

# 声呐图像滤波方法的比较分析

田晓东

(海军工程大学, 武汉, 430033)

**摘要:** 针对声呐图像的噪声污染主要有散斑噪声等多种噪声综合作用问题, 分析了比较常用的几种滤波方法。并采用性能指标函数定量的评价和分析了各种方法的滤波效果。

**关键词:** 声呐图像; 滤波; 散斑噪声

随着现代电子技术和计算机技术的发展, 以光学和声学为基础的成像系统在军事和民用的诸多领域得到广泛的应用。在对光学或声学图像进行后置处理时, 图像滤波降噪是必不可少的步骤之一。

在图像的滤波降噪过程中, 如何实现有效滤除噪声的同时保持图像细节特征是图像处理领域的研究热点和难点。针对这一问题, 广大研究者提出了大量的图像滤波降噪算法, 它们可分为空域滤波和频域滤波。由于图像的边缘细节和噪声同属于高频成分, 在频域中进行高频滤波的同时不可避免的会造成图像边缘细节的损失, 其中基于小波变换多分辨率分析的图像滤波方法是其典型代表。在空域滤波方法中, 又可分为线性滤波和非线性滤波。线性滤波以均值滤波方法为代表, 其最大的不足就在于对图像细节特征的保留能力较差; 而非线性滤波方法近年来得到了广泛研究和应用, 其中中值滤波技术和形态学滤波技术是其中应用较为广泛的。同线性滤波方法相比, 其特点就在于具有一定的保持图像细节的能力。但这些方法均需依赖模板进行, 自适应能力较差。

由于散斑噪声属于乘性噪声范围, 对于斑点噪声的滤除问题, 一直以来就是图像滤波平滑技术中的难点之一。由于水下声场环境的复杂性和声呐设备成像的非线性, 所采集到的水下声呐图像具有对比度低、成像质量差、目标物与背景之间对比度低等特点。这些特点对后续的声呐图像目标检测与识别分析等工作带来了很大的难度。因此, 声呐图像的预处理就成为近年来广大研究人员普遍关注的问题之一<sup>[1]</sup>。本文旨在通过声呐图像的滤波处理, 对比分析各种滤波方法的效果, 为后续的图像分割、目标识别等工作提供良好的条件, 也为实际应用中声呐图像的滤波处理方法的选择提供一定的指导。

## 1 各种滤波方法的分析比较

图像斑点噪声滤波技术的发展需求和方向是:

在获得所需的降斑效果的同时尽可能地保持良好的空间分辨率, 即在滤除斑点噪声获取平滑图像的同时, 尽量减少图像细节信息特征的损失<sup>[2]</sup>。

目前已有的大量的相干斑噪声抑制技术, 这些技术可分为两大类, 即成像前的多视处理技术和成像后的滤波技术。前者以多视平均的方法, 以空间分辨率降低  $N$  倍为代价获得  $N$  倍的斑点抑制效果。近年来, 许多学者提出了各种改进型的多视处理技术, 在保持适当的空间分辨力的前提下, 对相干斑有较好的抑制效果, 但大多在一定程度上增加了成像系统的复杂度; 后者可分为空间滤波技术和频域滤波技术两个分支, 其中, 以空间滤波技术为基础的斑点抑制算法研究较多, 应用也较为广泛。目前用得较广泛的是 Lee 滤波器及其改进、Kuan 滤波器及其改进、最大后验概率法、中值滤波法、同态滤波、小波分析、非线性扩散滤波等。

### 1.1 中值滤波和均值滤波<sup>[3]</sup>

采用线性滤波方法进行图像的滤波处理, 在许多情况下是很有效的, 但是大多数线性滤波具有低通特性, 在去除噪声的同时也使图像的边缘变模糊, 不能获得较好的复原效果。针对这种情况, 非线性滤波方法就成为更为有效地滤波方法得到广泛的研究和应用, 中值滤波技术是其中最为简单实用的方法之一。因此自 Turkey 提出中值滤波技术以来, 该技术就得到了广泛的研究, 并被应用到语音处理、图像恢复等领域中。

对于二维中值滤波可利用某种形式的二维窗口, 如: 方形、圆形、十字形等。设  $\{x_{ij}, (i, j) \in I^2\}$  表示数字图像中各点的灰度值, 滤波窗口为  $A$  的二维中值滤波可定义为:

$$y_{ij} = \text{Med}_A \{x_{ij}\} = \text{Med} \{x(i+r), (j+s) \mid (r, s) \in A(i, j \in I^2)\}$$

均值滤波技术在保持图像细节方面的能力较中值滤波要差,但其平滑能力较强,同样以其算法原理简单、易于改进实现等优点得到了广泛的应用。

$$y_{ij} = \text{Mean}_{\mathbf{A}} \{x_{ij}\} = \text{Mean} \{x(i+r), (j+s) \mid (r,s) \in \mathbf{A}(i,j \in \mathbf{I}^2)\}$$

本文分别采用大小为  $3 \times 3$  的滤波窗口对声呐图像进行中值滤波和均值滤波处理,待滤波声呐图像如图 1 所示,滤波结果如图 2 所示。

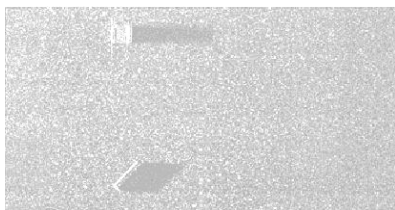
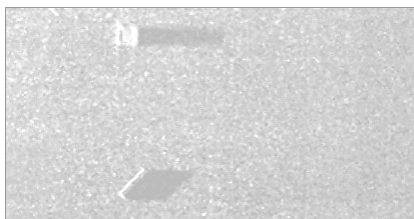
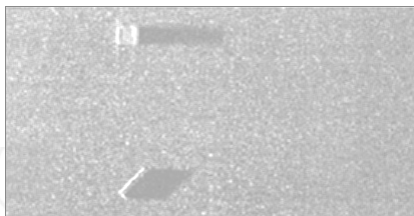


图 1 待滤波声呐图像



(a)中值滤波



(b)均值滤波

图 2 滤波结果

## 1.2 小波去噪<sup>[4]</sup>

小波分析有着多分辨率分析的特点,可在不同的尺度上对图像信号进行分析,被称为信号处理中的“数学显微镜”。从信号学的角度看,小波去噪是一个信号滤波的问题,而且尽管在很大程度上小波去噪可以看成是低通滤波,但是由于在去噪后,还能成功地保留图像特性,所以在这一点上又优于传统的低通滤波器。

目前常用的小波阈值去噪算法主要可分为如下三种:一是硬阈值函数,二是软阈值函数,三是半软半硬阈值函数。总的来说,硬阈值方法可以很好地保留图像边缘等局部特征,但有时会出现振

铃、伪吉布斯效应等视觉失真;软阈值方法处理结果相对于硬阈值方法来说平滑得多,但是软阈值方法会造成边缘模糊等失真现象;而半软半硬阈值方法则通过选择合适的阈值,能够在软阈值方法和硬阈值方法之间达到很好的折中。在每类阈值算法中,又各有许多不同的阈值函数,分别针对不同的应用情况,分别取得了相应的应用效果。比较常用的阈值函数有以下 3 种。

硬阈值法:

$$\hat{y} = T_h(X, \lambda) = \begin{cases} X & |X| \geq \lambda \\ 0 & |X| < \lambda \end{cases}$$

软阈值法:

$$\hat{y} = T_s(X, \lambda) = \begin{cases} \text{sign}(X)(|X| - \lambda) & |X| \geq \lambda \\ 0 & |X| < \lambda \end{cases}$$

半软阈值法:

$$\hat{y} = \begin{cases} 0 & |X| \leq \lambda_1 \\ \text{sign}(X) \frac{\lambda_2(|X| - \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} & \lambda_1 < |X| \leq \lambda_2 \\ X & |X| > \lambda_2 \end{cases}$$

式中,  $\lambda$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为阈值;  $X$  为含噪图像;  $\hat{y}$  为去噪后的平滑图像。本文中采用小波软阈值算法对声呐图像的平滑效果如图 3 所示。



图 3 小波软阈值算法

## 1.3 同态变换滤波<sup>[5]</sup>

同态滤波技术针对噪声模型的性质,利用对数变换将乘性噪声模型转化为加性噪声模型,然后再利用加性噪声的滤除方法进行平滑处理。该方法在一定程度上降低了乘性散斑噪声信号和目标信号的相关程度。

设含噪图像为  $x(i, j) = f(i, j) \times t(i, j)$ , 方程两边取对数, 可得:

$$s(i, j) = \ln x(i, j) = \ln f(i, j) + \ln t(i, j)$$

式中,  $f$  为理想图像;  $t$  为噪声信号。

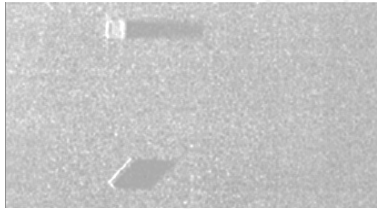
对  $s(i, j)$  利用加性噪声的滤波方法进行处理, 得到滤波图像  $\hat{s}(i, j)$ 。对  $\hat{s}(i, j)$  进行对数反变换即可得到最终的滤波平滑图像  $y(i, j)$ :

$$y(i, j) = \ln^{-1}(s(i, j))$$

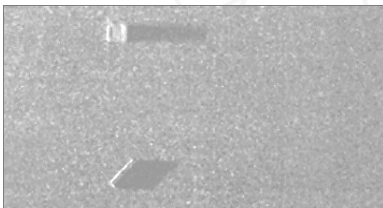
本文中将同态变换方法与小波变换算法、均值滤波以及中值滤波分别进行组合, 得到的滤波结果如图 4 所示。



(a) 同态变换+小波软阈值



(b) 同态变换+均值滤波



(c) 同态变换+中值滤波

图 4 滤波结果

#### 1.4 非线性扩散滤波<sup>[6-7]</sup>

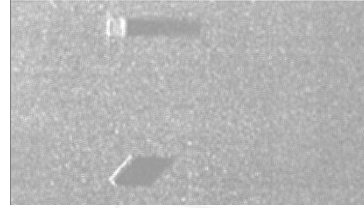
上述算法大多来源于求解初始值为输入图像的非线性偏微分方程。通过设计合适的扩散系数可以控制扩散方程的扩散行为, 使得在平滑图像的同时能够保留图像的重要特征, 但由于上述方法中的扩散系数大多是标量, 是各向同性的, 这对图像细节特征 (尤其是边缘特征) 的保持是不利的<sup>[3-4]</sup>。非线性各向异性扩散方程则有效地利用了图像的边缘的方向性, 自动调节扩散系数, 从而使得在图像的平坦区域, 图像光滑加强, 而在特征边缘区域, 图像光滑减弱。

针对传统的光滑滤波器的主要缺陷, Perona 和 Malik 提出了基于各向异性扩散的图像光滑思想, 从而使图像的质量有了很大的改善。PM 各向异性扩散方程为:

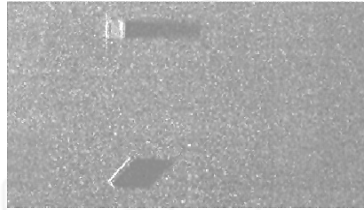
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(c(|\nabla u|) \cdot \nabla u) \quad (1)$$

式中,  $u$  为演化图像,  $\text{div}$  为散度算子,  $\nabla u = [u_x, u_y]$

为图像的梯度,  $|\nabla u| = (u_x^2 + u_y^2)^{1/2}$  为图像的梯度模,  $c(|\nabla u|)$  为扩散系数。滤波结果如图 5(a)所示。



(a) 非线性扩散滤波结果



(b) 维纳滤波结果

图 5 滤波结果

#### 1.5 维纳滤波

维纳滤波器是经典的线性去噪滤波器, 常用于从加性噪声中恢复出未知信号, 在最小均方误差的最优准则下, 维纳滤波是一种最优滤波器。

设有理想图像  $y(i, j)$ , 其退化过程被模拟成为一个作用于  $y(i, j)$  上的模糊函数  $h$ , 它与一个加性噪声  $t(i, j)$  联合作用产生含噪模糊图像  $X(i, j)$ 。

$$X(i, j) = h[y(i, j)] + t(x, y)$$

维纳滤波器  $\phi(i, j)$  能以最小均方差  $e^2$  恢复信号  $y(i, j)$ , 假设估计  $\hat{y}(i, j)$  是  $X(i, j)$  的一个线性函数, 即:

$$\hat{y}(x, y) = \sum_m \sum_n \phi(x-m, y-n) \times X(m, n)$$

平方误差最小化为:

$$e^2 = E \left\{ \sum_x \sum_y [y(x, y) - \hat{y}(x, y)]^2 \right\} \rightarrow \min$$

本文采用维纳滤波器对声呐图像进行了滤波平滑处理, 得到的结果如图 5 (b) 所示。

除上述方法以外, 还有如形态滤波、模糊滤波方法、Lee 滤波器、Kuan 滤波器以及各种组合算法, 其中形态滤波方法主要涉及到形态滤波窗口的选择问题; 模糊滤波方法则要解决好模糊规则的定义问题; 而对于 Lee 滤波器和 Kuan 滤波器等方法, 需要在滤波过程中进行对信号模型和噪声模型的参数进行估计, 计算量有所增加。这些算法在各自的实际应用条件下, 采用具有较强针对性的模板窗口或改进模型, 均取得了较好的滤波效果。限于篇幅本文不再介绍。

## 2 滤波效果性能评价<sup>[8-9]</sup>

### 2.1 性能评价方法

图像滤波方法的效果主要从两个方面进行评价。定性评价主要是依据直观的视觉感受, 比较分析各种算法的处理效果进行评判, 该类方法主观性较强, 使得评判结果不能够很好的满足客观性和公平性; 定量评价方法则通过定义适当的指标函数, 对滤波结果进行定量计算, 利用比较分

$$EPI = \frac{\sum [y(i, j) - y(i+1, j)] + |y(i, j) - y(i, j+1)| + |y(i, j) - y(i+1, j+1)| + |y(i, j) - y(i-1, j+1)|]}{\sum [|x(i, j) - x(i+1, j)| + |x(i, j) - x(i, j+1)| + |x(i, j) - x(i+1, j+1)| + |x(i, j) - x(i-1, j+1)|]}$$

(2) 峰值信噪比 (Peak Signal To Noise Ratio, PSNR):

$$PSNR = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N 255^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y_{ij} - P_{ij})^2} \right]$$

(3) 平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y_{ij} - P_{ij})}{MN}$$

其中,  $y_{ij}$  为滤波后的输出图像中的像元灰度值,  $P_{ij}$  为未加噪声的原始图像中的灰度值,  $M$  为图像的行数,  $N$  为图像的列数。

从定义可以看出, PSNR 越大, MAE 越小, 说明滤波效果越好。

### 2.2 性能评价结果

采用第 2.1 节定义的性能指标定量分析上述各种算法的优劣, 计算结果如表 1 所示。由表 1 中给出的定量评价指标值可以看出, 各种算法的不同性

析指标函数值进行滤波方法的评判, 该类方法可在一定程度上满足客观性的要求, 但存在性能指标函数的定义问题。目前文献中提出的指标函数也存在多种, 本文中选取了几种代表性的函数形式, 并进行了适当的改进, 使之能够更加准确地评价滤波算法的性能。

(1) 边缘保持指数 (Edge Preservation Index, EPI):

$$EPI = \frac{\sum [|y(i, j) - y(i+1, j)| + |y(i, j) - y(i, j+1)|]}{\sum [|x(i, j) - x(i+1, j)| + |x(i, j) - x(i, j+1)|]}$$

其中,  $y(i, j)$  是平滑后的图像的像元灰度值,  $x(i, j)$  是原始图像的像元灰度值。  $y(i, j)$  和  $x(i, j)$  都在边缘区域内。  $i$  是像元的行数,  $j$  是像元的列数。可见, 边缘保持指数的最大值为 1, 最小值为 0。边缘保持指数越高, 边缘保持能力越强。本文中考虑四个方向的情况:

能指标各不相同, 很难有一种方法能够各方面均达到较高的指标值。比如非线性扩散滤波的边缘保持指标较高, 也就是说该算法的边缘保持能力较强, 但其另外两项指标均比较差。而维纳滤波的峰值信噪比和平均绝对误差两项指标较好, 但其边缘保持指数略差。这也说明在选择滤波算法的时候, 应根据实际应用需求是侧重于滤波还是侧重于保持图像细节, 来选择适当的算法。

表 1 各种滤波算法的性能指标

滤波算法	EPI	PSNR	MAE
中值滤波	0.3720	326.0453	199.4355
均值滤波	0.5088	342.6995	189.7435
同态滤波+中值滤波	0.3720	326.0453	199.4355
同态滤波+均值滤波	0.5210	333.0112	195.2637
同态滤波+小波变换	0.1005	196.8788	330.2794
小波变换	0.0710	242.0382	268.6559
非线性扩散滤波	0.7800	187.9367	345.9941
维纳滤波	0.5380	573.3170	113.4189

## 3 结论

通过分析各种滤波方法在声呐图像中的滤波应用, 采用几种不同的性能指标对各种滤波方法进行了比较分析表明, 各种滤波方法互有优劣, 实践中应根据实际的应用需求来选择适当的算法。(下转第 30 页)

**参考文献:**

- [1] AKYILDIZ I F, POMPILI D, MELODIA T. Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE ACM Sigbed Review, 2004, 1(2).
- [2] XIE G, Gibson J. A networking protocol for underwater acoustic networks[D]. CS Department, Naval Postgraduate School, 2000.
- [3] SEAH W K G, TAN H X, LIU Z. multiple-uuv approach for

enhancing connectivity in underwater ad-hoc sensor networks[C]. Proceedings of IEEE OCEANS, 2005.

- [4] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Design and simulation of an underwater acoustic local area network[C]. OPNETWORK'99, Washington, 1999.
- [5] SOZER E M, STOJANOVIC M, PROAKIS J G. Underwater acoustic networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 72-83.

.....

(上接第 25 页)

**参考文献:**

- [1] JOCELYN CHANUSSOT, FREDERIC MAUSSSANG. Scalar Image filters for speckle reduction on synthetic aperture sonar images[J]. IEEE, 2002 (1): 1234-1241
- [2] 单冬梅. SAR 图像降斑与目标检测[D]. 北京: 航空航天大学, 2001.
- [3] 刘丽梅, 孙玉荣. 中值滤波技术发展研究[J]. 云南师范大学学报, 2004, 24(1): 23-27.
- [4] 谢杰成, 张大力. 小波图像去噪综述[J]. 中国图像图形学报. 2002, 7(3):209-217.
- [5] 郝志琦. 同态滤波图像增强在微粒场全息图图像处理中的应用[J]. 光子学报, 1998, 27(8): 764-767.

- [6] 袁泽剑, 郑南宁, 张元林, 等. 一种非线性扩散滤波器的设计方法及其应用 [J]. 计算机学报, 2002, 25(10):1072-1076.
- [7] Guy Gilboa, Yehoshua Y Zeevi. Image enhancement and denoising by complex diffusion processs[J]. IEEE transaction on Pattern analysis and machine intelligence, 2004, 26(8):1020-1036.
- [8] 韩春明, 郭华东, 王长林, 等. 保持边缘的 SAR 图像滤波方法[J]. 高技术通讯, 2003 (7):11-15.
- [9] 张卡, 盛业华. 基于噪声监测的遥感图像模糊滤波遥感信息[J]. 2004(1):11-13.