

基于多分辨分析的合成孔径声纳相干斑抑制研究*

陈强[†] 田杰 刘维 黄海宁 张春华

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 相干斑噪声的存在使合成孔径声纳图像不能正确反映目标的反射特性, 严重影响了图像的质量, 降低了对图像的分析 and 理解性能。一个好的合成孔径声纳图像相干斑抑制算法, 必须在有效抑制相干斑噪声的同时, 尽量保持图像中的边缘、点目标等细节信息。小波变换具有多分辨特性, 可以利用其多分辨特性进行图像噪声消除。由于合成孔径声纳图像相干斑具有乘性噪声的性质, 这就需要对其合成孔径声纳图像进行对数变换, 把乘性噪声转换成加性噪声。然后对加性噪声进行小波多分辨分析和阈值处理, 剔除小于阈值的小波系数后进行逆小波变换和指数变换, 从而获得抑制相干斑噪声后的新的合成孔径声纳图像。从相干斑抑制的结果可以看出, 基于多分辨分析的相干斑噪声抑制算法能够有效降低合成孔径声纳图像中的相干斑噪声。

关键词 合成孔径声纳, 相干斑噪声, 多分辨分析

中图分类号: TP751.1 O427.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2012)04-0262-05

Speckle suppression for Synthetic Aperture Sonar imaging based on multiple resolution analysis

CHEN Qiang TIAN Jie LIU Wei HUANG Haining ZHANG Chunhua

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The presence of speckle noise makes Synthetic Aperture Sonar (SAS) image incorrectly describe the reflective properties of objects, seriously affects the image quality, and reduces analysis and understanding performance of SAS image. A good speckle noise suppression algorithm must effectively suppress speckle noise and keep the edges, point objects and other details information of SAS image at the same time. The wavelet transform has multiple resolution characteristics, so we can use the multiple resolution property to suppress speckle noise. Because of the multiplicative characteristics of speckle noise in SAS image, the original SAS image will be logarithmic transformed in order to get additive noise image. Then wavelet multiple resolution threshold processing can be used in additive noise image, and finally we can recover the data by index transformation. From the results of speckle suppression, we can see, the speckle noise suppression algorithm based on multiple resolution analysis can significantly reduce the speckle noise

2012-01-11 收稿; 2012-05-08 定稿

*中国科学院声学研究所所长择优基金项目

作者简介: 陈强 (1985-), 男, 安徽人, 博士研究生, 研究方向: 水声信号处理。

田杰 (1972-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师。

刘维 (1980-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师。

黄海宁 (1969-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。

张春华 (1962-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。

[†]通讯作者: 陈强, E-mail: chenqiang08@mails.gucas.ac.cn

in SAS image.

Key words Synthetic Aperture Sonar, Speckle noise, Multiple Resolution Analysis

1 引言

合成孔径声纳 (SAS, Synthetic Aperture Sonar) 是一种高分辨率的水下成像声纳, 其可以获得高质量的水下图像数据^[1]。合成孔径技术利用多个回波相干叠加得到一个孔径, 从而使合成孔径声纳设备在方位向保持较高的分辨率^[2]。在合成一个孔径的过程中, 由于为同一 SAS 声波波源所激励的各散射源 (元) 的回波 (散射波) 具有相似性, 从而导致相干斑噪声。

相干斑噪声的存在使 SAS 图像不能正确反映目标的反射特性, 严重影响了图像的质量, 降低了对 SAS 图像的分析 and 理解性能。相干斑噪声使边缘检测的结果不准确, 影响图像分割效果; 目标特征的稳定性受到干扰, 分类正确率下降; 相干斑噪声遮盖一些反射强度不大的真实目标和大部分点目标, 给目标检测造成极大困难。因此, 相干斑抑制是 SAS 图像应用研究的重要课题, 同时也是图像处理的一个重要环节。

一个好的 SAS 图像相干斑抑制算法, 必须在有效抑制相干斑噪声的同时, 尽量保持图像中的边缘、点目标等细节信息, 但是抑制相干斑噪声和保持图像细节信息是矛盾的两方面。抑制相干斑噪声的方法有很多种, 总的来说可以分为两类: 空域方法和变换域方法。

空域方法基本上可以分为两类: 一类是没有利用相干斑噪声统计特性的滤波方法, 如中值滤波、均值滤波等; 另一类是基于图像局部统计特性的自适应滤波算法, 如 Gamma-MAP 滤波^[3]、Lee 滤波^[4]、Frost 滤波^[5]、Kuan 滤波^[6]等。

随着小波的出现, 以及多分辨分析 (MRA, Multiple Resolution Analysis) 的发展, 许多学者提出变换域图像去噪方法, 并应用于图像相干斑抑制。1995 年 D. D. Donoho 在小波变换的基础上提出阈值去噪算法^[7], 其主要理论依据是信号在小波域内, 能量主要集中在有限的几个系数中, 而噪声的能量却分布在整个小波域内, 采用阈值方法可以保留大部分信号系数, 而将大部分噪声系数减少到

零。但 Donoho 的阈值算法主要针对高斯白噪声, 而 SAS 图像主要是乘性相干斑噪声。通常利用对数变换将乘性噪声转化为加性噪声, 然后采用阈值方法进行系数收缩, 最后进行指数变换重构图像。

2 相干斑噪声模型

SAS 图像中的相干斑噪声是一种乘性噪声, 在降低图像质量的同时, 其还会增加 SAS 图像边缘检测、图像分割和目标识别等处理的难度。对于相干斑噪声模型的研究具有重要作用, 其可以为相干斑噪声的抑制提供理论指导和效果分析。

SAS 图像中的每个分辨单元内都有大量离散的散射源, 对于分布目标来讲, 当声波作用于该目标时, 每个散射源都会产生一个后向散射波, 这些散射波的相位和幅度与该散射源有关, 因此, 该分辨单元的总回波就是各个散射回波之和:

$$s = Ae^{i\phi} = \sum_{i=1}^n A_i e^{i\phi_i}, \quad (1)$$

其中 A 是回波幅度, ϕ 是回波相位, A_i 和 ϕ_i 分别是第 i 个散射单元反射声波的幅度和相位。

从公式(1)可以看出, 散射回波受到散射源之间相位差导致的干涉效应的影响。因此, 可以计算该分辨单元散射回波的实部 z_1 和虚部 z_2 :

$$z_1 = A \cos \phi = \sum_{i=1}^n A_i \cos \phi_i, \quad (2)$$

$$z_2 = A \sin \phi = \sum_{i=1}^n A_i \sin \phi_i. \quad (3)$$

通常每个分辨单元内有许多散射源, 因此中心极限定理成立, 故 z_1 和 z_2 服从正态分布。假设相位 ϕ 在 $[0, 2\pi]$ 服从与幅度 A_i 无关的均匀分布, 那么 z_1 和 z_2 则服从均值为零的正态分布, 且相互之间独立。因此, 可以得到联合概率密度函数 PDF:

$$p(z_1, z_2) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{z_1^2 + z_2^2}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

由此，可以得到幅度和相位的联合概率分布：

$$p(A, \phi) = \frac{A}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma^2}\right). \quad (5)$$

幅度和相位的概率密度函数分别是：

$$p(A) = \frac{2A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma^2}\right), \quad (6)$$

$$p(\phi) = \frac{1}{2\pi} \quad \phi \in [0, 2\pi], \quad (7)$$

其中， $p(A)$ 表示瑞利分布， $p(\phi)$ 表示均匀分布。

SAS 图像实际上是包含实部 $A\cos\phi$ 和虚部 $A\sin\phi$ 的复图像，每个像素点的反射强度可以用复数 $Ae^{i\phi}$ 表示。

根据相干斑噪声模型，噪声的实部和虚部分别服从均值为零，方差为 σ^2 的高斯分布。其联合概率密度函数为：

$$p_{z_1, z_2}(z_1, z_2) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{z_1^2 + z_2^2}{\sigma^2}\right). \quad (8)$$

相位服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布，幅度 A 服从瑞利分布：

$$p_A(A) = \frac{2A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma^2}\right) \quad A \geq 0, \quad (9)$$

其中，均值为 $\frac{\sqrt{\pi}\sigma}{2}$ ，标准差为 $\sqrt{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right)\sigma}$ ，相对偏差为 $\sqrt{\frac{4}{\pi}} - 1$ （约等于 0.52）。观测强度 $I = A^2$ 服从负指数分布：

$$P_I(I) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{I}{\sigma}\right) \quad I \geq 0, \quad (10)$$

其中，均值和标准差都是 σ ，表示回波的平均强度。令 $N = I/\sigma$ ，则 $I = N\sigma$ ，变量代换可得 N 也服从指数分布 $P(N) = \exp(-N)$ 。由于 σ 为常数（海底散射系数的均值），因此可以认为 I 是随机变量 N 和常数 σ 的乘积。如果把 N 看做噪声，那么相干

斑噪声就是由其随机波动产生，故相干斑噪声是一种乘性噪声。

3 基于 MRA 的相干斑抑制算法

小波变换具有多分辨特性，在研究小波变换时，可以利用其多分辨特性进行图像噪声消除。Donoho 等人^[7]在高斯噪声模型下，提出信号去噪的硬阈值、软阈值算法，推导出计算 Visushrink 阈值的公式，并从理论上证明在均方意义下该阈值是最优解。

由于 SAS 图像相干斑具有乘性噪声的性质，而 Donoho 等人的模型建立在高斯加性噪声的基础上，这就需要对原始 SAS 图像进行对数变换。

研究表明^[8]，瑞利分布取对数后可以近似看做高斯分布。把乘性噪声转换成加性噪声，然后对加性噪声进行小波多分辨阈值处理，最后再通过指数变换把原始数据恢复出来。整个处理过程如图 1 所示，其中阈值去噪是整个处理过程的关键步骤。

3.1 小波阈值去噪

小波阈值去噪的理论依据是小波变换具有一种能量集中性能。图像经过小波变换后，由图像得到的小波系数包含有关图像的重要信息，并且主要集中在幅值较高的少数小波系数中。噪声所对应的小波系数幅值较小，但噪声的能量却分布在整个小波域内。

小波阈值去噪的具体处理过程为，将含有噪声的图像进行小波变换，保留大尺度低分辨率下的全部小波系数。对于各尺度高频分辨率下的小波系数，可以设定一个阈值，将小于该阈值的小波系数置零，而高于该阈值的小波系数完全保留，或者做相应的收缩处理。从而使图像中的噪声得到有效抑制，最后将处理后的小波系数利用逆小波变换进行重构，得到去噪后的重构图像。

3.2 算法实现

小波阈值去噪算法主要由三个步骤组成：(1)对含有噪声的图像进行小波变换，得到各分辨率下的小波系数。(2)保留最低频近似系数，对其它高频



图 1 多分辨阈值相干斑抑制流程图

细节系数进行非线性阈值处理。这里采用的阈值算法为 Visushrink 阈值, 阈值为 $\sigma\sqrt{2\log N}$, 其中 σ 是噪声标准差, N 表示图像的像素数。阈值函数可以是软阈值或者硬阈值等。(3)对进行阈值处理后的图像做逆小波变换, 由所有低频近似系数、已经经过阈值处理的细节系数进行小波重构, 得到去噪后的图像。

3.3 选取阈值函数

在小波阈值去噪中, 阈值函数构成重要组成部分。常用的阈值主要有软阈值和硬阈值两种, 它们的基本思想都是去除较小的小波系数, 而对较大的系数予以收缩或保留。

设 $I_{i,j}$ 为原始小波系数, $\hat{I}_{i,j}$ 表示阈值处理后的小波系数, λ 表示阈值。常见的阈值函数如下:

(1) 软阈值:

$$\hat{I}_{i,j} = \begin{cases} I_{i,j} - \lambda, & I_{i,j} \geq \lambda, \\ 0, & |I_{i,j}| < \lambda, \\ I_{i,j} + \lambda, & I_{i,j} \leq -\lambda. \end{cases} \quad (11)$$

即将含噪图像的小波系数与所选阈值 λ 进行比较, 大于阈值 λ 的点收缩为该点的值与阈值的差; 小于 $-\lambda$ 的点收缩为该点的值与阈值的和; 幅值的绝对值小于阈值 λ 的点置为零。

(2) 硬阈值:

$$\hat{I}_{i,j} = \begin{cases} I_{i,j}, & |I_{i,j}| \geq \lambda, \\ 0, & |I_{i,j}| < \lambda. \end{cases} \quad (12)$$

即将含噪图像的小波系数的绝对值与所选定的阈值 λ 比较, 小于阈值 λ 的点置为零; 大于等于阈值 λ 的点保持不变。

小波阈值去噪算法不仅可以较好地抑制噪声, 而且还可以很好地保留原始图像的特征, 因而具有良好的去噪效果。事实上, 在均方误差意义上可以证明阈值算法能够得到原始图像的最优估计, 并且采用软阈值算法得到的估计图像至少与原始图像同样光滑。

4 实验结果和分析

使用基于多分辨分析的相干斑噪声抑制算法对含有目标的 SAS 图像进行处理的结果如图 2 和图 3 所示, 其中图 2 是未经处理的原始图像, 从

中可以看到显著的斑点噪声; 图 3 是经过相干斑抑制处理后的图像, 从中可以看出相干斑噪声得到很好的抑制。在使用相干斑抑制算法处理后, 图像中目标的灰度并没有受到很大影响, 而背景中的相干斑噪声却受到很好的抑制, 目标与背景的灰度对比明显增强。由于背景占据图像的绝大部分区域, 因此, 处理后的图像相对原始图像来说, 图像的整体灰度下降。

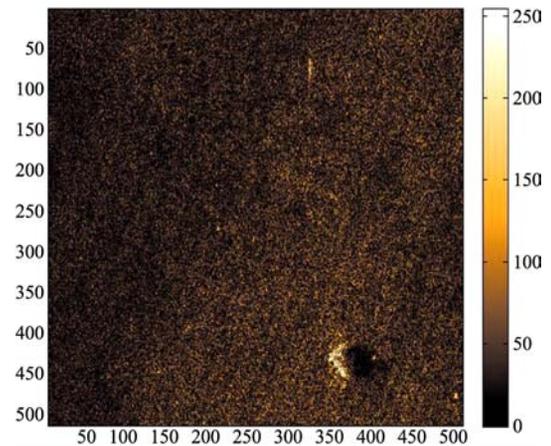


图 2 原始图像 (目标)

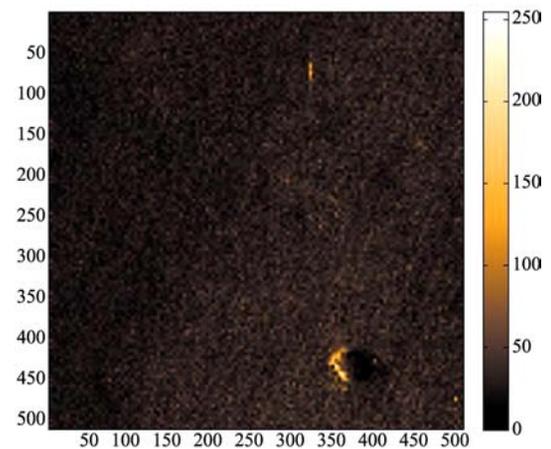


图 3 相干斑抑制后的图像 (目标)

图 4 和图 5 所示的为使用相干斑噪声抑制算法对地貌 SAS 图像进行处理的效果, 其中图 4 为 SAS 对一片地貌区域的成像结果, 可以看到不同地貌区域及其边缘, 边缘受到相干斑噪声严重影响呈现破碎现象; 图 5 为经过相干斑抑制后的地貌图像, 相干斑噪声得到很好的抑制。相干斑噪声处理后的地貌图像的不同地貌区域之间的边缘更加光滑, 而且边缘没有模糊, 边缘破碎情况得到缓解。相干斑噪声抑制算法处理后, 均匀地貌区域的相干斑噪声受

到抑制,使其灰度值降低,而边缘并没有受到显著影响,故边缘和均匀地貌区域的灰度对比度得到增强。边缘在图像中占据的区域虽然没有均匀地貌多,但是依然是较大的部分,因此,处理后的图像相对原始图像来说,图像的整体灰度上升。

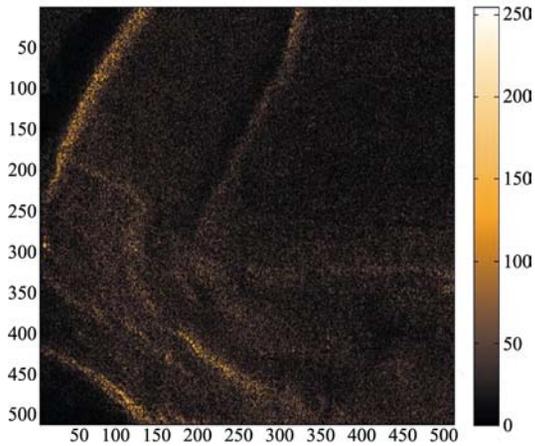


图4 原始图像(地貌)

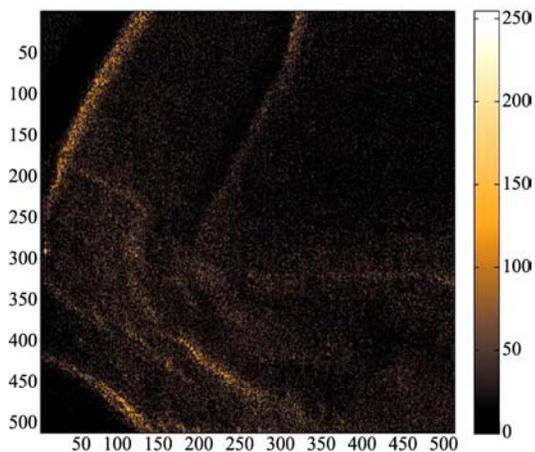


图5 相干斑抑制后的图像(地貌)

5 结论

从相干斑抑制的结果可以看出,基于多分辨率的相干斑噪声抑制算法能够有效降低 SAS 图像中的相干斑噪声。对于含有目标的 SAS 图像,相干斑抑制可以提高目标与背景的灰度对比度,从而有利于后续的图像处理过程(比如目标检测、分类和识别等)。对于地貌 SAS 图像,相干斑抑制能够使不同地貌区域之间的边缘更加明显,从而有利于后续的图像分割以及地貌特性分析等图像处理要求。

参 考 文 献

- [1] 张春华,刘纪元.合成孔径声纳成像及其进展[J].物理,2006,35(5):107-123.
- [2] HAYES P M, GOUGH T P. Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current SAS Status[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009,34(3):207-224.
- [3] LOPES A, NEZRY E, TOUZI R, et al. Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images[C]. Proceedings of IGARSS, 1990:2409-2412.
- [4] LEE J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence. 1980. PAMI-2. P165-168.
- [5] FROST S V, STILES A J, SHANMUGAN S K, et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence. 1982. PAMI-4. P157-166.
- [6] KUAN T D, SAWCHUK A A, STRAND C T, et al. Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence. 1985. PAMI-2. P165-177.
- [7] DONOHO L David. De-noising by Soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory. 1995. 41(3): 613-627.
- [8] VACHON W P. Spectral estimation techniques for multilook SAR image of ocean waves[J]. IEEE Trans. On Geosci. Remote Sensing, 1992, 30 (3) :568-577.