基于改进 EEMD 的穿墙雷达动目标微多普勒特性分析

王 宏[①] Narayanan R M[②] 周正欧[①] 李廷军[①] 孔令讲[①]
[①](电子科技大学电子工程学院 成都 610054)
[②](宾夕法尼亚州立大学电子工程系 宾州 16802)

摘 要：穿墙雷达动目标探测中人的心跳、呼吸、手臂摆动等运动的微多普勒信号是非线性、非平稳信号，可以采用经验模式分解(EMD)对其进行时频分析。由于 EMD 分解存在模式混合问题，该文提出一种改进的整体平均经验模式分解(EEMD)方法，并将其应用于穿墙雷达人的运动微多普勒特性分析中，并且对分解后的每个本征模式函数(IMF)进行 Hilbert-Huang 变换(HHT)，得到信号的时间-频率-能量谱。仿真数据和实验结果分析均表明，改进的 EEMD 方法不仅能够有效消除 EMD 中的模式混合问题，将人运动微多普勒信号中的不同频率尺度分解在不同的 IMF 中，而且还能够有效抑制原始信号中的噪声，提高信噪比，得到更精细、更清晰的时频分布。

关键词：穿墙雷达；经验模式分解；整体平均经验模式分解；Hilbert-Huang 变换；微多普勒特性
中图分类号：TN959.1 **文献标识码**： A **文章编号**：1009-5896(2010)06-1355-06
DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00899

Micro-Doppler Character Analysis of Moving Objects Using Through-Wall Radar Based on Improved EEMD

Wang Hong[①] Narayanan R M[②] Zhou Zheng-ou[①] Li Ting-jun[①] Kong Ling-jiang[①]
[①](*College of Electronic Engineering*, *University of Electronic Science and Technology of China*, *Chengdu* 610054, *China*)
[②](*Department of Electrical Engineering*, *Pennsylvania State University*, *University Park*, *PA* 16802, *USA*)

Abstract: The micro-Doppler signals of human's heartbeat, breathe and arm-moving using through-wall radar are nonlinear and non-stationary, which can be analyzed by Empirical Mode Decomposition (EMD). Due to the mode mixing problem in EMD, an improved Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) is proposed in this paper, and is applied to the human micro-Doppler character analysis of the through-wall radar. The time-frequency-energy spectrum is obtained by using Hilbert-Huang Transform (HHT) to every Intrinsic Mode Functions (IMF). The analysis on simulation data and experimental results show that the improved EEMD can effectively eliminate the mode mixing problem in EMD, which means different frequency scales in human's micro-Doppler signals are decomposed in different IMF. Furthermore, this method can restrain the noise in the original signal and more detail information can be seen clearly in the time-frequency spectrum.

Key words: Through-wall radar; Empirical Mode Decomposition (EMD); Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD); Hilbert-Huang Transform (HHT); Micro-Doppler character

1 引言

穿墙雷达动目标探测中，人体胸腔(呼吸和心跳时)、手臂等目标或目标组成部分相对雷达径向小幅运动时会产生微多普勒信号[1,2]，其属于非线性、非平稳信号，具有非常丰富的多普勒频移分量。微多普勒信号对时频分辨率有较高要求，因此传统的信号处理方法(例如 FFT)已不适合，需要采用新的更能体现信号时频细节特征的处理方法。目前对穿墙雷达动目标多普勒特性的研究已有很多报导[3–7]。其中文献[6]采用短时傅里叶变换(STFT)对人的 7 种不同运动模式进行了时频分析，并采用支撑向量机算法进行分类。文献[7]利用 EMD 对人运动多普勒特性进行了分析，通过对 STFT 和 EMD 两种方法的结果比较，表明 EMD 方法具有更高的频率分辨能力，更能体现信号时频分布的细节特征。

EMD 是 Huang 于 1998 年提出的一种新的自适应信号处理方法，能够很好地处理非线性、非平稳信号[8]。EMD 分解实质上是一组滤波过程，它将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解开来，产生一系列具有不同频率尺度的数据序列。每一个序列称为本征模式函数(IMF)，每个 IMF 体现了蕴含在原

2009-06-19 收到，2009-12-31 改回
国家自然科学基金(60802063)资助课题
通信作者：王宏 wanghong@uestc.edu.cn

信号中不同频率尺度的振荡特性。EMD 方法一经提出后，很快被用于雷达、超声、医学等不同领域的信号处理中[9−11]。随着研究的深入，发现 EMD 分解经常会出现模式混合问题。所谓模式混合是指一个 IMF 中包含有完全不同频率尺度的信号分量，或者相似频率尺度的信号分量出现在不同的 IMF 中，它是信号间歇性的表现。这种间歇性一般由信号中的干扰或噪声引起，不仅能造成信号时频分布的严重偏移，而且使每个 IMF 的物理意义变得不明确。为了解决模式混合问题，在对白噪声特性进行 EMD 分析的基础上[12]，一种改进的 EMD 方法 —— 整体平均经验模式分解(EEMD)方法被提出[13]。EEMD 是一种借助于噪声的数据分析方法，每次将不同的白噪声人为添加到被分析的信号中，并对添加了白噪声的信号进行 EMD 分解，共进行若干次，将所有分解获得的对应 IMF 分量求平均，得到最终的 IMF，作为被分析信号的基函数。经过整体平均后的 IMF 与只进行一次 EMD 分解的 IMF 相比，可以自动消除模式混合问题，使得物理意义更明确。因此 EEMD 是对 EMD 方法的较大改进，并已有一些应用[14,15]。

EEMD 方法能够消除模式混合问题，也能分离并抑制原始信号中噪声的高频成分，但噪声中的低频成分却混杂在相应频率的 IMF 分量中，不能被有效抑制。本文提出一种改进的 EEMD 方法，既能消除模式混合问题，又能有效抑制原始信号中噪声的高频与低频成分，并且将该方法用于穿墙雷达人呼吸和心跳时引起的胸腔运动、手臂摆动等不同运动模式的微多普勒特性分析中。通过对仿真实例和人不同运动微多普勒实测数据进行分析比较，证实了改进 EEMD 方法的优越性。

2 经验模式分解理论

2.1 EMD

EMD 是一种基于信号局部极值特征的自适应信号分析方法，它将任一时间信号 $x(t)$分解成一系列的 IMF，每个 IMF 满足以下两个条件：(1)信号极值的数目和零点的数目必须相等或最多相差一个；(2)在任意一点处，极大值包络和极小值包络的平均值为零。

EMD 是一种循环迭代算法，具体流程如下：

(1)分别找出信号中所有极大值点和极小值点，采用三次样条函数拟合成该数据序列的上、下包络线，上下包络线的均值为该数据序列的平均包络线 $m_1(t)$。

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

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \tag{1}$$

一般来讲$h_1(t)$仍然不是一个平稳数据序列，所以再将$h_1(t)$作为待处理的信号$x(t)$，重复步骤(1)，步骤(2)，直到满足判定条件 SD= $\sum_{t=0}^{T}\left[\frac{\left|h_{1(k-1)}(t)-h_{1k}(t)\right|^2}{h^2_{1(k-1)}(t)}\right]$。SD表示连续两次迭代结果的标准偏差，取值区间一般为[0.2, 0.3]。这样就得到了第1个IMF分量$C_1(t)=h_{1k}(t)$，k表示达到判定条件时的迭代次数。

(3)计算剩余值时间序列，得到一个去掉高频成分的差值数据序列$r_1(t)$

$$r_1(t) = x(t) - C_1(t) \tag{2}$$

(4)对 $r_1(t)$进行上述平稳化处理过程可以得到第 2 个 IMF 分量 $C_2(t)$，如此重复下去直到最后一个差值序列 $r_n(t)$为单调函数，不可再被分解为止，此时残余量 $r_n(t)$代表原始数据序列的均值或趋势。

Huang 将这一处理过程称为筛选过程。最后，原始的数据序列即可由这些 IMF 分量以及残余项 $r_n(t)$表示，即

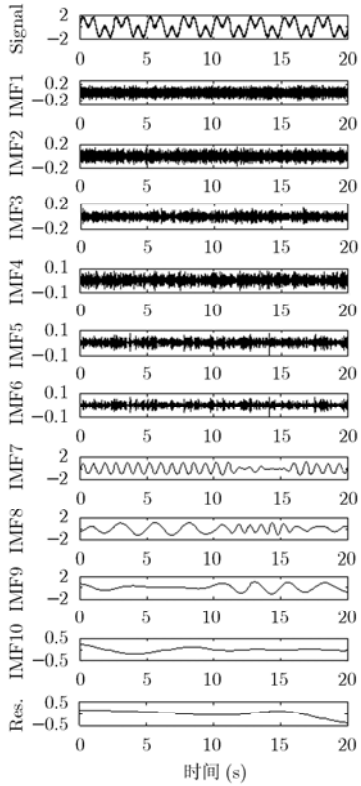
$$x(t) = \sum_{j=1}^{n} C_j(t) + r_n(t) \tag{3}$$

进行 EMD 分解的主要目的之一是进行 HHT 变换，进而得到 HHT 谱。基于 IMF 分量的 HHT 谱是一个时间、频率、能量的 3 维谱，与传统的时频分析方法(例如小波变换，STFT)相比，HHT 谱更能精确地反映信号的时频分布细节。对 IMF 分量 $C_j(t)$ 作 Hilbert 变换，得到一个复 IMF 分量 $Z_j(t) = C_j(t) + i\widetilde{C}_j(t) = a_j(t)e^{i\theta_j(t)}$，其中虚部 $\widetilde{C}_j(t)$ 是 $C_j(t)$ 的 Hilbert 变换。$a_j(t) = \sqrt{C_j^{\,2}(t) + \widetilde{C}_j^2(t)}$ 表示复 IMF 的振幅，$\theta_j(t) = \arctan\dfrac{\widetilde{C}_j(t)}{C_j(t)}$ 表示相位。定义瞬时频率 $\omega_j(t) = \dfrac{\mathrm{d}\theta_j(t)}{\mathrm{d}t}$，因此原始数据可以表示为

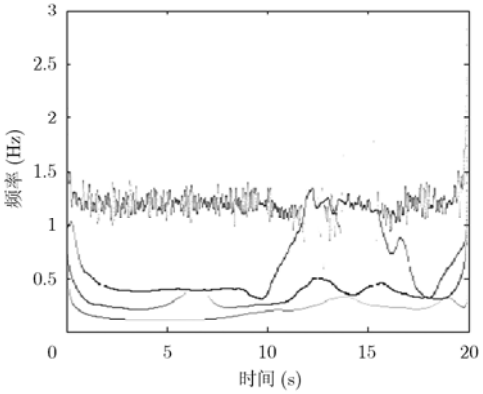
$$x(t) = \mathrm{Re}\sum_{j=1}^{n} a_j(t)e^{i\int \omega_j(t)\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中 $a_j(t)$ 和 $\omega_j(t)$ 不再是常数，而是时间的函数，所以HHT谱能够刻画一个数据序列在时间上的变化规律。

图 1 为两个正弦信号与噪声叠加的混合信号 EMD 分解的具体实例，两个正弦信号频率分别为 0.4 Hz 和 1.2 Hz，幅值均为 1，噪声幅度为信号标准均方差的 0.1 倍，采样率 f_{ad} 为 50 kHz，时间为 20 s。图 1(a)中 IMF1～IMF10 为分解的 10 个本征模式分量，Res.为残余项。其中 IMF1～IMF6 主要为



(a) 原始信号及其 IMF 分量



(b) HHT 变换时频图

图 1 有噪声信号 EMD 分解

高频噪声成分，1.2 Hz 的频率成分被分解到 IMF7 和 IMF8 中，而 0.4 Hz 的频率成分被分解到 IMF8 和 IMF9 中。说明当信号中混有一定强度的噪声时，采用 EMD 分解会造成模式混合问题，从而引起图 1(b)中 HHT 变换的时频分布出现严重失真。另外，在时频图上 1.2 Hz 处还出现较强的噪声干扰。

2.2 EEMD

为了解决模式混合问题，EEMD 方法被提出。EEMD 方法的流程如下：

(1)将一定强度的白噪声加到信号上。

(2)将添加了白噪声的信号进行 EMD 分解，得到所有的 IMF 分量。

(3)重复执行上述步骤(1)，步骤(2)，每次添加不同的白噪声序列，总共进行 M 次分解。

(4)对 M 次 EMD 分解得到的相应 IMF 求整体平均，将其作为原信号的最终 IMF。

$$\bar{C}_j(t)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}C_{jm}(t),\quad m=1,2,\cdots,M \tag{5}$$

EEMD 消除模式混合的本质在于：对于每次 EMD 分解，添加的白噪声在整个时频空间是均匀分布的，信号的不同频率尺度被自动投影到由白噪声所建立的均匀时频空间的相应频率尺度上。由于每次 EMD 分解添加不同的白噪声，噪声之间不相关，因此对所有 EMD 分解的相应 IMF 求整体平均后，人为添加的噪声被抵消掉。与一次 EMD 分解相比，EEMD 能够消除模式混合，使得 IMF 的物理意义更明确。采用 EEMD 方法需要考虑整体平均次数和添加噪声强度的选取问题，详细见文献[11]。

2.3 改进的 EEMD

EEMD 能够消除 EMD 中的模式混合问题，但是如果原始信号的信噪比很低，EEMD 对信号中的噪声抑制不理想，通过 EEMD 不能消除原始信号中的低频噪声。为了有效抑制原始信号中的噪声，对被测信号序列进行等间隔二次采样，得到一组采样率降低的信号序列，对这组信号序列分别人为添加白噪声后进行 EMD 分解，将获得的相应 IMF 求平均，作为原始信号的最终 IMF。其中添加的白噪声强度的选取与 EEMD 相同。

改进的 EEMD 算法流程为：

(1)将较高采样率的原始信号序列通过等间隔二次采样分解为 M 个新序列。

(2)将一定强度的白噪声添加到新序列中，每个序列添加不同的白噪声。

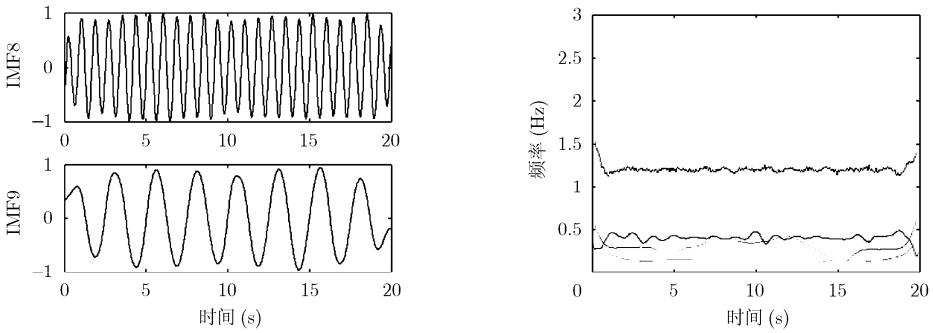
(3)将添加了白噪声的 M 个序列分别进行 EMD 分解。

(4)对每个序列 EMD 分解得到的相应 IMF 求整体平均，作为原始信号序列最终的 IMF。

二次采样是对原始离散采样数据进行等间隔抽

取，使得二次采样率降低，为原始采样率的 $1/M$。在二次采样率远大于信号频率情况下(后面仿真和实验中，原始采样率为 50 kHz，二次采样率为 50 kHz/50=1 kHz，信号频率<10 Hz)，二次采样对信号的影响很小，可以忽略。二次采样后每个信号序列自身含有的噪声不再相同，多次叠加能够相互抵消。所以，改进的 EEMD 不仅能够消除人为添加的白噪声，而且还能够消除原始信号自身含有的噪声。

图 2 是图 1 中的混合信号采用改进的 EEMD 分解的主要 IMF 分量及总的 HHT 变换时频图(整体平均次数 M=50)。从图 2(a)可以看出，1.2 Hz 和 0.4 Hz 频率分量被独立分解到 IMF8 和 IMF9 中，幅值均基本为 1，且连续出现在整个观察时间范围内，所以没有出现模式混合。从图 2(b)的时频图也可以看出信号中的两个频率被单独分离出来，并且 1.2 Hz 处的噪声与图 1(b)相比，得到有效抑制。所以，改进的 EEMD 方法不仅能够消除 EMD 中的模式混合问题，而且还能有效抑制原始信号中的噪声。



(a) IMF8 和 IMF9 分量　　(b) HHT 变换时频图

图 2 有噪声信号改进的 EEMD 分解

3 实验结果分析

墙后人体运动多普勒特性的探测功能被集成在超宽带噪声穿墙雷达中[16]，该雷达不仅能够对墙后目标进行隐蔽探测与成像，而且可以用来测量人运动的多普勒信息，多普勒探测原理框图如图 3 所示。压控振荡器 VCO 产生 750 MHz 的单频连续波信号，通过功分器后一路经发射天线辐射出去，另一路与含有多普勒频移信息的接收信号进行混频，将混频后的信号进行低通滤波，获得多普勒频移。在实验中使用 Agilent DSO80804B 数字示波器对多普勒频移信号进行 AD 采样，采样率为 50 kHz，每次测量都连续采样 20 s。

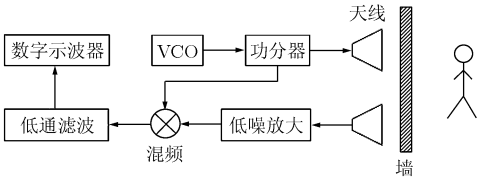


图 3 多普勒测量原理框图

图 4 给出了人面向墙静止站立时呼吸和心跳引起胸腔运动的微多普勒分析结果。图 4(a)为时域信号波形，由于人的呼吸和心跳都比较微弱，因此被测信号的信噪比很低(在条件允许情况下，可通过提高信号源功率来提高信噪比)，这种情况下 EMD 分解一般不会出现模式混合问题。图 4(b)–4(d)分别为采用 EMD，EEMD 和改进的 EEMD 3 种分解方法得到的 HHT 谱，其中 EEMD 和改进的 EEMD 整体平均次数 M 均为 50(整体平均次数再增加对结果没有太大改善，后面处理中整体平均次数均为 50)，两种方法中人为添加白噪声幅度均为被测信号标准均方差的 0.2 倍。比较 3 种方法的 HHT 谱可以看出 EMD 和 EEMD 分解的 HHT 谱受噪声污染比较严重，而改进的 EEMD 分解得到的 HHT 谱对噪声抑制作用明显，HHT 谱背景比较干净。由于呼吸相对心跳而言频率较低，引起的胸腔振动幅度略大，因此在 HHT 谱中的能量也较强，颜色较深，如图 4(d)所示。

图 5 为人面向墙站立，单臂前后摆动时(基本匀速)的微多普勒分析结果。人手臂摆动时手臂各处线速度不同，因此包含丰富的微多普勒频移信息。图 5(a)给出 EMD 分解后的部分 IMF 及其 HHT 变换，可以看出 IMF8 的频率成分主要分布在 2~4 Hz 之间，IMF9 的频率成分主要分布在 1~3 Hz 之间，2~3 Hz 频率成分既出现在 IMF8 中又出现在 IMF9 中，即存在模式混合。图 5(b)是 EMD 分解的所有 IMF 的 HHT 变换时频谱。图 5(c)是改进的 EEMD 分解后的部分 IMF 及其 HHT 变换，IMF8 的频率成分主要分布在 2~4 Hz 之间，IMF9 的频率成分主要分

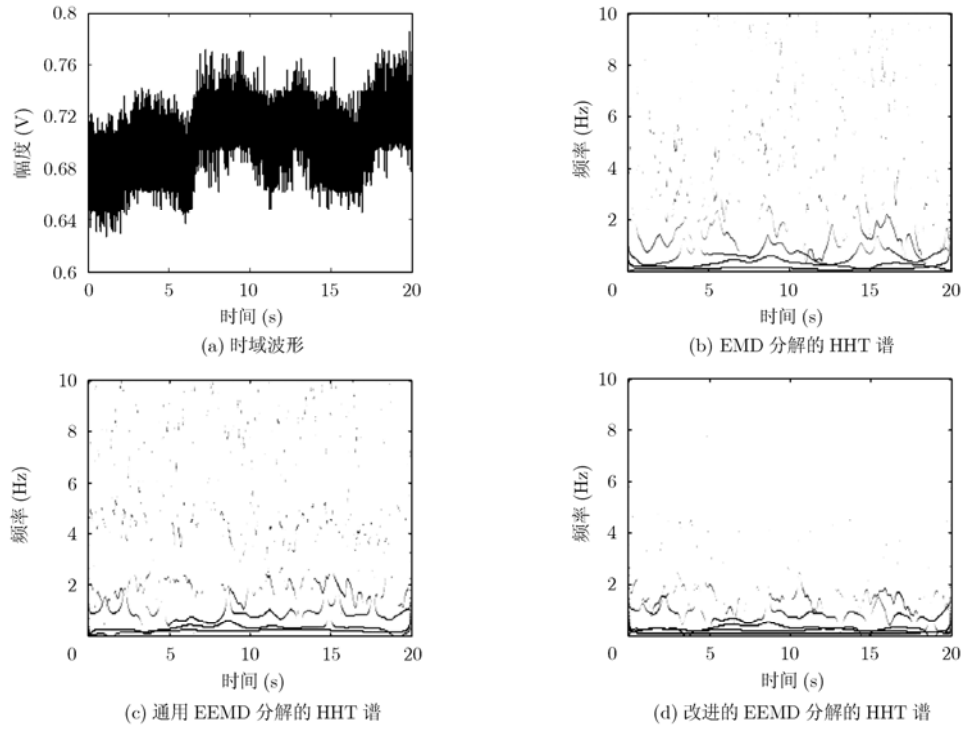


图 4 人静止站立时多普勒分析

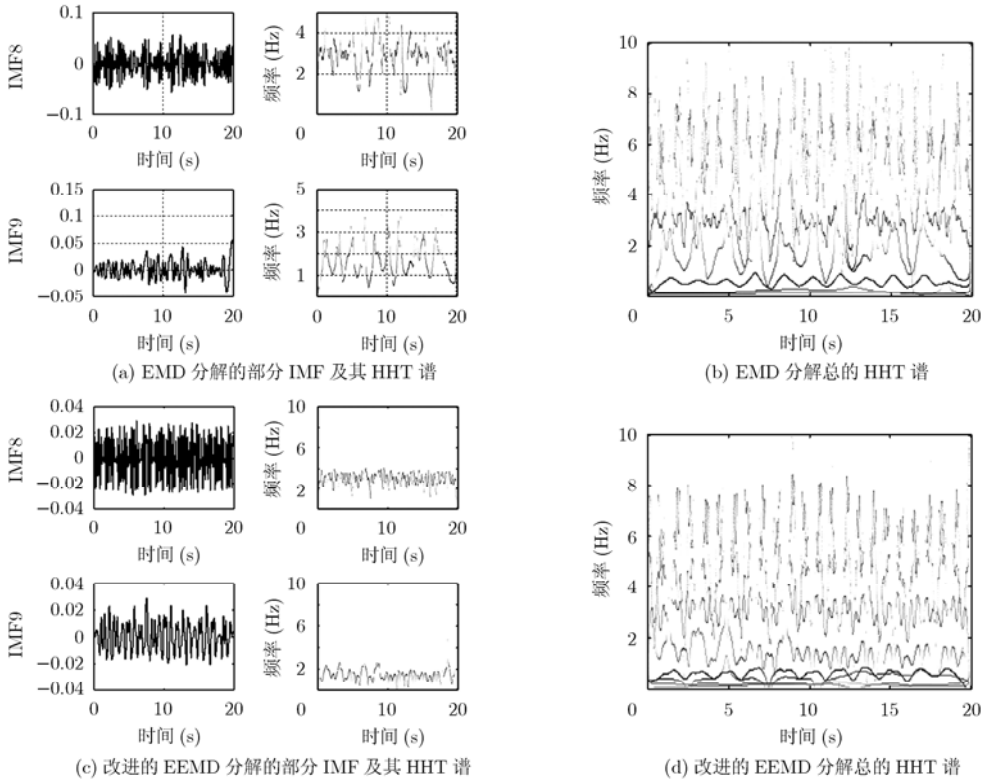


图 5 单臂前后摆动多普勒分析

布在 1~2 Hz 之间，两个 IMF 之间基本没有发生频率重叠，不同的频带范围被分解在不同的 IMF 中，因此不存在模式混合。图 5(d)为改进的 EEMD 分解的所有 IMF 的 HHT 谱，从中可以看出频带之间相互分离，与图 5(b)相比，更能清晰反映手臂摆动各处的微多普勒频移细节。

4 结束语

由于 EMD 分解存在模式混合问题，并且 EEMD 对信号中的噪声抑制作用不明显，因此本文提出了一种改进的 EEMD 方法。将该方法应用到穿墙雷达人的运动微多普勒特性分析中，并通过 HHT 变换得到微多普勒信号的时间-频率-能量谱。仿真数据和实验结果分析均表明，针对人运动微多普勒特性分析这类信号频率较低，噪声频率较高的情况，改进的 EEMD 方法不仅能够有效消除模式混合问题，将被测信号中体现不同运动细节的多普勒频移成分独立分解在不同的 IMF 中，而且还能够有效抑制原信号中的噪声，提高信噪比，得到更清晰的时频分布，有利于不同运动模式的识别。

参 考 文 献

[1] Chen V C, Li F Y, and Ho S S. Micro-Doppler effect in Radar-phenomenon, model and simulation study [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,* 2006, 42(1): 2–21.

[2] 陈行勇, 刘永祥, 黎湘, 等. 微多普勒分析和参数估计[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 360–363.
Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, and Li Xiang, *et al.*. Analysis of micro-Doppler and parameters estimation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 25(5): 360–363.

[3] Nag S, Barnes M A, Payment T, and Holladay G. Ultrawide-band through-wall radar for detecting the motion of people in real time [J]. *Proceedings of SPIE*: *Radar Senior Technology Data Visualization*, 2002, 2744(48): 48–57.

[4] Ram S S, Li Y, Lin A, and Ling H. Doppler-based detection and tracking of humans in indoor environments [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2008, 345(6): 679–699.

[5] Ram S S and Ling H. Through-wall tracking of human movers using joint Doppler and array processing [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 537–541.

[6] Kim Y and Ling H. Human activity classification based on micro-Doppler signatures using a support vector machine [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1328–1337.

[7] Lai C P, Narayanan R M, and Ruan Q, *et al.*. Hilbert-Huang Transform (HHT) analysis of human activities using through-wall noise and noise-like radar [J]. *IET Radar*, *Sonar*, *and Navigation*, 2008, 2(4): 244–255.

[8] Huang N E, Shen Z, and 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 A*, 1998, 454(1971): 903–995.

[9] 韩春明, 郭华东, 王长林, 等. 一种改进的SAR图像斑点噪声滤波方法 [J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 121–127.
Han Chun-ming, Guo Hua-dong, and Wang Chang-lin, *et al.*. An enhanced SAR image speckle filter [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(2): 121–127.

[10] Li L and Ji H B. Signal feature extraction based on an improved EMD method [J]. *Measurement*, 2009, 42(5): 796–803.

[11] Tsui P H, Chang C C, and Chang C C, *et al.*. An adaptive threshold filter for ultrasound signal rejection [J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(4): 413–418.

[12] Wu Z H and Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2004, 460(2046): 1597–1611.

[13] Wu Z H and Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1: 1–41.

[14] Lei Y G, He Z J, and Zi Y Y. Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(4): 1327–1338.

[15] Ahmad F, Amin M G, and Kassam S A. Signal extraction using ensemble empirical mode decomposition and sparsity in pipeline magnetic flux leakage nondestructive evaluation [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(2): 025105.

[16] Lai C P, Narayanan R M, and Culkowksi G. Through wall surveillance using ultrawideband random noise radar [C]. Proceedings of the 25th Army Science Conference, Orlando, FL, 2006: 1–11.

王 宏： 女，1975 年生，讲师，在职博士生，研究方向为雷达信号处理.

Narayanan R M： 男，教授，研究方向为高分辨率雷达系统设计、遥感成像、噪声雷达、保密通信等.

周正欧： 男，1940年生，教授，博士生导师，研究方向为探地雷达系统设计与信号处理、穿墙雷达系统及成像算法、数字通信等.

李廷军： 男，1975年生，讲师，博士，研究方向为雷达信号处理.

孔令讲： 男，1974年生，副教授，博士，研究方向为雷达信号处理.