

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.07.001

基于改进小波阈值函数的雷达信号去噪

赵松, 江汉红, 张朝亮, 柯泽贤
(海军工程大学电气与信息工程学院, 武汉 430033)

摘要: 为去除雷达信号混杂的高斯白噪声, 对小波阈值去噪法进行研究。通过分析软硬阈值函数和几种改进阈值函数的特点, 提出了改进连续阈值函数和折衷阈值函数, 并选取优化阈值进行去噪仿真。仿真结果表明: 新阈值函数连续性好、便于调节, 克服了硬阈值法不连续和软阈值法具有偏差的缺点。方法 2 效果最佳, 有效提高了输出信噪比, 对于雷达信号处理具有一定的应用价值。

关键词: 小波变换; 阈值函数; 雷达信号

中图分类号: TN957.54 **文献标志码:** A

Radar Signal Denoising Based on Improved Wavelet Thresholding Functions

Zhao Song, Jiang Hanhong, Zhang Chaoliang, Ke Zexian
(College of Electrical & Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to discard the Gaussian white noise mixed in radar signal, researched conventional wavelet threshold denoising method. By analysing the character of soft and hard thresholding functions and some improved thresholding functions, introduces two optimized functions: improved continuous thresholding function and eclectic thresholding function. It also makes a simulation with optimized threshold. The simulation results show that the new thresholding functions above are continuous and easy to adjust, which overcome the shortcomings of the incontinuous hard thresholding function and the soft thresholding function with unvarying warp. The second method performs better, which enhances the signal-to-noise of output signal effectually. The work has an important applied value for radar signal processing.

Keywords: wavelet transform; thresholding function; radar signal

0 引言

船载雷达工作环境复杂, 受多种因素影响, 雷达回波中除回波信号以外夹杂着多种噪声和杂波干扰, 具有非平稳的特性。相比于传统的傅里叶变换, 小波变换具有多分辨率分析特性和良好的时频局部化分析能力, 能有效提取非平稳信号中的瞬态、稳态信息和信号波形特征^[1], 是一种重要的雷达信号去噪手段。

小波阈值法^[2-4]是常用的信号去噪方法, 其中阈值和阈值函数的选取是阈值法的关键步骤。由于经典的软硬阈值函数还存在不同程度的缺点, 笔者通过设计系数函数对软硬折衷阈值函数进行了改进。仿真实验表明: 新阈值函数可克服软硬阈值的缺陷, 优于软硬折衷阈值。选取根据尺度调整的统一阈值并进行仿真实验, 结果表明, 新阈值函数去噪声效果明显提高。

1 噪声特点与小波阈值法原理

1.1 雷达噪声特点

雷达信号的噪声主要有系统噪声、环境杂波、人为干扰等。环境杂波数学模型复杂, 主要通过

消等方式进行抑制^[5], 系统噪声主要是传感器、电路产生的热噪声, 具有时间上连续, 振幅和相位随机的特点, 可近似为白噪声。此外, 雷达工作的稳定性也对回波信号的频谱具有重要影响。

对于离散信号来说, 其高频部分所影响的是小波分解的第一层次细节, 其低频部分所影响的是小波分解的最深层和低频层, 对于白噪声, 高频系数的幅值随着分解层次的增加而迅速衰减, 且其方差也有同样的变化趋势^[6]。

1.2 小波阈值法原理

设雷达接收的回波信号

$$x(t) = s(t) + e(t) \quad (1)$$

其中: $s(t)$ 为目标回波信号, 通常频率较低, 常含有奇异点; $e(t)$ 为噪声信号(按高斯白噪声处理)。

信号经小波变换后, 噪声在小波系数各个尺度上都有影响, 目标信号特征则分布在有限的几个系数上, 通过对小波系数进行适当阈值化处理, 可分离有用信号和噪声, 对处理后的系数进行小波反变换重构信号, 最后可达到信号去噪的目的。小波阈值去噪法步骤如下:

1) 对含噪信号进行离散正交小波变换, 选取适

收稿日期: 2011-03-28; 修回日期: 2011-04-29

基金项目: 湖北省自然科学基金(2010CDB01503)

作者简介: 赵松(1986—), 男, 河北人, 硕士, 从事雷达信号处理与目标检测研究。

当的小波基和分解层数 j ，对信号做 j 层小波分解，获得小波系数 $d_{j,k}$ 。

2) 选取去噪阈值 λ ，常见的估计阈值主要有统一阈值、 3σ 阈值、BayesShrink 阈值、理想阈值等。

3) 对分解所得小波系数 $d_{j,k}$ 进行阈值处理，得出估计小波系数 $\hat{d}_{j,k}$ ，阈值处理方法主要有 3 种：

① 硬阈值法：

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} d_{j,k} & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

② 软阈值法：

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k})(|d_{j,k}| - \lambda) & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

③ 软硬折衷法：

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k})(|d_{j,k}| - \alpha\lambda) & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

其中： α 为调节因子， $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

4) 进行小波逆变换，将阈值处理后的小波系数按重构公式进行重构，得到去噪后的信号估计值。

2 阈值算法改进

软硬阈值法在广泛应用的同时也存在自身的缺陷。硬阈值函数中， $\hat{d}_{j,k}$ 在 λ 和 $-\lambda$ 处不连续，重构信号会产生一定振荡；软阈值函数连续性好，但当小波系数较大时，在 $\hat{d}_{j,k}$ 和 $d_{j,k}$ 之间存在固定偏差，造成了高频信息损失，影响了重构信号的精度。软硬折衷阈值由于不连续性在重构信号时会引起振荡，因此在实际应用中具有局限性。为此，文献[7-9]中提出改进阈值函数，其中文献[9]阈值函数效果较好，表达式如下：

函数 1：

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k}) \left(|d_{j,k}| - \frac{\beta\lambda}{\beta + |d_{j,k}| - \lambda} \right) & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中： β 为调节因子，取正数。

笔者利用指数函数特点，对去噪阈值函数做出 2 种改进，优化函数如下：

1) 改进函数 1：

$$\hat{d}_{j,k} = d_{j,k} + k\lambda \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 + \exp(-m d_{j,k} / \lambda)} \right) \quad (6)$$

其中 k, m 为调节因子。

相比于经典软硬阈值函数，方法 1 函数曲线光

滑连续，同时具有高阶可导性。当 $d_{j,k} \rightarrow +\infty$ 时，函数以 $\hat{d}_{j,k} = d_{j,k} - \frac{k}{2}\lambda$ 为渐近线；当 $d_{j,k} \rightarrow -\infty$ 时，函数以 $\hat{d}_{j,k} = d_{j,k} + \frac{k}{2}\lambda$ 为渐近线；随着 $d_{j,k}$ 的增加 $\hat{d}_{j,k}$ 逐渐逼近； $k \rightarrow 2$ 时，渐近线趋近软阈值函数；伴随 k 逐渐减小，渐近线趋近软硬折衷阈值函数，实际去噪中可根据具体信号特征选定适合的调节因子，从而达到最优效果。

2) 改进函数 2：

利用指数函数对软硬折衷系数做出调整：

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k})(|d_{j,k}| - \alpha^{|d_{j,k}| - \lambda}) & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中： α 为调节因子， $0 < \alpha \leq 1$ 。

改进函数曲线连续，函数以 $\pm\lambda$ 为零点，当 $\alpha=1$ 时，表达式为软阈值函数，当 $0 < \alpha < 1$ 时，函数随 $d_{j,k}$ 的增加逐渐逼近 $\hat{d}_{j,k} = d_{j,k}$ ，曲线趋近速度与参数 α 值成反比关系。因此可通过调节 α 来获得实用的阈值函数。

2 种函数曲线与软、硬阈值函数对比如图 1。由图 1 可知，2 种函数均具有整体连续的优点，同时曲线可根据参数灵活调节，计算简便。

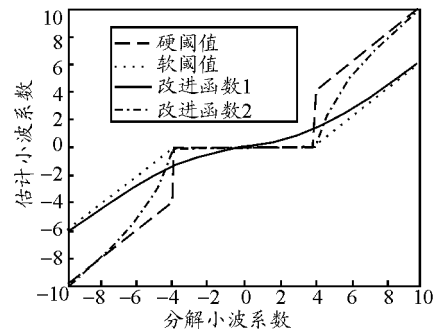


图 1 4 种函数对比图

在阈值选取方面，Donoho 提出的统一阈值 $\lambda = \sigma\sqrt{2\log(N)}$ 从渐进意义上证明了其最优性，但实际应用中该阈值存在“过扼杀”小波系数现象。改进型阈值形式，在不同尺度上选取不同阈值，令尺度 j 上阈值 $\lambda_j = \sigma\sqrt{2\log(N)} / \log(j+1)^{[10]}$ ，从而克服了通用阈值的缺点。

3 仿真分析

实验借助 Matlab 环境，采用雷达常用的 Doppler 信号进行仿真，含噪信号信噪比 (SNR) 为 8.493 3。采用 db4 小波进行去噪处理，进行 5 层分解。实验中分别采用软硬阈值函数、软硬折衷阈值函数、函

数 1 和 2 种改进方法对信号去噪处理(其中 $\alpha=0.5$, $\beta=1.5$, $k=2$, $m=2.2$), 去噪结果如图 2~图 5。

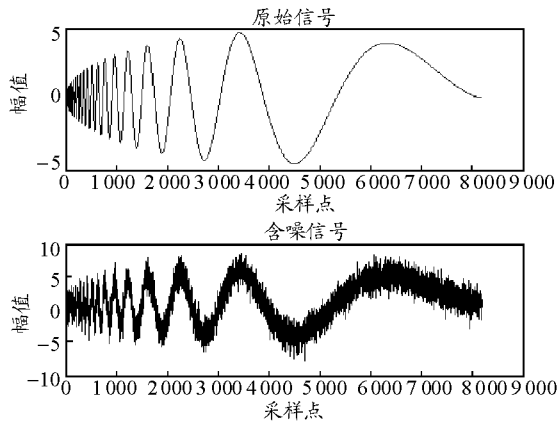


图 2 原始信号与含噪信号

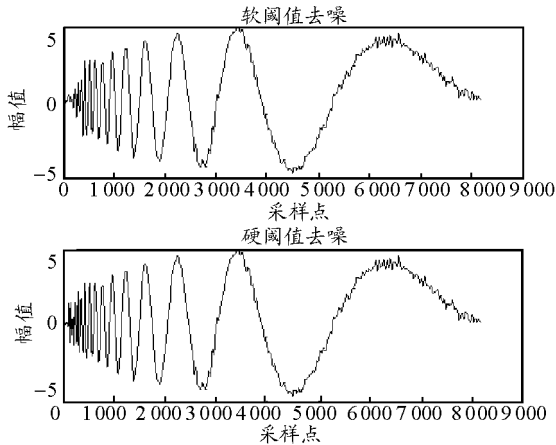


图 3 软、硬阈值去噪效果

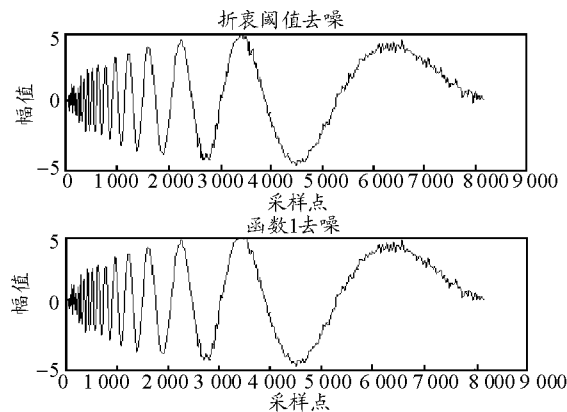


图 4 软硬折衷阈值与函数 1 去噪效果

为验证去噪效果, 笔者以输出信噪比(SNR)和均方根误差(RMSE)为判定标准, 几种阈值函数去噪结果如表 1。

由图 2~图 5 中波形与去噪后的数据可知, 改进方法 1 在去噪效果上优于软阈值和硬阈值函数, 但与其他 3 种方法相比效果不明显, 原因可能是因为 $(-\lambda, \lambda)$ 区间内对噪声系数存在一定程度的保留。方法 2 去噪后的 SNR 和 RMSE 优于其他 5 种

方法, 具有较好的去噪效果。

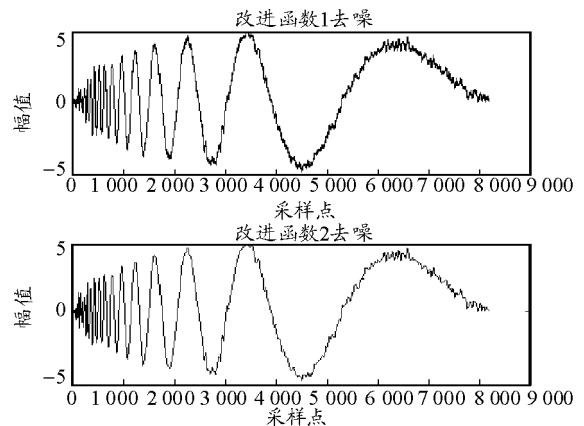


图 5 2 种改进函数去噪效果

表 1 不同方法去噪后的 SNR 和 RMSE

阈值函数	SNR/dB	RMSE
软阈值	20.876 9	0.242 5
硬阈值	21.544 1	0.224 7
折衷阈值	21.981 8	0.213 5
函数 1	22.226 5	0.207 6
方法 1	21.606 3	0.222 9
方法 2	22.236 3	0.207 4

4 结论

仿真结果表明: 2 种改进去噪算法能有效去除 Doppler 信号中的高斯噪声, 相比经典去噪算法和文献引用算法, 输出信噪比有所提高。方法 1 函数曲线光滑, 具有可导性和可调性, 但去噪效果不理想, 去噪函数具有进一步完善空间。方法 2 计算简便、可调性好, 在工程实践中具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 黄小毛, 张永刚. 小波变换在雷达回波信号消噪处理中的应用[J]. 现代雷达, 2001(5): 34-37.
- [2] Donoho D L. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. Journal of American Statistical Association, 1995, 12(90): 1200-1224.
- [3] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal Spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 422-455.
- [4] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans. on IT, 1995, 41(3): 612-627.
- [5] 吴顺君, 梅晓春, 等. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [6] 张德丰. 小波分析与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [7] 张维强, 宋国乡. 基于一种新的阈值函数的小波域信号去噪[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(2): 296-299.
- [8] 曾守桢, 朱建华. 一种改进的小波阈值去噪方法[J]. 海洋技术, 2008, 27(1): 37-39.
- [9] 薛伟, 关福宏, 等. 基于一种新的小波阈值函数的雷达信号去噪[J]. 计算机仿真, 2008, 25(8): 319-322.
- [10] 赵瑞珍, 宋国乡, 等. 小波系数阈值估计的改进模型[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(4): 625-628.