

基于 Goldstein 滤波器的 SAR 海洋图像增强方法

张问一^{*①②③} 胡东辉^{①②} 丁赤飏^{①②}

^①(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)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 增强具有风浪纹理的 SAR 海洋图像并保持其他海洋特征可以推动其在海洋学中的应用。该文引入干涉图 Goldstein 滤波器, 通过图像谱中风浪成分与噪声比率自适应地确定增强系数, 实现高频风浪纹理增强; 通过 SAR 成像参数及海面风速, 确定图像谱中分离波数, 实现低频中/大尺度海洋特征保持。原理分析和实验表明, 该方法具有显著的风浪纹理增强效果, 同时保持了中/大尺度海洋纹理, 实现效率高且适用性较强。

关键词: 合成孔径雷达; 图像增强; 海浪; 自适应增强; 干涉相位滤波

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2263-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00185

Enhancement of SAR Ocean Image Based on Goldstein Filter

Zhang Wen-yi^{①②③} Hu Dong-hui^{①②} Ding Chi-biao^{①②}

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

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Enhanced SAR ocean images with wind wave signatures and reserved other oceanographic features can promote oceanographic applications. Based on the Goldstein interferogram filter, the enhanced parameter is adaptively determined by the wind wave spectrum power to noise ratio. Meanwhile, the divided wavenumber is determined by SAR imaging parameters and in-suit ocean wind to reserve the low frequency spectrum components. Therefore, the wind wave features are dramatically enhanced and the abundant oceanographic signatures are reserved. Algorithm analysis and experiments show the reasonable efficiency and capabilities.

Key words: SAR; Image enhancement; Ocean wave; Adaptive enhancement; Interferogram filter

1 引言

1978 年, 随着合成孔径雷达(SAR)卫星 Seasat 的发射, SAR 已经证明其在观测各种海洋现象中的巨大应用价值。在 SAR 海洋图像中, 可观察到小尺度的风浪(百米量级)、中尺度的涌浪(千米量级), 以及其他海洋特征。然而, 受海面散射点随机运动的影响, 图像中的小尺度风浪条纹纹理模糊, 给海洋特征检测和纹理分类等应用, 带来不利影响。另外, 在海洋风向反演中, 需要获得更清晰风条纹^[1]; 在浅海水下地形特征变化方向提取中, 也需要获得更清晰的明暗条纹特征^[2]。因此, 研究 SAR 海洋图像中条纹纹理的增强, 并保持中/大尺度海洋特征, 可以

增加 SAR 海洋图像的判读和识别概率, 提高风向反演的精度和特征变化提取的准确度。

目前, 已经有许多学者开展 SAR 海洋图像的增强研究。根据目标不同, 算法可分为抑制斑点噪声和直接增强风浪条纹两大类, 本文提出的增强方法属于后者。对于第 1 类, Vehel^[3]采用小波变换方法, 调整描述小波系数图奇异特性的 Hölder 指数实现图像噪声抑制, 但可视化增强效果不佳; 蒋永馨等人^[4]在此基础上引入基于经验模式分解(EMD)和 Hölder 指数调整相融合的方法, 但对海面纹理结构的平滑过强。对于第 2 类, Carlson^[5]利用 SAR 海洋图像的小波分解, 并对显著波浪纹理所在小波系数图进行处理并重构, 虽然直接增强了显著波浪纹理, 但破坏了其他海洋特征; 白皓等人^[6]通过在曲波(curvelet)域中提取并增强特定的 Curvelet 系数, 实现方向性

2012-02-28 收到, 2012-04-20 改回

国家部委预研基金资助课题

*通信作者: 张问一 jasoniecas@gmail.com

波浪纹理增强。但容易在图像中引入“割痕”一样的额外图像“噪声”。

以上介绍的增强方法均在频率域以外的特征域中对目标纹理进行增强,且计算过程较为复杂。实际上,在SAR海洋图像的频率域(波数域)中可以充分描述不同尺度海洋特征。因此,本文在波数域中,首次引入干涉相位滤波中使用的Goldstein滤波器,并发展了增强过程中相关参数的自适应选取方法。本文的结构如下:首先,通过研究SAR海洋图像及其频谱特征,分析Goldstein滤波器在风浪条纹增强中的适用性;其次,针对SAR海洋图像增强的需要,改进Goldstein滤波器;然后,详细分析增强过程中参数自适应选取方法;最后,基于包含不同海洋特征的ERS-2 SAR海洋图像,分析参数选取方法的有效性并进行增强效果对比实验。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海洋图像及其谱特性

理想情况下,海浪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^[7]。采用非线性变换关系的一阶近似描述SAR对海洋成像过程如下:

$$S_I(\mathbf{k}) = H_D(\mathbf{k})T(\mathbf{k})\Psi(\mathbf{k}) + S_n(\mathbf{k}) \quad (1)$$

其中 \mathbf{k} , $S_I(\mathbf{k})$, $H_D(\mathbf{k})$ 和 $T(\mathbf{k})$ 分别为波数矢量、SAR海洋图像谱、方位向波数截断因子和SAR调制传递函数。 $\Psi(\mathbf{k})$ 是海浪谱,在波数域中为窄带成分(如JONSWAP谱^[8])。虽然经过 $H_D(\mathbf{k})$ 和 $T(\mathbf{k})$ 的调制,但不改变其窄带特性。 $S_n(\mathbf{k})$ 是图像噪声(主要为斑点噪声),在波数域中为宽带成分^[7]。

2.2 Goldstein滤波器原理及增强适用性

InSAR干涉图常存在噪声。Goldstein等人^[9]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,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:

$$Z(u,v) = |\tilde{S}(u,v)|^\alpha, \quad \alpha \in [0,1] \quad (2)$$

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海洋图像的频率域特性满足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。此外,Goldstein对于图像分块大小和关键的滤波系数选取均未给出明确的参数选取方法。因而需要对Goldstein滤波器进行改进,并自适应地确定增强过程中的相关参数。

2.3 改进的Goldstein滤波器增强方法

在SAR海洋图像谱中,待增强的风浪条纹特征,在波数域中表现为较高频率对称的谱峰值。与零频处的谱峰值相比,能量很小。因此引入谱分离滤波器,对高频风浪成分进行增强处理,而对中/低频特征纹理成分进行保持。改进的Goldstein滤波器SAR海洋图像增强方法如图1所示。实现过程中需要确定图像块划分的尺寸 P_w ,谱分离滤波器的形式和分离波数 k_d ,以及增强系数 α_{ij} ,而待增强图像分辨率不影响增强效果。

2.4 基于成像参数及海洋图像特征的参数选取

(1)SAR海洋图像块划分准则 待增强的小尺度风浪条纹波长在1 km以下,图像块尺寸选取为风浪条纹最大空间尺度的两倍。由此保证选取的图像块空间域中有足够周期的风浪条纹,在波数域中有窄带波浪成分。每块之间的重叠率大于75%以上,避免出现块效应。此外,图像块尺寸的选取应尽量

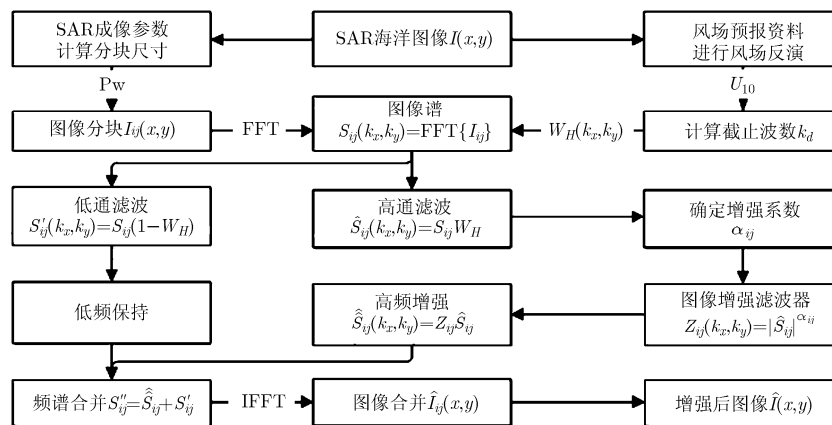


图1 基于Goldstein滤波器的增强方法

便于实现快速傅里叶变换。

(2) 谱分离滤波器形式和分离波数确定准则
高通滤波器的选取应避免波数域滤波后图像产生振铃效应, 在实际图像的处理中可采用高斯高通滤波器, 如式(3)所示:

$$\left. \begin{aligned} W_H(k_x, k_y) &= 1 - e^{-D^2(k_x, k_y)/2k_d^2} \\ D(k_x, k_y) &= \left[\left(k_x - \frac{P_w}{2} - 1 \right)^2 + \left(k_y - \frac{P_w}{2} - 1 \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} (3)$$

其中 k_d 为小尺度风浪与中尺度涌浪的分离波数, 可等效为 SAR 海洋图像谱和海浪谱之间是线性关系的条件, 取值范围如式(4)所示^[10]:

$$k_d \leq \left(\frac{2.87gV^2}{R^2U_{10}^4 \cos^2 \Phi (\sin^2 \theta \sin^2 \Phi + \cos^2 \Phi)} \right)^{1/3} (4)$$

其中 g , V , R 和 θ 分别为重力加速度常数, SAR 平台相对场景运动速度(m/s), 相对场景中心斜距(m)和入射角(rad); Φ 为场景中波浪传播方向与方位向夹角(rad); U_{10} 为海平面 10 m 高度处的风速(m/s), 可通过外部风场预报数据获取或根据 SAR 海洋图像反演获得^[1]。由式(4)可知 k_d 与分辨率无关。

(3) 自适应增强系数 α_{ij} 确定准则 定义风浪对比度参数 PBR (Peak to Background Ratio) 用于描述待增强风浪成分与噪声的比率。PBR 越大, 波浪纹理越明显; 反之, 波浪纹理越微弱, 或者本身不包含波浪纹理。通过计算各图像块的 PBR_{ij} , 自适应地确定增强系数 α_{ij} , 可实现对包含风浪条纹的海面进行显著增强, 同时避免纹理微弱或不包含风浪条纹图像的过度增强。各图像块的 PBR_{ij} 定义如下:

$$PBR_{ij} = \left(S_{I_{ij}} \right)_{\max} / \left\langle S_{n_{ij}} \right\rangle (5)$$

$(S_{I_{ij}})_{\max}$ 为经过滤波后分块 SAR 图像谱 $\hat{S}_{ij}(k_x, k_y)$ 中风浪成分的峰值能量; $\langle \bullet \rangle$ 表示统计平均; $\left\langle S_{n_{ij}} \right\rangle$ 为 SAR 图像谱中平均噪声能量。可通过计算 $\hat{S}_{ij}(k_x, k_y)$ 最右列的平均能量 $\left\langle \hat{S}_{ij} \left(k_x, k_y = \frac{2\pi}{\Delta y} \right) \right\rangle$ 获得。各图像块的增强系数 α_{ij} 通过 $(PBR_{ij})_{\max}$ 归一化:

$$\alpha_{ij} = PBR_{ij} / (PBR_{ij})_{\max} (6)$$

由此得到各图像块增强系数 $\alpha_{ij} \in (0, 1]$, $\alpha_{ij} = 0$ 时对风浪条纹没有增强效果, $\alpha_{ij} = 1$ 时有最强的增强效果。由式(6)可知 α_{ij} 也与分辨率无关。

3 SAR 海洋图像增强实验及分析

3.1 实验数据及参数选取分析

为验证本文方法的效果, 选取星载 ERS-2 一景 PRI 图像中的 3 处典型区域进行 SAR 海洋图像增

强实验。并对斑点噪声抑制, 对比典型的分形滤波方法^[3]; 对风浪条纹直接增强, 对比相对于小波方法效果更好的 Curvelet 域增强方法^[6]。图像获取于 2005 年 4 月 27 日 02:22 UTC, 景中心经纬度为 $(121.96^\circ, 20.89^\circ)$, 方位向和距离向分辨率(投影至地距)均为 12.5 m, 景中心入射角 23.177° , 参考斜距 847 km, 卫星速度 7.556 km/s, 待增强图像的大小(方位向 \times 距离向)为 1024×1024 像素。同地、近同时(获取时间: 10:05 UTC)QuikSCAT 反演的平均风速约为 9 m/s。

根据 2.4 节的分析可知, 待增强图像块尺寸大约为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$, 图像分辨率 12.5 m, 为满足快速傅里叶变换的需要, 图像块尺寸选取 256×256 像素。利用式(4), 可求得分离波数 $k_d = 0.007 \text{ rad/m}$ 。为验证分离波数 k_d 选取是最优的, 计算 3 幅在不同 k_d 下增强后图像的归一化风浪对比度 PBR, 结果如图 2 所示。由于 QuikSCAT 反演的风速精度为 $\pm 2 \text{ m/s}$, 通过风速计算的 $k_d \in [0.0053, 0.0098] \text{ rad/m}$ 。由结果可知, 在该范围内, 3 幅图像的风浪对比度均达到最大值。

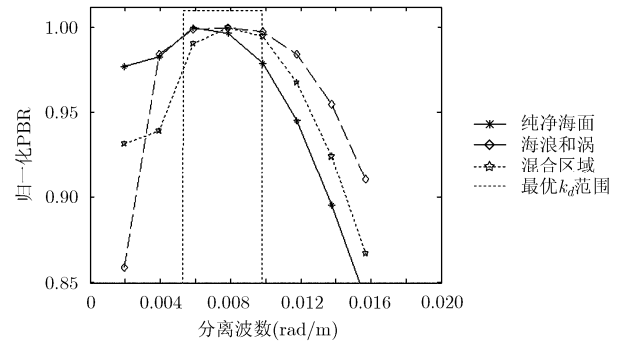


图2 分离波数选取对图像增强的影响

3.2 实验结果及主观评价

Vehel^[3]采用的分形滤波方法使得 SAR 海洋图像斑点噪声显著降低, 但波浪纹理的增强效果不明显。以下仅列出 Curvelet 域增强方法^[6]与本文提出方法的对比结果, 如图 3 至图 5 所示。基于 Curvelet 域增强方法选取 $j = 4, 5$ 二层系数提取边缘方向特征, 阈值 $\text{thresh} = 0.2$, 增强的方向分别为 $\theta_{\text{range}} = [-94^\circ, -86^\circ]$, $[-94^\circ, -86^\circ]$ 和 $[-90^\circ, -80^\circ]$ 。对比增强结果发现, 在给定 Curvelet 域增强方向并通过多次实验调整增强参数后, 风浪纹理的增强效果较为明显, 但出现了虚假波浪条纹, 且在一定程度上破坏了涡和混合区域海面中非风浪条纹区域的纹理; 而本文提出的方法, 风浪纹理增强显著, 保持了其他海洋特征的纹理, 并且图像对比度得到了提高。

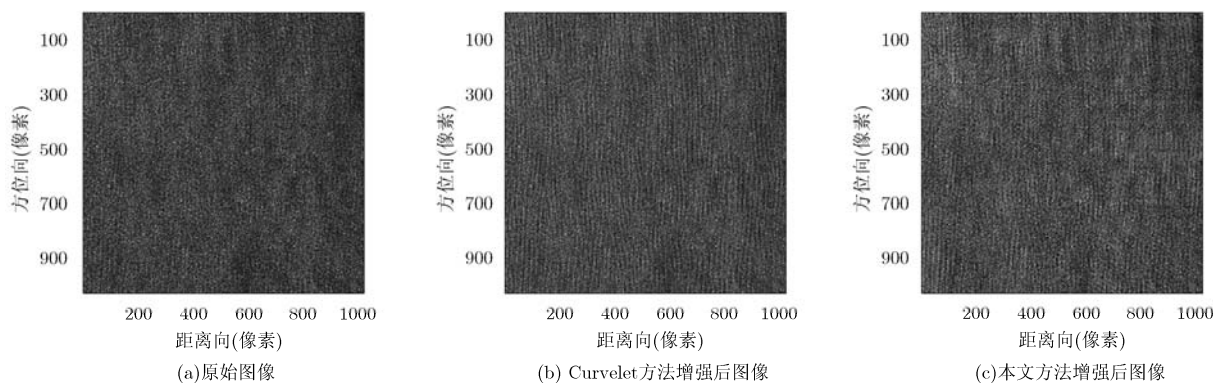


图3 纯净海面增强前后比较

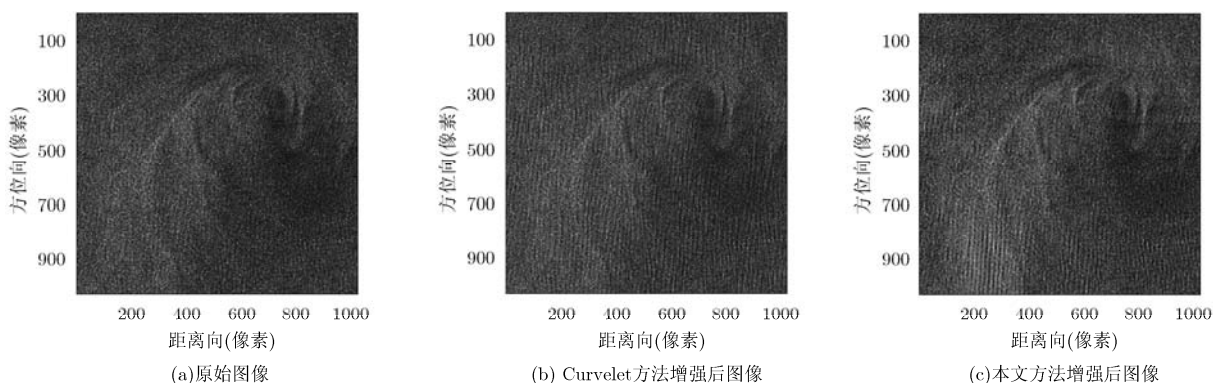


图4 包含海浪和涡海面图像增强前后比较

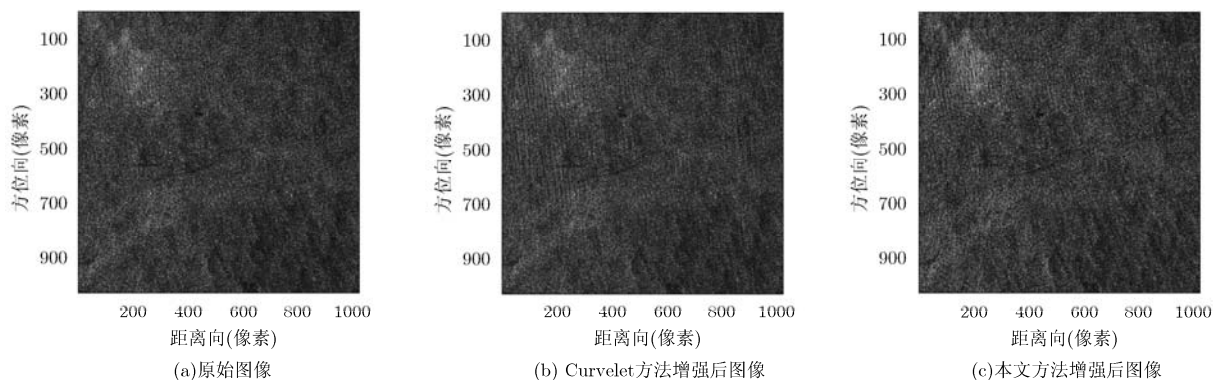


图5 混合区域海面图像增强前后比较

3.3 客观指标评价

利用文献[11]中提出的客观指标, 分别对 Curvelet 和本文方法增强后灰度图像进行评价。指标包括: 图像方差 Var 、图像对比度 C 、正负灰度调制差 S_{BD} (描述图像中亮暗条纹的反差)、相对归一化图像灰度调制 $|\Delta I/\bar{I}|$ (描述纹理特征所包含的信息)、加权相对归一化图像灰度调制 ΔI_w (描述不同图像背景纹理特征的清晰度)。以上指标值越大, 纹理特征越清晰。可以得到 3 幅图像如表 1 所示的结果(各图中评价指标最优值以粗体标示)。由表中指标可以得出: 与 Curvelet 域的增强方法相比, 改进

后的 Goldstein 滤波显著提高了风浪条纹特征的纹理信息, 提高了图像信噪比, 增强了波浪条纹的对比度和纹理的清晰程度。

4 结束语

本文通过分析 SAR 海洋图像谱的特征, 提出一种基于改进的 Goldstein 滤波器 SAR 海洋图像增强新方法。在视觉上对风浪条纹具有显著的增强效果, 保持了其他海洋特征, 且实现简单; 基于客观指标评价也表明该方法的适用性和优越性。本文方法将为海洋环境参数监测和提取, 海洋现象的理解和解译提供帮助。

表 1 ERS-2 卫星 SAR 图像不同方法增强效果评价

		Var	C	S_{BD}	$\Delta I/\bar{I}$	ΔI_w
1	原图	5323	1.32	115.87	0.21	19.66
	Curvelet	6194.4	1.40	125.05	0.23	22.88
	本文方法	6812.7	1.57	130.90	0.26	27.29
2	原图	3821	1.48	98.22	0.23	18.05
	Curvelet	4311.7	1.54	104.25	0.24	20.37
	本文方法	4892.1	1.82	111.02	0.29	25.69
3	原图	812.8	1.54	48.34	0.22	8.17
	Curvelet	839.3	1.58	49.37	0.23	8.44
	本文方法	1039.7	2.13	55.33	0.30	12.44

致谢: 感谢中国科学院电子学研究所的种劲松研究员和王小青副研究员提供图像数据和宝贵建议。

参考文献

- [1] 赵凤军, 刘凡, 邓云凯, 等. 一种基于灰度互相关法的扫描模式下的风场反演算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1667-1670.
Zhao F J, Liu F, Deng Y K, et al. A new wind vector algorithm in scanning mode based on gray cross-correlation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(7): 1667-1670.
- [2] 王珂. 基于SAR图像的浅海水下地形探测技术研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2011.
Wang K. Study on detecting technique of shallow ocean under water bottom topography based on SAR image[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [3] Vehel J L. Evolutionary signal enhancement based on Hölder regularity analysis[OL]. <http://www-rocq.inria.fr/fractales>, 2006.
- [4] 蒋永馨, 王孝通, 徐晓刚, 等. 海洋合成孔径雷达图像斑点噪声的滤除[J]. 高技术通讯, 2009, 19(6): 586-590.
Jiang Y X, Wang X T, Xu X G, et al. Speckle noise filtering for sea Synthetic Aperture Radar images[J]. *High Technology Letters*, 2009, 19(6): 586-590.
- [5] Carlson G E. Wavelet processing of SAR ocean wave images[C]. Proceedings of 1995 Geoscience and Remote Sensing Symposium, Firenze, Italy, 1995: 679-681.
- [6] 白皓, 王小青, 陈永强. 一种基于曲波域的 SAR 图像特征增强新方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(2): 228-234.
Bai H, Wang X Q, and Chen Y Q. A new curvelet-based method for SAR image feature enhancement[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2011, 28(2): 228-234.
- [7] Jackson C R, Apel J R, et al. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual[M]. Washington DC, 2004: 139-169.
- [8] 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.
- [9] Goldstein R M and Werner C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035-4038.
- [10] 孙建. SAR 影像的海浪信息反演[D]. [博士学位论文], 中国海洋大学, 2005.
Sun J. The retrieval of ocean wave information from SAR image[D]. [Ph.D. dissertation], Ocean University of China, 2005.
- [11] Cai Y N and Chong J S. Parameter assessment for texture feature quality evaluation in SAR ocean image[C]. 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xián, China, 2009: 852-855.

张问一: 男, 1984年生, 硕博连读生, 研究方向为海洋合成孔径雷达成像。

胡东辉: 男, 1970年生, 硕士生导师, 副研究员, 从事 SAR/ISAR 成像研究工作。

丁赤飏: 男, 1969年生, 博士生导师, 研究员, 从事 SAR 地面系统处理工作。