

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.006

连续波雷达生命信息检测和提取技术

杨秀芳, 马江飞, 高瑞鹏

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 雷达生命信号是微弱信号, 常常淹没在噪声中, 这些杂波噪声具有非平稳随机性, 有效去噪是对有用信号提取和分离前的必要手段。本文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, 通过比较不同阈值函数的去噪效果, 确定最佳阈值函数。结果表明: 利用提升小波变换、采用一种新型的改进软阈值函数去噪技术, 信号的信噪比(SNR)和均方误差(MSE)均优于传统去噪方法。

关键词: 雷达生命信号; 理论模型; 提升小波变换; 阈值去噪; 改进软阈值函数

中图分类号: TP312

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)03-0283-07

Detection and extraction technology of CW radar life signal

YANG Xiufang, MA Jiangfei, GAO Ruipeng

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: As the radar life signal is weak, it is often submerged in the noise. Because of non-stationary and randomness of these clutter signals, it is necessary to denoise efficiently before extracting and separating useful signals. This study improves the radar life signal's theoretical model of the continuous wave, processes de-noising by introducing lifting wave transform and determines the best threshold function through comparing the de-noising effects of different threshold functions. The result indicates that both SNR and MSE of the signal are better than the traditional ones by using lifting wavelet transform and combining with a newly improved method for soft threshold function de-noising.

Key words: radar life signal; theoretical model; lifting wavelet transform; threshold de-noising; improved soft threshold function

信号去噪是信号处理领域的主要研究内容之一。传统的去噪方法如中值滤波和 Wiener 滤波等, 不足之处在于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, 为了克服这些缺点, 近年来利用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。

文献[1]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[2]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[3]用自适应提升小波变换对心音信号进行了降噪处理, 取得了不错的效果; 文献[4]用小波变换的方法对光纤温度传感系统的测量信号实现了有效的降噪处理; 文献[5]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[6]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[7]对含噪的 Block 信号采用奇异值分解(Singular Value Decomposition)多次迭代方案实现了有效去噪; 文献[8]用小波变换方法对简支梁振动信号进行去噪处理, 以便减少 EMD 分解过程的计算量和分解层数; 文献[9]用自适应阈值函数去噪方案对加入强噪声的水下金属圆柱体的回波信号进行了有效的去噪处理; 文献[10]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。

与传统的小波变换相比, 提升小波变换有以下

收稿日期: 2015-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11502198)

作者简介: 杨秀芳, 女, 硕士, 研究方向为光电检测与信息提取技术。E-mail: yxf5078@xaut.edu.cn

特点: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,结合不同的阈值函数,对雷达生命信号进行去噪处理,以去噪信号的信噪比(SNR)和均方误差(MSE)为评价指标,选取了最佳的阈值函数,以实现雷达生命信号进行最佳去噪处理。

1 雷达生命信号理论模型的建立

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的单频信号(频率为 f_0),其表达式为:

$$s_r(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + q_0) \quad (1)$$

设目标与雷达的距离为:

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

则有:

$$s_r(t) = mA_0 \cos[(2pf_0 t + q_0 - 2kr(t)] = \mu A_0 \cos[(2\pi f_0 t + \varphi_0 - 2kx(t)] \quad (3)$$

式中, μ 为雷达穿过介质的衰减因子; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为雷达发射电磁波的波长值; $\varphi_0 = \theta_0 - \frac{2\pi}{\lambda} r_0$, 目标位置确定后,它为一个常数。

设呼吸和心跳引起的雷达与目标的距离起伏分别为:

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

$$x_2(t) = \Delta_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_0) \quad (5)$$

式中, Δ_1 、 Δ_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:

$$s_r(t) = \mu A_0 \cos[(2\pi f_0 t + \varphi_0 - 2kx_1(t)] + \mu A_0 \cos[(2\pi f_0 t + \varphi_0 - 2kx_2(t)] \quad (6)$$

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:

$$s(t) = s_c(t) \times s_r(t)$$

经过低通滤波器和放大后,得到雷达生命信号:

$$s(t) = \frac{\mu A_0^2}{2} \times \cos[2kx_1(t) + \varphi_1] + \frac{\mu A_0^2}{2} \times \cos[2kx_2(t) + \varphi_2] \quad (7)$$

式中, φ_1 、 φ_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。这里选用了两种频率的雷达波:1.8 GHz和35 GHz,对应的波长分别为166.67 mm和8.57 mm,这两种波长分别是生物雷达波中波长较长和波长较短的波长之一;仿真中选用的呼吸和心跳频率分别为0.3 Hz(呼吸每分18次)和1.2 Hz(心跳每分72次),幅值分别为2 mm和5 mm。

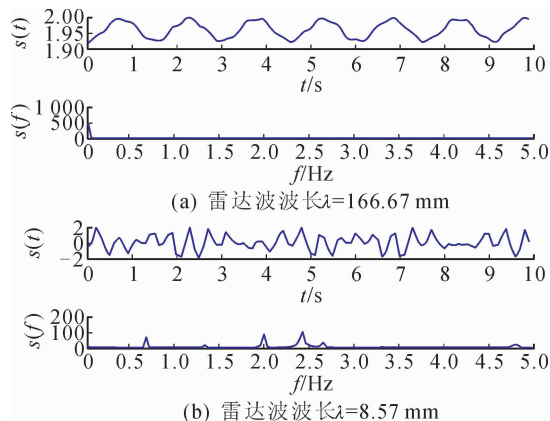


图1 多普勒雷达生命信号的时域和频域
Fig. 1 Time-domain and frequency-domain of the Doppler effect radar life signal

从图1可以明显看出,雷达生命信号的频谱并不含有生命信号频谱——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,其携带的生物电场用式(8)表示:

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

式中: $\epsilon(t)$ 为介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为人体的相对介电常数; $\sigma(t)$ 为电导率, σ_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。

应用电磁场的麦克斯韦方程和物质方程:

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

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

对式(9)应用等效极化电流概念和积分方程法求解^[11],可以得到人体散射电场为:

$$\vec{E}_s = \delta \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 x(t) \cdot \iint \vec{E}G(r, r') ds + \epsilon_0 x(t) / \epsilon_0 \cdot \iint (\hat{n} \cdot \vec{E}) \nabla G(r, r') ds \quad (10)$$

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

由式(10)可知, 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:

$$s(t) = \frac{\mu A_0^2}{2} x_1(t) \times \cos[2kx_1(t) + \varphi_1] + \frac{\mu A_0^2}{2} x_2(t) \times \cos[2kx_2(t) + \varphi_2] \quad (11)$$

从图2可看出, 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。

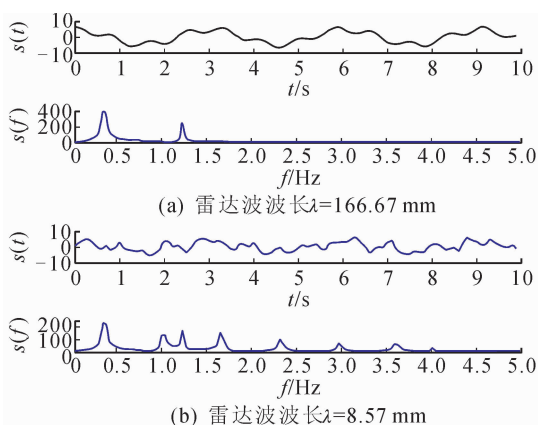


图2 生物电效应雷达生命信号的时域和频域
Fig.2 Time-domain and frequency-domain of bioelectricity effect radar life signal

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:

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

可以把服从高斯分布的、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的输出。设滤波器的幅频特性为:

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

式中, ξ 为滤波因子, 相当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:

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

可得杂波的功率为:

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

考虑到杂波过程, 雷达生命信号模型为:

$$s(t) = \frac{\mu A_0^2}{2} x_1(t) \times \cos[2kx_1(t) + \varphi_1] + \frac{\mu A_0^2}{2} x_2(t) \times \cos[2kx_2(t) + \varphi_2] + \frac{\mu A_0^2}{2} c(t) \times \cos[2kc(t)] \quad (12)$$

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有效方法。在传统的小波变换中, 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, 通过函数 `lwtt` 可实现对分析信号的提升小波变换, 得到所需要分解层的近似分量和细节分量, 通过函数 `lwttcoef` 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如下:

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^[12-16], 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)所示, 其函数曲线图如图3(a)、(b)所示, 这两种函数的去噪方法在文献[1]中已使用过。

$$\eta(\omega) = \omega I(|\omega| > T) \quad (13)$$

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

这里主要构造另外两种阈值函数: 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)所示,其表达式为:

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

式中, ω 为原小波系数, $\eta(\omega)$ 为阈值化后的小波系数, 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)所示,其表达式为:

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

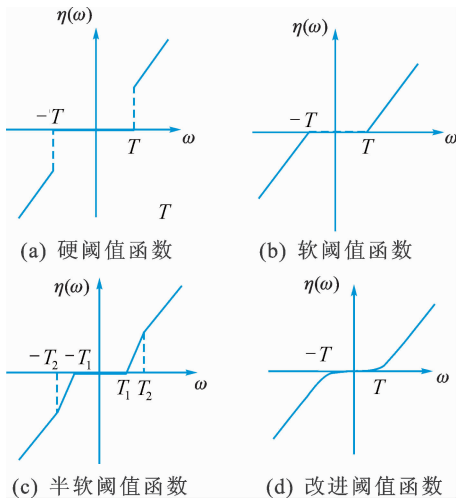


图3 不同阈值函数曲线

Fig. 3 The curves of different threshold functions

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2.0468,均方误差是1.7639;雷达波长为8.57 mm的雷达生命信号的信噪比是0.9426,均方误差是1.9806。

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。

前期研究表明,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。现在仍然用 sym8 小波,对仿真信号做提升小波变换,在

分解层数3,采用自适应阈值方案,用文中提到的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,选取阈值函数中的 k 分别为1、2、3、4,通过信号处理的评价指标——信噪比(SNR)和均方误差(MSE)的比较,可以选择出最佳的 k 值。图5、图6分别给出了不同阈值函数去噪后雷达生命信号的时域和频域曲线,表1、表2列出了去噪后雷达生命信号的SNR和MSE数值。

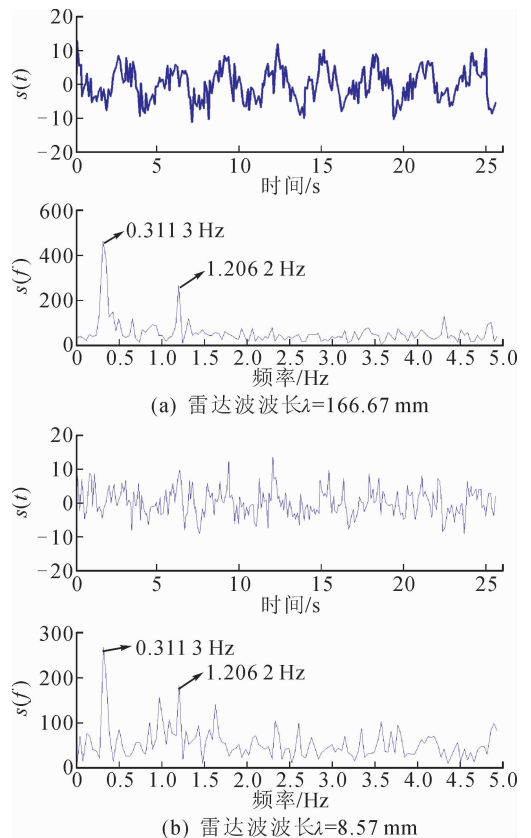
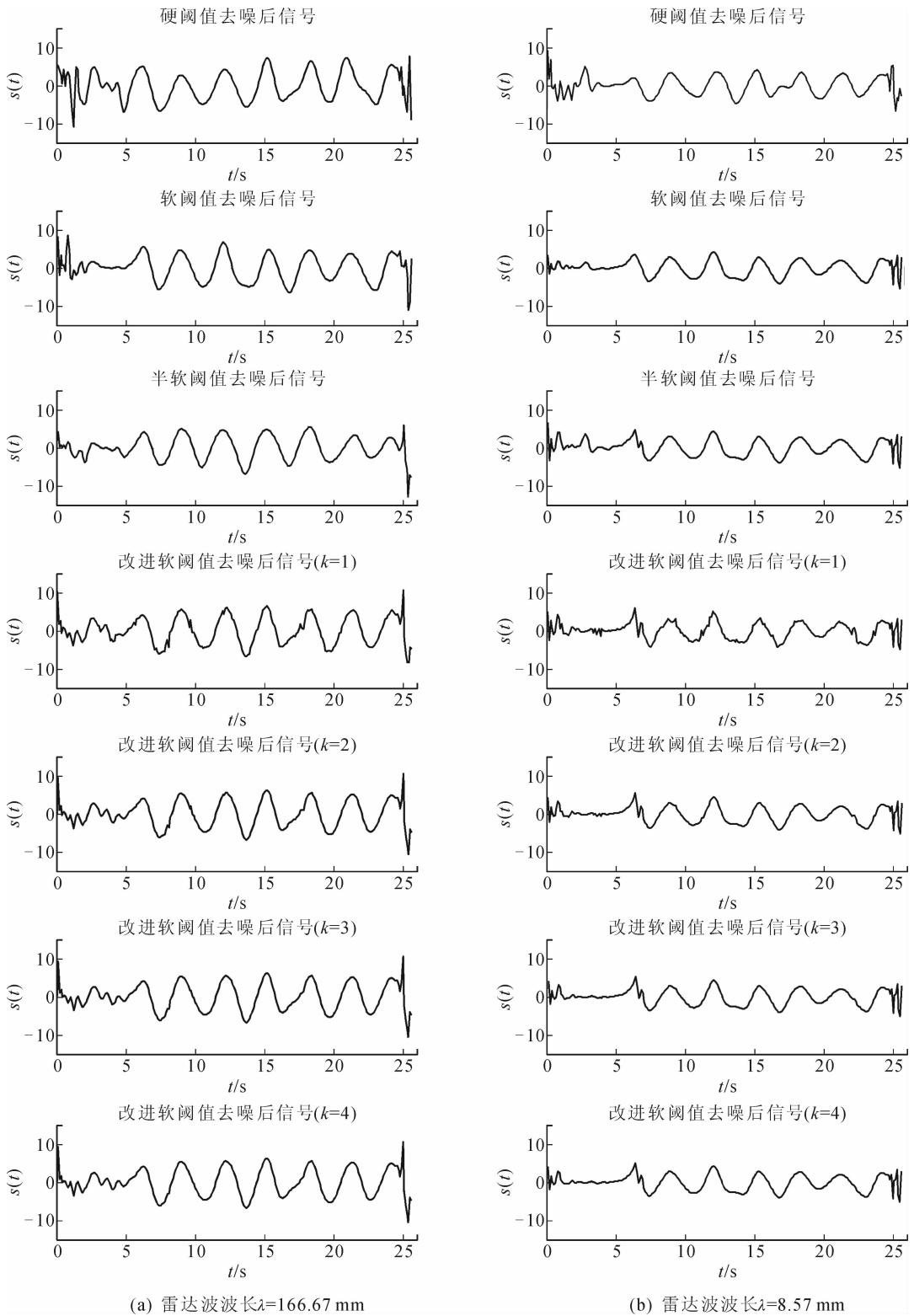


图4 雷达生命信号的时域和频域

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

图5(a)是对波长为166.67 mm的雷达生命信号先进行提升小波变换,然后用不同阈值函数去噪后的时域图。与图4(a)的雷达生命信号对比发现,这几种去噪方案都显著地抑制了雷达生命信号中的噪声信号。比对图5(a)与图2(a),图2(a)是不含噪声的波长为166.67 mm的雷达生命信号,该信号含有两种频率——呼吸频率和心跳频率,比对结果发现,这几种去噪方案将较弱的生命信号作为噪声抑制掉了,使得去噪后的信号呈现单频性。因此本文采用提升小波变换的不同阈值函数的去噪方案对雷达生命信号实现了有效去噪,同时也抑制了较弱的生命信号。

对于图5(b)的分析结果同上。



(a) 雷达波波长 $\lambda=166.67$ mm

(b) 雷达波波长 $\lambda=8.57$ mm

图 5 去噪后雷达生命信号时域图

Fig. 5 The time domain diagram of radar life signals after denoising

图 6(a)是对波长为 166.67 mm 的雷达生命信号先进行提升小波变换,然后用不同阈值函数去噪处理后的频域图,图中峰值频率是 0.311 3 Hz,该频率为呼吸信号频率。

与图 4(a)的频谱图进行比对,这几种去噪方案有效拟制了高频噪声,但同时将频率为 1.206 Hz 的心跳信号作为噪声拟制掉了。

对于图 6(b)的分析结果同上。

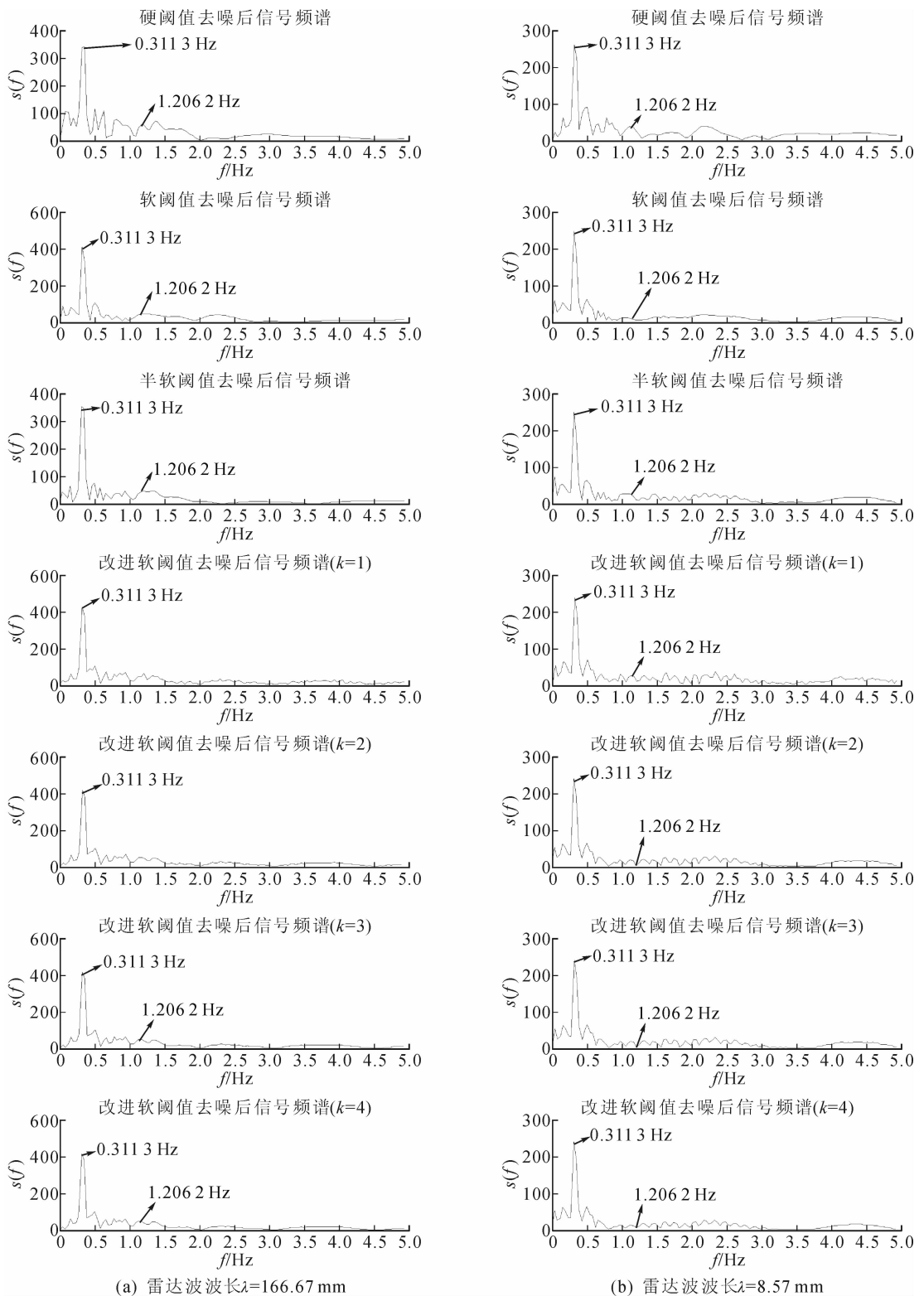


图6 去噪后雷达生命信号频域图

Fig. 6 The frequency domain diagram of radar life signal after denoising

从去噪信号的时域和频域比对不同阈值函数去噪的效果,较难判断那种阈值函数去噪效果更好。表1给出了不同阈值函数去噪后的评价指标信噪比

SNR和均方误差MSE值,很容易发现,采用改进阈值函数,且函数中的 $k=1$ 时评价指标值最优,这个结论对不同的雷达波都适用。

表 1 不同阈值函数去噪效果比较

Tab. 1 Comparison of signal processing effect with different threshold function

λ/mm	评价参数	SNR	MSE	Time/s
166.67	硬阈值	4.842 5	1.177 4	1.163 1
	软阈值	5.709 2	1.031 2	1.138 5
	半软阈值	6.136 1	1.033 7	1.184 3
	改进($k=1$)	6.696 9	0.909 9	1.172 9
	改进($k=2$)	6.457 6	0.911 9	1.194 8
8.57	改进($k=3$)	6.393 5	0.920 9	1.160 2
	改进($k=4$)	6.371 6	0.927 0	1.191 1
	硬阈值	1.690 8	1.434 5	1.175 7
	软阈值	1.866 9	1.396 1	1.281 0
	半软阈值	1.948 7	1.365 2	1.853 0
	改进($k=1$)	2.541 8	1.286 0	1.294 7
	改进($k=2$)	2.136 1	1.341 3	1.326 4
	改进($k=3$)	2.027 1	1.352 3	1.196 6
	改进($k=4$)	1.986 8	1.357 0	1.244 5

4 结 论

为了解决雷达生命信号的去噪问题,本文对雷达生命信号进行了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的时域图和频域图,本文采用的这几种阈值函数对雷达生命信号中的高频噪声进行了有效去除。用去噪信号的评价指标SNR和MSE来衡量,改进阈值函数($k=1$)为最佳去噪函数,这一结论对波长为166.67 mm和8.57 mm的雷达波都适用。

本文采用的这几种去噪阈值函数,可以有效地从雷达生命信号分理处呼吸信号,但较弱的心跳信号都被作为噪声抑制掉了,这一问题将留作后续研究。

参考文献:

- [1] 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.
YANG Xiufang, ZHANG Wei, WANG Ruojia, et al. Study on the extraction method of radar life signal based on wavelet transform [J]. ACTA Photonica Sinica, 2013,42(11):1370-1374.
- [2] 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.
OUYANG Bo, CHENG Dong, WANG Ling. Improved wavelet threshold algorithm in application of ECG signal denoising[J]. Computer Engineering and Applications, 2015,51(4): 213-217.

- [3] 郭兴明,吴玉春,肖守中. 自适应提升小波变换在心音信号预处理中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2009,30(4): 802-806.
GUO Xingming, WU Yuchun, XIAO Shouzhong. Application of adaptive lifting wavelet transform in pre-processing of heart sound signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(4): 802-806.
- [4] 刘磊,于森,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.
LIU Lei, YU Miao, YANG Ruijuan, et al. Wavelet denoising applied in optical fiber raman temperature sensor system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6):0605005.
- [5] 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.
LIU Xiuping, LI Xiaoping, SUN Haifeng. X-ray pulsar signal de-noising using lifting scheme wavelet[J]. Acta Optica Sinica, 2013,33(3):0304002.
- [6] 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.
YANG Xiufang, ZHANG Wei, YANG Yuxiang. Denoising technology of radar life signal based on lifting wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2014,34(3): 0328003.
- [7] 查翔,倪世宏,张鹏. 一类非线性信号去噪的奇异值分解有效迭代方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1330-1335.
ZHA Xiang, NI Shihong, ZHANG Peng. Effective iteration method of a class of nonlinear signal denoising based on singular value decomposition[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(6): 1330-1335.
- [8] 汤宝平,何启源,蒋恒恒,等. 利用小波去噪和HHT的模式参数识别[J]. 振动、测试与诊断, 2009:29(2): 197-200.
TANG Baoping, HE Qiuyan, JIANG Hengheng, 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.
- [9] 吴光文,王昌明,包建东,等. 基于自适应函数的小波阈值去噪方法[J]. 电子与信息学报, 2014: 36(6): 1340-1347.
WU Guangwen, WANG Changming, BAO Jiandong, et al. A wavelet threshold de-noising algorithm based on adaptive threshold function [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014,36(6):1340-1347.

警服务则将移民管理服务过程中报警信息和预警信息以图标及预警框的形式在系统中进行形象的表示,加以闪烁特效,实时反应报警预警位置,使管理者及时掌握报警预警信息,以快速做出应断和决策。

4 结 语

针对水工程移民管理的重要性,传统基于 GIS 的移民管理系统表现力和管控力的不足,以及移民管理辅助决策的智能化需求。本文基于综合集成思想,采用 3S 集成技术、SOA 模式和 JE22 等关键技术,给出一个基于 3S 环境的移民管理综合集成体系架构,其涵盖了水利工程移民数据处理、智能分析与集成应用等核心框架,以数据融合服务、综合集成服务、信息发布服务为核心,内置高程数据资源和遥感影像信息,支持淹没分析、影响分析、移民安置分析、地形剖面分析、空间几何属性测量等辅助决策手段。最后将该系统在陕西省引汉济渭工程移民中加以实施应用,结果表明该系统具有良好的分析力、表现力和掌控力,有效的提高了水利工程移民管理辅助决策能力。

参考文献:

- [1] HOLLAND P, REICHARDT M E, NEBERT D, et al. The global spatial data infrastructure initiative and its relationship to the vision of a digital earth[C]//Proceedings of the International Symposium on Digital Earth, Beijing, 1999: 1-7.
- [2] LECLERC Y G, REDDY M, IVERSON L, et al. Dig-

ital earth: building the new world[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Dundee, Scotland, UK, 1999: 250-262.

- [3] MICHAELIS C D, AMES D P. Evaluation and implementation of the OGC web processing service for use in client-side GIS [J]. Geoinformatica, 2009, 13 (1): 109-120.
- [4] SUN X, DUBOIS E. A novel algorithm to stitch multiple views in image mosaics[C]//Proceedings (ICASSP'04) of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Quebec, Canada, 2004, 3: iii-481-4.
- [5] 焦健,曾琪明. 地图学[M]. 北京:北京大学出版社, 2005:201-257.
- [6] KRATKY V. Rigorous photogrammetric processing of SPOT images at CCM Canada[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1989, 44(2): 53-71.
- [7] OKAMOTO A. Orientation and construction of models III- Mathematical basis of the orientation problem of one-dimensional central perspective photographs [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1981, 47: 1739-1752.
- [8] KRATKY V. Online aspects of stereo photogrammetric processing of SPOT images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1989, 55(3):311-316.
- [9] 李建勋,沈冰,郭建华,等. 面向影像金字塔的线性四叉树编码及其特性[J]. 计算机应用, 2011, 31 (4): 1148-1151.
- LI Jianxun, SHEN Bing, GUO Jianhua, et al. Linear quadtree coding and its features for image pyramid[J]. Computer Application, 2011, 31(4):1148-1151.

(责任编辑 杨小丽)

(上接第 289 页)

- [10] 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.
- ZONG Fuxing, RUI Aishe, WANG Hui, et al. De-noising 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.
- [11] 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):76-80.
- YI Dafang, LIU Wenbin. Characteristics of a dipole antenna on a dielectric slab[J]. Journal of Electronics, 1994, 16(1):76-80.
- [12] SANAM T F, SHAHNAZ C. Noisy speech enhancement based on an adaptive threshold and a modified hard treshlodng 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.

(责任编辑 王卫勋)