

海洋合成孔径雷达图像斑点噪声的滤除^①

蒋永馨^② * **** 王孝通 ** **** 徐晓刚 *** **** 黄 华 ** ****

(* 海军大连舰艇学院基础部 大连 116018)

(** 海军大连舰艇学院航海系 大连 116018)

(*** 海军大连舰艇学院装备系统与自动化系 大连 116018)

(**** 海军大连舰艇学院光电技术研究所 大连 116018)

摘 要 针对海洋合成孔径雷达(SAR)图像结构信息不明显、水下目标识别困难这一问题,提出了基于经验模式分解(EMD)的算法和 *Hölder* 指数调整相融合的框架,该框架可以有效地滤除海洋 SAR 图像的斑点噪声并增强其结构信息,使得人眼可以分辨其特征信息。该融合框架利用 EMD 将海洋 SAR 图像分解成不同频率成分的分量,不同层次的分量根据其结构信息和噪声的特征用不同的 *Hölder* 指数来调整, *Hölder* 指数的大小随着分量层数的增加而减小,即在不同尺度下分别抑制斑点噪声,从而恢复其中所包含的结构信息。试验结果表明,利用该框架可以有效抑制 SAR 图像中的斑点噪声和增强与水下目标相关的结构信息,使人眼可以分辨海洋 SAR 图像的特征结构。

关键词 合成孔径雷达(SAR), 图像去噪, 斑点噪声, *Hölder* 指数

0 引 言

利用合成孔径雷达(SAR)准确地获得水下目标信息对建立海洋信息数据库具有非常重要的意义。由于 SAR 成像是通过雷达发射电波和接收回波完成的,返回波的强弱决定了在雷达图像中的亮度。海水的反射率高于地面植被、建筑物等介质,电磁波对海水的穿透力小,回波强度高,又由于海面大小尺度不同的波浪会影响回波的强度, SAR 图像便呈现了亮点或暗点,且电磁波的散射特性又会产生相干斑噪声。理论上 SAR 图像的高频噪斑,其强度分布服从负指数分布且具有相乘性。所以,斑点噪声和回波形成信息混叠,水下目标(如暗礁、沉船等)扰动产生的微弱结构信息被淹没在斑点噪声中,增强它的结构信息非常困难。为此严重影响了水下目标探测的发展。因此,如何有效地压抑斑点噪声和增强其结构信息,是实际应用中很现实的一个关键技术问题。

目前,许多情况下对地面植被、建筑等, SAR 图像噪声滤除效果不错,对海洋, SAR 图像处理效果却不理想,如著名的 speckle 统计参数滤波器, Lee 滤

波、Kuan 滤波、Frost 滤波和 Gamma MAP 滤波^[1-3]。基于小波分析的 speckle 滤波算法^[4,5]取得了较好的平滑效果,但纹理等细节信息保持不够。Mallat 和 Hwang 利用小波变换模极大值法研究信号的局部奇异性,为处理多分形谱的奇异性提供了线索和思路^[6]。2001 年, Han 和 Yue^[7,8]等给出了雷达图像的粒子噪声去除算法,通过行和列上的经验模式分解,去除含有噪声粒子的内蕴模式函数(intrinsic mode function, IMF), 获取滤波图像。此方法对特定的噪声效果不错,但它不是严格意义上的二维滤波算法,因为丢失了空间上的相关性。2002 年,韩春明^[9]等提出了基于经验模式分解(experiment mode decomposition, EMD)的 SAR 图像降噪,但 EMD 是一维分解,是简单地将噪声减去,效果也不理想。Vehel^[10,11]等采用小波变换,将分形思想应用于图像信号的奇异特性的分析和处理,对于结构特征明显的地面植被、建筑等 SAR 图像可以呈现基本的结构信息和纹理信息,但对海洋 SAR 图像的处理效果无法满足人眼的视觉要求。对于未经处理的海洋 SAR 图像,人眼可以很容易地分辨出水上目标或障碍物,但对于水下目标或者障碍物引起对雷达回波的影响,如果

① 国家自然科学基金(6047314), 辽宁省自然科学基金(20082176)和浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放基金资助项目。

② 女, 1981 年生, 博士; 研究方向: 遥感图像处理和目标识别; 联系人, E-mail: jiangyongxin1981@yahoo.com.cn

(收稿日期: 2008-05-21)

SAR 图像未经处理,人眼几乎无法觉察由此产生的结构信息。因此,本文提出了基于 EMD 的算法和 Hölder 指数的融合框架,可以有效地滤除海洋 SAR 图像的斑点噪声并增强其结构信息,使得人眼可以分辨海洋 SAR 图像中由水下目标产生的特征结构信息。

1 EMD 算法和 Hölder 指数调整的融合框架

EMD 是 1998 年 Huang 提出来的,它利用寻找局部极值将数据分解成不同频率特性的数据成分^[12]。EMD 用于普通图像去噪时,估计噪声分布的频率范围,将该频段的数据成分扔掉,即完成去噪处理;若用同样的方法处理海洋 SAR 图像,简单地将高频分量扔掉,会损失大量的结构信息。因为海洋 SAR 图像经过 EMD 分解后,噪声不是单一地分布在某个频率范围内,而是不同频率层次的分量包含了不同频率的结构信息和噪声。

Hölder 指数可以刻画函数的奇异性,通过调整图像的 Hölder 指数可以使图像更光滑,抑制图像的噪声,但只能从整体上抑制图像的噪声,某些频段的噪声仍大量存在。

根据上述 EMD 算法和 Hölder 指数在各自应用中的缺陷和海洋 SAR 图像斑点噪声的负指数分布特性,本文提出了基于 EMD 的算法和 Hölder 指数调整相融合的框架。该框架既克服了只利用 EMD 处理海洋 SAR 图像时结构信息损失较多的缺陷,又弥补了调整图像的 Hölder 指数只能从整体上抑制噪声,而某些频段的噪声仍大量存在的缺点,且达到了滤除斑点噪声的同时增强了其结构信息的目的。

1.1 EMD 算法

EMD 是基于数据时域局部特征的、自适应的时频分析工具^[12],其中每组数据分解为内蕴模式函数(IMF)和趋势项。IMF 定义为:(1)在一段数据中极值点数目等于数据过零点数目或者最多相差为 1;(2)在任何一点由极大值点和极小值点定义的包络的平均值为 0。设一维信号 $f(t)$,可以把原始数据分解成 n 个基本模式分量及一个剩余分量 r_n , r_n 可以是平均趋势或常量,即

$$f(t) = \sum_{i=1}^n \text{imf}_i + r_n \quad (1)$$

同样,利用上式将内蕴模式函数分量和剩余量反向构建原信号 $f(t)$ 。

2005 年徐冠雷等^[13]提出了基于时频特性的不

相容原理限邻域经验模式分解,采用基于局部自适应均值代替上下包络的限邻域 EMD 算法。对于二维图像 $f(x, y)$,经验模式分解可描述为

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^L \text{imf}_i(x, y) + r_L(x, y) \quad (2)$$

式中 $\text{imf}_i(x, y)$ ——第 i 次分解的内蕴模式函数分量, $r_L(x, y)$ —— L 次分解后的剩余量。

限邻域 EMD 消除了以往算法图像分解时普遍存在的灰度斑现象,而且可以根据需要精细分解出各种层次信息。

1.2 Hölder 指数定义

为了有助于理解 Hölder 指数的物理意义,先给出两种 Hölder 指数的定义^[10]。

定义 1 点态 Hölder 指数:设 $\alpha \in (0, 1)$, 且 $x_0 \in K \subset R$, 那么存在一个定义在 $C_{x_0}^\alpha$ 上的函数 $f: K \rightarrow R$, 对于所有 x 的邻域 x_0 , 使得

$$|f(x) - f(x_0)| \leq C |x - x_0|^\alpha \quad (3)$$

式中 C 为常数。

函数 f 在 x_0 的点态 Hölder 指数记为 $\alpha_f^p(x_0)$, 称为 α 的谱函数。

定义 2 局部 Hölder 指数:设 $\alpha \in (0, 1)$, 且 $\Omega \subset R, f \in C_l^\alpha(\Omega)$, 如果 $\exists C: \forall x, y \in \Omega: \frac{|f(x) - f(y)|}{|x - y|^\alpha} \leq C$, 则有

$$\alpha_{l(f, x_0, \rho)} = \sup\{\alpha: f \in C_l^\alpha(B(x_0, \rho))\} \quad (4)$$

如果 f 是一个连续函数,那么 f 在 x_0 点的局部 Hölder 指数为实数

$$\alpha_f^l(x_0) = \lim_{\rho \rightarrow 0} \alpha_{l(f, x_0, \rho)} \quad (5)$$

由于 α^p 和 α^l 都是定义在每一个点上的,两个函数 $f: x \rightarrow \alpha_f^p(x)$ 和 $f: x \rightarrow \alpha_f^l(x)$ 是两个不同的估计 Hölder 指数规则性的方法。在文献[10]中, $\alpha^p = \alpha^l$ 为假设前提进行了降噪处理。由于 Hölder 指数可以刻画函数的奇异性,它被广泛应用于分形分析。所谓奇异性指的是若函数在某些点处不连续或某阶导数不连续,则称函数在这些点处有奇异性。如果信号或图像的 Hölder 指数 α 越大,那么该信号或图像越光滑。

1.3 EMD 算法和 Hölder 指数调整的融合框架

在海洋 SAR 图像中,斑点噪声集中在高频部分,而结构信息为低频信息。将海洋 SAR 图像经过 EMD 分解后,得到 n 个内蕴模式分量和 1 个剩余分量,每一个分量都含有结构信息和噪声。第一层内蕴模式分量主要是高频信息,噪声占的比重较大,而有用信息则表现为 SAR 图像结构信息的细节部分。

第一层内蕴模式分量受噪声影响最大,其余分量依次次之。随着分解层次的增加,噪声含量越来越小,有用信息逐渐表现为结构信息的总体趋势。因此,根据每一层分量的结构信息和噪声含量来调整其

Hölder 指数,从而抑制每一层分量的噪声,也就是不同层次的分量用不同的 Hölder 指数来调整,在不同尺度下分别抑制斑点噪声,恢复其中所包含的结构信息。具体方案示意图如图 1。

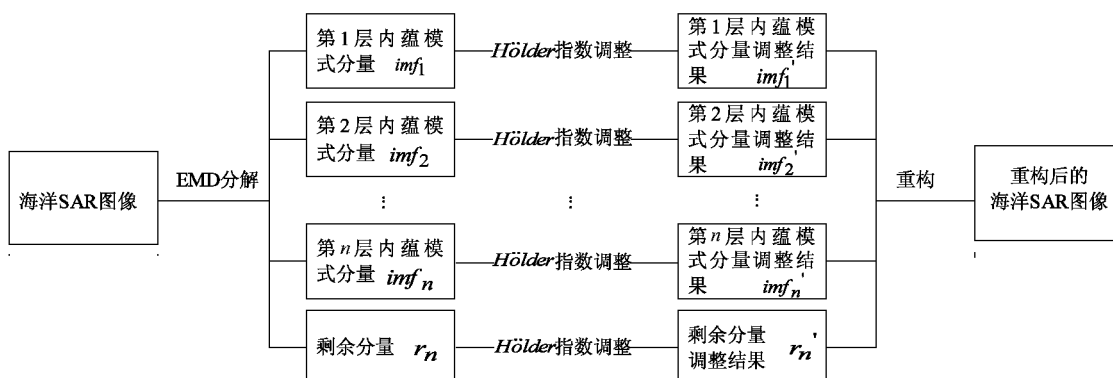


图 1 基于 EMD 算法和 Hölder 指数的融合框架示意图

海洋 SAR 图像经 EMD 分解得到 n 个内蕴模式分量和 1 个剩余分量,每一个分量所包含的结构信息和噪声的特性各不相同,所有分量中 imf_1 受噪声影响最大,其余分量依次次之;通过调整每一个分量的 Hölder 指数来抑制每一个分量的噪声;后将所有抑制后的分量重构,即得到噪声滤除后的海洋 SAR 图像。

由于不同层次的分量根据其结构信息和噪声含量的特性用不同的 Hölder 指数来调整,图像的 Hölder 指数 α 越大,图像越光滑。因此,可以通过提高 Hölder 来抑制斑点噪声。各个分量的噪声含量随着分解层数的增加而衰减,随着分解层次的增加, Hölder 指数的增量逐渐减少,即当 $i < j$ (i, j 是分解层数) 时, $\Delta\alpha_i > \Delta\alpha_j$ 。图 2 给出了 Hölder 指数的调整规律。在利用本文的融合框架处理海洋 SAR 图像时,根据不同层次分量的噪声含量来调整相应层次的 Hölder 指数,通常 $\Delta\alpha$ 的变化范围为 0.2 ~ 1.8。

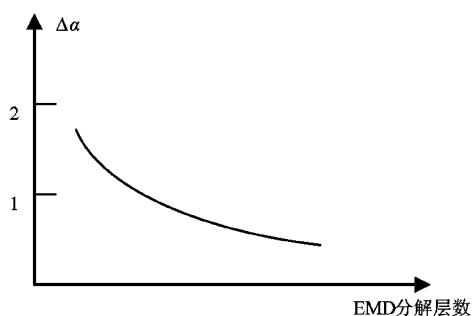


图 2 Hölder 指数调整规律图

该融合框架采用的 EMD 算法和 Hölder 指数起到了互补的作用,有效地滤除海洋 SAR 图像的斑点噪声并增强其结构信息。

2 算法实现

利用限邻域 EMD 在空域中将数据分解成不同的成分,并根据每一层数据的不同频率特性,分析其每一层的噪声含量和有用的数据含量,调整每一层数据的 Hölder 指数。通过调整图像的 Hölder 指数,就可改变图像的奇异性,从而达到去噪目的。具体算法如下:

(1) 将 SAR 图像进行 N 层限邻域 EMD 分解^[13],获取图像的内蕴模式函数分量 imf_m 和剩余量 R_m (其中 $m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$)。

(2) 分别对内蕴模式函数分量 imf_m 和剩余分量 R_m 进行小波 L 层分解,得到各层内蕴模式函数分量的小波系数 $d_{j,k}^n$ 及剩余分量的小波系数 $d_{R,j,k}^n$, 其中 n 为 NLEMD 分解的第 n 层内蕴模式分量的小波系数, j 为小波变换的尺度, k 为小波变换的位置)。

(3) 根据分析每一层分量的噪声和结构信息的特征,手工设定每一层内蕴模式函数分量和剩余量预调整的 Hölder 指数的值 $\Delta\alpha$, 经过多幅海洋 SAR 图像实验,随着层数的增加, Hölder 指数增量应该越来越小,即第 $N-1$ 层分量调整的 $\Delta\alpha$ 大于第 N 层分量的 $\Delta\alpha$ 。

(4) 通过给定的各层的内蕴模式函数分量和剩

余量的 $\Delta\alpha$, 来调整小波系数 $d_{j,k}^n$ 和 $d_{Rj,k}^n$, 得到各层调整后的小波系数 $\hat{c}_{j,k}^n$ 和 $\hat{c}_{Rj,k}^n$, 根据 2-microlocal 理论^[11], 令

$$\hat{c}_{j,k}^n = d_{j,k}^n \cdot 2^{-j(\Delta\alpha^n)} \quad (6)$$

式中 $\Delta\alpha^n$ 为第 n 层分量预调整的 Hölder 指数的值。

(5) 根据各层调整后的小波系数 $\hat{c}_{j,k}^n$ 和 $\hat{c}_{Rj,k}^n$ 重构, 得到降噪后的内蕴模式函数分量 imf_{mn} 和和剩余分量 $\tilde{R}_{mN}$ 。

(6) 对每一内蕴模式函数分量 imf_{mn} 做 $1/N$ 加权并求和, $a = \sum (\frac{1}{N} \times imf_{mn})$ 。

(7) 重构获得处理后的图像, 加权求和 $img = \omega_1 \times a + \tilde{\omega}_2 \times \tilde{R}_{mN}$ (其中 $0 < \omega_1, \omega_2 < 1$, 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$)。

3 试验结果和分析

图 3(a) 是 256×256 大小的 SAR 图像, 该区域中包含的内容为一条主干流分成两条支流, 流经区域呈“V”字形。图像在经过限邻域 EMD 分解后, 第一层内蕴模式含量主要是高频信息, 所包含的高频信息主要成分是噪声, 那么还有一些结构信息(细节信息或轮廓), 因此, 在处理此层时, 不能完全把它当作是噪声而去除, 要尽可能在去除噪声的同时, 保留有用的结构信息, 那么就需要将 Hölder 指数调整大一

些。第二层内蕴模式含量的主要成分就是中小尺度的纹理信息和一些噪声, 对于这一层的处理只要相应的提高其 Hölder 指数, 消除噪声的同时使之内在规律更为明显便可。剩余分量主要是低频信息, 即 SAR 图像的总体趋势, 通过调整 Hölder 指数提取更为明显的结构信息。图 3(b) 是经典的 Lee 滤波的处理结果, 在损失了结构信息的前提下平滑了斑点噪声。图 3(c) 是文献[11]的处理结果, 虽然结构信息已经可以看到了, 但斑点噪声依然较多; 若是该算法作用于结构不清晰的 SAR 图像上时, 处理后斑点噪声依然较多, 区分 SAR 图像的结构特征是较困难的。图 3(d) 是本文算法处理的结果, 和图 3(c) 比较, 斑点噪声明显少了很多, “V”字型更清晰, 更易于人眼分辨。

图 4(a) 呈现了中间是海, 两侧是岸边的一副 512×512 大小的 SAR 图像。在 SAR 向目标发送电磁波时, 与岸边相比, 海水对电磁波的反射率高, 穿透力小, 回波强度就强; 而岸边则对电磁波穿透力更大, 更能吸收电磁波, 电磁波反射就小, 回波强度就弱。图 4(a) 显示中间比两侧要亮。图 4(c) 和图 4(b) 分别是采用本文方法和文献[11]中的方法的降噪结果, 两图相比, 图 4(c) 的斑点噪声要少得多, 岸边和河流之间视觉上具有更大的区分度。

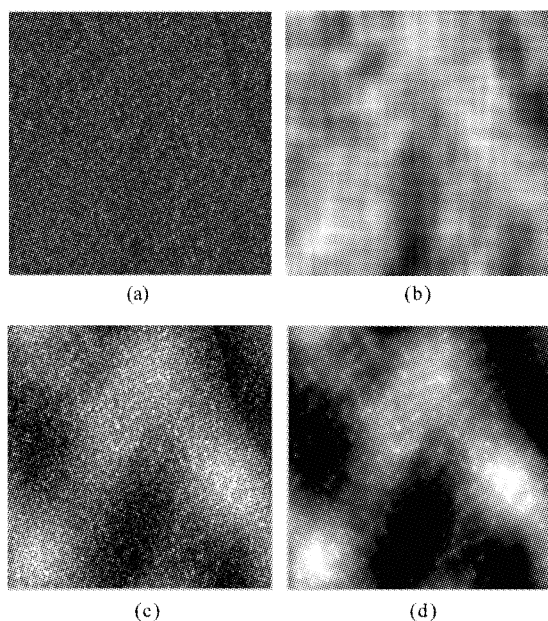


图 3 本文方法的具体处理过程、结果及与其它方法的处理结果的比较

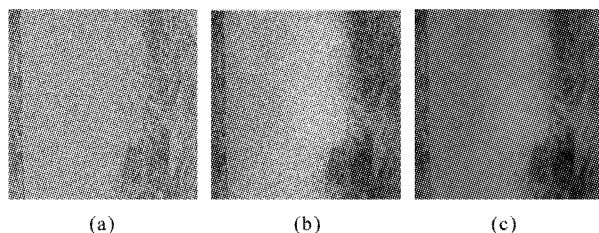
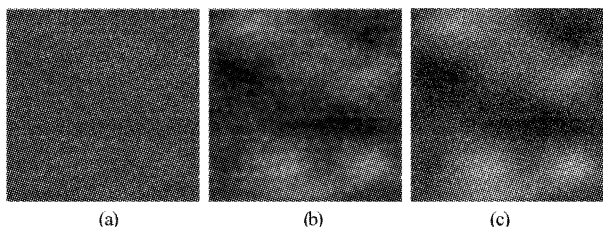


图 4 本文方法的结果及与其它方法的处理结果的比较

图 5(a) 是一副经过孤立暗礁的洋流的 SAR 图像。由于暗礁充当了一个极好的内波强扰动源角色, 内波与海浪产生相互作用, 海洋内波通过其自身在海表面形成的水平流场改变了海浪中小尺度在空间的分布形式, 进而被 SAR 探测到。洋流遇到暗礁后呈“V”字形向两边扩散, 进而可以探测暗礁的位置。图 5(a) 很难分辨出其特征信息, 而经过本文算法的处理结果可以分辨出洋流遇暗礁后的呈“V”字形的结构特征, 见图 5(b); 图 5(c) 是文献[11]中的方法的处理结果, 与本文的结果比较, 斑点噪声更

多,容易混淆结构特征,不利于观察。通过对该图像的处理,我们可以进一步估计洋流与暗礁之间的相互作用强度。



(a) 原 SAR 图像; (b) 为本文方法的降噪结果; (c) 为文献[11]方法的降噪结果

图 5 本文方法的结果及与其它方法的处理结果的比较

4 结 论

海洋 SAR 图像结构信息不明显,滤除斑点噪声并增强其结构信息是海洋 SAR 图像处理的难点。本文提出了一种 EMD 算法和 Hölder 指数调整的融合框架,可以有效地滤除海洋 SAR 图像的斑点噪声并增强其结构信息,使得人眼可以观察其特征信息。目前,该算法对于沿岸海区海底情况复杂,或气象条件恶劣情况下对水下障碍物产生的特征信息检测仍然无能为力,有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] Lee J S. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 1983, 13(1): 85-89
- [2] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C. Adaptive restoration of images with speckle. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1987, 35(3): 373-383
- [3] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, 4(2):157-166
- [4] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1994, 41(5): 613-627
- [5] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling. *IEEE Transaction on Geoscience Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2196-2212
- [6] Mallat S, Huang W L. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Transaction on information theory*, 1992, 38(2):617-643
- [7] Han C M, Guo H D, Wang C L. A novel method to reduce speckle in SAR image. *International Journal of Remote Sensing*, 2002,23(23): 5095-5101
- [8] Yue H Y, Guo H D, Han C M. A SAR interferogram filter based on the empirical mode decomposition method. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001, 38(5): 2061-2063
- [9] 韩春明,郭华东,王长林. 利用经验模态分解方法抑制 SAR 斑点噪声. *遥感学报*, 2002,6(4):266-271
- [10] Vehel J L. Fractal approaches in signal processing. *Fractals*, 1995, 3(4): 755-775
- [11] Vehel J L. Evolutionary signal enhancement based on Hölder regularity analysis. EASEA home page: <http://www-rocq.inria.fr/fractales>, 2006
- [12] Huang N E, Shen Z. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear non-stationary time Series Analysis. In: *Proceedings of the 1998 Royal Society of London A*, London, UK, 1998. 454. 903-995
- [13] 徐冠雷,王孝通,徐晓刚等. 基于限邻域 EMD 的图像增强. *电子学报*, 2006, 34(9):1635-1639

Speckle noise filtering for sea Synthetic Aperture Radar images

Jiang Yongxin * ****, Wang Xiaotong ** ****, Xu Xiaogang *** ****, Huang Hua ** ****

(* Department of Basic Sciences, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

(** Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

(*** Department of Automation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

(**** Institute of Photoelectric Technology, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

Abstract

To solve the problem that underwater objects are difficult to recognize with the method of Synthetic Aperture Radar (SAR) due to the insufficiency of the structure character information of sea SAR images, the paper proposes a noise elimination algorithm based on combining the experiment mode decomposition (EMD) algorithm with the Hölder Exponent adjustment. The algorithm can effectively suppress the speckle noise and enhance the structure character information, which finally become visible to the naked eye. Using the different frequency character of each level, the content of each level noise and non-noise are analyzed and the Hölder exponent of each level is adjusted. And the speckle noise of simple SAR images in different scale is filtered. At last, the new denoised SAR images can be obtained. The experimental result indicates that the speckle noise is substantially decreased and the structure character and texture of the result is clearer. And human eyes can distinguish the structure character of sea SAR images.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR), image denoising, speckle noise, Hölder exponent