图 5 所示图像进行人工判决和测量得到:图像中含有内波的区域块共有 56

块,(对应的区块在此不作具体说明),波长的手动测量平均值为 1 134 m。

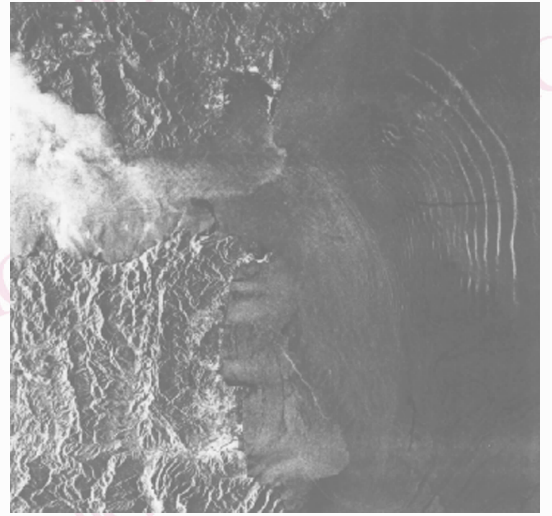


图 5 罗陀海峡 ERS-1 SAR 图像

Fig. 5 The ERS-1 SAR image of the strait of Gibraltar

表 1 采用不同 k 值时的人工检测方法比对结果

Table 1 The detection and estimate result comparing to manual detection with different value of k

k 值	波长 (m)	检测率 (%)	虚警率 (%)	波长误差 (m)
0.6	768.3	100	45.10	365.7
0.65	798.5	100	23.43	335.5
0.7	976.2	98.31	11.72	137.8
0.75	1 082.1	96.4	5.71	51.9
0.8	1 187.5	73.56	3.49	53.5
0.85	1 341.2	64.4	1.82	307.2

从表 1 可见,采用本文方法可以检测出内波区域, k 参数的变化直接影响检测率和虚警率,取参数 $k = 0.75$ 左右时检测效果与人工检测方法最为接近,对图 5 所示 SAR 图像检测到的内波区域结果如图 6 所示。

对图 6 中的检测结果进行参数估计计算,得到图像中检测波长处 $\bar{\theta} = 14$, $S_1 = 173.88$, $S_2 = 232.46$, $S_3 = 281.97$, $S_4 = 281.97$, $S_5 = 347.88$,则内波区域亮纹间距平均值为 58.1 像素。根据 ERS-1 SAR 图像的分辨率:12.5 m/像素,根据式(4)计算得到该图像中内波波长估计值为 1 082.1 m。

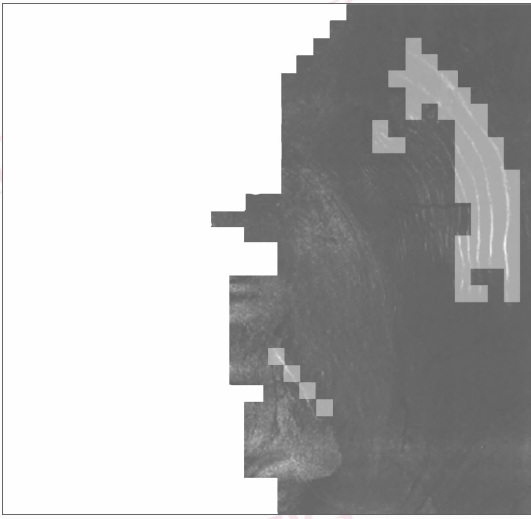


图 6 检测结果

Fig. 6 The detection result

5 结 论

对传统的 Radon 变换进行了改进,提出了一种椭圆域归一化 Radon 变换方法,并将其应用到 SAR 图像海洋内波检测中,根据变换后参数特征计算获得了海洋内波的区域传播方向和内波波长的估计值。通过实验验证,得出以下结论:

(1) 该方法是进行 SAR 图像海洋内波区域检测和内波参数估计的一种新的思路。

(2) 提出的椭圆域归一化 Radon 变换能检测强噪声背景下的弱直线特征,是直线检测的一种好方法。

(3) 该算法的结果可以作为海洋内波参数海水层化信息反演的基础。

(4) 由于数据缺乏,对于复杂海洋背景下的内波检测效果需要进一步验证。

参考文献 (References)

- 1 Rodenas J, Garello R. Wavelet analysis in SAR ocean image profiles for internal wave detection and wavelength estimation [J]. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 1997, **35**(4): 933-945.
- 2 Rodenas J, Garello R. Internal wave detection and location in SAR images using wavelet transform [J]. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 1998, **36**(5): 1494-1507.
- 3 Marghany M. Internal wave detection and wavelength estimation[A]. In: Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium Conference 1999[C], Hamburg, Germany, 1999, **1**(28):163-165.
- 4 Li Hai-yan. Studying ocean Internal waves with SAR[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004:45-53. [李海艳, 利用合成孔径雷达研究海洋内波[D]. 青岛:中国海洋大学, 2004:45-53.]
- 5 Zhao Bing-ai, Su Hui. Study on the internal wave characterization in SAR image [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, **24**(2):10-13. [赵炳爱, 苏辉. SAR 图像中内波参数提取方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, **24**(2):10-13.]
- 6 Copeland A, Ravichandran G, Trivedi M. Localized radon transform-based detection of ship wakes in SAR images[J]. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 1995, **33**(1):35-45.