

doi: 10.3788/gzxb20164507.0707001

# 基于提升小波改进型阈值函数的雷达生命信号去噪技术

杨秀芳<sup>1</sup>, 王若嘉<sup>2</sup>, 王佩佩<sup>1</sup>, 杨宇祥<sup>1</sup>, 邵伟<sup>1</sup>, 王建<sup>1</sup>

(1 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2 佐治亚理工学院, 亚特兰大 30332, 美国)

**摘 要:**通过引入生物电理论, 完善了连续波雷达生命信号的理论模型; 采用提升小波变换和改进型阈值函数去噪技术对强噪声干扰的雷达生命信号进行去噪处理, 将 166.67 mm 波长雷达生命信号的信噪比由 2.046 8 优化到 6.696 9, 均方误差由 1.763 9 优化到 0.909 9; 8.57 mm 波长雷达生命信号的信噪比由 0.942 6 优化到 2.541 8, 均方误差由 1.980 6 优化到 1.286 0。结果表明: 本文建立的连续波雷达生命信号理论模型与实际情况相符, 采用的去噪方案适用于雷达生命检测系统不同波长的雷达波。

**关键词:**信号处理; 理论模型; 雷达生命信号; 小波变换; 去噪; 阈值函数; 信噪比; 均方误差

中图分类号: TP312

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0707001-6

## De-noising Technology of Radar Life Signal Based on Lifting Wavelet Transform and Improved Soft Threshold Function

YANG Xiu-fang<sup>1</sup>, WANG Ruo-jia<sup>2</sup>, WANG Pei-pei<sup>1</sup>, YANG Yu-xiang<sup>1</sup>, SHAO Wei<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>

(1 Xi'an University of Technology, Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering,

Xi'an 710048, China)

(2 Georgia Institute of Technology, Atlanta 30332, USA)

**Abstract:** Theoretical model of the continuous wave radar life signal was improved by introducing the biological electric theory. Using the lifting wavelet transform and the improved threshold function denoising technique, the radar life signal of the strong noise was processed. The signal to noise ratio and the mean square error of the radar life signal of the 166.67 mm wavelength are optimized from 2.046 8 and 6.6969 to 1.763 9 and 0.9099, and 8.57 mm wavelength are optimized from 0.942 6 and 1.9806 to 2.541 8 and 1.286 0. The result indicates that the theoretical model of the continuous wave radar life signal is consistent with the actual situation and the denoising scheme can be applied to radar wave at different wavelengths.

**Key words:** Signal processing; Theoretical model; Radar life signal; Wavelet transform; De-noising; Threshold function; Signal to noise ratio; Mean square error

**OCIS Codes:** 070.2615; 070.4790; 120.1880; 280.5600

## 0 引言

信号去噪是信号处理领域的主要研究内容之一。连续波雷达生命探测技术以单频连续雷达波拾取生命信号——呼吸和心跳, 是一种非接触测量技术。由于多波段雷达波具有很强的穿透非金属物的能力, 因此被

广泛应用于医疗救护、反恐、救灾、巷战等场合。雷达生命信号是一种微弱信号, 常常淹没在非平稳噪声中, 怎样从强噪声中提取生命信号是这一技术走向实用的重要环节<sup>[1]</sup>。在传统的去噪方法中, 如中值滤波和 Wiener 滤波等, 无法刻画信号的非平稳特性, 并且使得信号变换后的熵增高。随着小波变换理论的完善, 近年来利用

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61273271)资助

第一作者: 杨秀芳(1965—), 女, 副教授, 硕导, 主要研究方向光电检测与信号处理技术。Email: yxf5078@xaut.edu.cn

收稿日期: 2015-11-11; 录用日期: 2016-02-03

<http://www.photon.ac.cn>

小波变换解决非平稳信号的去噪技术引起了国内外研究者的广泛兴趣<sup>[2]</sup>.

文献[2]利用 dB3 小波变换分离了雷达生命信号中的呼吸和心跳信号;文献[3]对心电信号进行改进阈值算法处理,去除掉心电信号中基线漂移、工频干扰和肌电干扰信号的影响;文献[4]通过小波变换对小波低频系数置零的方案实现了对光谱信号的基线校正和谱线去噪;文献[5]用小波变换方法对光纤温度传感系统的测量信号实现了有效降噪处理;文献[6]分别用小波变换和提升小波变换对受到较大噪声污染的 X 射线脉冲星信号进行降噪处理,证明了提升小波的降噪效果优于传统的小波变换;文献[7]对 sym8 小波实施提升方案,再用软阈值函数和硬阈值函数对强噪声干扰下的雷达生命信号进行了去噪处理;文献[8]用小波变换方法对筒支梁振动信号进行去噪处理;文献[9]对油库阀门内漏声发射信号,采用 Db5 小波变换处理,有效去除掉检测信号中电磁信号的干扰.由这些文献可以看出,由于小波变换针对非平稳噪声处理方面的有效性,均受到不同研究方向学者的热捧.

文献[10]用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition)算法对非平稳噪声处理,得到很好的效果.但 EMD 方法对去噪信号有较严格的要求,如要求被处理信号极值点个数与过零点个数相同或最多相差一个,且要信号的上下包络线关于时间轴局部对称,这样增加了信号前期处理的工作量.

与传统小波变换相比,提升小波变换特点有:1)运算速度快;2)不需要额外的内存;3)可实现整数小波变换.本文采用提升小波变换,结合不同阈值函数,对雷达生命信号进行去噪处理,以去噪信号的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)和均方误差(Mean Square Error, MSE)为评价指标,选取最佳阈值函数,实现对雷达生命信号最佳去噪处理.

## 1 雷达生命信号的理论模型建立

雷达生命信号理论模型的建立,包括雷达回波信号模型的建立和噪声信号模型的建立.

### 1.1 多普勒雷达回波信号理论模型

用雷达探测人体生命信息时,雷达发射的电子波照射到人体上,以多普勒效应的理论,人体的生命特征信息——呼吸和心跳会对雷达波的相位进行调制.

设雷达发射的电子波为连续单频信号,其表达式为

$$s_r(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) \quad (1)$$

设目标与雷达的距离为

$$r(t) = r_0 + x(t) \quad (2)$$

$$s_r(t) = \mu A_0 \cos[(2\pi f_0 t + \theta_0 - 2k \times r(t))] = \mu A_0 \cos[(2\pi f_0 t + \theta_0 - 2k \times x(t))] \quad (3)$$

式中, $\mu$ 为雷达穿过介质的衰减因子; $k = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 为雷达发射电磁波的波长值; $\varphi_0 = \theta_0 - (2\pi/\lambda)r_0$ ,目标位置确定后,它为一个常量.设呼吸和心跳引起的雷达与目标的距离起伏分别为

$$x_1(t) = \Delta_1 \sin(2\pi f_1 t) \quad (4)$$

$$x_2(t) = \Delta_2 \sin(2\pi f_2 t + \Psi_0) \quad (5)$$

式中, $\Delta_1, \Delta_2$ 分别表示呼吸和心跳的幅度; $f_1, f_2$ 分别表示呼吸和心跳的频率.则雷达回波信号为

$$s_r(t) = \mu A_0 \cos[(2\pi f_0 t + \varphi_0 - 2 \times x_1(t)] + \mu A_0 \cos[(2\pi f_0 t + \varphi_0 - 2k \times x_2(t))] \quad (6)$$

### 1.2 多普勒雷达生命信号的理论模型

回波信号  $s_r(t)$  与本振信号  $s_c(t)$  在混频器中混频  $s(t) = s_r(t) \times s_c(t)$ . 经过低通滤波器和放大后,得到雷达生命信号为

$$s_r(t) = \frac{\mu A_0^2}{2} \times \cos[2k \times x_1(t) + \varphi_1] + \frac{\mu A_0^2}{2} \times \cos[2k \times x_2(t) + \varphi_2] \quad (7)$$

式中, $\varphi_1, \varphi_2$ 是不随时间变化的恒定相位.

图 1 是雷达生命信号模型式(7)的仿真图.选用频率为 1.8 GHz 或 35 GHz 的雷达波,对应波长分别为 166.67 mm 或 8.57 mm,这两种波长是目前国内外在研究生物雷达中波长较长和波长较短的两种波长之一(研究这两种波长的特性,基本可以代表目前所有的连续单频的生物雷达波);选用呼吸和心跳频率分别为 0.3 Hz(呼吸每分钟 18 次)和 1.2 Hz(心跳每分钟 72 次),幅值为 2 mm 和 5 mm.

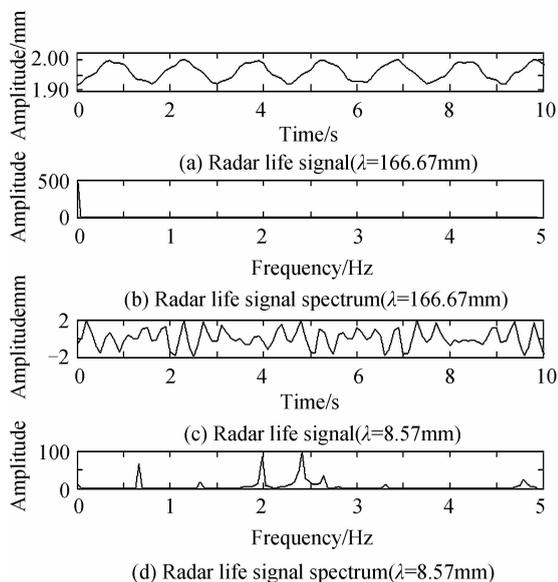


图 1 多普勒雷达生命信号的时域和频域

Fig. 1 Time-domain and Frequency-domain of the doppler effect radar life signal

从图 1(b)、(d)可以明显地看到,雷达生命信号的频谱不含生命信号频谱——呼吸和心跳的频率,而实际的情况是,使用这个波段的雷达波是可以探测到生

命信息的,所以多普勒雷达模型与实际的情况存在差异。

### 1.3 生物电场效应的雷达生命信号模型

以电磁场的理论分析,人体的生物组织是一种变介电系数的介质,其携带的生物电场表示为

$$\begin{cases} \epsilon(t) = \epsilon_0 \epsilon_r x(t) \\ \sigma(t) = \sigma_0 x(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\epsilon_0$  是真空的介电常量, $\epsilon_r$  是人体的相对介电常量, $\sigma_0$  是人体的电导率, $x(t)$  是呼吸或心跳引起的体表位置的变化值。

电磁场的麦克斯韦方程和物质方程为

$$\nabla \times \mathbf{H} = j2\pi f \epsilon(t) \mathbf{E} + \sigma(t) \mathbf{E} = j2\pi f \epsilon_c x(t) \mathbf{E} \quad (9)$$

式中, $\epsilon_c = \epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma_0}{\omega}$ ;  $f$  为呼吸和心跳引起的体表位置变化的频率; $\omega = 2\pi f$ 。

对式(9)应用等效极化电流概念和积分方程法求解<sup>[10]</sup>,可以得到人体散射电场为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_s &= \delta \omega^2 \mu_0 \epsilon_c x(t) \iint \mathbf{E} \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS + \\ &\epsilon_c x(t) / \epsilon_0 \iint (\mathbf{n} \mathbf{E}) \nabla \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\delta$  为人体表层皮肤的厚度, $G$  为自由空间的格林函数, $\mathbf{n}$  为人体表面单位法线矢量, $E$  包括了入射场和散射场, $S$  为人体表面。在微波范围内,入射场远远大于散射场  $E_s$ 。

由式(10)可见,当外加电磁场被人体散射后,散射场具有体表变化信号  $x(t)$  与入射场相乘的形式,这意味着散射场除了多普勒频移外,还具有调幅波的性质,所以雷达生命信号的表达式应为

$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{\mu A_0^2}{2} x_1(t) \times \cos [2k \times x_1(t) + \varphi_1] + \\ &\frac{\mu A_0^2}{2} x_2(t) \times \cos [2k \times x_2(t) + \varphi_2] \end{aligned} \quad (11)$$

图2是生物电效应雷达生命信号的时域和频域图。从图2(b)、(d)可以看到,雷达生命信号的频谱中含有生命信号频谱——呼吸频率0.3 Hz和心跳的频率1.2 Hz,这与实际的情况相符合。

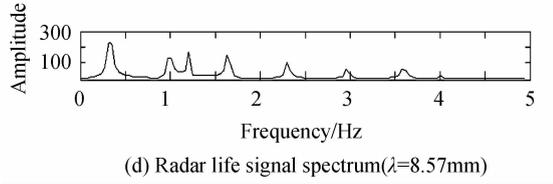
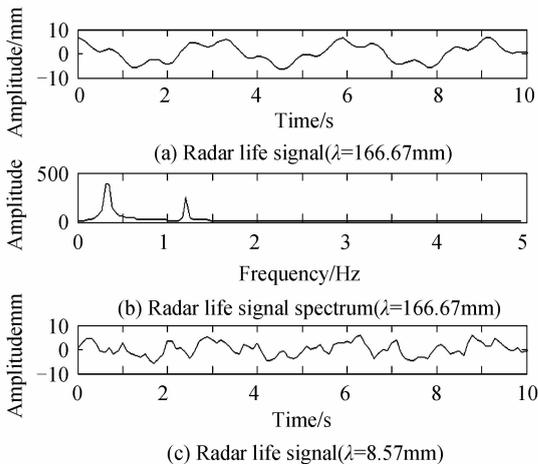


图2 生物电效应雷达生命信号的时域和频域  
Fig. 2 Time-domain and Frequency-domain of bioelectricity effect radar life signal

### 1.4 杂波信号的理论模型

实际上,在雷达回波中包含有很强的杂波,这些杂波分为固定物体杂波和运动物体杂波两类。固定物(如建筑物)反射杂波可以近似为高斯分布的有色噪声,用  $c(t)$  表示,其功率谱密度函数呈高斯状,可表示为

$$C(f) = \omega_0 \exp \left( -\frac{f^2}{2\sigma^2} \right).$$

把服从高斯分布、功率谱为高斯状的杂波看成是一个方差为  $N_0^2$  的高斯白噪声,通过一个线性滤波器后输出。设滤波器的幅频特性为

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{\xi} \sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{f^2}{4\omega\xi^2} + j\varphi \right).$$

式中, $\xi$  为滤波因子,相对于杂波的高斯形功率谱的展宽程度。则杂波的功率谱密度函数可写为

$$C(f) = N_0^2 |H(f)|^2 = \frac{N_0^2}{\xi \sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{f^2}{2\xi^2} \right).$$

可得杂波的功率为

$$P_c = \int_{-\infty}^{+\infty} C(f) df = \frac{N_0^2}{\xi \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left( -\frac{f^2}{2\xi^2} \right) df = N_0^2.$$

考虑到杂波过程,雷达生命信号模型为

$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{\mu A_0^2}{2} x_1(t) \times \cos [2k \times x_1(t) + \varphi_1] + \\ &\frac{\mu A_0^2}{2} x_2(t) \times \cos [2k \times x_2(t) + \varphi_2] + \frac{\mu A_0^2}{2} c(t) \times \\ &\cos [2k \times c(t)] \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $c(t)$  为杂波过程

## 2 提升小波变换阈值去噪原理

小波变换去噪是解决非平稳特性噪声的有效方法。在传统小波变换中,加入提升方案,然后再对分析信号进行小波变换,称为提升小波变换。在 Matlab 中,函数 `lwt` 实现对分析信号的提升小波变换,可得到所需要分解层的近似分量和细节分量,函数 `lwtcoef` 可得到不同分解层的提升小波低频系数向量和高频系数向量,计算高频系数阈值并用不同的阈值函数对高频系数向量进行处理,得到新的高频系数向量;最后由低频系数向量和新的高频系数向量重构信号,从而达到对原信号去噪的目的。

总的来说,提升小波阈值去噪步骤可归纳为:1)对分析信号进行多层的提升小波分解,获得小波分解系数;2)对小波分解系数进行阈值处理;3)对处理完的小波系数进行反变换,重构出去噪后的信号。

阈值去噪的关键是构造阈值函数和阈值估计. 阈值估计方案有极大极小值阈值方案、自适应阈值方案、无偏似然估计方案和自适应阈值方案;在阈值函数的构造方面,近年来,很多学者做了大量的工作<sup>[12-16]</sup>,常用的阈值函数有硬阈值函数和软阈值函数,其表达式如式(13)、(14),函数曲线见图3(a)、(b),且两种函

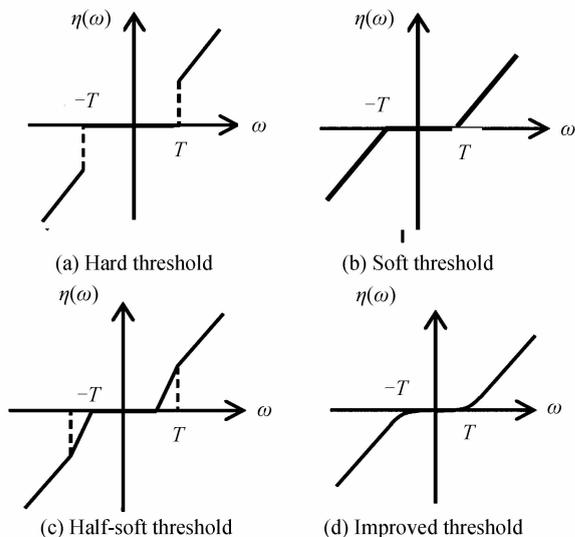


图3 不同阈值函数曲线

Fig. 3 The curves of different threshold functions

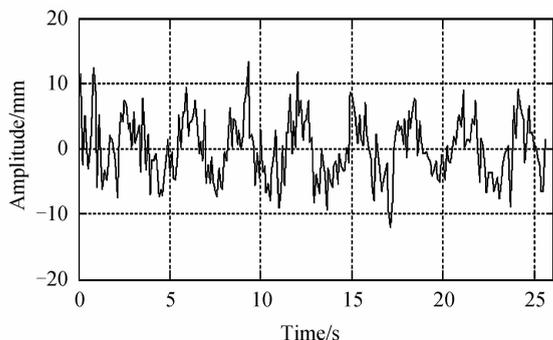
数的去噪方法在文献[1]中已使用过。

$$\eta(\omega) = \omega I(|\omega| > T) \tag{13}$$

$$\eta(\omega) = (\omega - \text{sgn}(\omega)T) I(|\omega| > T) \tag{14}$$

本文主要构造半软阈值函数和改进型阈值函数. 半软阈值函数可以克服硬阈值函数过分扼杀小波系数或软阈值造成边缘模糊的现象,如图3(c),其表达式为

$$\eta(\omega) = \text{sgn}(\omega) \frac{T_2(|\omega| - T_1)}{T_2 - T_1} I(T_1 < |\omega| < T_2) + \omega I(|\omega| > T_2) \tag{15}$$



(a) Radar life signal( $\lambda=166.67\text{mm}$ )

式中, $\omega$ 为原小波系数; $\eta(\omega)$ 为阈值化后小波系数; $T_1$ ,  $T_2$ 为阈值。

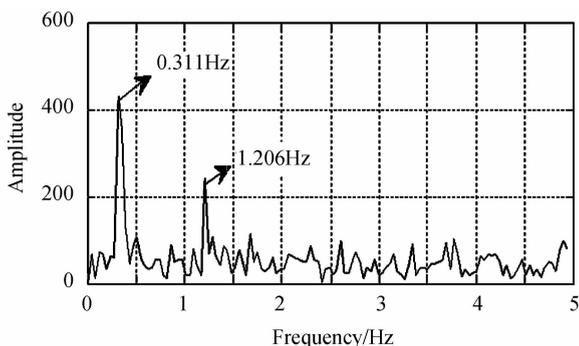
改进型阈值函数是对软阈值函数应用更高的阶数,使得在噪声小波系数和有用信号小波系数之间存在一个平滑过渡区,这样更符合自然信号的连续特性. 如图3(d),其表达式为

$$\eta(\omega) = \begin{cases} \omega + T - \frac{T}{2k+1} & (\omega < -T) \\ \frac{1}{(2k+1)T^{2k}} \omega^{2k+1} & (\omega \leq T) \\ \omega - T + \frac{T}{2k+1} & (\omega > T) \end{cases} \tag{16}$$

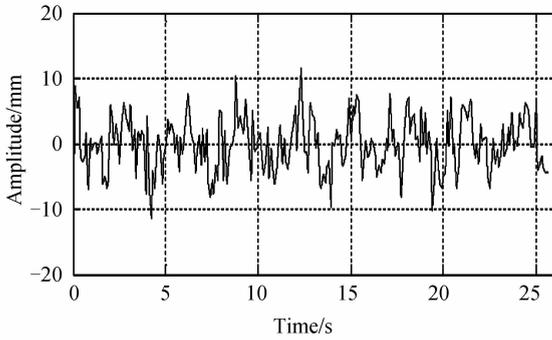
### 3 雷达生命信号的仿真及去噪处理

依据建立的雷达生命信号的理论模型,在 Matlab 软件平台上,对雷达生命信号式(12)进行仿真. 仿真中,雷达波长为 166.67 mm 的雷达生命信号的信噪比是 2.046 8、均方误差是 1.763 9;雷达波长为 8.57 mm 的雷达生命信号的信噪比是 0.942 6、均方误差是 1.980 6;图4给出了两种波长雷达生命信号的时域图和频域图,图中设定信号的采样频率  $f_s=10$  Hz,采样时间  $t=25.6$  s,则频率的分辨率为 0.039 Hz.

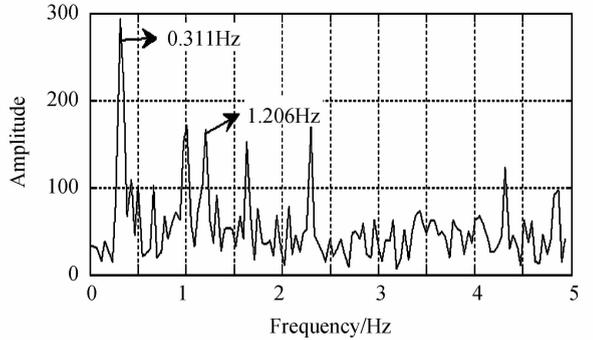
已有研究表明,在雷达生命信号处理中 sym8 为较好的小波基,小波变换的分解层数为 3 层. 本文仍然用 sym8 小波,对仿真信号做提升小波变换,在分解层数为 3,采用自适应阈值方案,用文中提到的各阈值函数进行去噪处理,用新型函数——改进型阈值函数做去噪处理时,选取阈值函数中的  $k$  分别为 1, 2, 3, 4,通过对信号处理效果的评价指标——信噪比和均方误差的对比,可以选择出最佳阈值去噪方案. 表1、表2列出了去噪后雷达生命信号的 SNR 和 MSE 数值. 由表1、表2 可以看到,选用本文的改进型阈值函数,取  $k=1$  时,有最优的去噪效果,这一结论对于两种雷达波长同时适应(表1和表2中黑体字体部分)。



(b) Radar life signal spectrum( $\lambda=166.67\text{mm}$ )



(c) Radar life signal( $\lambda=8.57\text{mm}$ )



(d) Radar life signal spectrum( $\lambda=8.57\text{mm}$ )

图4 雷达生命信号的时域和频域

Fig. 4 Time-domain and Frequency-domain of radar life signal

表1 不同阈值函数去噪效果比较( $\lambda=166.67\text{mm}$ )

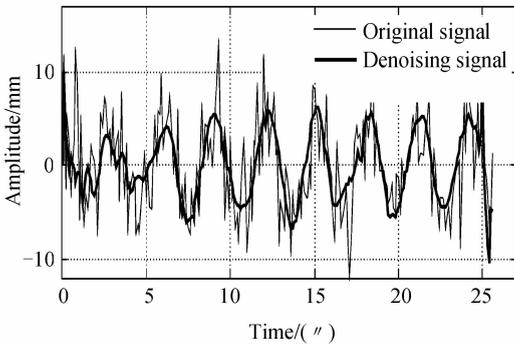
Table 1 Comparison of signal processing effect with every threshold function( $\lambda=166.67\text{mm}$ )

Evaluation parameters	SNR	MSE	Time/s
Hard threshold	4.8425	1.1774	1.1631
Soft threshold	5.7092	1.0312	1.1385
half-soft threshold	6.1361	1.0337	1.1843
<b>Improved(<math>k=1</math>)</b>	<b>6.6969</b>	<b>0.9099</b>	<b>1.1729</b>
Improved( $k=2$ )	6.4576	0.9119	1.1948
Improved( $k=3$ )	6.3935	0.9209	1.1602
Improved( $k=4$ )	6.3716	0.9270	1.1911

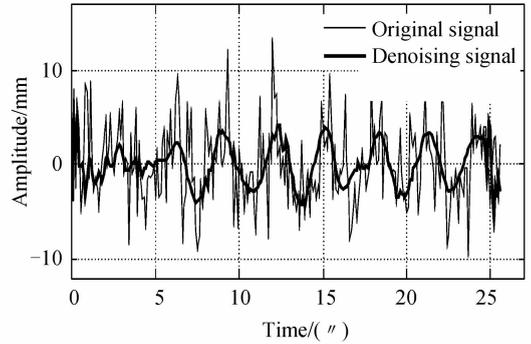
表2 不同阈值函数去噪效果比较( $\lambda=8.57\text{mm}$ )

Table 2 Comparison of signal processing effect with every threshold function( $\lambda=8.57\text{mm}$ )

Evaluation parameters	SNR	? MSE	Time/s
Hard threshold	1.6908	1.4345	1.1757
Soft threshold	1.8669	1.3961	1.2810
half-soft threshold	1.9487	1.3652	1.8530
<b>Improved(<math>k=1</math>)</b>	<b>2.5418</b>	<b>1.2860</b>	<b>1.2947</b>
Improved( $k=2$ )	2.1361	1.3413	1.3264
Improved( $k=3$ )	2.0271	1.3523	1.1966
Improved( $k=4$ )	1.9868	1.3570	1.2445



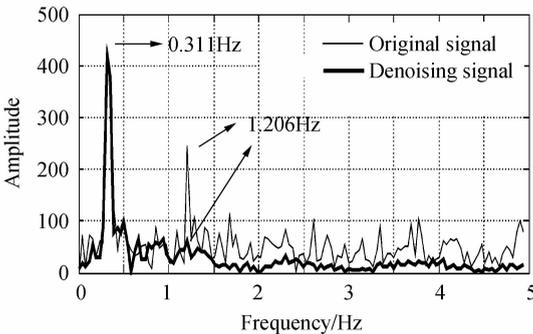
(a) Radar wavelength  $\lambda=166.67\text{mm}$



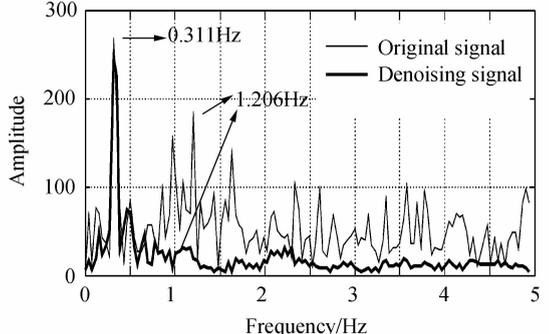
(b) Radar wavelength  $\lambda=8.57\text{mm}$

图5 两种波长的雷达生命信号去噪前后时域对比

Fig. 5 Time domain comparison of two wavelengths radar life signal before and after denoising



(a) Radar wavelength  $\lambda=166.67\text{mm}$



(b) Radar wavelength  $\lambda=8.57\text{mm}$

图6 两种波长的雷达生命信号去噪前后频域对比

Fig. 6 Frequency domain comparison of two wavelengths radar life signal before and after denoising

图5、图6分别给出了两种波长的雷达生命信号在去噪前和去噪后的时域对比图和频域对比图,  $k=1$ 。

由图 5(a)、(b)的比对结果发现,去噪后的信号呈现单频性。由图 6(a)、(b)的比对结果可知,去噪处理后,信号的谱能量主要集中在呼吸频率 0.311Hz 处,这相当于从强噪声雷达生命信号中提取出了呼吸信号。

## 4 结论

为了解决雷达生命信号的去噪问题,对雷达生命信号进行了 sym8 小波的 3 层的提升小波分解,对 1-3 层的细节分量进行不同阈值函数的去噪处理,然后再进行逆提升小波变换,获得去噪后的雷达生命信号。比对去噪前后雷达生命信号去噪信号的评价指标 SNR 和 MSE 以及去噪前后雷达生命信号的时域图和频域图,本文采用的改进型阈值函数( $k=1$ )有效地拟制了雷达生命信号中的强噪声信号,并提取出了生命信号——呼吸信号,这一结论对 166.67 mm 的雷达波和 8.57 mm 的雷达波都适应。

另外,本文采用的这几种去噪方案均没有提取到较弱的心跳信号,说明较高频率的心跳信号不在 sym8 小波分解的第 1、2 和 3 层近似分量上,怎样从雷达生命信号中提取心跳信息,我们将在后面做进一步的研究。

### 参考文献

- [1] ZHANG Hua, LI Sheng, JING Xi-jing, *et al.* A separation technology for Biological radar signals of respiration and heartbeat[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **411-414**: 1564-1568
- [2] YANG Xiu-fang, ZHANG Wei, WANG Ruo-jia, *et al.* Study on the extraction method of radar life signal based on wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(11): 1370-1374.  
杨秀芳,张伟,王若嘉,等. 基于小波变换的雷达生命信号提升方法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(11): 1370-1374.
- [3] OUYANG Bo, CHENG Dong, WANG Ling. Improved wavelet threshold algorithm in application of ECG signal denoising [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, **51**(4): 215-217.  
欧阳波,程栋,王玲. 改进小波阈值算法在心电信号去噪中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2015, **51**(4): 213-217
- [4] FENG Fei, WANG Fu-bei, XIE Fei, *et al.* Implementation of spectral overlap resolution based on wavelet transforms and gaussian fitting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(6): 0630001.  
冯飞,王府北,谢非,等. 小波变换与高斯拟合在光谱重叠峰解析中的应用[J]. *光子学报*, 2015, **44**(6): 0630001.
- [5] LIU Lei, YU Miao, YANG Rui-juan, *et al.* Wavelet denoising applied in optical fiber raman temperature sensor system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(6): 0605005.  
刘磊,于淼,杨瑞娟,等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统[J]. *中国激光*, 2013, **40**(6): 0605005.
- [6] LIU Xiu-ping, LI Xiao-ping, SUN Hai-feng. X-Ray pulsar signal de-noising using lifting scheme wavelet[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 0304002.  
刘秀平,李小平,孙海峰. 提升小波的 X 射线脉冲星信号降噪[J]. *光学学报*, 2013, **33**(3): 0304002.
- [7] YANG Xiu-fang, ZHANG Wei, YANG Yu-xiang. Denoising technology of radar life signal based on lifting wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(3): 0328003.  
杨秀芳,张伟,杨宇祥. 基于提升小波变换的雷达生命信号去噪技术[J]. *光学学报*, 2014, **34**(3): 0328003.
- [8] TANG Bao-ping, HE Qi-yuan, JIANG Heng-heng, *et al.* Modal parameter identification based on hilbert huang transform and wavelet de-noising [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2009, **29**(2): 197-200.  
汤宝平,何启源,蒋恒恒,等. 利用小波去噪和 HHT 的模式参量识别[J]. *振动、测试与诊断*, 2009, **29**(2): 197-200.
- [9] ZONG Fu-xing, RUI Ai-she, WANG Hui, *et al.* Denoising method for acoustic emission signal in oil depot internal valve leakage inspection based on CCA and WT[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, **35**(9): 2004-2011.  
宗富兴,锐爱社,汪辉,等. 基于 CCA 和 WT 的油库阀门内漏声发射信号去噪[J]. *仪器仪表学报*, 2014, **35**(9): 2004-2011.
- [10] WANG Shu-tao, LI Mei-mei, LI Pan, *et al.* Signal processing method based on empirical mode decomposition in the SO<sub>2</sub> concentration monitoring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0228002.  
王书涛,李梅梅,李盼,等. 基于经验模态分解的 SO<sub>2</sub> 浓度检测信号处理方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 0228002.
- [11] YI Da-fang, LIU Wen-bin. Characteristics of a dipole antenna on a dielectric slab [J]. *Journal of Electronics*, 1994, **16**(1): 76-79.  
易大方,刘文斌. 介质板上的振子天线特性研究[J]. *电子科学学刊*, 1994, **16**(1): 76-79.
- [12] SANAM T F, SHAHNAZ C. Noisy speech enhancement based on an adaptive threshold and a modified hard threshold function in wavelet packet domain [J]. *Digital Signal Processing*, 2013, **23**(3): 941-951.
- [13] STEFAN W, CHEN K W, GUO H B, *et al.* Wavelet-based de-noising of positron emission tomography scans [J]. *Journal of Scientific Computing*, 2012, **50**(3): 665-667.
- [14] LIU W Y, HAN J G. The optimal Mexican hat wavelet filter de-noising method based on cross-validation method [J]. *Neurocomputing*, 2013, **108**: 31-35.
- [15] LI J, CHENG C K, JIANG T Y. Wavelet de-noising of partial discharge signals based on genetic adaptive threshold estimation [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, **19**(2): 543-549.
- [16] BEENAMOL M, PRABAVATHY S, MOHANALIN J. Wavelet based seismic signal de-noising using shannon and stllis entropy [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2012, **64**(12): 3580-3593.