

一种基于序列 SAR 图像的海浪对消方法

高骥超^{1,2,3} 王小青^{1,2} 种劲松^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 微波成像技术重点实验室 北京 100190; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:在高分辨率 SAR 海洋图像中,海浪是图像中最明显的纹理特征。当需要对海面上非海浪信息进行检测或者反演时,需要克服图像中的海浪杂波干扰。本文提出了一种海浪对消方法,它利用序列 SAR 图像间海浪条纹的差异与海浪的振动特性对海浪纹理进行抑制,不仅利用了图像的几何信息还利用了时变信息,能够选择性地抑制 SAR 图像中的海浪纹理,同时很好地保留海面上其他信息。本文还利用真实的机载 SAR 数据对算法进行了有效性验证。实验结果表明,该方法能够有效地抑制图像中的海浪纹理,同时很好地保留图像中的非海浪目标信息,比传统的仅利用空间信息的滤波方法效果更好。

关键词:合成孔径雷达(SAR);序列图像;海浪对消

中图分类号: TN958 文献标识码:A 国家标准学科分类代码: 510.4030

Ocean wave clutter cancellation method based on series of SAR images

Gao Jichao^{1,2,3} Wang Xiaoqing^{1,2} Chong Jinsong^{1,2}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Waves are the most obvious surface stripy features in the high-resolution synthetic aperture radar (SAR) images of the ocean. In order to effectively detect or retrieve the non-wave phenomena from SAR ocean images, the interference from the waves need to be suppressed. The traditional ocean wave clutter suppression method is mainly based on the geometric texture of the images, by means of filtering in the special frequency domain or wavelet domain. However, the regions in the frequency domain or wavelet domain which contain information of the waves may also contain spectra of other non-wave objects, thus leading to an unwanted information losing when filtering on these regions. In this paper, we propose a new ocean wave clutter suppression method based on series of SAR images. We use the differences of the two images in combination with the wave dispersion relation to cancel the wave-stripe in the images. The main point of our method is to use both the geometric information and the temporal information, thus enable us to suppress the waves selectively while leaving the non-wave information unharmed. In addition, we use real SAR data to validate it. The result of the experiments shows that the proposed method can effectively suppressed the wave stripes and maintain the non-wave information in the images. Our method outperformed the traditional filter-based method as well.

Keywords: SAR; series of images; ocean wave clutter cancellation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)因其全天时、全天候、高分辨率的工作能力,广泛应用于海洋微波遥感领域^[1-4],如表面波、内波、洋流、海冰等。海浪是海洋最主要的表面特征,在很多遥感应用中,如舰船检测^[5-6]、油膜检测和内波反演等,海浪纹理常常成为主要的干扰因素,需要予以

消除^[7-8]。

传统的海浪抑制方法都是基于 SAR 图像中海浪条纹的几何特性,利用空间频域滤波或者小波分析等方法对海浪进行滤波处理^[9-10],但海浪的频谱或者小波域分布往往与其他海洋现象有较大的重叠部分,滤除海浪的同时也滤除了其他目标的信息。

本文提出了一种利用序列 SAR 图像对消海浪的海浪

抑制方法。它同时利用了图像的几何特性与时变特性,能有选择性地将海浪条纹对消而保留其他非海浪的目标信息。利用本文方法对机载C波段SAR数据进行海浪对消实验的结果表明,该方法能够有效抑制SAR图像中的海浪杂波成分,同时保留非海浪目标信息,其效果明显好于传统的基于空间几何信息的滤波方法。

2 基于序列SAR图像的海浪对消方法

2.1 算法介绍

序列SAR图像是指一系列不同成像时刻的SAR图像,它不仅包含了海面的几何信息还体现了海面的动态特性。通常的序列SAR图像有子孔径图像序列和双星图像序列。

在倾斜调制、水动力调制和速度聚束调制3种调制机理作用下,SAR可以对海浪进行高分辨率成像,海浪在图像上表现为明暗相间的条纹。由于海面是运动的,在序列SAR图像中,相邻图像中的海浪条纹存在偏移。如果图像中的海浪条纹正好相差半个周期,那么将两幅图像相加就能使条纹亮暗抵消,这就是本文方法的基本原理。本文的方法就是利用这样的两幅序列SAR图像,通过对图像频谱进行相位补偿使得两幅图像中的海浪条纹正好相差半个周期,最后通过图像求和使得海浪条纹互相抵消。算法原理如图1所示。

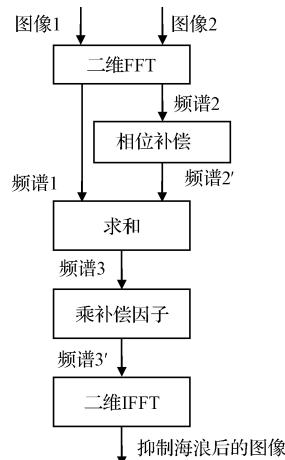


图1 算法原理

2.2 算法原理

SAR图像可以分为海浪相关的部分和其他海洋现象部分。一般来说海浪是快变现象,振动周期为几秒到十几秒,其变化在合成孔径时间内不可忽略(SAR合成孔径时间为秒到几十秒量级);而其他海洋现象,例如内波、漩涡、锋面等,变化周期大多在分钟甚至小时量级,在SAR合成孔径时间基本可以认为是不变的。因此假定海浪相关的部分和时间有关,其他海洋现象部分与时间无关。因此,可将SAR图像表示为:

$$I(x, y, t) = w(x, y, t) + s(x, y) \quad (1)$$

式中: x, y 为空间坐标, t 为方位时间。式中第一项为海浪成分,第二项为非海浪成分。对式(1)做二维傅里叶变换可得SAR图像的二维频谱:

$$I(k_x, k_y, t) = W(k_x, k_y, t) + S(k_x, k_y) \quad (2)$$

海浪通常被看做是很多正弦波的叠加,在观测时刻 t_1 时的海浪可以表示为:

$$\zeta(x, y, t_1) = \iint A \cos(k_x x + k_y y + \varphi_1) dk_x dk_y \quad (3)$$

式中: A, k_x, k_y, φ_1 分别表示海浪的振幅、 x 方向波数、 y 方向波数以及初始相位。对式(3)做二维傅里叶变换可得到 t_1 时刻海面的波高谱:

$$S_h(k_x, k_y, t_1) = A(k_x, k_y) \exp\{j\varphi_1\} \quad (4)$$

它描述了不同波长海浪的能量分布。SAR图像中海浪图像谱 $S_i(\vec{k})$ 与海面波高谱 $S_h(\vec{k})$ 有如下近似关系:

$$S_i(\vec{k}) = M(\vec{k}) S_h(\vec{k}) \quad (5)$$

式中: \vec{k} 表示海浪的波数向量, $M(\vec{k})$ 是包括所有调制机理的传递函数。由式(5)的映射关系, t_1 时刻海浪的图像谱表示为:

$$W(k_x, k_y, t_1) = A(k_x, k_y) M(k_x, k_y) \exp\{j\varphi_1\} \quad (6)$$

将式(6)代入式(2),那么 t_1 时刻的海面SAR图像频谱可以表示为:

$$I_1(k_x, k_y, t_1) = A(k_x, k_y) M(k_x, k_y) \exp\{j\varphi_1\} + S(k_x, k_y) \quad (7)$$

如果SAR经过一段时间(几秒)后,在 t_2 时刻再次对海面进行成像,则此时的SAR图像频谱可以表示为:

$$I_2(k_x, k_y, t_2) = A(k_x, k_y) M(k_x, k_y) \exp\{j\varphi_2\} + S(k_x, k_y) \quad (8)$$

由于SAR系统很少在这个时间间隔内对海面进行重复成像,因此在实际处理时使用不同的子视图像来代替不同时刻的SAR图像^[11],这要求SAR系统有足够的合成孔径时间。

利用两图像的交叉谱可求两图像中海浪条纹的相位差。定义两图像交叉谱如下:

$$\begin{aligned} \Phi(k_x, k_y) &= \langle I_1(k_x, k_y, t_1) \cdot I_2^*(k_x, k_y, t_2) \rangle \\ &= [A(k_x, k_y) M(k_x, k_y)]^2 \exp\{j(\varphi_1 - \varphi_2)\} + S^2(k_x, k_y) \end{aligned} \quad (9)$$

通常海浪条纹尺度在30~200 m之间,振动周期大约5~8 s。假设两图像成像时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 约为振动周期的一半,那么在海浪传播方向上,交叉谱中海浪分量的相位为:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = -\omega \Delta t \quad (10)$$

式中: ω 为波数为 (k_x, k_y) 的海浪分量的振动频率。由式(10)可知,在海浪传播方向上,交叉谱中海浪分量的相位小于0,并随着振动频率增大而减小;而在传播方向的共轭对称处,交叉谱中海浪分量的相位大于0,并随振动频率增大而增大。通过交叉谱的相位可以确定海浪的传播方向。

式(10)中的振动频率 ω 可由海浪色散关系求出。对

自由传播的海浪,波数和振动频率不是独立的,存在下面的对应关系:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (11)$$

式中: h 是水深, g 为重力加速度。若波长为 ν , 当 $h \gg \nu$ 时, 可得近似关系:

$$\omega = \sqrt{gk} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot g}{\nu}} \quad (12)$$

通常在 SAR 图像中, 图像的距离向与方位向分辨率不同, 图像频谱中的频点 (k_x, k_y) 对应的波长 $\nu(k_x, k_y)$ 可由下式求得:

$$\nu(k_x, k_y) = \frac{\left(\frac{N_a \delta_a}{k_x}\right) \left(\frac{N_r \delta_r}{k_y}\right)}{\sqrt{\left(\frac{N_a \delta_a}{k_x}\right)^2 + \left(\frac{N_r \delta_r}{k_y}\right)^2}} \quad (13)$$

式中: N_a, N_r 分别为方位向和距离向的点数, k_x, k_y 分别为方位向与距离向的波数, δ_a, δ_r 分别为方位向与距离向的分辨率。

为了抵消海浪成分, 需要对图像频谱中海浪分量进行相位补偿, 使得两图像中海浪分量的相位差为 π 。若选择图像 2 的频谱进行补偿, 则应该对海浪传播方向处的 $I_2(k_x, k_y, t_2)$ 分量补偿相位 $-\pi + \omega\Delta t$, 对与其共轭对称处的 $I_2^*(k_x, k_y, t_2)$ 分量补偿相位 $\pi - \omega\Delta t$ 。 ω 的值由式(12)和式(13)求得。

图像 2 经相位补偿后的频谱 $I_2'(k_x, k_y, t_2)$ 为:

$$I_2'(k_x, k_y, t_2) = -A(k_x, k_y)M(k_x, k_y)\exp\{j\varphi_1\} + S(k_x, k_y)\exp\{j(\pi - \omega\Delta t)\} \quad (14)$$

对比式(7)与式(14)可知, 它们的海浪部分正好可以正负相抵。因此, 将频谱 $I_1(k_x, k_y, t_1)$ 与频谱 $I_2'(k_x, k_y, t_2)$ 相加可得抵消海浪成分之后的频谱:

$$I_3(k_x, k_y) = [1 + \exp\{j(\pi - \omega\Delta t)\}] \cdot S(k_x, k_y) \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 虽然抵消掉了频谱中的海浪分量, 但对非海浪目标的频谱引入了一个乘法因子。对 $I_3(k_x, k_y)$ 分量乘以 $2/[1 + \exp\{j(\pi - \omega\Delta t)\}]$, 对与其共轭的 $I_3^*(k_x, k_y)$ 分量乘以 $2/[1 + \exp\{-j(\pi - \omega\Delta t)\}]$ 可以消除引入的这个乘法因子。

消除引入的乘法因子后得到最终的频谱:

$$I_3'(k_x, k_y) = 2S(k_x, k_y) \quad (16)$$

最后对该频谱做二维逆傅里叶变换可得抵消海浪的图像:

$$I_R(x, y) = 2s(x, y) \quad (17)$$

从式(17)可以看出, 经本文方法抑制海浪后的图像有这样的优点, 即海浪成分被抵消, 而非海浪的目标很好地被保留。

3 机载 SAR 数据处理结果

下面利用本文方法对中国科学院电子学研究所的 C 波段机载 SAR 数据进行了海浪对消实验。雷达的平台速度约 133 m/s, 天线尺寸为 0.64 m, 波长 0.055 6 m, 最短斜

距为 9 698.5 m, 计算可知最短斜距处的合成孔径时间约为 6.27 s, 并且随着斜距增加, 最远端合成孔径时间约 12 s。当提取两幅子视图像时, 图像间隔最多可达到合成孔径时间的一半。在实验海域, 海浪主要集中在 80~100 m 范围内, 最理想的子孔径时间间隔在 3.5~4 s 左右。因此, 系统的合成孔径时间长度完全满足使用本文方法抑制海浪的要求。

图 2(a)是一幅 C 波段数据进行常规 SAR 成像处理的结果, 图中有两艘小船。由于该图中存在明显的海浪纹理, 小船尾迹受海浪纹理严重干扰不易辨认。图 2(b)是本文利用小波分解滤波的结果, 图 2(c)是本文利用傅里叶滤波的结果, 图 2(d)是用本文的海浪对消方法处理的结果。可以看出, 图 2(c)和图 2(d)中的海浪条纹都受到了抑制, 但是, 图 2(d)中海杂波区域更加均匀, 尾迹更明显, 效果较好。

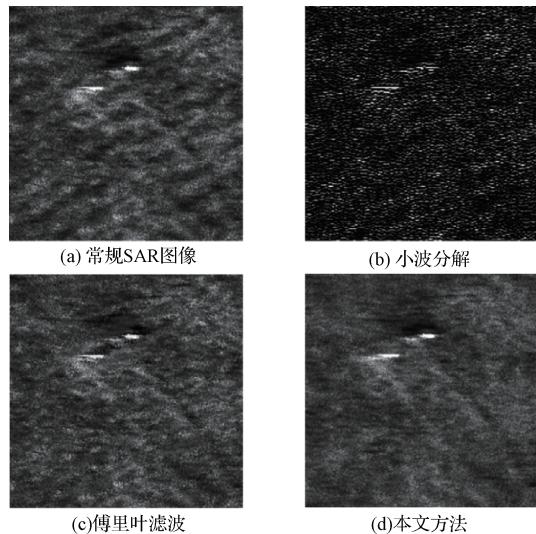


图 2 舰船尾迹 SAR 图像及处理结果

图 3(a)是一幅海面油膜 SAR 图像, 油膜为图像中的黑色部分。图 3(b)是本文利用小波分解处理的结果, 图 3(c)是本文利用傅里叶滤波处理的结果, 图 3(d)是用本文方法处理的结果。可以看出同图 3(b)与图 3(c)相比, 图 3(d)中海浪区域图像更加均匀, 并且油膜清晰可见。

图 4(a)是一幅内波 SAR 图像, 内波为图中横向的暗条纹。图 4(b)是本文用小波分解处理的结果, 图 4(c)是本文用傅里叶滤波处理的结果, 4(d)是用本文方法处理的结果。同图 4(b)和图 4(c)相比, 图 4(d)中海浪区域更加均匀, 内波更加清晰。

从上面的几个例子可以看出, 本文的方法与基于频域滤波的方法相比有如下的特点: 1)能有效地抑制掉海面图像中的海浪杂波条纹, 抑制海浪后的海面区域更加均匀; 2)能很好地保留海面上的非海浪目标信息, 受海浪干扰严重的一些目标(舰船尾迹、油膜等)经过抑制后更加明显了。因此, 本文的方法达到了预期的目标, 并且效果明显。

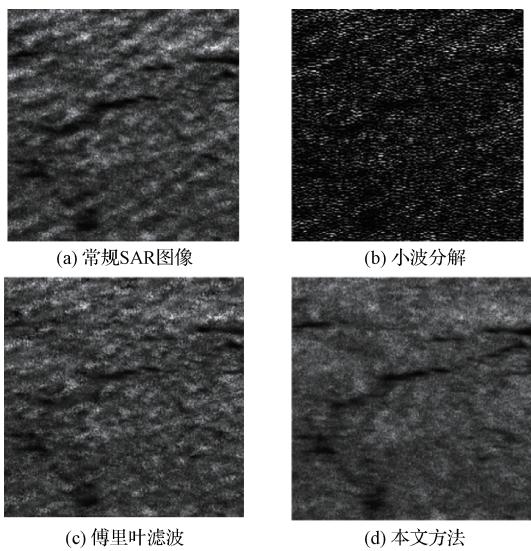


图3 油膜目标处理结果

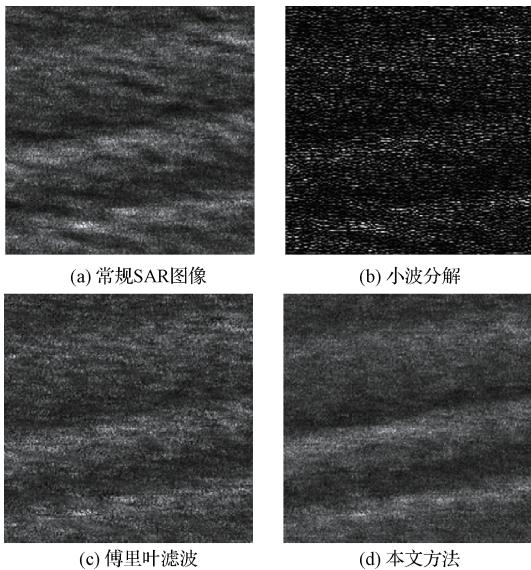


图4 内波图像处理结果

好于基于小波或者傅里叶滤波等利用几何信息的海浪杂波抑制方法。

4 结 论

海浪是 SAR 海洋图像中最显著的纹理,对于其他的内波、漩涡、油膜等非海浪现象产生严重的干扰,抑制海浪杂波干扰是很多基于 SAR 图像进行非海浪现象研究的重要预处理步骤。本文针对以前基于频域滤波抑制海浪杂波方法的不足,提出了一种新的海浪杂波对消制方法,该方法同时利用了海浪的空间特性和时变特性,可以选择性地对海浪成分进行抑制。该方法利用不同时刻的 SAR 图像中海浪条纹存在偏移这一特性,通过精确的相位补偿使

得偏移量正好为海浪波长的一半,最后将两幅图像相加使得海浪条纹亮暗相抵。最后利用真实的机载 SAR 海洋实验数据对该方法进行了验证,实验结果表明,在合适的合成孔径时间下,该方法可以很好地抑制海浪成分,保留其他非海浪成分,其效果明显好于传统的基于小波或者傅里叶滤波的海浪抑制方法。

参 考 文 献

- [1] 朱敏慧. SAR 的海洋动力探测研究及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(4):342-352.
- [2] 南华, 方宁, 苏珉. 海面 SAR 时域回波信号可视化仿真计算[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6):118-121.
- [3] 凌祥, 王夷, 赵雷鸣, 等. 二维距离—多普勒海杂波信号模拟与实现方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 108-111.
- [4] 杨学志, 桂志强, 郑鑫, 等. 采用自适应块拼接的北极海冰 SAR 图像合成[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2070-2077.
- [5] 鲁小丽, 王岩飞, 潘卓, 等. 基于剪切波变换的 SAR 图像舰船检测[J]. 电子测量技术, 2013, 37(6):54-62.
- [6] 李斌, 孙显, 吴其昌, 等. 一种基于活动基模型的近岸舰船检测算法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 17-21.
- [7] CHEN X L, GUAN J. A fast FRFT based detection algorithm of multiple moving targets in sea clutter[J]. IEEE International Radar Conference, Washington DC, United states, 2010:402-406.
- [8] XING H Y, ZHANG Q, LU CH X. Adaptive stochastic resonance method for weak signal detection based on particle swarm optimization[J]. Instrumentation, 2015, 1(2):3-10.
- [9] 查正兴, 鲁昌华, 陶志颖, 等. 增强型 Shearlet 域 SAR 图像去噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 644-649.
- [10] 李晓玮, 种劲松. 基于小波分解的 K-分布 SAR 图像舰船检测[J]. 测试技术学报, 2007, 21(4):350-354.
- [11] 王小青, 孙海清, 种劲松. 从 SAR 子孔径序列图像中提取海洋动态特征的改进相位相关法[J]. 雷达学报, 2013, 2(1):30-38.

作 者 简 介

高骥超, 1990 年出生, 男, 硕士研究生。主要研究方向为海洋 SAR 成像理论及其信号处理。

王小青, 1978 年出生, 男, 工学博士, 副研究员。主要研究方向为 SAR 海洋遥感应用与机理、SAR 新体制新技术等。

种劲松, 1969 年出生, 女, 工学博士, 研究员。主要研究方向为目标检测与识别、遥感图像信息处理等。