

基于 SAR 子孔径序列图像配准的海洋动态信息获取

孙海青^{①②} 王小青^{*①} 种劲松^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要: 合成孔径雷达(SAR)在海洋遥感中发挥着重要的作用。海洋的动态信息如洋流的运动和海浪的传播等是海洋信息中的重要组成部分。但是通常的 SAR 海洋图像信息处理是将 SAR 图像作为海面的瞬时状态进行处理,无法获取海洋的动态信息。该文采用子孔径分割的方法获取海面的具有连续时间间隔的序列图像,通过改进的相位相关法对序列图像间的对应部分进行亚像素级配准,获取了海面各个部分的海浪纹理信息运动的速度大小和方向。仿真实验表明改进的配准方法具有 1/10 像素精度和极强的噪声鲁棒性。对序列图像间相同的舰船目标,分别采用该文提出的配准法与较成熟的“尾迹法”计算的舰船速度基本一致,证明了该文方法的有效性。

关键词: SAR 子孔径序列图像; 相位相关法; 海面动态信息; 舰船速度

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0179-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00478

Ocean Dynamic Information Acquisition Based on Matching SAR Ocean Sub-aperture Sequence Images

Sun Hai-qing^{①②} Wang Xiao-qing^① Chong Jin-song^①

^①(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) plays a very important role in ocean remote sensing. Current movement and ocean wave transmission are crucial constituent part of ocean dynamic information. However, regular SAR ocean image processing treats SAR image as transient state, and can not get dynamic information. This paper gets several sequent time interval images from one image using sub-aperture division method. An optimized phase correlation method is proposed to match the corresponding parts of sequence SAR images. According to the movement quantity and direction, the ocean waves movement tendency can be got. Experimental results show that the optimized method presents 1/10 resolution accuracy and noise robustness. For the same ships in sequence images, the proposed matching method and the “ship wake” method are used to calculate the ship speed. Two results are very close to each other, which proves the proposed method is effective.

Key words: SAR sub-aperture sequence images; Phase correlation method; Ocean dynamic information acquisition; Ships speed

1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天时、全天候、高分辨率的特性,是当今海洋遥感中的不可或缺的重要传感器,在海面风场^[1]、内波^[2]、波浪等海洋环境信息获取方面有许多成功的应用。海面的快速动态信息是海面的重要信息之一,但是目前 SAR 在海洋上的应用通常是获取海面的瞬时图像,无法获取海面的动态信息。关于 SAR 获取动态信息的研究主要集中于对刚体运动目标获取的分析上。常用的

检测动目标的方法有单通道方法和多通道方法。多通道方法^[3]虽然具有较强的抑制杂波能力,较大的速度检测范围,但系统复杂度高。单通道方法^[4,5]由于 SAR 海洋图像信噪比低,无法用于海洋动目标检测。此外,海洋上舰船目标的运动如果有尾迹,可以根据尾迹^[6]确定目标的运动方向和速度,但如果尾迹模糊会造成较大的误差。在海洋流场的获取上,文献[7,8]都采用多普勒频移法估计海洋流场,利用动目标的多普勒偏移特性获取动态信息。但此方法只能获取径向速度信息,不能获取 2 维运动信息。

2011-05-19 收到, 2011-09-01 改回

*通信作者: 王小青 huadaqq@126.com

在合成孔径雷达成像的方位向孔径合成过程中,一个目标在合成孔径长度内一直被照射。利用 SAR 方位向信号频谱与方位向视角的对应关系可以很方便地在方位向频域实现子孔径分割,对子孔径部分分别成像则可以得到子孔径序列成像。每个目标依次被各个子孔径成像,成像时间存在差异,利用子孔径序列图像间的时间差异可以提取海面的动态信息。以 L 波段的机载 SAR 为例,如果天线长度 1.5 m,作用距离 15000 m,载机速度 120 m/s,合成孔径时间约 20 s,若分为 10 个子孔径,则相邻子孔径序列图像间隔时间为 2 s 左右。在这么短的时间内大尺度纹理特征如波浪的相关程度还是很高的。又由于子孔径间隔时间较短,海浪等纹理信息移动的距离很小,需要精确估计。由于海面波浪等纹理信息是面目标,其平移可以采用匹配法来进行高精度估计。在众多匹配算法^[9]中,相位相关法^[10-12]以其运算量小,抗噪声性强而得到广泛关注。由于它是使用两幅图像互功率谱中的相位信息通过最小二乘法计算相对平移量,所以它能捕获大尺度特征,对单个点的亮度值变化不明显,对噪声不敏感,且能达到亚像素的匹配精度。由于 SAR 海洋图像乘性的斑点噪声效应严重,信噪比低,在光学图像相位相关匹配方法中常用的经验参数对 SAR 图像并不适合,本文针对 SAR 图像特点进行改进。

本文利用 L 波段子孔径序列图像,通过图像纹理匹配的方法获取了海面动态特性。对相位相关法中的经验参数进行了改进,使之适用于 SAR 图像,并将其用于 SAR 海洋子孔径图像匹配。仿真实验表明改进的相位相关方法对于 SAR 图像的匹配具有 1/10 像素精度。对于海面纹理信息的运动,本文将海面分块,根据海面不同部分的位移方向和大小,获取海面纹理(主要是海浪纹理)的运动速度矢量。由于本文获取的海洋图像区域没有当时的海上实测数据,无法进行对比验证。但是同一海域有运动舰船存在,为了验证本文方法的有效性,本文对海面运动舰船分别采用本文方法以及较成熟的“尾迹法”^[8]进行速度估计,两种方法估计的速度吻合较好,证明了本文方法的有效性。

2 相位相关法原理

2.1 相位相关法平移估计

相位相关法通过计算频域的相移量来获得时域上的偏移量。

假设子孔径图像间只存在平移关系,则两幅相邻子孔径图像为 $f_1(x, y)$ 与 $f_2(x, y)$, 其中 $f_2(x, y)$ 由 $f_1(x, y)$ 经过简单的平移得到。

$$f_2(x, y) = f_1(x - a, y - b) \quad (1)$$

将 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 做傅里叶变换后为 $F_1(u, v)$ 与 $F_2(u, v)$, 根据傅里叶变换的性质可得

$$f_1(x - a, y - b) \xrightarrow{F} F_1(u, v) \exp\left[-2\pi j\left(\frac{au}{M} + \frac{bv}{N}\right)\right] \quad (2)$$

时域上的平移导致频域上的相移。因此可以通过计算频域中的相移量获得时域上的偏移量。式(2)中 M, N 为图像的高度和宽度大小。它们的互功率谱 Q 为

$$Q = \frac{F_1^*(u, v)F_2(u, v)}{|F_1^*(u, v)F_2(u, v)|} = \exp\left[-2\pi j\left(\frac{au}{M} + \frac{bv}{N}\right)\right] \quad (3)$$

其中 $F_1^*(u, v)$ 是 $F_1(u, v)$ 的复共轭。

序列图像上的每个对应点都可以用于计算它们的互功率谱,可以列出多个算式,只有两个未知数需要求解。针对该超定方程组,如果解出了 a, b , 得到两幅图像间的相对位移量,就能配准两幅图像。

2.2 解 a, b 的方法:奇异值分解(SVD)方法

经过上文分析可知,图像配准问题转化为一个求未知量为 a, b 的超定方程求解问题。根据文献[13]所述,将矩阵做奇异值分解(SVD)后,奇异值的高序部分更多地反映图像噪声,中序部分更多地反映目标性质,而低序部分更多地反映图像背景。由式(3)可知,没有噪声干扰的互功率谱矩阵 Q 的秩应该为 1。用 SVD 法滤波时应该保留低序部分的最大奇异值,而把其它的奇异值都默认为是噪声引起的,予以滤除。位移量 a, b 可以通过秩为 1 的互功率谱矩阵进行求解,这个方法不仅简单易行,也可以一定程度抑制噪声。

互功率谱矩阵 Q 大小为 $M \times N$, 不失一般性,假设 $M > N$, 秩为 $r, r < N$, 类似方阵可以做特征值分解,非方阵可以做奇异值分解。分解后,

$$Q = U \Sigma V^T \quad (4)$$

其中 U 是 $M \times M$ 正交矩阵, V 是 $N \times N$ 正交矩阵,分别称为左右奇异矢量矩阵。 Σ 为 $M \times N$ 的奇异值矩阵,它只在主对角线上的前 r 个值上非 0,其它元素值全为 0。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Lambda_{r \times r} & 0_{r \times (n-r)} \\ 0_{(n-r) \times r} & 0_{(n-r) \times (n-r)} \\ 0_{(m-n) \times r} & 0_{(n-r) \times (n-r)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$\Lambda_{r \times r} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$, 其中, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r \geq 0$, 如果把矩阵 Q 的 SVD 结果写成积的形式,就可以得到如下结果:

$$Q = \sum_{i=1}^r \lambda_i u_i v_i^T \quad (6)$$

SVD 法滤波时保留低序部分的最大奇异值,滤

除其它的奇异值。经过滤波后，提取最大奇异值后的互功率谱矩阵 Q 变为 Q' ：

$$Q' = \lambda_1 u_1 v_1^T \quad (7)$$

这样就符合互功率谱矩阵秩为 1 的要求。参数 a 的计算，可以通过取 Q' 的任意一行，构造方程用最小二乘法来求解：

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ M-1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{2\pi a}{M} \\ \frac{2\pi bv}{N} \end{pmatrix} = \text{unwrap}(\text{angle}(Q'(:,1))) \quad (8)$$

将 $\begin{pmatrix} \frac{2\pi a}{M} \\ \frac{2\pi bv}{N} \end{pmatrix}$ 解出，就可解出 a (M 已知)，同理，

将 Q' 的一行取出可以将 b 解出。

2.3 算法误差分析及经典方法减少误差的方法

由于图像信号是离散的，并且在算法过程中存在一些近似，相位相关法的主要误差来源于两部分：边缘效应和混叠效应。

边缘效应是因为图像做 DFT 时默认图像是周期的，如果 DFT 处理有限序列时，就隐含地将有限序列延拓成为周期序列。即图像的上(左)边像素和下(右)边像素自动拼接起来。上(左)边像素和下(右)边像素的不连续就有可能导致在傅里叶变换后有高频信号产生。这就是边缘效应。文献[10]提到，去除边缘效应的有效方法是，在做 DFT 变换前加上 2 维窗函数，以减小边缘对整个图像的影响。

混叠效应：光学信号经采样变为图像像素的过程相当于经过了一个非理想的低通滤波器，假设图像的信号带宽为 $(0 \sim f_0)$ ，如果采样频率小于奈奎斯特频率，就会发生频谱混叠。如图 1 所示，高频信号叠加在低频上，使得计算偏移量变得不精准。从图 1(b)可以看出，这时的互功率谱矩阵就变得非常复杂了。

文献[10]指出，对于光学图像，混叠一般发生在高频区域，而在半径为 $0.6L/2$ (其中 $L = \min(M, N)$) 的低频区域被混叠污染的程度较轻。所以，有效去除混叠效应的方法是在互功率谱矩阵 Q

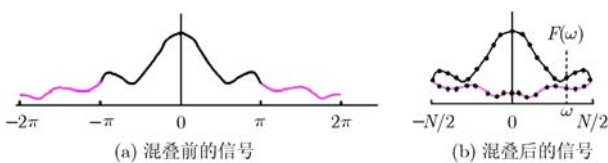


图 1 1 维信号混叠的影响示例

上将半径为 $0.6L/2$ 的低频区域提取出来，然后再做 SVD 变换，只保留最大奇异值将矩阵变为 1 维矩阵，再用式(8)的方法将平移参数 a, b 计算出来。此方法可以有效地抑制边缘效应和混叠效应，可以应用于光学图像的精确匹配。经典相位相关法计算图像平移量，整个流程是：

- (1)将两幅图像加上 2 维的 Blackman 窗函数，以降低边缘效应。
- (2)对两幅图像进行离散傅里叶变换。
- (3)求两幅图像的互功率谱矩阵 Q 。
- (4)从相位相关矩阵中，提取出中心半径为 $0.6L/2$ 的一小块区域，以降低混叠效应。
- (5)对步骤(4)中截取的小块区域构成的矩阵做 SVD 分解，分解后取最大的分量，将这一矩阵变为秩为 1 的矩阵 Q' 。
- (6)取 Q' 的任一列，根据式(8)求出参数 a 。
- (7)用类似的方法取任一行，求出参数 b 。

3 相位相关法用于 SAR 子孔径序列海洋图像的问题及其改进办法

3.1 经典的相位相关法应用于 SAR 海洋图像的问题

通常情况下，光学图像含噪声较少，其频域带宽较窄，经 DFT 后发生混叠的程度很小，用文献[10]提出的方法，就可以大大减小混叠和边缘效应的影响。而由于 SAR 的相干成像特性，不可避免地存在相干斑，海洋的相干性差进一步加剧了相干斑噪声的程度。这些因素都导致 SAR 海洋图像噪声严重，信噪比非常低。其频域的高频信号多，带宽较宽，经 DFT 后混叠严重。用相位相关方法求解误差非常大，2.3 节中光学图像经典的减少误差的方法在 SAR 海洋图像上不能取得理想的效果。

3.2 相位相关法的改进

由上面分析可知，相位相关法应用于 SAR 海洋图像的主要误差来源是混叠效应。由于混叠效应在 SAR 图像中更加严重，混叠不仅发生在高频并向低频延展。用光学图像 $0.6L/2$ 经验值取得的数据很可能已经包含一定程度的混叠了。通过上面分析可知，在 SAR 海洋图像的匹配问题上，可以通过将这个经验值减小，取没有混叠的低频区域来降低混叠效应的影响。下面用仿真实验验证了我们的想法。

因为真正的 SAR 海洋序列图像虽然叠加了真实的噪声，但是由于不能事先已知其平移量，没办法验证算法的精度。因此该文分析了 SAR 图像的噪声特性，用已知精确平移量，但叠加不同 SAR

噪声的图像做仿真实验, 通过改变这个经验值参数的大小, 观察参数取多大时匹配的误差最小。

SAR 图像包含乘性噪声和加性噪声, 乘性噪声是指 SAR 图像每个像素点的灰度值服从瑞利分布, 瑞利均值为真实灰度值大小, 其概率密度函数为

$$p(U) = \frac{U}{\sigma^2} e^{-U^2/(\pi\sigma^2)} \quad (9)$$

可以证明, 瑞利分布的平均值是 $\sqrt{\pi/2}\sigma$, 如果原图像的任一点灰度值为 $f(i, j)$, 并满足

$$\sqrt{\pi/2}\sigma = f(i, j) \quad (10)$$

在产生瑞利分布的随机数时, 参数 σ 可以由此得到。

SAR 图像的加性噪声也服从瑞利分布。仿真实验用真实 SAR 子孔径图像和经过向下向右分别平移 2, 5 个像素的同一幅图像, 然后分别注入乘性噪声和加性噪声。这样我们就得到了已知精确平移量, 但叠加不同 SAR 噪声的图像。图 2 为仿真实验用的原图, 叠加了乘性噪声和加性噪声的图像。

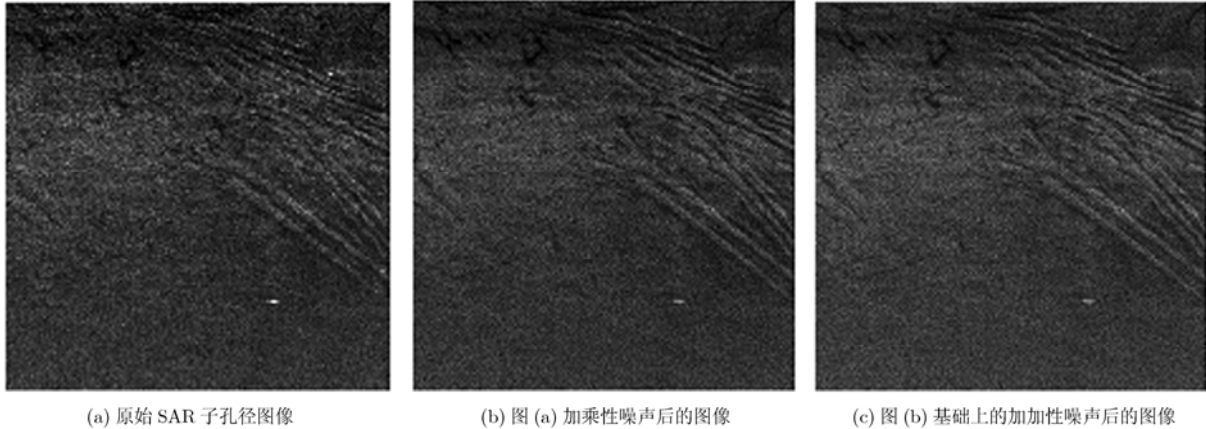


图 2 仿真实验图像

图 3 为给出了叠加不同信噪比噪声的情况下, 取不同中心半径参数时所对应的误差大小。误差的大小指计算值与真实值之间 x, y 方向误差的平方和。

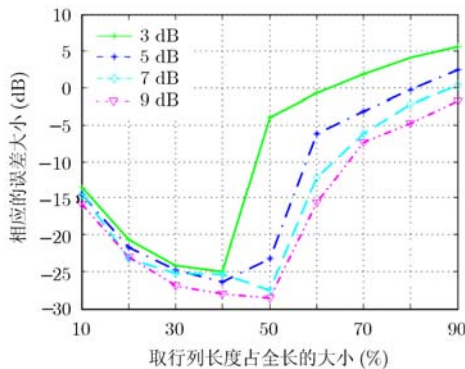


图 3 仿真实验结果

可以看出, 在中心半径参数取得很小如 $0.2L/2$ 时, 由于点数较少, 最小二乘法估计的方程个数较少造成了估计不准确的结果。在中心半径参数取得很大如 $0.8L/2$ 时, 由于边缘混叠效应的影响, 也使结果有较大的误差。我们实验发现, 在大多数信噪比下中心半径参数取 40% 时配准误差最小。其它少数信噪比下, 取 50% 时误差最小, 且与参数取 40%

的误差相比只是稍小。所以可以给出 SAR 图像配准时中心半径参数取法, 即用最小二乘法解超定方程时取以图像中心为中心, 边长为 $0.4L/2$ 大小的数据时, 基本滤除了混叠效应, 误差只有 -25 dB 左右, x, y 方向的平均匹配精度均达到十分之一像素。观察图 3 可知, 与选取原来经验值 $0.6L/2$ 的误差相比, 新的参数较大程度上降低了误差大小, 大大提高了算法的精度。

3.3 改进的相位相关法用于 SAR 海洋图像配准

用相差 3 个孔径的机载 SAR 海洋图像实验, 计算两幅图像之间的平移量。过程与 2.3 节相位相关法采取的实验过程一致, 应用改进的参数, 得到的结果如图 4 所示。计算得到的偏移量是 $a = 3.17152$, $b = 8.23920$ 。

4 海面动态信息获取

4.1 海面纹理信息运动

海面上最显著的动态特性就是波浪纹理的传播。由于各个局部区域海浪的波长、波向不一致等原因, 会导致各个局部运动大小不一致。首先对海面 SAR 子孔径序列图像进行子块分割, 再通过上述的相位相关法进行平移估计可以获得各个局部纹理的运动矢量。子孔径图像间的时间间隔已知, 所

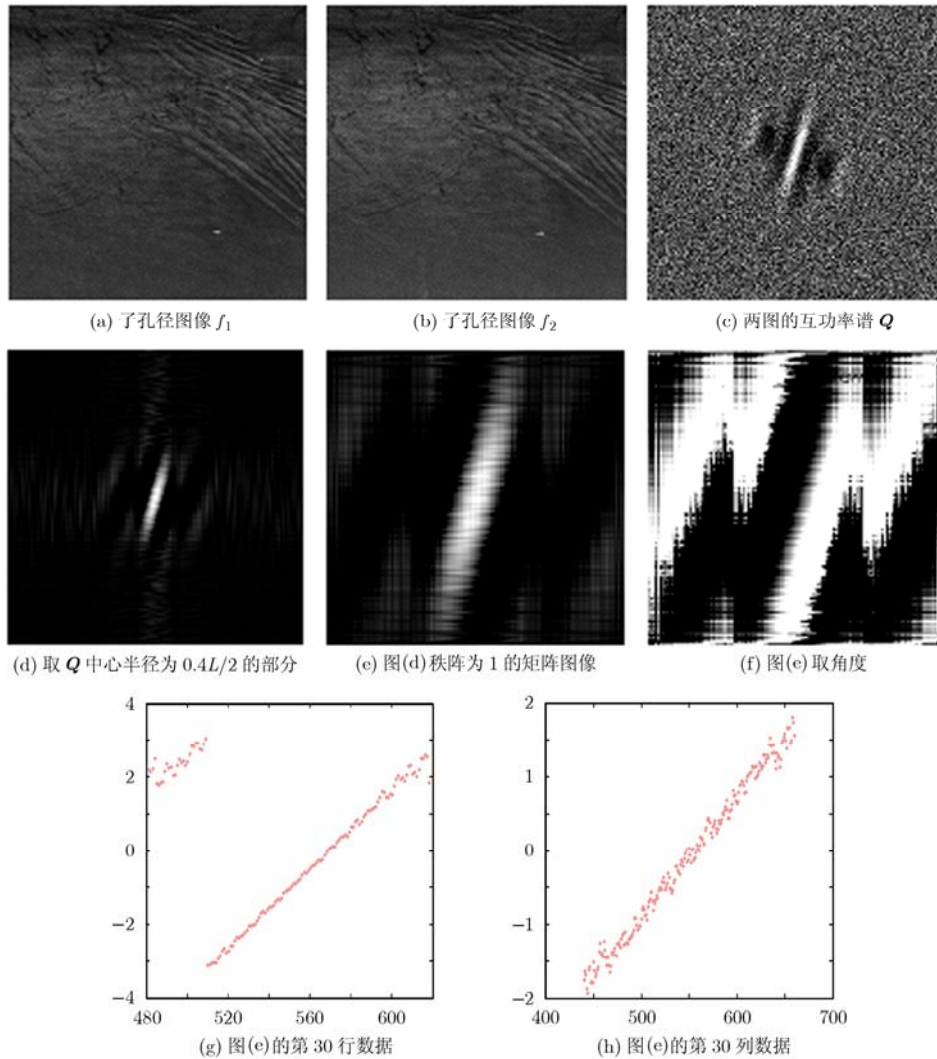


图 4 用相位相关法的 SAR 海洋配准实验图像

以还可以获得纹理运动的速度信息。

因为机载 SAR 成像的载体速度往往估计不准，因此会造成每幅子孔径图像发生成像的偏移，所以我们计算得到的两幅图像的平移差别其实是成像造成的偏移与实际海面纹理运动的和。即

$$\text{计算的背景偏移量} = \text{海洋纹理运动} + \text{成像误差导致的偏移} \quad (13)$$

海面纹理的运动主要是波浪相位和能量的传播。水质点只是在原地往复运动，不会随波浪传播，因此可以认为油膜等海面覆盖物基本是不随波浪传播的。本文所用的海面 SAR 图像有明显的油膜，

本文将油膜假定为静止，来校正成像误差导致的偏移。

同 3.3 节的方法计算出子孔径序列图像中的子图像块的偏移量。再匹配油膜区域得到成像误差导致的偏移量，两者相减就可以得到海洋流场的分布。

将图像分为 5×5 小块分别匹配，得到的位移量如表 1 所示。

已知，两幅子孔径图像相差 3 个孔径，时间上相差 8.06 s，方向分辨率 5.4 m/pixel，距离向分辨率为 4.5 m/pixel。则可以计算速度，如表 2 所示。

表 1 对应小块的偏移量大小(像素)

像素(pixel)	第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列	第 5 列
第 1 行	-0.12, -0.24	-0.07, -0.22	-0.08, -0.52	-0.10, -0.52	0.07, -0.09
第 2 行	0.10, -0.30	0.07, -0.18	0.02, -0.59	0.06, -0.20	0.19, -0.11
第 3 行	0.28, -0.39	0.18, -0.33	0.35, -0.49	0.17, -0.35	0.18, -0.21
第 4 行	0.33, -0.49	0.44, -0.30	0.51, -0.38	0.37, -0.53	0.27, -0.49
第 5 行	0.49, -0.38	0.59, -0.48	0.57, -0.74	0.35, -0.49	0.17, -0.35

表 2 对应小块的速度大小(m/s)

速度(m/s)	第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列	第 5 列
第 1 行	-0.07, -0.16	-0.04, -0.14	-0.05, -0.35	-0.06, -0.35	0.04, -0.06
第 2 行	0.05, -0.20	0.04, -0.12	0.01, -0.39	0.03, -0.13	0.10, -0.08
第 3 行	0.16, -0.26	0.10, -0.22	0.19, -0.33	0.09, -0.24	0.10, -0.14
第 4 行	0.19, -0.33	0.25, -0.20	0.28, -0.26	0.21, -0.36	0.15, -0.33
第 5 行	0.28, -0.26	0.33, -0.32	0.32, -0.49	0.19, -0.33	0.09, -0.24

计算得到的波浪纹理运动速度矢量如图 5 所示, 其中箭头大小和方向分别代表位移的大小和方向。这样我们就可以研究海面的局部运动情况。

4.2 动态信息验证

由于本文获取的海洋图像区域没有当时的海上实测数据, 无法进行对比验证。但是同一海域有运动舰船存在, 采用其尾迹的方向信息以及舰船与尾迹方位向偏移量可以计算舰船速度^[5], 同时也可以通过子孔径匹配的方法计算速度矢量。

类似 4.1 节, 序列图像中目标位置的不同不仅由于目标运动导致, 而且还由于序列图像间成像误差导致的偏移。即

$$\text{序列图像目标重心的偏移量} = \text{目标运动} + \text{成像误差导致的偏移} \quad (11)$$

首先确定各个子孔径图像中舰船目标的重心位置, 然后根据用油膜区域作为静止背景校正各个子孔径图像, 这样就可以将成像导致的偏移量进行校正。最后根据校正后的子孔径序列图像中的舰船目标重心位置不同计算目标偏移量和速度。

舰船重心确定的方法如下:

(1) 找出图像上灰度值大于 Gray_Threshold 的联通域;

(2) 考虑舰船大小, 取出联通域面积大于 Area_Min, 小于 Area_Max 的区域。这样就可以找到舰船的位置, 进一步, 也能方便地获得它的重心位置且重心位置是亚像素精度的, 如图 6 所示, 图 6(b) 用上述算法自动找出图 6(a) 舰船的位置(黄色框)和目标的重心(小蓝点)。

用改进的相位相关法匹配油膜区域, 以得到成像误差导致的图像偏移量。图 7 所示, 用伪彩色合成的方法清楚的表示了油膜区域配准前与配准后的图像。红色代表前一时间刻图像, 绿色代表后一时间刻图像。图 7(c) 两幅图像直接伪彩色合成, 红绿色是有重影的, 说明油膜区域并没有对齐。图 7(d) 配准后伪彩色合成, 红绿色重影基本消失, 说明我们匹配方法的有效性。我们在 7(e) 图上可以判断舰船向左上方移动, 但油膜区域配准后, 即去除成像误差导致的图像偏移后, 从 7(f) 图上可以看出舰船向右

下方移动, 尾迹的位置和方向也证明了我们分析的正确。

改进的相位相关法匹配油膜得到的成像误差导致的偏移量是亚像素精度的, 确定舰船位置和舰船重心也是亚像素精度的(见图 6(b) 表示的重心位置), 所以本方法计算的舰船速度也是亚像素精度的。

进而, 本文将计算得到的舰船速度与尾迹法计算的舰船速度进行对比, 来证明本方法的有效性。尾迹法^[5]根据运动目标 SAR 成像的特点, 运动舰船航速可以通过舰船在方位向的位移计算。即

$$V_{\text{ship}} = \frac{dV_{\text{sat}}}{H \tan \theta \cos \phi} \quad (12)$$

其中 d 为舰船方位向位移; ϕ 为舰船运动矢量与距离向之间的夹角; H 为 SAR 平台的高度; θ 为入射角, V_{sat} 为卫星速度。

分别对图 2(a) 与图 6(a) 中的舰船用两种方法计算其速度, 结果见表 3。对表 3 的数据分析可知, 本文计算得到的舰船速度与尾迹法计算的舰船速度吻合较好, 间接证明了本文采用子孔径序列图像亚像素配准方法获取动态信息的有效性。

5 结论

将 SAR 原始数据进行子孔径分割, 分别成像, 可以获取同一场景不同时间序列的图像。本文基于 SAR 子孔径序列图像的这一特点, 采用改进的相位相关法得到了图像各个子区域的运动矢量。在匹配方法上, 本文改进了相位相关法使其能运用于 SAR 海洋图像的配准。本方法首次将相位相关法用于 SAR 子孔径序列图像的匹配。仿真实验表明改进的相位相关法具有更强的抗噪性, 且可以达到 1/10 像素精度。由于相位相关法得到的偏移量还包含了 SAR 成像误差导致的图像偏移量, 因此本文假定图像中的油膜区域是静止背景, 对成像误差导致的图像偏移量进行了校正。由于没有海上的实测数据进行验证, 但是同一海域有运动舰船存在, 采用本文方法计算船速与尾迹法^[5]计算的船速是基本吻合的, 验证了本文采用子孔径序列图像亚像素配准方法获取动态信息的有效性。

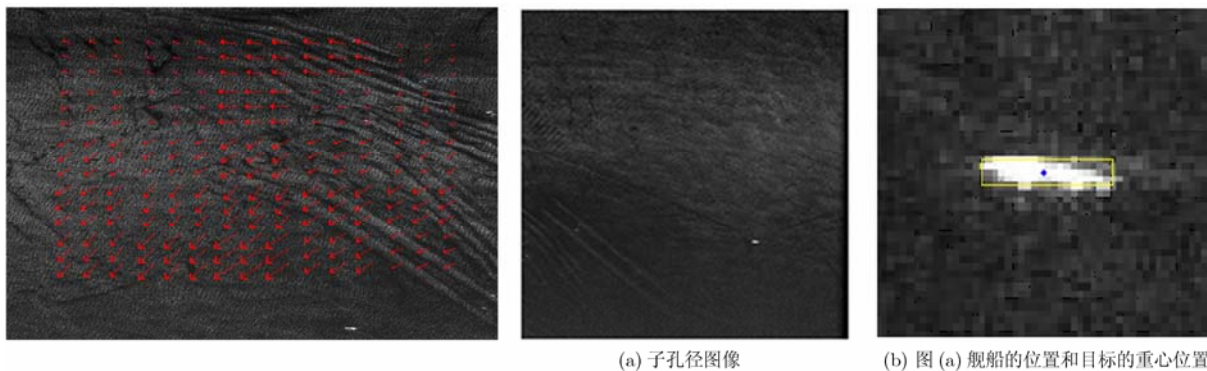


图5 分块匹配后得到的流场图

图6 自动寻找舰船目标及其重心的实验图像

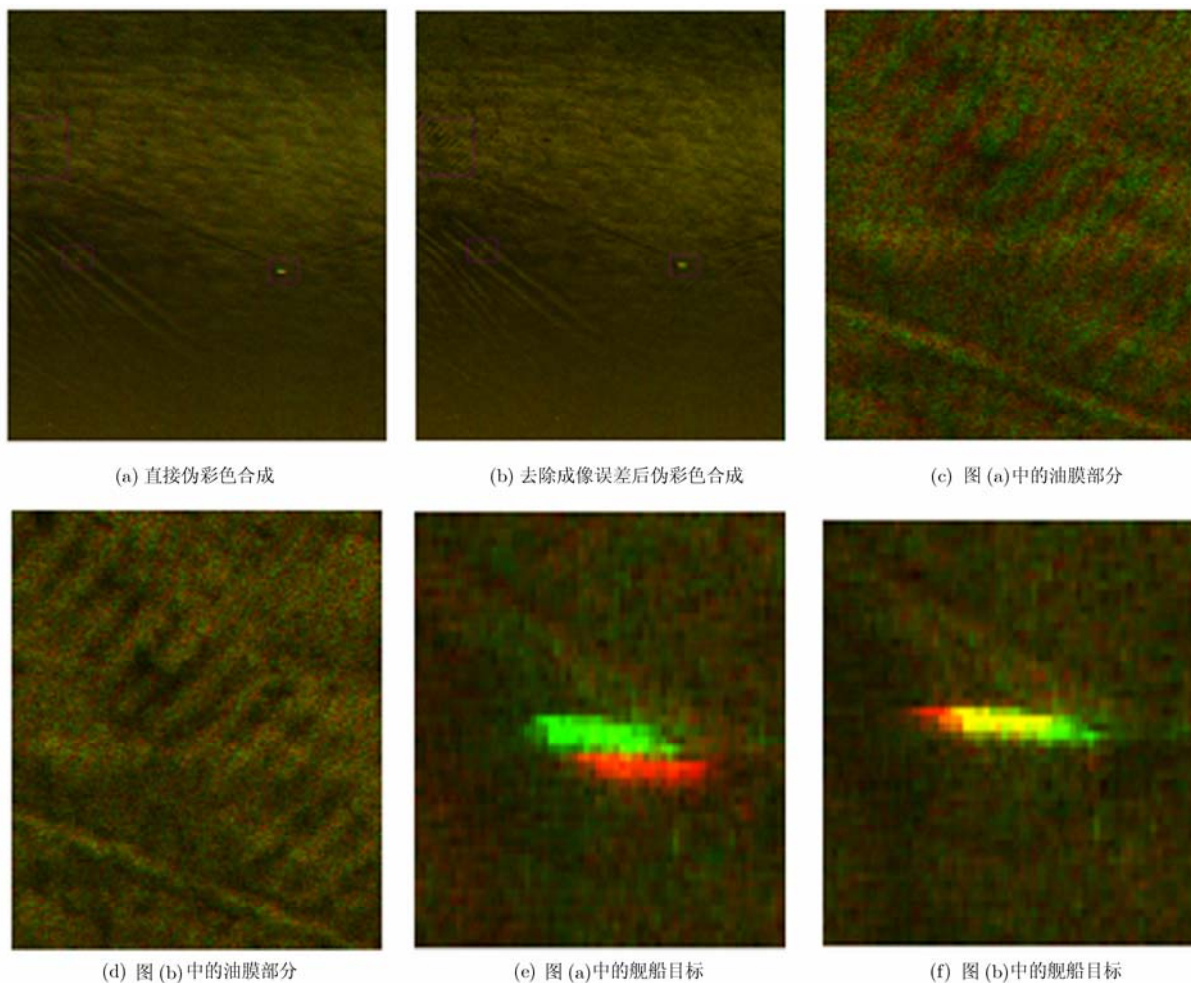


图7 用伪彩色合成观察运动目标实验图像

表3 用匹配法和尾迹法计算的舰船速度对比

方法	距离向速度(m/s)	方位向速度(m/s)	总速度(m/s)	与距离向夹角(°)
匹配法	1.34528	3.88818	4.11433	70.9
尾迹法	1.68974	3.99069	4.33368	67.5
匹配法	-1.78624	-5.30748	5.60000	71.4
尾迹法	-2.12010	-4.91306	5.35098	66.7

参考文献

- [1] Horstmann J, Koch W, and Lehner S. Wind retrieval over ocean using synthetic aperture radar with C-band HH polarization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2122-2131.
- [2] Porter D L and Thompson D P. Continental shelf parameters inferred from SAR internal wave observations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16(4): 475-487.
- [3] Wang H S C. Mainlobe clutter cancellation by DPCA for space-based radars[C]. IEEE Aerospace Applications Conference Digest, Crested Butte, Colorado, USA, February 3-8, 1991: 1-10.
- [4] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1971, 7(3): 499-505.
- [5] Liu Shu-jun, Yuan Yun-neng, and Gao Fei. Method of moving target detection based on sub-image cancellation for single-antenna airborne synthetic aperture radar [J]. *Journal of System Engineering and Electronics*, 2007, 18(3): 448-453.
- [6] Ouchi K, Iehara M, and Morimura K. Nonuniform azimuth image shift observed in the radarsat images of ships in motion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2188-2195.
- [7] Kersten P R and Jansen R W. Estimating surface water flow speeds using time-frequency methods[J]. *IET Signal Processing*, 2010, 4(4): 406-412.
- [8] Rossi C, Runge H, and Breit H. Surface current retrieval from TERRASAR-X data using Doppler measurements[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, July 25-30, 2010: 3055-3058.
- [9] Huang Lei and Li Zhen. Feature-based image registration using the shape context[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(8): 2169-2177.
- [10] Stone S S, Orchard M T, Chang E C, et al. A fast direct Fourier-based algorithm for sub-pixel registration of images. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(10): 2235-2243.
- [11] Hoge W S. A subspace identification extension to the phase correlation method [MRI application][J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2003, 22(2): 277-280.
- [12] Morgan G L K, Liu Jian-guo, and Yan Hong-shi. Precise subpixel disparity measurement from very narrow baseline stereo[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(9): 3424-3433.
- [13] 胡谋法, 董文娟. 奇异值分解带通滤波背景抑制和去噪[J]. *电子学报*, 2008, 36(1): 111-116.
- Hu M F and Dong W J. Singular value decomposition band-pass-filter for image background suppression and denoising[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(1): 111-116.
- 孙海青: 女, 1989年生, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理.
- 王小青: 男, 1978年生, 副研究员, 研究方向为雷达信号与信息处理.
- 种劲松: 女, 1969年生, 研究员, 研究方向为海洋目标监视、遥感图像处理.