

## 基于 FABEMD 和 Goldstein 滤波器的 SAR 舰船尾迹图像增强方法

张问一<sup>\*①②③</sup> 胡东辉<sup>①②</sup> 丁赤彪<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(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)

<sup>②</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 增强 SAR 舰船尾迹图像中模糊的开尔文尾迹并保持湍流尾迹特征对舰船及运动参数的反演具有重要作用。该文利用快速自适应 2 维经验模式分解方法(Fast and Adaptive Bidimensional Empirical Mode Decomposition, FABEMD)实现图像中开尔文尾迹, 湍流尾迹和其他中/大尺度海洋特征的分解, 提高开尔文尾迹相对其他特征的图像和频谱对比度。同时引入并改进干涉图 Goldstein 滤波器实现对开尔文尾迹的进一步增强, 并利用不变矩对增强后的 SAR 舰船尾迹图像进行评价。通过原理分析、增强实验和主/客观评价, 表明该方法具有显著的开尔文尾迹增强效果, 并保持了湍流尾迹特征, 实现效率高且适用性较强。

**关键词:** 合成孔径雷达; 图像增强; 尾迹; 2 维经验模式分解; 快速自适应 2 维经验模式分解; 干涉相位滤波; 不变矩

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)04-0426-10

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20059

## Enhancement of SAR Ship Wake Image Based on FABEMD and Goldstein Filter

Zhang Wen-yi<sup>①②③</sup> Hu Dong-hui<sup>①②</sup> Ding Chi-biao<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Enhanced SAR ship wake images with blur Kelvin wakes and reserved turbulent wakes are very important to the inversions of ship and motion parameters. This paper applies the Fast and Adaptive Bidimensional Empirical Mode Decomposition (FABEMD) to decompose the SAR ship wake image into Kelvin wakes, turbulent wakes and other multiscale features, which enhances the gray intensity and spectrum contrast of Kelvin wakes to other features. Based on the FABEMD, a modified Goldstein interferogram filter is developed to further enhance the Kelvin wakes. Moreover, the moment invariants are introduced to evaluate the enhancement. Therefore, the Kelvin wakes are dramatically enhanced and the turbulent wakes are reserved. Algorithm analysis, experiments, subjective and objective evaluations show the reasonable efficiency and capabilities.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Image enhancement; Ship wake; Bidimensional Empirical Mode Decomposition (BEMD); Fast and Adaptive Bidimensional Empirical Mode Decomposition (FABEMD); Interferogram filter; Moment invariants

### 1 引言

1978 年,随着合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)卫星 Seasat 的发射, SAR 已经证明其在观测各种海洋现象和舰船目标中的巨大应用价

值。在 SAR 海洋图像中,除可以观察到海浪、中/大尺度涡、锋面和油迹等海洋特征以外,还可观察到运动舰船和由其产生的尾迹特征。利用 SAR 舰船尾迹图像进行舰船监测对维护领海主权和专属经济开发区经济利益具有重要的军事和民用价值<sup>[1]</sup>。相比直接对 SAR 图像中的舰船进行检测,由于舰船尾迹具有覆盖面积广,持续时间长等特点,在舰船目标的检测、识别和参数提取中具有更加广泛的

2012-08-20 收到, 2012-11-14 改回; 2012-11-20 网络优先出版

国家部委预研基金资助课题

\*通信作者: 张问一 jasoniecas@gmail.com

应用价值和前景。SAR 舰船尾迹图像中常见的开尔文尾迹常被用于舰船位置和航速的反演<sup>[2-5]</sup>, 而另一种更加常见的湍流尾迹常用于舰船参数和航向的反演<sup>[2,3]</sup>。然而, 舰船尾迹作为一种特殊的海面特征成像机理更为复杂, 且 SAR 对舰船尾迹的观测条件, 舰船参数和周围海况参数等均会对 SAR 图像中的舰船尾迹带来影响, 导致观察到的开尔文尾迹在 SAR 图像上特征纹理常不明显, 可视化效果不佳, 影响检测和识别概率, 以及参数提取精度。

目前, 已经有许多学者开展 SAR 舰船尾迹图像的增强研究, 增强方法主要集中在抑制斑点噪声和增强舰船尾迹相对背景对比度两大类。对于第 1 类, 邹焕新等人利用小波变换对 SAR 舰船尾迹图像中的斑点噪声进行抑制并增强航迹线性特征<sup>[6]</sup>; Krishnaveni 等人利用小波阈值萎缩 (Wavelet Threshold Shrinkage) 方法进行噪声抑制, 而与邹焕新的方法在小波变换后阈值选取上采用不同策略<sup>[7]</sup>; Chen 等人在处理由潜艇产生的 SAR 舰船尾迹图像时使利用合理设计的距离滤波器实现 V 字型尾迹臂的增强, 并利用维纳滤波处理模糊和包含噪声 SAR 舰船尾迹图像<sup>[8]</sup>, 但增强效果比较不明显, 且未介绍具体实现方法; Moya 等人利用均值移动滤波 (Mean Shift Filtering) 降低 SAR 海洋舰船尾迹图像中相干斑噪声, 并保持舰船尾迹<sup>[9]</sup>。对于第 2 类, Tunaley 等人提出可对海洋自然特征纹理进行抑制, 便于进行舰船尾迹检测<sup>[4]</sup>; Arnold 等人利用频域高通滤波器提高尾迹特征的信噪比<sup>[5]</sup>; Jin 等人对 SAR 舰船尾迹图像相邻尺度的小波系数取模并逐点相乘, 得到更细和更明显的尾迹边缘<sup>[10]</sup>, 虽然可以有效抑制噪声, 但破坏除尾迹边缘以外有用的尾迹特征, 并对原图中舰船尾迹的信噪比有较高要求; Ai 等人对同时包含舰船和尾迹的 SAR 海洋图像, 按舰船目标几何中心将图像进行分块, 增强舰船尾迹相对海浪纹理之间的信杂比, 但对不包含舰船或者在沿方位向运动产生偏移的 SAR 舰船尾迹图像, 该方法的应用受到局限<sup>[11]</sup>。

实际上, 在 SAR 舰船尾迹图像的频率域(波数域)中, 开尔文尾迹和湍流尾迹具有与海洋背景和噪声显著不同的特征。因此, 本文在通过 FABEMD (Fast and Adaptive Bidimensional Empirical Mode Decomposition) 提高尾迹相对背景的图像和频谱对比度基础上, 在波数域中首次引入干涉相位滤波中使用的 Goldstein 滤波器方法, 对开尔文尾迹进行直接增强处理。该增强方法不仅提高了舰船尾迹相对背景对比度, 还对开尔文尾迹实现了直接增强。本文的结构如下: 首先, 通过分析开尔文尾迹和湍流尾迹的模型和频谱特性, 研究 SAR 舰船尾迹图

像及其频谱特征, 并分析 Goldstein 滤波器在舰船尾迹增强中的适用性; 其次, 研究利用 FABEMD 对 SAR 舰船尾迹图像进行分解, 提高开尔文尾迹和湍流尾迹相对背景对比度; 然后, 针对 SAR 舰船尾迹图像增强的需要, 改进 Goldstein 滤波器并发展整个增强流程; 最后, 基于包含不同舰船尾迹特征的 TerraSAR-X 图像, 进行开尔文尾迹增强实验, 并采用不变矩评价增强效果。通过主观与客观指标的评价, 验证了本文方法具有增强效果显著, 计算简便和适用性较高的特点。

## 2 增强原理分析

### 2.1 SAR 舰船尾迹图像及其谱特性

#### 2.1.1 舰船尾迹模型及频谱特性

##### (1) 开尔文尾迹模型

完整的开尔文尾迹有横波、扩散波和由横波与扩散波干涉形成幅度最强的尖头波组成<sup>[3]</sup>。可根据水动力学模型, 仿真开尔文舰船尾迹波高分布。假定观测点  $(x, y)$  离船足够远(1-2 倍船长之后), 水面无限深, 并且是窄船体。当船体以速度  $U$  沿  $-x$  方向运动( $x > 0$ ) 时产生的开尔文尾迹波高分布函数  $\zeta(x, y)$  为<sup>[12]</sup>

$$\zeta(x, y) = \operatorname{Re} \left[ \int_{-\pi/2}^{\pi/2} A(\theta) \exp(-j\Omega(\theta)) d\theta \right] \quad (1)$$

其中符号  $\operatorname{Re}[\cdot]$  表示取括号内变量的实部;  $A(\theta)$  是复幅度, 称为自由波谱或 Kochin 函数, 仅由船体的几何构型决定;  $\Omega(\theta)$  是一个相位函数, 如式(2)所示:

$$\Omega(\theta) = k(\theta)(x \cos \theta + y \sin \theta) \quad (2)$$

其中  $k(\theta)$  是以  $\theta$  角传播尾迹的波数成分, 满足:

$$k(\theta) = k_0 \sec^2 \theta \quad (3)$$

其中  $k_0 = g/U^2 = k(0)$  是沿  $\theta = 0$  rad 传播的横波波数,  $g$  为重力加速度常数。通过求解式(1)的积分, 可以得到开尔文尾迹波高分布。

##### (2) 开尔文尾迹频谱特性

根据开尔文尾迹波高表达式(1), 可令  $f(x, y)$  为

$$f(x, y) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} A(\theta) \exp[-jk(\theta)(x \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta \quad (4)$$

假设  $f(x, y)$  对于所有  $x$  和  $y$  均成立<sup>[13]</sup>, 并对  $f(x, y)$  的实部进行 2 维傅里叶变换得到  $\zeta(u, v)$  如式(5)所示<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} \zeta(u, v) &= \operatorname{FFT} \{ \operatorname{Re} [ f(x, y) ] \} \\ &= \operatorname{FFT} \left\{ \frac{1}{2} [ f(x, y) + f^*(x, y) ] \right\} \\ &= \frac{1}{2} \{ \operatorname{FFT} [ f(x, y) ] + \operatorname{FFT} [ f^*(x, y) ] \} \quad (5) \end{aligned}$$

其中  $f^*$  表示函数  $f$  的复共轭。根据2维傅里叶变换可求得 FFT  $[f(x, y)]$  如式(6)所示:

$$\begin{aligned} \text{FFT}[f(x, y)] &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \\ &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} A(\theta) \delta\left[u + \frac{k(\theta)\cos\theta}{2\pi}\right] \delta\left[v + \frac{k(\theta)\sin\theta}{2\pi}\right] d\theta \quad (6) \end{aligned}$$

同理可以求得 FFT  $[f^*(x, y)]$  如式(7)所示:

$$\begin{aligned} \text{FFT}[f^*(x, y)] &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f^*(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \\ &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} A^*(\theta) \delta\left[u - \frac{k(\theta)\cos\theta}{2\pi}\right] \delta\left[v - \frac{k(\theta)\sin\theta}{2\pi}\right] d\theta \quad (7) \end{aligned}$$

当且仅当  $u$  和  $v$  满足式(8)时, FFT  $[f(x, y)]$  和 FFT  $[f^*(x, y)]$  才不为零, 即:

$$\begin{cases} u = \frac{k(\theta)\cos\theta}{2\pi}, v = \frac{k(\theta)\sin\theta}{2\pi}, & u > 0, \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \\ u = -\frac{k(\theta)\cos\theta}{2\pi}, v = -\frac{k(\theta)\sin\theta}{2\pi}, & u < 0, \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

其中  $k_x = k(\theta)\cos\theta$  为  $x$  方向的波数 (rad/m),  $k_y = k(\theta)\sin\theta$  为  $y$  方向的波数 (rad/m)。选取船长 200 m, 船宽 20 m, 船速 10 m/s, 吃水深度 17.5 m, 场景大小为  $512 \times 512$  像素, 分辨率为 3 m,  $x$  方向为方位向。得到由舰船尾部产生的开尔文尾迹波高  $\zeta(x, y)$  如图 1(a)所示。并求得其功率谱如图 1(b)所示, 其中的标注表示开尔文尾迹在  $k_x < 0$  的波数范围内分布至  $k_{x0} = 2\pi \times (257 - 233) / 3 \times 513 = -0.098$  rad/m。根据式(8)直接得到的功率谱示意图如图 1(c)所示, 图中的标注表示开尔文尾迹在  $k_x < 0$  的波数范围内分布至  $k'_{x0} = g/U^2 - 0.098$  rad/m。由图 1可知, 直接计算得到的功率谱示意图和仿真得到的开尔文尾迹功率谱形状和起始波数相同。因此, 开尔文尾迹功率谱在波数域为两条对称的线性特征,

并可用式(8)进行描述。

### (3) 湍流尾迹模型及其谱特性

相比开尔文尾迹, 湍流尾迹的形成机理尚不明确<sup>[15]</sup>。但湍流尾迹在 SAR 舰船尾迹图像中的却十分明显, 表现为暗条带的尾迹特征, 张角很小。可根据湍流尾迹的宽度随尾迹与舰船距离  $x$  的变化进行原理仿真。湍流尾迹的宽度通过半经验公式(9)得到<sup>[3]</sup>:

$$W(x) = \frac{\bar{\omega}_0}{\left(\frac{\bar{x}_0 L}{B}\right)^{1/\alpha}} B^{(\alpha-1)/\alpha} x^{1/\alpha} \quad (9)$$

其中  $\bar{\omega}_0 \approx 4$ ,  $\bar{x}_0 \approx 4$ ,  $\alpha \in [4, 5]$  常估计为 5;  $B$  为舰船宽度;  $L$  为舰船长度。由于湍流尾迹可近似认为是具有一定宽度的暗直线, 可以用式(10)所示的 Dirac delta 函数来描述:

$$h_1(x, y) = \delta(x \cos\theta + y \sin\theta - \rho) \quad (10)$$

其中  $\rho$  为直线到原点的距离, 当直线具有一定宽度时,  $\rho$  在一定范围内取值;  $\theta$  为直线与  $x$  轴的夹角。可令  $\rho$  为

$$\rho = a \cos\theta + b \sin\theta \quad (11)$$

则式(10)可表示为

$$h_1(x, y) = \delta[(x - a) \cos\theta + (y - b) \sin\theta] \quad (12)$$

利用傅里叶变换的位移特性和旋转特性, 可以得到直线  $h_1(x, y)$  的傅里叶变换  $H_1(u, v)$  为

$$H_1(u, v) = \delta(v \cos\theta - u \sin\theta) \exp[-j2\pi(au + bv)] \quad (13)$$

式(13)表示直线代表的湍流尾迹  $h_1(x, y)$ , 其傅里叶变换  $H_1(u, v)$  能量集中在过零频且与原直线垂直的直线上。选取与仿真开尔文尾迹时相同的参数, 湍流尾迹起始点距离船头 800 m, 湍流尾迹区域灰度值设为 0, 其他区域灰度值设为 1。仿真得到的湍流尾迹和其宽度随距离  $x$  的变化如图 2(a)和图 2(b)所示。并得到图 2(a)功率谱如图 2(c)所示, 其频谱特性与式(13)描述的频谱特性一致。

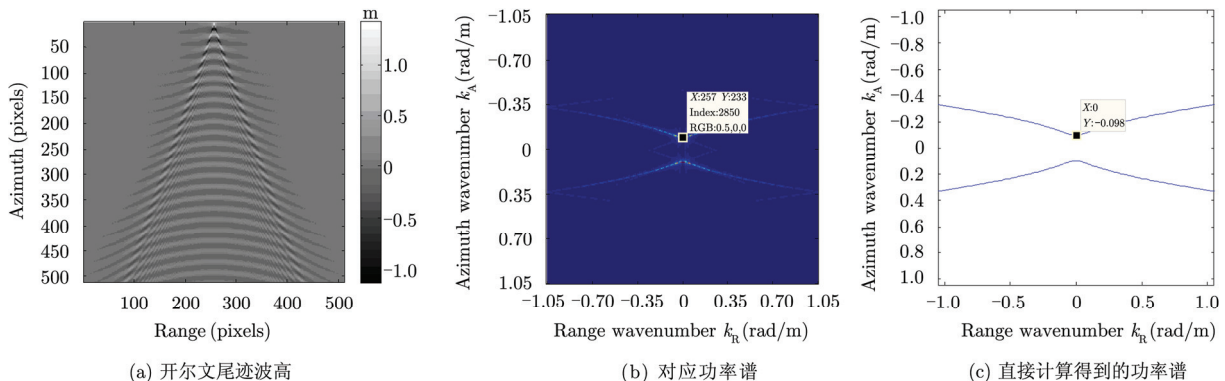


图1 仿真开尔文尾迹波高分布及其功率谱

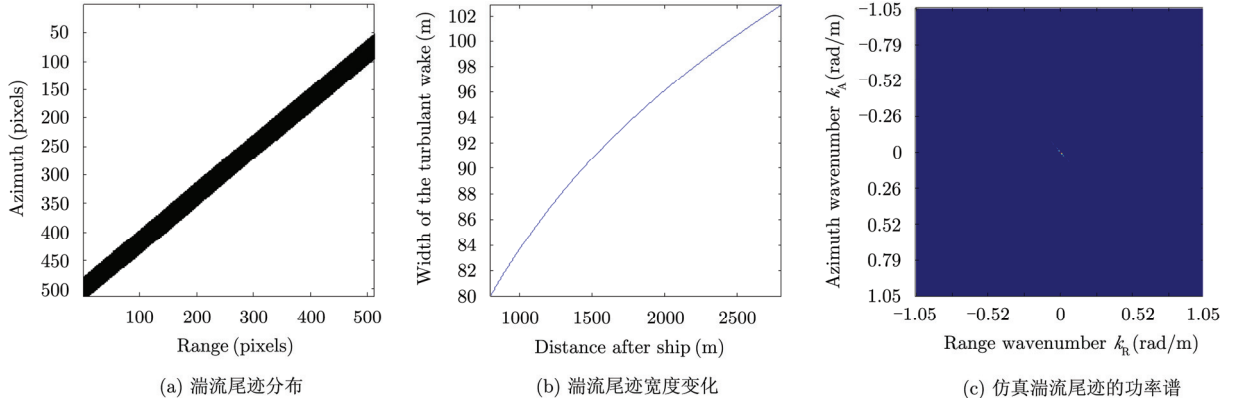


图2 仿真湍流尾迹分布及其功率谱

**2.1.2 SAR 舰船尾迹图像及其谱特性** 理想情况下, 海表面的雷达后向散射截面与海表面波高成正比; 实际情况中, 由于 SAR 对运动海面复杂的成像机理, SAR 海洋图像谱和海浪谱之间不是简单线性变换关系<sup>[16]</sup>。SAR 观测到包含海浪和舰船尾迹的图像, 其图像谱  $S_I(\mathbf{k})$  与海浪和舰船尾迹波高形成的波浪谱  $\Psi_{s+w}(\mathbf{k})$  可以采用非线性变换关系的 1 阶近似进行描述:

$$S_I(\mathbf{k}) = H_D(\mathbf{k})T(\mathbf{k})\Psi_{s+w}(\mathbf{k}) + S_n(\mathbf{k}) \quad (14)$$

其中  $\mathbf{k}$ ,  $S_I(\mathbf{k})$ ,  $H_D(\mathbf{k})$  和  $T(\mathbf{k})$  分别为波数矢量、包含海浪和舰船尾迹 SAR 图像谱、方位向波数截断因子和 SAR 调制传递函数。 $\Psi_{s+w}(\mathbf{k})$  在不考虑海浪和舰船尾迹相互作用的条件下<sup>[15]</sup>, 可认为单纯海浪的海浪谱  $\Psi_s(\mathbf{k})$  和舰船尾迹的海浪谱  $\Psi_w(\mathbf{k})$  满足线性叠加的关系, 即:

$$\Psi_{s+w}(\mathbf{k}) = \Psi_s(\mathbf{k}) + \Psi_w(\mathbf{k}) \quad (15)$$

在波数域中,  $\Psi_s(\mathbf{k})$  以对称的双峰形式存在(如 JONSWAP 谱<sup>[17]</sup>),  $\Psi_w(\mathbf{k})$  以线性特征形式存在(如 2.1.1 节的分析所示), 均为窄带成分。虽然经过  $H_D(\mathbf{k})$  和  $T(\mathbf{k})$  的调制, 仍然不改变其窄带特性。 $S_n(\mathbf{k})$  为图像噪声(主要为斑点噪声), 在波数域中为宽带成分<sup>[16]</sup>。

## 2.2 Goldstein 滤波器原理及增强适用性

InSAR 干涉图常存在噪声<sup>[18]</sup>。Goldstein 等人提出与场景无关的 Goldstein 干涉图滤波器, 可有效增强干涉条纹并抑制噪声<sup>[19]</sup>, 其简要步骤为: 首先将干涉图分块为  $\tilde{I}(x, y)$ , 并进行 2 维傅里叶变换至频率域得到局部功率谱  $S(u, v)$ ; 然后对其进行平滑  $\tilde{S}(u, v)$ , 并构造平滑滤波器如下:

$$Z(u, v) = |\tilde{S}(u, v)|^\alpha, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (16)$$

其中  $\alpha \in [0, 1]$  为局部增强因子; 最后将  $S(u, v)$  与  $Z(u, v)$  相乘, 并进行 2 维逆傅里叶变换, 得到滤波

后的干涉图像块。Goldstein 滤波器的适用条件基于干涉图噪声在频域为宽带信号, 而干涉条纹为窄带信号。根据 2.1 节的分析, SAR 舰船尾迹图像谱中窄带的开尔文尾迹满足 Goldstein 滤波器的适用条件, 但也与干涉图的频谱具有明显的不同, 因而需要对 Goldstein 滤波器进行改进。

## 2.3 SAR 舰船尾迹图像 FABEMD 分解

在 SAR 舰船尾迹图像中, 待增强的开尔文尾迹相对湍流尾迹较不明显。而在图像谱中, 待增强的开尔文尾迹表现为较高频率对称的线性特征。与零频处的谱峰值以及过零频的湍流尾迹相比, 能量很小, 不能直接使用传统的 Goldstein 滤波器。因此需要对 SAR 舰船尾迹图像及图像谱中的开尔文尾迹和湍流尾迹进行分解, 提高开尔文尾迹和湍流尾迹相对背景的图像和频谱对比度, 并分别进行 Goldstein 滤波增强和保持处理。

FABEMD 是最近提出的一种基于数据驱动的图像分解方法<sup>[20]</sup>。经过 FABEMD 可以得到一系列频率从高到低、尺度从细到粗的 2 维内蕴模式函数 (Bidimensional Intrinsic Mode Function, BIMF), 以及频率最低、尺度最粗的余项 (Residue)。将所有 BIMFs 和余项线性叠加可以恢复原始图像, 并且将某几个相邻层 BIMFs 线性叠加可以得到具有一定尺度和频率分布的图像。相比于传统的 BEMD 方法, FABEMD 可以更加快速和准确地对任何尺寸和分辨率的图像进行分解。令原始图像为  $I$ ,  $S_1 = I$ , 第  $i$  层 BIMF 为  $F_i$ , 并且余项为  $R$ 。FABEMD 实现的简要步骤如下:

(1) 令  $i = 1$  并且  $S_i = I$ ;

(2) 使用  $3 \times 3$  的矩形窗获取待分解图像的局部极值;

(3) 通过计算每一层局部极值图中极值点相互之间的欧氏距离, 确定统计 MAX/ MIN 滤波器的



窗口大小  $w_{eni} \times w_{eni}$ ;

(4) 使用统计 MAX/ MIN 滤波器构造极大值和极小值包络;

(5) 令每一层的平滑窗大小  $w_{smi} = w_{eni}$ , 并对局部极值图进行平滑滤波。滤波之后得到极大值包络  $U_{Ei}$  和极小值包络  $L_{Ei}$ ;

(6) 计算极大值和极小值包络的均值  $M_{Ei} = (U_{Ei} + L_{Ei})/2$ ;

(7) 通过  $F_i = S_i - M_{Ei}$  计算得到  $F_i$ , 并令  $i = i + 1$ ,  $S_i = F_{i-1}$ ;

(8) 判断分解层数  $N_{BEMD}$  是否达到, 或者  $S_i$  中是否含有少于 3 个极值点。如果满足以上任意一个条件, 则停止分解过程。否则, 继续执行步骤(2)至步骤(7), 获得下一个 BIMF。

## 2.4 基于 FABEMD 和改进 Goldstein 滤波器的增强方法

SAR 舰船尾迹增强的目的在于增强模糊的开尔文尾迹, 并对湍流尾迹进行保持。如果不对两种尾迹进行有效地分解, 则本来已经较为明显的湍流尾迹也将得到增强, 且零频处的能量也将影响 Goldstein 滤波器的使用。相比常用的 Gabor 函数分解和小波分解方法, 由于 FABEMD 不依赖于基的选取, 可以更有效地分解 SAR 舰船尾迹图像中的开尔文尾迹和湍流尾迹。并且针对 SAR 舰船尾迹图像的分解, FABEMD 具有两项特点: (1) 通过自适应或强制选取每一层统计滤波器窗口大小  $w_{eni}$ , 控制获取每一层 BIMF 图像的特征尺度, 以实现开尔文尾迹 BIMFs 的有效分解; (2) 通过对高斯白噪声的分解表明 BEMD 和 FABEMD 具有波数域 2 维滤波器组特性, 可用于改进 Goldstein 滤波器的实现, 避免对低频和零频处的频谱特征进行增强。因此将 FABEMD 引入 Goldstein 滤波器对 SAR 舰船尾迹的增强过程中, 得到如图 3 所示的实现流程。

由于待增强的开尔文尾迹的分布范围较广, 且随与舰船扰动点之间的距离, 开尔文尾迹能量逐渐减少, 波高逐渐降低, 在 SAR 图像中的信噪比也随之降低。对于实际包含大范围开尔文尾迹的 SAR 图像进行增强时, 可对待增强图像进行分块处理, 并通过选取合适的增强系数, 实现信噪比随距离变化的开尔文尾迹的增强。由于 FABEMD 分解方法, 使用  $3 \times 3$  的矩形窗获取待分解图像的局部极值, 较好地解决了图像的边界效应问题<sup>[20]</sup>, 因此可以直接对待增强的舰船尾迹图像进行分块处理, 而不需对各图像块进行重叠。待增强的开尔文尾迹的波长  $\lambda_w$  和舰船运动速度  $U$  之间的关系如下<sup>[23]</sup>:

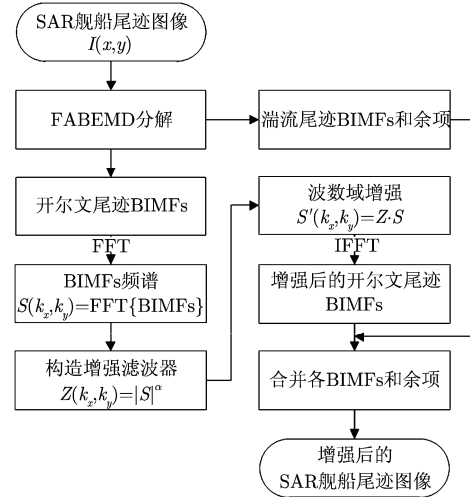


图 3 基于 FABEMD 和 Goldstein 滤波器的增强方法

$$\lambda_w = \frac{2\pi U^2 \cos^2 \phi_w}{g} \quad (17)$$

其中  $\phi_w$  为尾迹传播方向和舰船航行方向之间的夹角,  $g$  为重力加速度常数。目前航行最快的舰船航行速度不超过 20 m/s, 当  $\phi_w = 0$  rad 时求得该速度下最大的开尔文尾迹波长约为 256 m。为保证选取的图像块空间域中有足够周期的开尔文尾迹纹理, 在波数域中有线性窄带成分, 图像块尺寸至少选取为开尔文尾迹纹理最大空间尺度的两倍。此外, 图像块尺寸的选取应尽量便于实现快速傅里叶变换。

## 3 SAR 舰船尾迹图像增强实验及分析

### 3.1 实验数据及分析

为验证本文方法的效果, 选取 TerraSAR-X 一景图像中 3 幅包含不同特征的典型开尔文尾迹和 1 幅 SEASAT 图像进行 SAR 舰船尾迹增强实验。TerraSAR-X 卫星 3 幅实测图像分别为: (1) 包含 1 个开尔文臂和湍流尾迹的 SAR 图像; (2) 包含模糊开尔文臂和显著湍流尾迹的 SAR 图像; (3) 包含两个开尔文臂和模糊湍流尾迹的 SAR 图像。SEASAT 卫星实测图像为: 包含模糊开尔文尾迹横波和显著湍流尾迹的 SAR 图像。TerraSAR-X 图像获取于 2007 年 7 月 9 日 06: 29 UTC, 景中心经纬度为  $(-5.36^\circ, 35.57^\circ)$ , 方位向和距离向分辨率(投影至地距)均为 3 m。SEASAT 图像方位向和距离向分辨率(投影至地距)均为 25 m。待增强图像的大小(方位向  $\times$  距离向)包括  $256 \times 256$  像素和  $512 \times 512$  像素两种。分别对待增强的 TerraSAR-X 卫星图 5(a), 图 7(a)和图 8(a)进行小波分解, 分解过程使用 Matlab 小波工具箱 dw2dtool, 经过多次试验选取 4 阶 Symlets 小波, Haar 小波和 4 阶 Daubechies 小波进行两层小波分解, 结果如图 4 所示。从分解结果中

可以看出，包含湍流尾迹的小波系数图中还含有开尔文尾迹特征，开尔文尾迹和湍流尾迹未能明显地分解开。

### 3.2 实验结果及主观评价

包含 1 个开尔文臂和湍流尾迹的 SAR 图像增

强前后的对比如图 5 所示。本文提出的方法具有明显的增强效果，图 5(b)开尔文尾迹中的横波、扩散波和尖头波相比原图更加清晰；图 5(d)波数域中开尔文尾迹相比湍流尾迹成分和斑点噪声对比度显著增强。

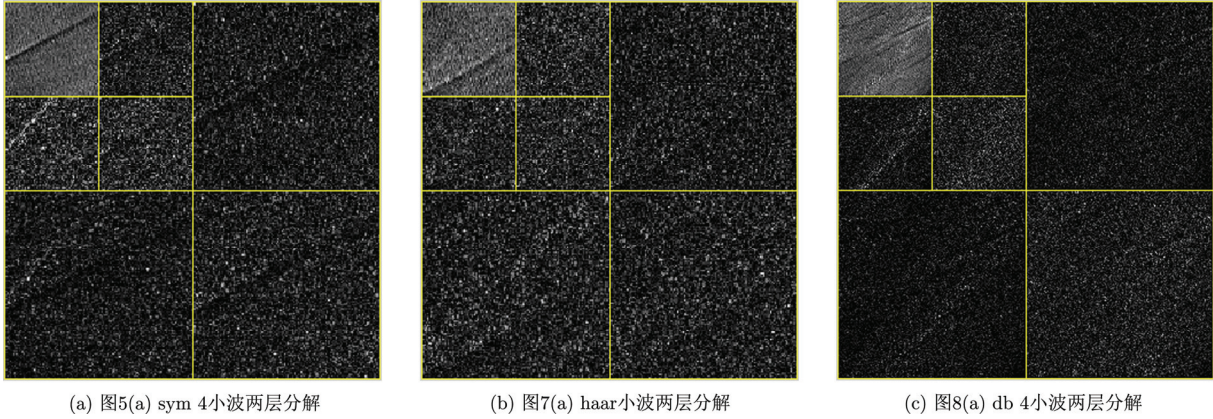


图4 待增强 SAR 舰船尾迹图像小波分解结果

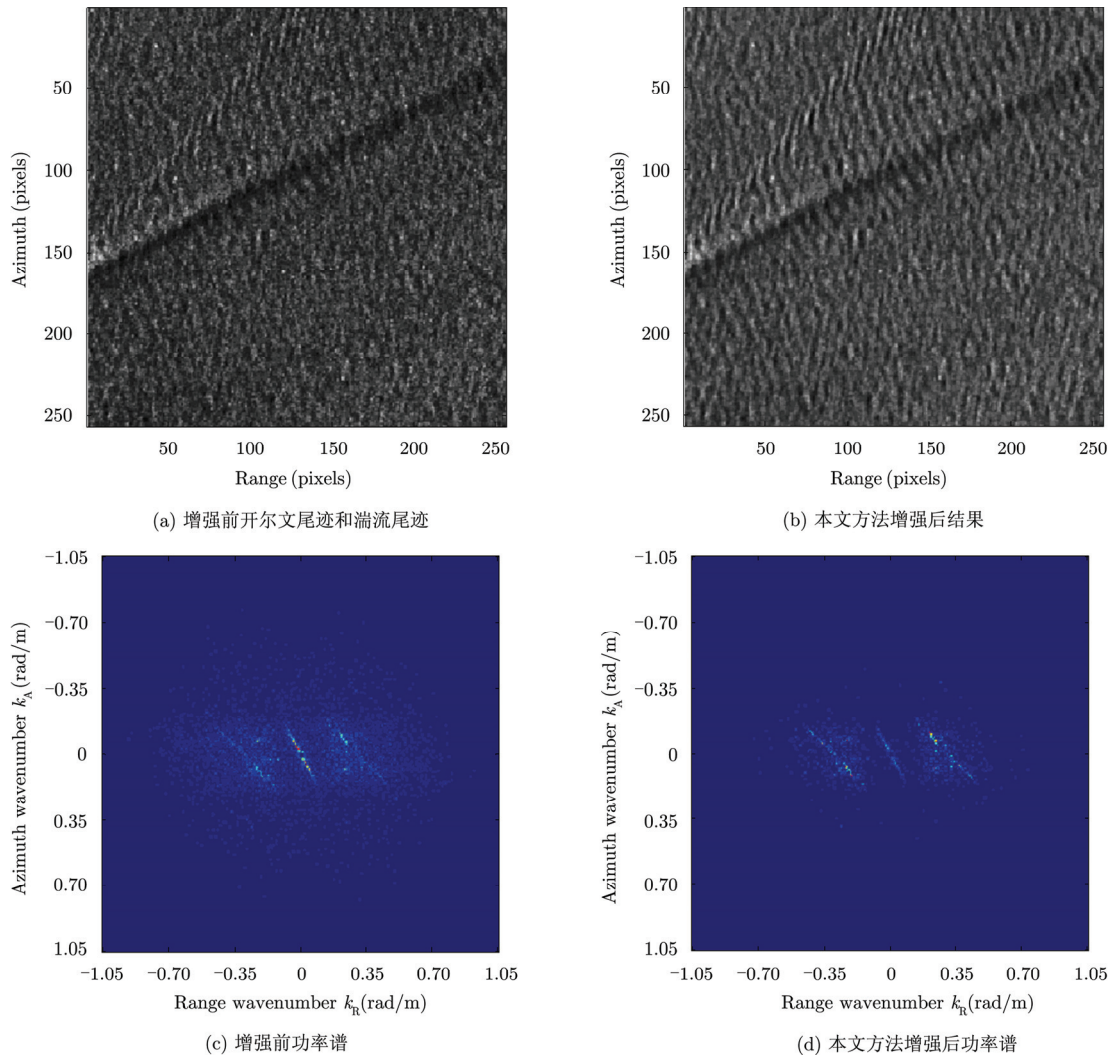


图5 包含开尔文臂和湍流尾迹的 SAR 图像增强前后比较



进一步本文提出的方法对图 5(a) 进行 FABEMD 分解及改进 Goldstein 滤波器增强的过程, 得到如图 6 所示的结果。分解层数为 3,  $w_{eni} = 3, 5$ , 开尔文尾迹所在 BIMFs 如图 6(a) 所示, 对应的功率谱中只具有开尔文尾迹对称的线性特征(如图 6(d) 所示), 相比原图及其功率谱(如图 5(a) 和图 5(c) 所示)开尔文尾迹的图像和频谱对比度均得到了提高。利用改进的 Goldstein 滤波器对分解得到的开尔文尾迹 BIMFs 进行直接增强( $\alpha = 0.6$ ), 得到增强后的开尔文尾迹 BIMFs 和对应的功率谱如图 6(b) 和图 6(e) 所示。开尔文尾迹的特征均得到了显著的增强, 横波和尖头波增强明显。湍流尾迹 BIMFs 和余项如图 6(c) 和图 6(f) 所示, 从其对应的功率谱可以看出, FABEMD 将开尔文尾迹和湍流尾迹成功地进行了分解, 分解之后的湍流尾迹的图像和频谱对比度也得到了提高。并且开尔文尾迹左侧暗臂也变得清晰可见。

利用本文提出的方法, 包含模糊开尔文臂和显著湍流尾迹的 SAR 图像增强前后对比如图 7 所示。分解层数为 3,  $w_{eni} = 3, 5$ ,  $\alpha = 0.5$ , 模糊的开尔文尾迹右臂得到了较为明显的增强。包含两个开尔文臂和模糊湍流尾迹的 SAR 图像增强前后对比如图 8

所示。分解层数为 4,  $w_{eni} = 3, 5, 7$ ,  $\alpha = 0.55$ , 开尔文尾迹的左暗臂和右亮臂均得到了明显的增强, 并且横波和扩散波也得到了一定程度的增强。包含模糊开尔文尾迹横波和湍流尾迹的 SEASAT SAR 图像增强前后对比如图 9 所示, 分解层数为 4,  $w_{eni} = 3, 5, 7$ ,  $\alpha = 0.7$ , 开尔文尾迹的横波得到了明显的增强, 并且开尔文尾迹右暗臂也得到了一定程度的增强。

### 3.3 客观指标评价

目前针对 SAR 舰船尾迹图像中开尔文尾迹的直接增强研究较少, 在客观评价本文方法的增强效果时, 除可采用常规的如图像均值 Mean 和图像方差 Var 进行评价以外, 还需采用更有效的评价指标。由于开尔文尾迹的理论功率谱模型清楚, 因此可利用增强前后开尔文尾迹 BIMFs 功率谱与参考开尔文尾迹功率谱的相似性评估增强效果。本文选取图 1(a) 中开尔文尾迹右臂的功率谱作为参考。但真实的开尔文尾迹功率谱与参考开尔文尾迹功率谱必然具有不同。因此引入具有良好尺度、平移、旋转和视角不变性的不变矩<sup>[21]</sup>, 并利用增强前后开尔文尾迹 BIMFs 功率谱和参考开尔文尾迹功率谱的相对不变矩距离  $c(i, r)$  (使用文献[22]中的描述) 来评价舰

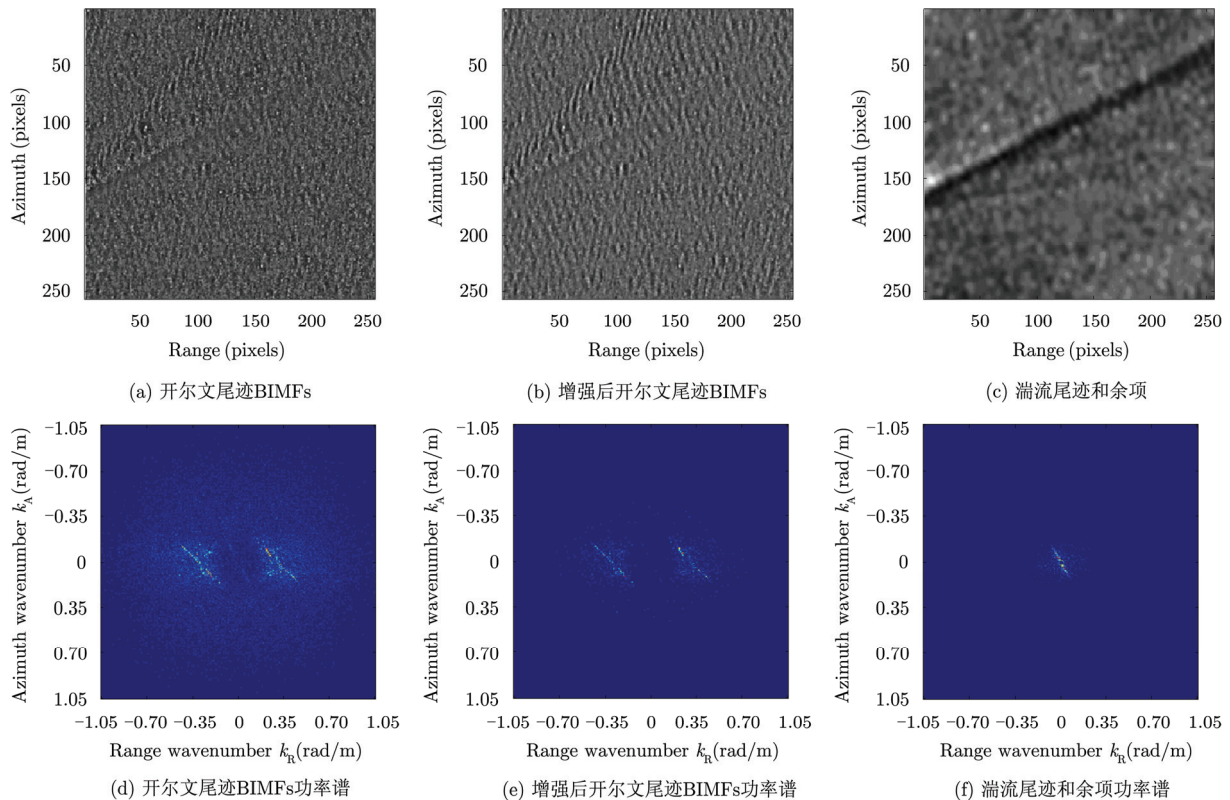


图 6 基于 FABEMD 和改进的 Goldstein 滤波器增强过程

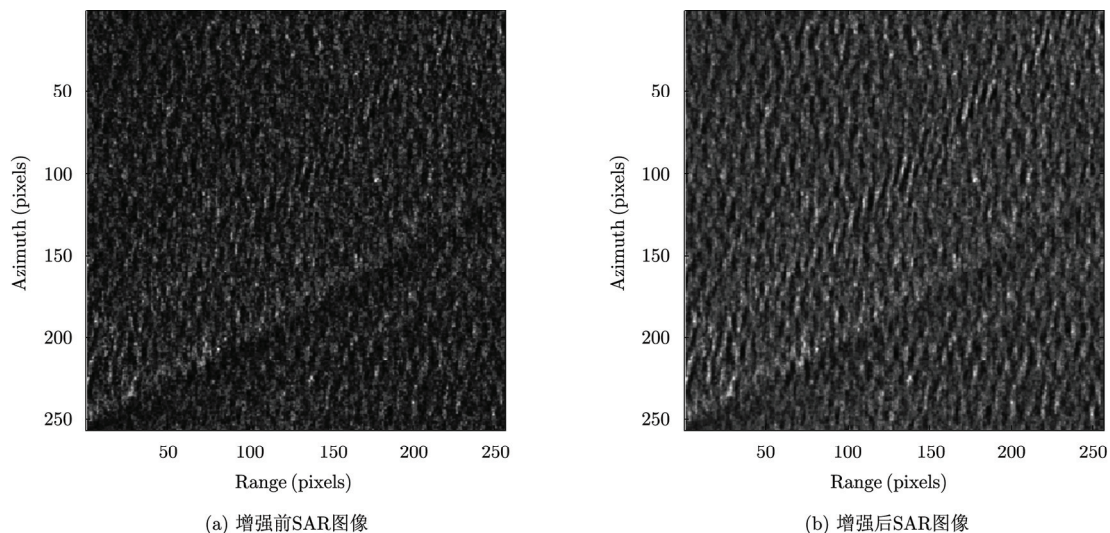


图 7 包含模糊开尔文臂和显著湍流尾迹的 SAR 图像增强前后比较

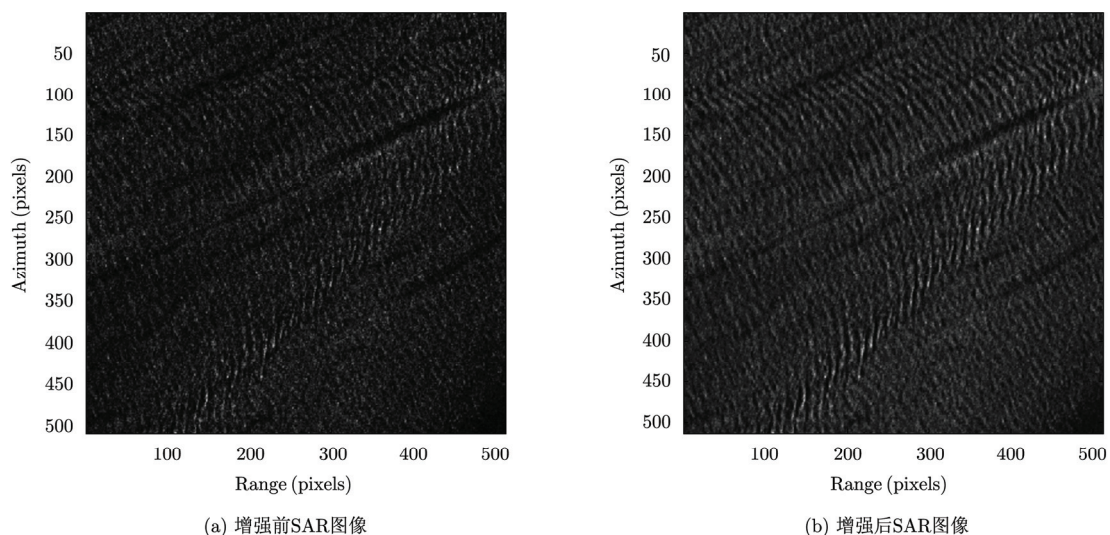


图 8 包含两个开尔文臂和模糊湍流尾迹的 SAR 图像增强前后比较

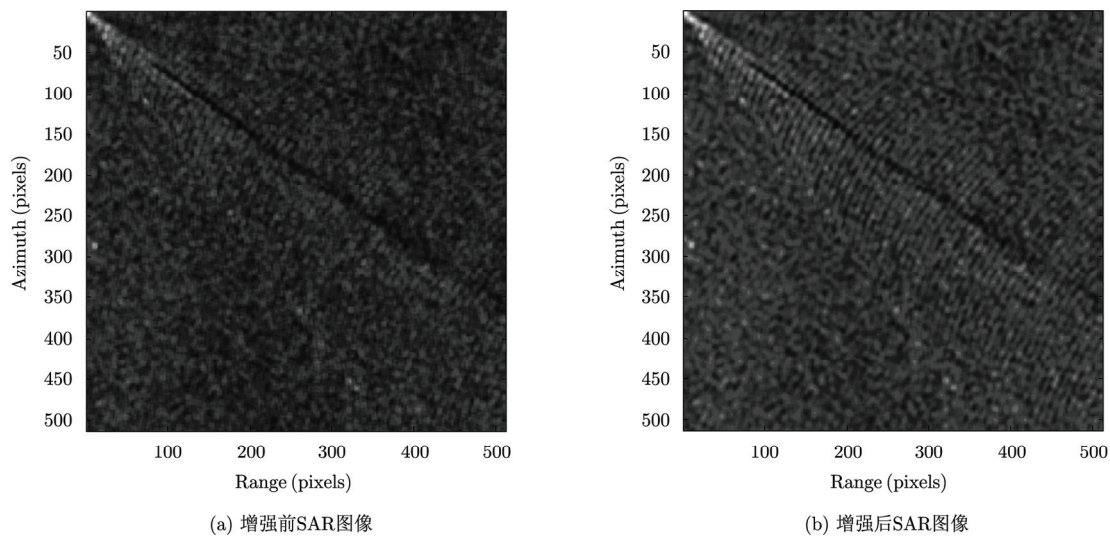


图 9 SEASAT 包含模糊开尔文尾迹横波和湍流尾迹的 SAR 图像增强前后比较



船尾迹的增强效果。相比原图, 增强后的  $c(i, r)$  越小, 代表增强后的开尔文尾迹 BIMFs 功率谱和参考开尔文尾迹功率谱越相似, 增强效果越好。可以得到 TerraSAR-X 3 幅图像如表 1 所示的评价结果

(各图评价指标最优值以粗体标示)。由表 1 中的指标可以得出: 基于 FABEMD 和改进 Goldstein 滤波器的增强方法, 显著提高了 SAR 舰船尾迹图像中尾迹特征的清晰度, 且增强了开尔文尾迹特征。

表 1 TerraSAR-X 卫星 SAR 图像增强效果评价

评价参数	图 5 增强前	图 5 增强后	图 7 增强前	图 7 增强后	图 8 增强前	图 8 增强后
Mean	22.31	26.91	24.07	29.01	13.80	17.11
Var	42.48	<b>47.38</b>	51.47	<b>61.76</b>	14.98	<b>15.34</b>
$c(i, r)$	10.29	<b>3.69</b>	7.69	<b>2.12</b>	10.55	<b>3.45</b>

## 4 结束语

本文通过分析 SAR 舰船尾迹及其图像谱特征, 提出一种基于 FABEMD 和改进 Goldstein 滤波器的 SAR 舰船尾迹图像增强新方法。在视觉上对模糊的开尔文尾迹具有显著的增强效果, 保持了湍流尾迹和其他特征, 且实现简单; 基于主观和客观指标评价也表明该方法的适用性和有效性。本文方法将为基于 SAR 舰船尾迹的舰船检测、识别和参数提取提供帮助。下一步研究针对 SAR 舰船尾迹自适应 FABEMD 分解的方法和步骤开展研究, 并且可在增强过程中自适应地确定增强参数。

## 参 考 文 献

- [1] Vincent K and Fabrice C. SAR-derived coastal and marine applications from research to operational products[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 472-486.
- [2] Wu Z. On the estimation of a moving ship's velocity and hull geometry information from its wave spectra[D]. [Ph.D. dissertation], The University of Michigan, 1991: 14-100.
- [3] Zilman G, Zapolski A, and Marom M. The speed and beam of a ship from its wake's SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2335-2343.
- [4] Tunaley J K E. The estimation of ship velocity from SAR imagery[C]. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, July 21-25, 2003, Vol.1: 191-193.
- [5] Arnold B A, Martin A, and Khenchaf A. Obtaining a ship's speed and direction from its kelvin wake spectrum using stochastic matched filtering[C]. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, July 23-28, 2007: 1106-1109.
- [6] 邹焕新, 蒋咏梅, 匡纲要, 等. 一种基于斑点抑制的 SAR 图像舰船航迹检测算法[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(8): 1051-1058.  
Zou H X, Jiang Y M, Kuang G Y, et al. Detection algorithm of ship wakes of SAR image based on the speckle noise suppression[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(8): 1051-1058.
- [7] Krishnaveni M, Thakur S K, and Subashini P. An optimal method for wake detection in SAR images using Radon transformation combined with wavelet filters[J]. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 2009, 6(1): 66-69.
- [8] Chen Y Q, Feng J, and Zhu M H. Detection methods of submerged mobile using SAR images[C]. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005: 1717-1720.
- [9] Mata M D, Jarabo A P, Jimenez C B, et al.. Application of mean-shift filtering to ship wakes detection in SAR images[C]. Proceedings of 2010 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Aachen, Germany, 2010: 893-896.
- [10] Jin M K and Chen K S. The application of wavelets correlator for ship wake detection in SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1506-1511.
- [11] Ai J Q, Qi X Y, Yu W D, et al.. A novel ship wake CFAR detection algorithm based on SCR enhancement and normalized Hough transform[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011: 8(4): 681-685.
- [12] Tuck E O, Lazauskas L, and Scullen D C. Sea wave pattern evaluation, part I report, primary code and test results (surface vessels)[R]. Applied Mathematics Department, The University of Adelaide, Tech. Rep., Apr. 1999: 1-9.
- [13] Tuck E O, Collins S I, and Wells W H. On ship wave patterns and their spectra[J]. *Journal of Ship Research*, 1971, 15(1): 11-21.
- [14] 梁奉龙, 陈永强. 一种 SAR 图像 Kelvin 尾迹反演舰船速度的方法[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(20): 4793-4799.  
Liang F L and Chen Y Q. A ship velocity inversion method of ship kelvin wakes in SAR images[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(20): 4793-4799.

- [15] Arnold B A, Khenchaf A, and Martin A. Bistatic radar imaging of the marine environment—part II simulation and results analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3384–3396.
- [16] Jackson C R, Apel J R, *et al.* Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual [R]. Washington DC, 2004: 139–169.
- [17] Zhang M, Zhao Y W, Chen H, *et al.* SAR Imaging simulation for composite model of ship on dynamic ocean scene[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 113: 395–412.
- [18] 于晓歆, 杨红磊, 彭军还. 一种改进的 Goldstein InSAR 干涉图滤波算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(9): 1051–1054.
- Yu X X, Yang H L, and Peng J H. A modified goldstein algorithm for InSAR interferogram filtering[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1051–1054.
- [19] Goldstein R M and Werner C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035–4038.
- [20] Bhuiyan S M A, Adhami R R, and Khan J F. Fast and adaptive bidimensional empirical mode decomposition using order-statistics filter based envelope estimation[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008, 2008: 1–18.
- [21] Hu M K. Visual pattern recognition by moment[J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, 8(2): 179–187.
- [22] 王珂, 洪峻, 张元, 等. 浅海水下地形检测算法[J]. 红外与毫米波, 2012, 31(1): 85–90.
- Wang K, Hong J, Zhang Y, *et al.* Algorithm for detection of shallow water bottom topography[J]. *Journal Infrared Millimeter Waves*, 2012, 31(1): 85–90.
- [23] Hennings I, Romeiser R, Alpers W, *et al.* Radar imaging of Kelvin arms of ship wakes[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(13): 2519–2543.

### 作者简介

张问一(1984–), 男, 硕博连读生, 主要研究方向为海洋合成孔径雷达成像。

E-mail: jasoniecas@gmail.com

胡东辉(1970–), 男, 硕士生导师, 副研究员, 主要研究方向为 SAR 信号处理、SAR 定标及雷达对抗等。

E-mail: dhhu@mail.ie.ac.cn

丁赤飏(1969–), 男, 博士生导师, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理、新体制 SAR 系统及雷达对抗等。

E-mail: cbding@mail.ie.ac.cn