

频域积累与EMD去噪结合的微动信号检测算法

蒋留兵, 韦洪浪, 杨昌昱, 许腾飞, 管四海

桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004

摘要 超宽带生命探测雷达具有穿透能力强、距离分辨率高、抗干扰能力强等诸多优点,在防暴、救援、反恐等领域有很高的使用价值。由于穿墙生命探测雷达回波信号具有杂波干扰严重,且生命信号与背景噪声相互交叠等特点,利用传统数字滤波方法无法有效检测人体微动信号。针对此问题,本文提出一种利用频域积累与经验模态分解(EMD)相结合的人体微动信号检测算法,利用频域积累提高回波信号的信噪比,利用EMD方法进行进一步的去噪处理。该算法不仅具有频域积累可以有效提高信噪比的优点,而且具有EMD方法自适应分解信号的能力。同时,它克服了在低信噪比情况下,频域积累实时性不强,以及EMD方法不能有效去除杂波的缺点。仿真和实验证明,该算法既可以有效提高雷达回波信号的信噪比,又可以改善单纯使用频域积累实时性不强的缺点,利用该算法对雷达回波信号进行处理可以准确快速地检测出人体的呼吸频率,是一种很好的穿墙雷达微弱信号检测新方法。

关键词 超宽带生命探测雷达;微动信号提取;频域积累;经验模态分解

中图分类号 TN958.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.19.005

Micro-tremor Signal Detection Algorithm Based on Frequency Domain Cumulation Combined with EMD De-noising

JIANG Liubing, WEI Honglang, YANG Changyu, XU Tengfei, GUAN Sihai

School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

Abstract Ultra-wideband (UWB) life detection radar has found wide applications in anti-riot, rescue, and anti-terrorism actions due to its many advantages, such as strong penetrating ability, high distance resolution, and strong anti-interference ability. Therefore, research on human micro-tremor signal detection using UWB through-wall radar has much significance. As the echo signal of through-wall life detection radar is interfered by background noise clutter, the conventional method using the digital filter cannot effectively detect human micro-tremor signal. To solve this problem, this paper presents a human body micro-tremor signal detection algorithm. First, the frequency domain cumulation is used to increase the signal-to-noise ratio (SNR) of the echo signal, and then EMD is used for de-noising. This algorithm not only has the advantages of frequency domain cumulation, but also has the ability of EMD method for adaptive decomposition. Under low SNR, it overcomes the disadvantages of frequency domain cumulation and EMD method, the former being not real-time and the latter having ineffective clutter remove. The simulation results show that the algorithm not only improves the SNR of the radar echo signal, but also overcomes the disadvantage of frequency domain cumulation. The frequency of human respiration can be rapidly and accurately detected by processing the echo signal using this algorithm, which is a novel method for through-wall radar detection of weak signals.

收稿日期:2014-01-02;修回日期:2014-04-21

基金项目:国家自然科学基金项目(61162007);广西自然科学基金项目(2013GXNSFAA019323);桂林科技攻关项目(20130102-5)

作者简介:蒋留兵,副教授,研究方向为智能信息处理,电子信箱:jlbj@guet.edu.cn

引用格式:蒋留兵,韦洪浪,杨昌昱,等.频域积累与EMD去噪结合的微动信号检测算法[J].科技导报,2014,32(19):36-42.

Keywords ultra-wideband life detection radar; micro-tremor signal detection; frequency domain cumulation; empirical mode decomposition

穿墙生命探测雷达是指探测生命体的雷达,它融合了雷达技术和生物工程技术,可以穿透非金属介质(砖墙、废墟等),非接触式、远距离检测人体的呼吸和心跳等信息,广泛应用于特殊病人监护、震后救援、反恐等领域^[1-4]。穿墙生命探测雷达通过发射的电磁波穿透障碍物照射到人体目标产生电磁波反射,反射的雷达回波信号包含大量杂波和噪声,同时携带微弱的人体生命信息,最后通过信号处理技术把回波信号中的杂波和噪声去除,提取有用的人体生命信息^[5]。

在穿墙生命探测情况下,由于雷达回波信号信噪比(signal to noise ratio, SNR)很低,且生命信号与背景噪声相互交叠,以至于使用传统滤波器无法有效去噪,但能否有效地去噪,直接决定检测的效果。对于此问题,一般使用相干积累和小波变换的方法去除噪声^[6],但在SNR很低的情况下,相干积累需要较长的数据采集时间,不适用于实时性要求很高的雷达系统。小波变换在去噪方面使用很广泛,但是小波基的选择是个难题,且一旦选定后其特性就固定,基于此缺陷,经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)给出了解决方案^[7]。EMD不仅解决小波变换难以选择小波基的问题,还保留了小波变换的多分辨率的优点,因此适用于雷达回波信号的去噪^[8]。但是,EMD方法在信噪比很低的情况下性能比较差,针对以上问题,本文提出一种使用频域积累与EMD去噪相结合的微弱信号检测算法,该算法有效地把两种去噪方法的优点结合起来,首先利用频域积累将回波信号的信噪比提高,再用EMD方法进行进一步的去噪处理,通过实验证明该算法能有效去除噪声,进而准确检测出微弱人体生命信号。

1 频域积累

由于人体的微动信号是周期或者准周期的,而噪声信号一般是随机的,没有相关性,通过频域上的积累,人体微动信号的谱线将得到增强,而噪声信号的谱线增强缓慢,所以信噪比将得到一定程度的提高。频域积累是先将信号变换到频域中,然后在频域中进行信号累加。通过选取不同时间段内相同时间长度的信号,分别进行固定点数的快速傅里叶变换(FFT),然后再将相应频率成分进行频域累加^[9]。离散傅里叶变换定义为^[10]

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-i\frac{2\pi}{N}nk} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

式中, $x(n)$ 为待处理序列, $X(k)$ 为 $x(n)$ 的 k 点离散傅里叶变换, N 为离散傅里叶变换的点数, $W_N = e^{-i\frac{2\pi}{N}}$ 为旋转因子。

设 $x(n)$ 为 $N=M \cdot L$ 的待处理序列,其中 M 为频域积累次数, L 为离散傅里叶变换的点数,则频域积累的表达式为

$$X(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} x_m(l) e^{-i\frac{2\pi}{N}lk} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} x_m(l) W_L^{lk} \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2)$$

式中, $x_m(l)$ 为第 m 次积累的序列。

频域积累可以使信号的信噪比得到一定程度的提高,但是当信噪比很低时,要达到识别微动信号的目的,需要增大积累次数,因而计算量比较大,消耗较长时间。而且不管积累次数如何增加,积累之后的信号由于含有较多高频噪声,因而不能很好地表现有用信号的特性。基于此,本文在频域积累之后采用EMD方法去噪,利于EMD方法自适应的特性提取微动信号。

2 经验模态分解去噪

2.1 经验模态分解

EMD能够自适应地根据信号自身的特点分解为一系列的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),每一个IMF体现信号中不同频率尺度的振荡特性,从而可以对信号进行时域或者频域分析^[11]。IMF要满足如下判断条件:1)在整个数据长度内,每一个IMF都具有数目相同或相差为1的过零点和极值点数;2)在任意时间点上,极大值包络线和极小值包络线的均值都为零,既IMF的上下包络线是关于时间轴对称的^[7]。EMD分解的过程实际上是一种筛分过程,即通过层层筛分获得IMF。

EMD分解的具体步骤如下:

1) 找出信号 $x(t)$ 的极大值点和极小值点,分别采用3次样条插值拟合,生产上包络线 $e_u(t)$ 和下包络线 $e_d(t)$,计算上下包络的均值:

$$m_1(t) = (e_u(t) + e_d(t)) / 2 \quad (3)$$

2) 将信号 $x(t)$ 减去平均包络 $m_1(t)$,得到一个去掉低频的新序列 $h_1(t)$,即

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (4)$$

重复步骤(1)和(2),直到满足判断条件:

$$SD = \sum_{i=0}^r \frac{|h_{1k(i)}(t) - h_{1k(i-1)}(t)|^2}{h_{1k(i-1)}^2(t)} \quad (5)$$

其中, SD 为连续两次迭代结果的标准差,取值区间为[0.2, 0.3]。得到第一个IMF分量为 $IMF_1(t) = h_{1k}(t)$, k 为判定条件时的迭代次数。

3) 将 $IMF_1(t)$ 从 $x(t)$ 中分离出来,得到去掉高频成分的余项序列 $r_1(t)$,即 $r_1(t) = x(t) - IMF_1(t)$ 。

4) 将余项序列 $r_1(t)$ 作为待分解信号,重复以上步骤直到满足筛分约束条件。此时,信号被分解为有限个IMF分量: $IMF_1(t)$, $IMF_2(t)$, ..., $IMF_n(t)$ 和一个代表原始信号序列均

值或趋势的余项 $r_n(t)$ 。因此,原始信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r_n(t) \quad (6)$$

式中, n 为 EMD 分解出来的 IMF 分量的数目。

2.2 确定 IMF 分量中信号占主导的模式和噪声占主导的模式

信号经过 EMD 分解后,阶数小的一般为高频部分,阶数大的一般为低频部分。对于生命探测雷达人体回波信号,人体有用信号的能量主要集中在低频部分,噪声信号主要集中在高频部分。所以,一定存在某一阶数是噪声占主要成分与信号占主要成分的分界点。Wu 等^[12]通过实验得出能量密度与平均周期成反比的结论。定义第 i 阶 IMF 分量 $IMF_i(t)$ 的能量为 E_i , 则

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [IMF_i(t)]^2 \quad (7)$$

式中, n 为 EMD 分解出来的 IMF 分量的数目。如果有阶数 $i=K$ 时,能量 E_k 达到最低点,即认为 K 是噪声占主导与信号占主导的分界点。

2.3 对噪声占主导模式的部分进行小波阈值去噪处理

一般雷达回波信号中均含有噪声,导致雷达回波信号存在间歇性,从而导致 EMD 分解会出现频谱模糊现象,即分解后一个 IMF 分量可能含有不同的频率成分。所以在噪声占主导模式的分量里面可能含有有用信号的高频成分,如果直接去除将会丢失信号的部分信息,滤波结果将会失真。因此,可以对噪声占主导模式的前 K 阶 IMF 分量进行类似小波软阈值去噪处理以保留其中的有用信号^[13]。根据 Donoho 等^[14]给出的消噪阈值选取方法,对前 K 阶 IMF 分量采用如下阈值计算:

$$Thr_i = \sigma_i \sqrt{2 \lg N} \quad (8)$$

$$\sigma_i = MAD_i / 0.6745 \quad (9)$$

其中, N 为 EMD 分解出来的各 IMF 分量的长度, σ_i^2 为噪声分量的方差, MAD_i 为第 i 阶 IMF 分量的绝对中值偏差,则 MAD_i 定义为

$$MAD_i = \text{Median} \left\{ \left| IMF_i(t) - \text{Median}(IMF_i(t)) \right| \right\} \quad (10)$$

式中, Median 为求中值函数。

软阈值函数为

$$IMF_i' = \begin{cases} IMF_i - Thr_i & IMF_i \geq Thr_i \\ 0 & |IMF_i| < Thr_i \\ IMF_i + Thr_i & IMF_i \leq -Thr_i \end{cases} \quad (11)$$

通过式(11)对 EMD 分解出来噪声占主导模式的前 K 阶 IMF 分量进行类似小波软阈值去噪处理,提取其中有用的信号成分 IMF_i' 。

2.4 信号重构

将信号占主导的 IMF 分量与经过软阈值去噪得到的 IMF 分量进行叠加,这样就得到了去噪后的重构信号:

$$y(t) = \sum_{j=K+1}^n IMF_j + \sum_{i=1}^K IMF_i' \quad (12)$$

式中, $y(t)$ 为重构信号, $\sum_{j=K+1}^n IMF_j$ 为 IMF 中信号占主导的分量, $\sum_{i=1}^K IMF_i'$ 为经过软阈值去噪得到的 IMF 分量。

3 频域积累与 EMD 去噪结合的微动信号检测算法

对低信噪比的信号,频域积累可以有效地提高信噪比,但是如果信号的信噪比太低,积累次数将大大增加,并且无论积累次数如何增加,频域积累的结果都含有较多的高频噪声,这样不仅不满足雷达系统实时性的要求,也不利于观察信号的细节信息。EMD 分解会根据信号自身的特性将信号分解为一系列的本征模态函数 IMF, 每一个 IMF 体现信号中不同频率尺度的振荡特性,适用于非线性、非平稳信号的处理^[7]。EMD 方法不仅具有小波变换的优点,还克服了小波变换缺点,但是 EMD 分解存在模式混叠问题^[11],引起信号时频分布偏移,在信噪比低的情况下这一问题更加明显,所以在信噪比较低时,用此种方法达不到很好的去噪效果。因而本文提出利用两种方法结合的微动信号检测算法,流程如图 1 所示。

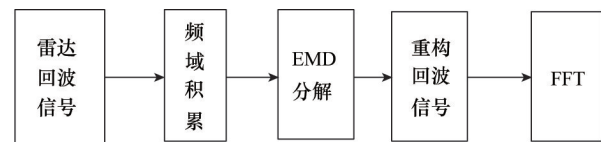


图 1 检测算法流程

Fig. 1 Flowchart of detection algorithm

首先利用频域积累对雷达回波信号进行处理,以提高信号的信噪比,然后对处理后的信号进行 EMD 分解,根据上文介绍的方法求出重构信号,最后对该信号进行 FFT 变换可以检测出人体生命信号。

4 仿真结果与分析

正常人的呼吸频率一般为 15~40 次/min,设呼吸为 15 次,则呼吸频率为 $f_r = 15/60 = 0.25$ Hz,呼吸幅度设为 $m_r = 2$ mm;正常人的心跳一般为 60~100 次/min,设心跳为 75 次/min,则心跳频率为 $f_h = 75/60 = 1.25$ Hz,心跳幅度为 $m_h = 1$ mm。并且假设各种杂波的影响服从 0 均值,方差为 δ^2 高斯分布,则雷达的回波信号为

$$y(t) = x_r(t) + x_h(t) + z(t) = 2 \cos(2\pi f_r t) + \cos(2\pi f_h t) + z(t) \quad (13)$$

式中, $y(t)$ 为回波信号, $x_r(t)$ 为呼吸信号, $x_h(t)$ 为心跳信号, $z(t)$ 为服从 $N(0,1)$ 的高斯白噪声。

4.1 频域积累仿真实验

图 2 为 SNR=-10 dB 的回波信号进行不同次数的频域积累的仿真结果,表 1 为不同积累次数的性能比较。由表 1 可

可以看出,频域积累的方法可以有效地提高信噪比,在一定条件下积累的次数越多信噪比越高,对噪声的抑制效果越好,但是积累次数的增加也加大了计算机的运行时间,而且积累

次数达到一定程度之后,信噪比提高很缓慢,所以单纯地依靠增加积累次数提高信噪比不是一种好的方法,不适用于实时性要求较高的雷达系统。

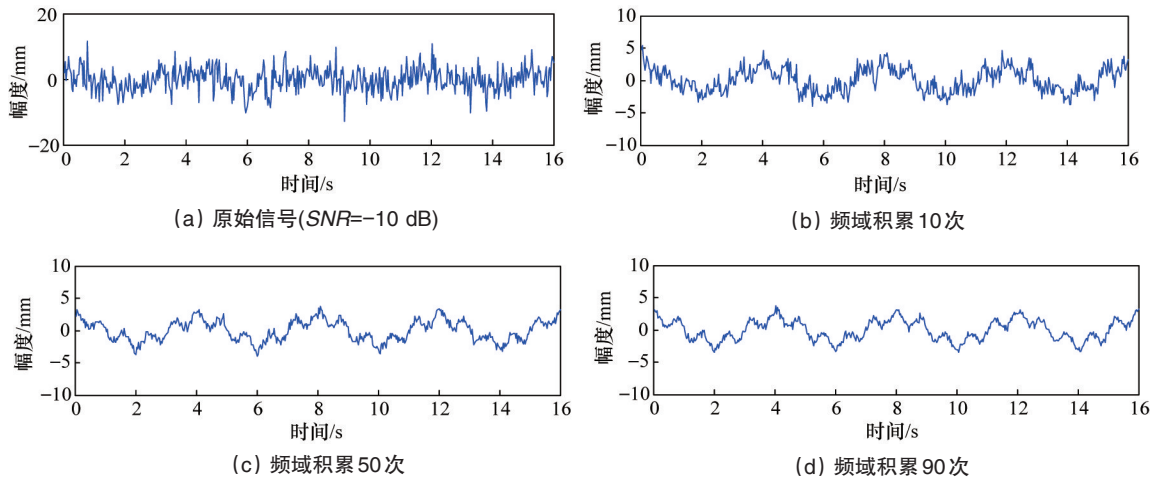


图2 不同次数的频域积累结果

Fig. 2 Results after different times of frequency domain cumulation

表1 不同次数频域积累的性能比较

Table 1 Comparison of the performance of frequency domain cumulation with different times

积累次数	运行时间/ms	信噪比/dB
10	2.331	4.4783
30	2.520	8.9412
50	4.379	10.7826
70	7.064	12.5413
90	8.820	13.9646

4.2 EMD去噪的仿真实验

图3~图5是采用EMD方法分别对信噪比为10,0和-10 dB的生命信号进行去噪的效果,去噪后的信噪比分别为 $SNR_1=14.9765$ dB, $SNR_2=6.4571$ dB, $SNR_3=1.0921$ dB,去噪后信号的信噪比得到不同程度的提高。由于EMD分解存在模态混叠问题,引起信号时频分布的偏移,在信噪比较低的情况下这一问题更加明显,因而当信噪比较高时用EMD方法去噪效果较好,当信噪比较低时用这种方法去噪达不到很好的去噪效果。

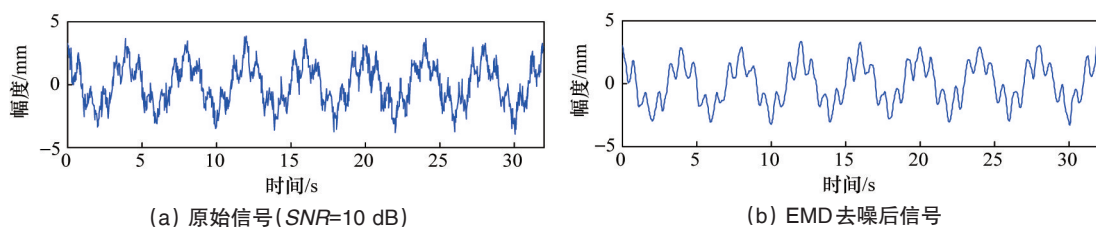


图3 原信号 SNR=10 dB 的EMD去噪结果

Fig. 3 EMD de-noising results of the original signal SNR=10 dB

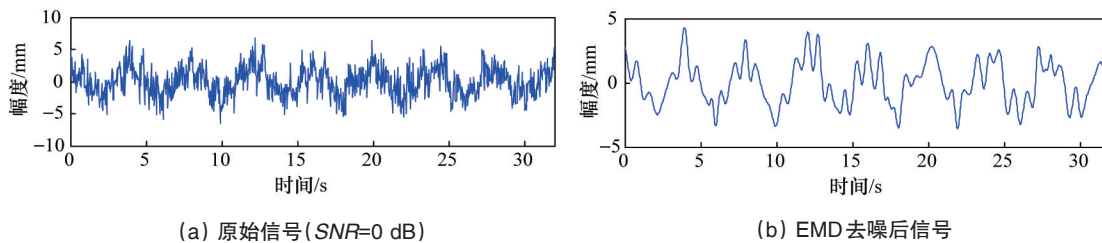


图4 原信号 SNR=0 dB 的EMD去噪结果

Fig. 4 EMD de-noising results of the original signal SNR=0 dB

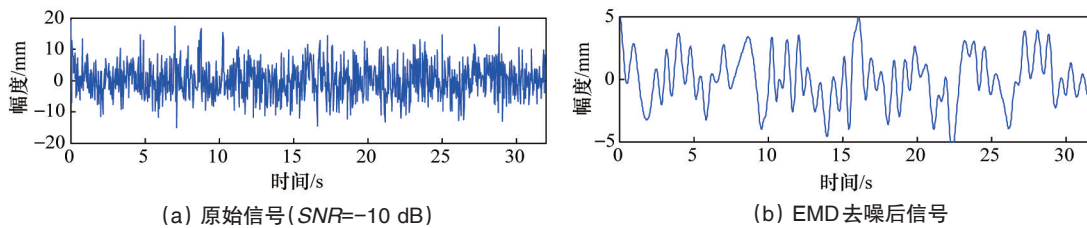


图5 原信号 $SNR=-10$ dB的EMD去噪结果

Fig. 5 EMD de-noising results of the original signal $SNR=-10$ dB

4.3 频域积分与EMD去噪相结合的去噪方法

由图6和图7可知,雷达回波信号在 -10 dB时心跳信号频谱几乎完全被噪声淹没,难以辨别心跳信号。通过频域积

累20次后,信号信噪比提高到 7.1244 dB,但此时的信号还含有大量高频噪声。然后利用EMD方法重构信号,信噪比提高到 13.4329 dB,此时心跳信号和呼吸信号可以清晰地辨别出来。

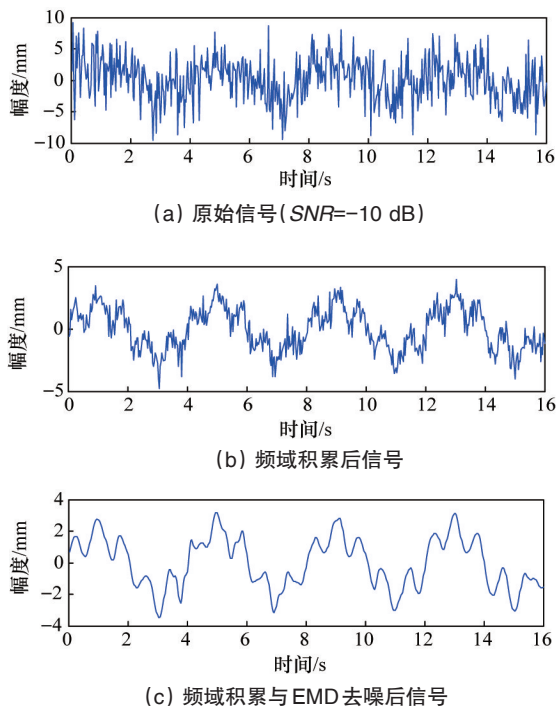


图6 本文去噪算法的时域结果

Fig. 6 Time domain results of the de-noising algorithm in this work

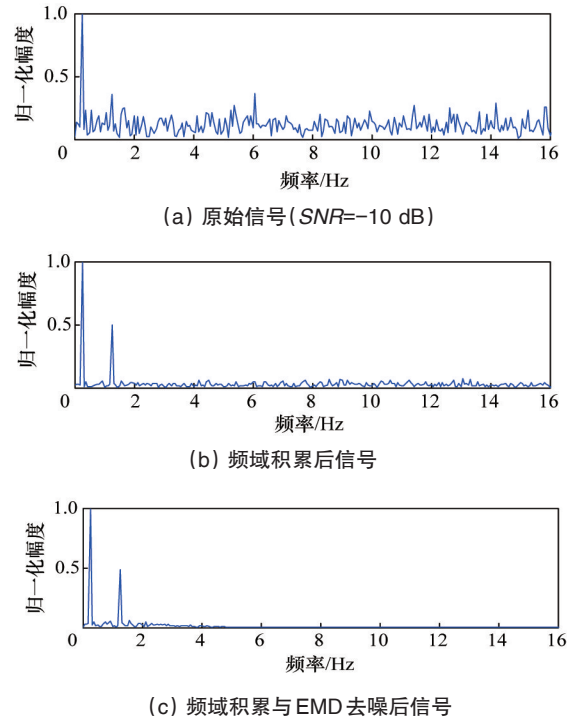


图7 本文去噪算法的频域结果

Fig. 7 Frequency domain results of the de-noising algorithm in this work

5 实验结果与分析

穿墙生命探测雷达的实验设备为实验室引进的美国劳雷工业有限公司的探地雷达系统SIR-20。实验场景:雷达天线距离墙 20 cm,墙体厚度 25 cm,人体站在墙体后面距离墙体 1.5 m处。雷达参数如下:天线的中心频率为 1 GHz,测程 15 ns,采用点数 1024 点,数据位数 16 位,扫描位数 64 ,重复频率 100 kHz。图8为实验场景图。

图9给出了雷达回波矩阵。可以看出,人体微动信号几乎被直达波和杂波信号掩盖,很难辨别人体的微动信号,需要过去去除直达波和杂波才能提取人体微动信号。



图8 实验场景

Fig. 8 Experiment scene

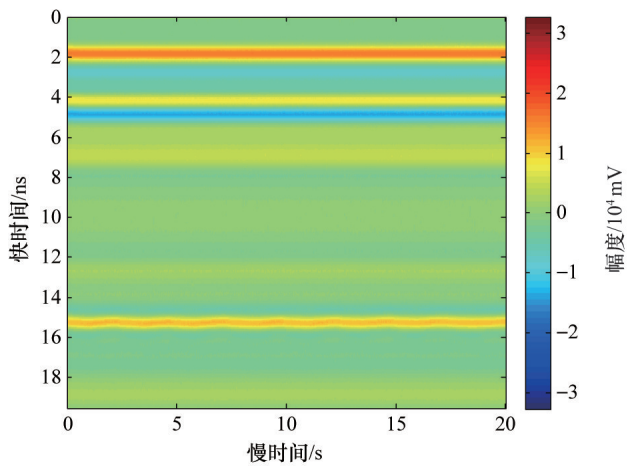


图9 雷达回波矩阵
Fig. 9 Radar echo matrix

图10(a)给出经过直达波去除和背景杂波去除后,提取出来的人体微动慢时间数据切片。可以看出,该信号的信噪比很低,无法看出信号中是否存在波动性,需要经过频域积累才能得到信噪比更高的信号。图10(b)给出了原始生命信号经过频域积累20次后的时域波形。由于人体微动信号是周期或者准周期的,而噪声和杂波信号是随机的,没有相关性,通过频域积累后,人体微动信号的谱线得到增强,而噪声和杂波信号的谱线均匀分布在整个频率范围内,增加缓慢,所以从图中可以看出信号的回波信噪比明显得到提高,回波

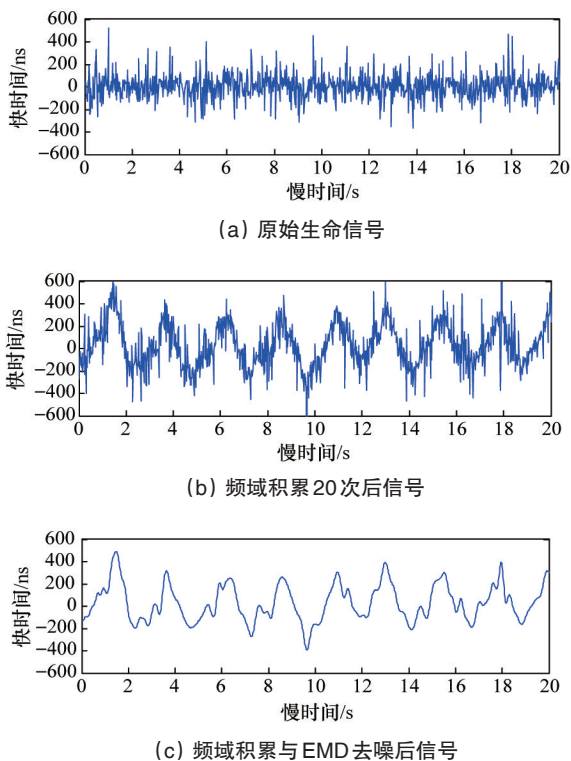


图10 雷达回波信号处理结果
Fig. 10 Results of radar echo signal processing

信号含有人体周期性的波动,但同时也含有较多的高频噪声。图10(c)给出了原始生命信号经过频域积累20次后再经过EMD去噪的信号波形,从波形可以看出信号的高频噪声被很好地去除,并且保留了信号中突变的成分,具有良好的细节分辨能力。这是由于频域积累之后回波信号的信噪比得到一定程度的提高,再利用EMD方法的自适应特性将回波信号分解为若干个IMF分量,然后将信号占主导的IMF分量与经过软阈值去噪得到的IMF分量进行重构回波信号,此时回波信号中大量噪声信号将被去除,仅保留人体微动信号。

图11给出了原始生命信号的频谱和信号经过频域积累与EMD去噪后信号的频谱,由于实测环境复杂,各种干扰信号较多,在原始信号频谱中很难看出人体的呼吸频率,经过本文方法处理后,可以明显看出人体呼吸的频率为0.4395 Hz。由于雷达分辨率达不到测心跳的要求,所以此处看不到心跳的频率。

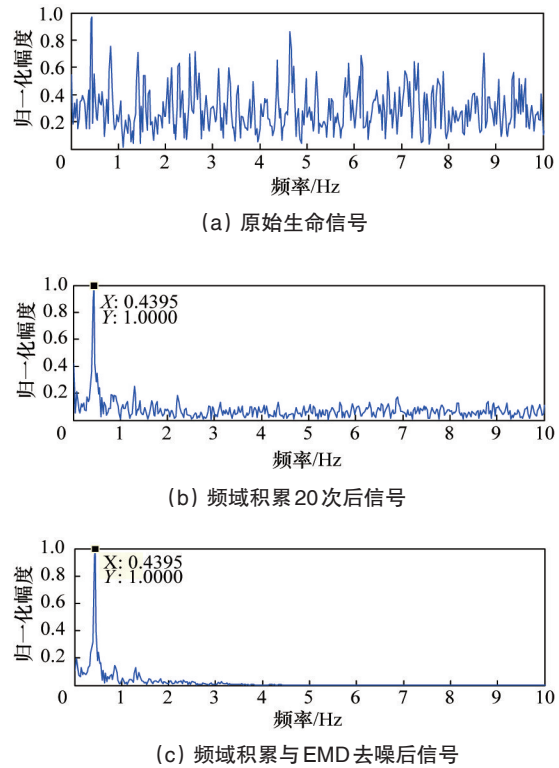


图11 信号频谱图对比

Fig. 11 Frequency spectrum comparison of signals

6 结论

针对超宽带雷达回波信号中人体生命信号与背景噪声相互重叠,使用传统滤波器无法有效检测人体微动信号的缺点,提出了一种频域积累与EMD去噪相结合的人体微动信号检测算法,首先利用频域积累将回波信号的信噪比提高,然后再利用EMD方法进行进一步的去噪处理。通过仿真和实验证明该方法既可以有效提高雷达回波信号的信噪比,又可

以改善单纯使用频域积累实时性不强的缺点,从而有效地检测出人体微动信号。因而该算法在雷达微动信号检测方面有很广的应用前景,可以用于非接触生命体的监测,以及抗震救灾的人体目标检测。但是目前该算法无法自动确定频域积累的次数,需要人工干预,不利于计算机进行自动检测,因而需要后续研究对其进行改进。

参考文献(References)

- [1] Li C, Cummings J, Lam J, et al. Radar remote monitoring of vital signs [J]. Microwave Magazine, IEEE, 2009, 10(1): 47-56.
- [2] Staderini E M. UWB radars in medicine[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2002, 17(1): 13-18.
- [3] 潘水洋, 吴晶, 李焯. 冲激超宽带雷达生命信号提取的新方法[J]. 微波学报, 2010, 26(6): 36-41.
Pan Shuiyang, Wu Jing, Li Ye. A new method for vital signal extraction in impulse-based UWB radar[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(6): 36-41.
- [4] 张洋, 王健琪, 荆西京, 等. HHT在生物雷达回波信号噪声抑制中的应用[J]. 医疗卫生装备, 2012, 33(5): 14-17.
Zhang Yang, Wang Jianqi, Jing Xijing, et al. Application of hilbert-huang transformation for noise suppression in ultra wideband bio-radar echo signal[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2012, 33(5): 14-17.
- [5] Boric-Lubecke O, Lubecke V M, Mostafanezhad I, et al. Doppler radar architectures and signal processing for heart rate extraction[J]. Mikrotalasna Revija, 2009, 15(2): 12-17.
- [6] 魏崇毓, 李玲娟, 朱卫娟. 一种弱信号检测新方法分析[J]. 现代电子技术, 2012, 35(5): 60-67.
Wei Chongyu, Li Lingjuan, Zhu Weijuan. Analysis of a new method for weak signal detection[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(5): 60-67.
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [8] Lai C P, Ruan Q, Narayanan R M. Hilbert-huang transform (HHT) analysis of human activities using through-wall noise radar[C]// International Symposium on Signals, Systems and Electronics, 2007 (ISSSE '07), Montreal, Canada, July 30-August 2, 2007: 115-118.
- [9] 倪安胜, 王健琪, 杨国胜, 等. 基于FFT频域积累的非接触生命参数信号检测[J]. 第四军医大学学报, 2003, 24(2): 172-175.
Ni Ansheng, Wang Jianqi, Yang Guosheng, et al. Non-contact life-parameters signal detecting of frequency domain signal integration based on FFT[J]. Journal of the Fourth Military Medical University, 2003, 24(2): 172-175.
- [10] Singleton R C. An algorithm for computing the mixed radix fast Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1969, 17(2): 93-103.
- [11] 张崇超, 张长春, 张群英. EEMD在超宽带雷达生命信号提取中的应用[J]. 电子测量技术, 2012, 35(4): 76-101.
Zhang Chongchao, Zhang Changchun, Zhang Qunying. Application of EEMD in vital signal detection for UWB radar[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(4): 76-101.
- [12] Wu Z H, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 460(2046): 1597-1611.
- [13] 张洋. 基于HHT的UWB生物雷达回波信号处理技术研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2012.
Zhang Yang. Application of HHT for noise suppression in radar echo signal[D]. Xi'an: The Fourth Military Medical University, 2012.
- [14] Donoho D L, Johnstone J M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.

(责任编辑 侯澄芝)

·学术动态·



2014中国科协夏季科学展将于7月12—18日举办

为展示年度最新科技成果,促进科学家与公众的互动交流,激发社会公众对科学的兴趣和热情,营造有利于科技创新的社会文化氛围,中国科协将举办2014夏季科学展。

时间:2014年7月12—19日

地点:中国科技馆

主办:中国科学技术协会

详见中国科协网 <http://zt.cast.org.cn/2014xjkxz/index.html>。