

超声多普勒信号降噪新方法的研究

张羽, 汪源源, 王威琪, 刘斌
(复旦大学电子工程系, 上海 200433)

摘要: 本文提出了利用离散小波框架结合软阈值的方法对超声多普勒信号进行降噪。通过对模拟多普勒信号和临床信号的降噪实验, 发现利用小波框架的降噪方法可以获得比标准正交小波变换的降噪方法更好的降噪效果。
关键词: 小波变换; 框架; 软阈值; 降噪
中图分类号: O427 **文献标识码:** A

A novel method for Doppler ultrasound signal denoising

ZHANG Yu, WANG Yuan-yuan, WANG Wei-qi, LIU Bin
(Department of Electrical Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A novel method for Doppler ultrasound signal denoising was presented in this paper. In this method, the wavelet frame analysis was used together with the soft-thresholding algorithm. From the simulation studies and clinical cases, it was found that this method has a better performance than that by using the standard orthogonal wavelet transform (OWT).
Key words: wavelet transform; frame; soft-threshold; denoise

1 引言

超声多普勒血流信号中的噪声会影响声谱图最大频率曲线及其特征点的提取, 从而降低声谱参数测量的精度, 所以有必要对信号进行降噪。由于信号是非平稳的, 传统的自适应滤波降噪方法仅考虑均方误差(MSE)最小化, 在降噪的同时引入了额外的噪声分量, 降噪效果不佳^[1]。

本文提出了利用离散小波框架对超声多普勒信号进行降噪的方法。与正交小波变换相比小波框架分析具有时移不变性, 更好地保持了信号的局部特性, 结合软阈值算法可以获得更好的降噪效果。

2 基本原理

小波变换可以用满足标准正交镜像滤波器条件

的低通滤波器 h 表征:

$$H(z)H(z^{-1}) + H(-z)H(-z^{-1}) = 1 \quad (1)$$

$H(z)$ 为滤波器 h 的 Z 变换, 与之相应的高通滤波器为:

$$G(z) = zH(-z^{-1}) \quad (2)$$

利用这两个锥形滤波器可构成滤波器组:

$$\begin{cases} H_{i+1}(z) = H(z^{2^i})H_i(z) \\ G_{i+1}(z) = G(z^{2^i})H_i(z), (i = 0, \dots, I-1) \end{cases} \quad (3)$$

其中初始条件为 $H_0(z) = 1$ 。与之相应的时域上的双尺度方程为:

$$\begin{cases} h_{i+1}(k) = [h]_{2^i} * h_i(k) \\ g_{i+1}(k) = [g]_{2^i} * h_i(k) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $[]_m$ 表示以因子 m 升采样的过程, $*$ 为卷积运算。

利用该滤波器组可构造出 l_2 空间的正交小波基, 相应的小波函数和尺度函数为:

$$\begin{cases} \psi_{i,l}(k) = 2^{i/2} h_i(k - 2^i l) \\ \phi_{i,l}(k) = 2^{i/2} g_i(k - 2^i l) \end{cases} \quad (5)$$

其中 i, l 分别为尺度因子和延迟因子, $2^{i/2}$ 为内积归一化系数。数字信号 x 在 (5) 式定义的一系列

收稿日期: 2000-04-28; 修订日期: 2000-08-28
国家自然科学基金项目(39800137)资助课题
庆祝上海市声学学会成立 20 周年征文
作者简介: 张羽(1978-), 男, 浙江人, 硕士研究生, 研究方向: 超声血流多普勒信号的处理

正交子空间中的映射即正交小波变换(OWT)后的系数:

$$\begin{cases} s_{(i)}(l) = x(k), \quad i, l(k) \quad l_2 \\ = 2^{i/2} x(k), \quad h_i(k-2^i l) \quad l_2 \\ d_{(i)}(l) = x(k), \quad i, l(k) \quad l_2 \\ = 2^{i/2} x(k), \quad g_i(k-2^i l) \quad l_2 \end{cases} \quad (6)$$

利用分解后各尺度的小波系数重构信号的公式为:

$$x(k) = \sum_{l \in Z} s_{(l)}(l) \quad l_1 + \sum_{i=1}^L d_{(i)}(l) \quad i, l \quad (7)$$

直接利用锥形滤波器 h, g 的 Mallat 塔式算法可快速实现离散正交小波变换^[2]。该分解算法包含的加法和乘法次数分别为 $2L(2D-1)(1-2^{-L})$ 和 $4DL(1-2^{-L})$, 其中 L 为信号长度, D 为小波阶数。

然而正交小波变换的系数不具有时移不变性, 为了更好地描述信号的局部特性, 可利用小波框架将信号映射到一族超完备的子空间, 与正交小波变换(OWT)定义不同的是这些子空间不具有正交性:

$$S = \{ \begin{matrix} D_{1,l}^{WF}(k), & D_{2,l}^{WF}(k) \\ D_{l,l}^{WF}(k), & D_{l,l}^{WF}(k) \end{matrix} \}_{l \in Z} \quad (8)$$

其中尺度函数和小波函数定义为:

$$\begin{cases} D_{i,l}^{WF}(k) = h_i(k-l) \\ D_{l,l}^{WF}(k) = g_i(k-l) \end{cases} \quad (9)$$

而小波框架分解(DWF)后各尺度的系数为:

$$\begin{cases} s_i^{DWF}(k) = h_i(k-l), x(k) \quad l_2 \\ d_i^{DWF}(k) = g_i(k-l), x(k) \quad l_2 \end{cases} \quad (10)$$

相应的信号重构公式为:

$$x(k) = \sum_{l \in Z} s_{(l)}(l) h_l(k-l) + \sum_{i=1}^L d_{(i)}(l) g_i(k-l) \quad (11)$$

与 Mallat 快速算法直接利用锥形滤波器 h 和 g 不同的是小波框架分解的快速算法中锥形滤波器内插了适当数目的零值^[3]:

$$\begin{cases} s_{i+1}(k) = [h] \quad 2^{i*} \quad s_i(k) \\ d_{i+1}(k) = [g] \quad 2^{i*} \quad s_i(k) \end{cases} \quad (i = 0, \dots, L) \quad (12)$$

上述小波框架分解算法中包含的加法和乘法次数分别为 $2LI(2D-1)$ 和 $4DLI$ 。可见其计算复杂度与变换尺度成正比。

软阈值降噪算法能保证获得极小 MSE 的同时, 很好地保持信号的平滑性^[1]。若含噪声的数字信号 s 表示为:

$$s(n) = f(n) + e(n) \quad (13)$$

其中 $f(n)$ 为不含噪声的信号, $e(n)$ 为 $N(0, 1)$ 的高

斯白噪声, 为噪声功率。则从信号 $s(n)$ 中恢复 $f(n)$ 的步骤为:

(a) 首先, 选择一种小波并确定变换的最大尺度 L , 对音频多普勒信号进行小波分解, 获得各尺度小波系数 $d_i(l)$ ($i = 1 \dots L$)。

(b) 然后, 对各尺度的小波系数取软阈值 $t = r_1 \sqrt{2 \log(L)}$, 其中 L 为信号 $s(n)$ 的数据长度, 常数 r_1 在正交小波时取 $1^{[1]}$ 。阈值化后的小波系数 $t(d_i(l))$ 为:

$$t(d_i(l)) = \text{sgn}[d_i(l)] [|d_i(l)| - t]_+ \quad (14)$$

(c) 最后, 利用阈值化后的各尺度小波系数重构原始信号。

其中阈值 t 设定与信号中噪声水平有关。所以在进行降噪前需估计信号的噪声水平。高斯白噪声经标准正交小波分解后, 任何尺度下的小波系数均为高斯白噪声, 且具有与原高斯白噪声相同的方差^[2]。根据小波框架分解的公式(10)很容易得:

$$E\{[d_i(l)]^2\} = E\left\{ \left[\sum_j n(j) g_i(j-l) \right] \left[\sum_k n(k) g_i(k-l) \right] \right\} = \sum_j [g_i(j-l)]^2 = 2^{-i-2} \quad (15)$$

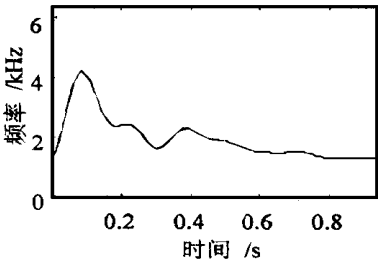
若采用与(5)式一样的归一化系数, 同样小波框架分解各尺度系数具有与原高斯白噪声相同的方差。

超声多普勒信号是带限的, 设定合适的采样率后, 通过对最细尺度的方差估计, 就可获得噪声水平的估计。考虑到最细尺度仍可能遗留少量信号成分的系数以及信号两端的边缘效应, 通过估计最细尺度小波系数的中值绝对值方差估计噪声水平。

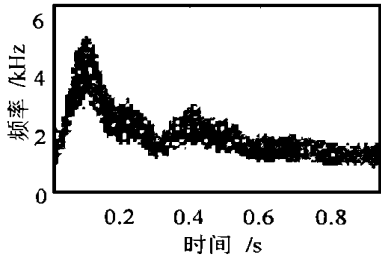
3 实验结果

本文进行了模拟实验, 将该方法与标准正交小波变换的降噪方法对信噪比的(SNR) 增强和降噪后提取的最大频率曲线精度进行比较。多普勒信号模拟采用时变滤波器的方法^[4], 信号的模拟和软阈值降噪算法均在 PC 机上编程实现。

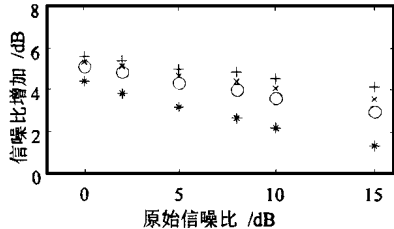
用于信号模拟的平均频率曲线以及模拟信号的声谱图如图 1 所示, 其中模拟信号的带宽取平均频率的 10%, 信号功率取为与信号带宽成正比。采样率为 25.6 kHz。为了给出不同信噪比的信号, 通过对模拟多普勒信号叠加高斯白噪声产生信噪比分别为 0 dB、2 dB、5 dB、8 dB、10 dB 和 15 dB 的信号。对获得信号分别用正交小波变换与小波框架分解进行降噪实验, 其中小波均为近似对称小波, 小波框架分解(DWF)分别采用 3 阶、4 阶和 6 阶小波, 而正交小波变换(OWT)则采用 8 阶小波。多普勒信号降噪后信噪比增加情况如图 2 所示。



(a) 用于信号模拟的平均频率曲线



(b) 模拟信号的声谱图
图 1 模拟多普勒信号



* : 8 阶小波 OWT; o : 3 阶小波 DWF;
: 4 阶小波 DWF; + : 6 阶小波 DWF
2 多普勒信号降噪后信噪比增加情况

由图可知,利用小波框架降噪后信号的信噪比获得增强,而且利用低阶的小波即可获得比高阶小波的正交小波变换降噪方法更大的信噪比增加。

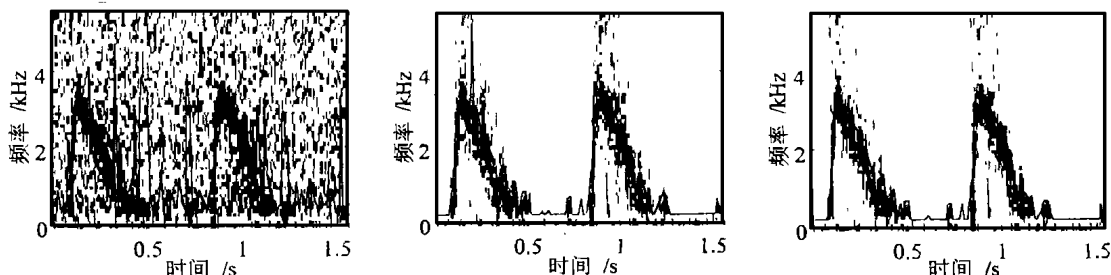
考虑到声谱参数均取自最大频率曲线,所以降噪后多普勒信号声谱图上获得的最大频率曲线的准确程度也可作为降噪效果的一种衡量标准。实验选取 10 ms 的海宁窗对信号进行短时傅里叶变换,获取信号的声谱图,最大频率曲线的提取采用常用的百分比法。由于模拟多普勒信号为高斯型,所以信号的最大频率曲线可以设为 $f_{\max}(t) = f_m(t) + 3f_f(t)$, 其中 $f_m(t)$ 为平均频率曲线,而 $f_f(t)$ 为谱宽^[5]。对不同信噪比和带宽的多普勒信号进行降噪实验,且对每组信噪比和带宽情况进行了 10 次独立实验,获得的降噪前后多普勒信号的最大频率曲线均方误差情况如表 1 所示(其中 为百分比系数,和 分别为 10 次独立实验获得的均方误差的均值和方差)。实验中正交小波变换采用 8 阶小波,小波框架采用 4 阶小波。

由表 1 显见,小波框架降噪方法可以获得比正交小波降噪方法更小的信号最大频率曲线均方误差均值和方差。

对小儿肺动脉的实际多普勒信号的降噪实验,获得了与模拟实验相似的结果。其中一例小儿肺动脉多普勒信号降噪前后的声谱图如图 3 所示,图中叠加的实线为最大频率曲线。小波框架(4 阶小波)和正交小波变换(8 阶小波)降噪后的多普勒信号声谱图最大频率曲线的提取采用相同的百分比系数 = 0.1。显然小波框架方法具有更好的降噪效果。

表 1 多普勒信号降噪前后最大频率曲线的均方误差情况

原始信号			降噪前的信号		降噪后的信号			
					OWT 法		DWF 法	
$f(t)$ (Hz)	$()$ (Hz)		SNR (dB)	$()$ (Hz)	$()$ (Hz)		$()$ (Hz)	
$0.1f_m(t)$	143(10)	0.10	2	1252(194)	0.45	389(56)	0.14	287(31)
			5	1549(210)	0.30	308(30)	0.09	243(25)
			10	1915(260)	0.13	256(26)	0.05	211(28)
$0.2f_m(t)$	265(13)	0.10	2	1233(112)	0.42	618(30)	0.13	580(13)
			5	1205(118)	0.30	539(19)	0.09	490(22)
			10	1441(230)	0.12	374(14)	0.04	324(13)
$0.3f_m(t)$	419(14)	0.10	2	1637(94)	0.35	778(61)	0.07	700(48)
			5	1528(86)	0.25	654(33)	0.05	509(21)
			10	1211(105)	0.12	534(27)	0.03	471(18)



(a) 原始信号的声谱图 (b) 正交小波变换降噪后信号的声谱图 (c) 小波框架降噪后信号的声谱图

图3 小儿肺动脉多普勒信号降噪前后的声谱图

4 讨论与结论

比较正交小波变换和小波框架分解的计算量可知,正交小波变换的计算量趋向一个常数,而小波框架分解的计算量与分析的尺度成正比。显然在采用同样的小波系数和分析尺度的情况下,小波框架与正交小波变换的计算量之比为 $2/(2^l - 1)$ 。从实验可知,采用低阶小波的小波框架比高阶小波的正交小波变换可以获得更好的降噪效果,且降噪算法的计算量同样也与小波的阶数成正比,所以在选择适当的分析最大尺度和小波阶数后,利用小波框架结合软阈值的降噪方法可以在计算量不是很大的前提下获得很好的降噪效果。

参考文献:

- [1] D. L. Donoho. Denoising via soft-thresholding [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [2] S. G. Mallat. Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 1989, 37(12): 2091-2110.
- [3] Michael Unser. Texture classification and segmentation using wavelet frames [J]. IEEE Trans. Image Processing, 1995, 4(11): 1549-1560.
- [4] Y. Y. Wang, P. J. Fish. Arterial Doppler signal simulation by time domain processing [J]. Ultrasound in Med. & Biol., 1996, 22(3): 71-81.
- [5] 汪源源, 陈斯中, 吴晓峰, 王威琪. 脉冲多普勒信号最大最小频率的估计 [J]. 复旦学报, 1998, 37(6): 782-788.

第八届全国建筑物理学术会议在天津召开

2000年10月13-15日,第八届全国建筑物理学术会议在天津市召开,会议由天津大学建筑学院主办。共有声学、光学、热学及建筑物理教育经验4方面议题的论文120余篇。来自全国高等院校、设计和研究单位以及产业界人士130余人出席了会议。

在开幕式大会上,中国建筑学会建筑物理学会(前身为建筑物理专业委员会)会长王季卿教授作了第八届专业委员会工作报告,介绍了5年来各专业学术交流会议、地区性学术活动以及国际学术交往等情况与经验。近5年来国内在建筑物理方面出版的教材和专著甚多,说明事业之发展与兴旺。大会还有声学、光学和热学方面的3个专题报告。同济大学王季卿教授的大会报告是改善人居环境声品质的任务与对策。另外,清华大学建筑学院院长秦佑国教授主持的教学论坛,连续了两个单元,发言踊跃,气氛热烈,可见大家对建筑物理课程之教学改革非常关心和殷切期望。论文宣读分3个小组同时举行,共进行了3个单元。

会议期间进行了九届理事会改选,肖辉乾研究员当选九届分会理事长。下届年会将于南京或广州举行。

与会代表对肖辉乾、王淑芝两位在近20年间缩印出版的《建筑物理学术委员会简讯》给予很高评价,并希望不久出版电子网版,加速信息交换。

(本刊讯)