

引用格式:朱绍程,刘利民.低空目标声信号去噪方法研究[J].电光与控制,2018,25(7):63-67. ZHU S C, LIU L M. Research on denoising method of low-altitude target acoustic signal[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7):63-67.

低空目标声信号去噪方法研究

朱绍程, 刘利民

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

摘要: 声目标探测识别是目前弥补雷达低空探测不足的重要方法。采集到的声信号通常含有大量环境噪声,如何在去除噪声的同时尽可能多地保留有效信号是该领域的一个难点。针对低空战场环境噪声的特点,提出基于改进阈值经验模式分解的去噪方法。首先对信号进行经验模式分解,然后对实际能量大于噪声能量的固有模式函数进行阈值处理,最后将处理后的固有模式函数进行重构得到去噪信号。为了验证该算法的性能,对直升机声信号加入不同信噪比的典型低空环境噪声进行去噪,并与其他去噪方法进行比较,采用信噪比、均方根误差和平滑度指标进行定量分析。仿真结果表明,该算法对大部分低空环境噪声有良好的去除效果。

关键词: 声目标; 目标探测与识别; 低空环境噪声; 经验模式分解; 去噪; 声信号

中图分类号: V271.4; O213.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.07.013

Research on Denoising Method of Low-altitude Target Acoustic Signal

ZHU Shao-cheng, LIU Li-min

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The detection and recognition of acoustic target is an important method to compensate for the weakness of radar in low-altitude detection. How to eliminate the noise mixed in the acoustic signal and to retain the useful information as much as possible is still a challenging problem. Inspired by the wavelet threshold, and according to the characteristics of low-altitude battlefield ambient noise, we proposed a new denoising method based on threshold Empirical Mode Decomposition (EMD). Firstly, the signal is decomposed by EMD to obtain the Intrinsic Mode Functions (IMFs). Then, threshold processing is made to the IMFs whose actual energy exceeds the estimated energy. Finally, the processed IMFs are reconstructed to obtain the denoised signal. To evaluate the performance of the proposed method, a simulation is performed using helicopter sound signal corrupted with typical low-level ambient noise under different signal-to-noise ratios. The performance is evaluated in terms of SNR, Root Mean Square Error (RMSE), and smoothness index, and a comparison is made with those of the previous denoising methods. The simulation results show that the proposed method is effective in eliminating most low-altitude ambient noise.

Key words: acoustic target; target detection and recognition; low-altitude ambient noise; EMD; denoising; acoustic signal

0 引言

声音是低空飞行目标识别的一个重要特征,对飞机声信号的研究有利于提高目标识别的准确性、稳健性以及可靠性,弥补雷达对低空探测的不足,为作战决

策提供重要依据。战场环境中采集到的飞机声信号常常有噪声,影响后续识别。为了去除噪声且尽可能多地保留有用信息,必须对声音增强。小波变换^[1]是声信号去噪算法中运用最广泛的非参数方法之一。但小波去噪方法的去噪性能和参数的选取有很大关系,目前尚没有较好的参数选取标准,只能通过多次实验,选取去噪性能较好的参数,自适应性不强且效果不佳。HUANG等提出的经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)^[2-3]克服了小波变换中参数选取困难的问题,

收稿日期:2017-06-22

修回日期:2017-08-24

基金项目:2015年军内科研项目

作者简介:朱绍程(1993—),男,四川会理人,硕士生,研究方向为目标探测与识别,声信号处理。

EMD 是一种相对较新的非线性非平稳的信号分析方法,从原始信号中自适应地得到基函数是其最大优点,自提出以来就吸引了全球许多研究人员的重视并运用于去噪领域。但在低空运用 EMD 去除环境噪声仍具有一定挑战性。文献[4]受小波阈值去噪启发,提出阈值 EMD 去噪方法。本文在此基础上,运用改进阈值函数的 EMD 方法去除低空环境噪声。为了验证本文提出方法的有效性,对纯净的飞机声信号加入不同类型的噪声干扰,输入信噪比从 -10 ~ 10 dB,同时使用 3 个评价标准:信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)和平滑度指标进行定量评价,仿真结果表明该算法具有良好的去噪性能。

1 基本原理

1.1 EMD 算法

EMD 能自适应地将信号 $x(n)$ 分解成 L 个零均值的固有模式函数(Intrinsic Mode Functions, IMFs) $h^{(i)}(n)$ ($1 \leq n \leq L$) 和一个残余分量,即

$$x(n) = \sum_{n=1}^L h^{(i)}(n) + r(n) \quad (1)$$

式中: $r(n)$ 是非零均值的残余分量,是常量或者单调函数,体现了信号的变化趋势。第 i 个 IMF 由式(2)中信号的残余分量迭代得出,迭代的过程称为筛选,即

$$x^{(i)}(n) = \begin{cases} x(n) & i = 1 \\ x(n) - \sum_{j=1}^{i-1} h^{(j)}(n) & i \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x^{(i)}(n)$ 为第 i 次筛选的残余分量,作为第 $i+1$ 次筛选的输入。对于计算每个 IMF 的迭代中间产生的临时 IMF $h_n^{(i)}(n)$,可由图 1 所示的经验模式分解流程得到。

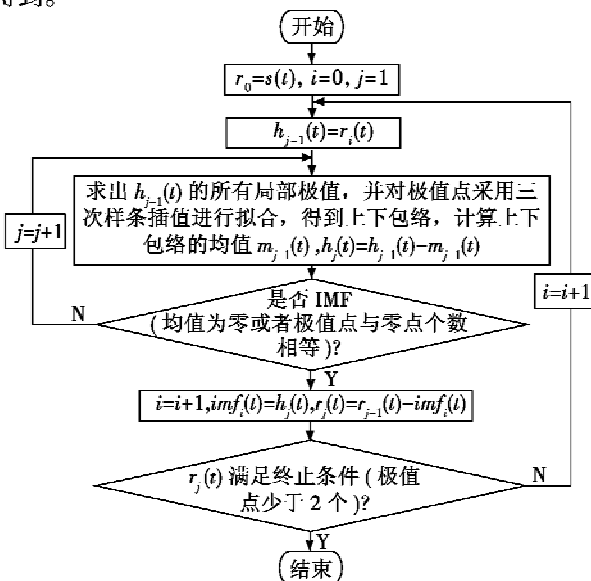


图 1 经验模式分解流程图

Fig. 1 The flow chart of empirical mode decomposition

1.2 去噪模型

信号通过信道传输并接受的过程可以用图 2 所示的模型表示^[5]。

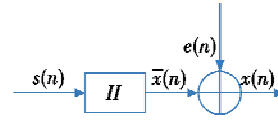


图 2 信号接收模型

Fig. 2 The model of signal reception

声源产生的信号 $s(n)$, 经过系统 H 变为 $\bar{x}(n)$, 在信道传输和信宿接收过程中, 受到噪声 $e(n)$ 的影响, 接收到的含噪信号可表示为

$$x(n) = \bar{x}(n) + e(n) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

小波变换在非参数去噪领域是经典方法, 鉴于小波变换的阈值选取的非适应性, 本文提出应用新的基于阈值 EMD 去噪的方法。EMD 去噪的核心是通过比较 IMF 的实际能量 E_i 和噪声能量 V_i ^[6] 来分析利用哪几个 IMF 进行信号重构。若 $E_i > V_i$, 即该 IMF 的实际能量大于噪声能量, 则认为该 IMF 主要含有有用信息成分; 否则, 主要含有噪声成分。利用主要含有有用信息的 IMF 进行重构则达到了信号去噪的目的。IMF 的实际能量可由式(4)计算得出, 噪声的能量可以近似地用式(5)计算得出^[4,7-9], 即

$$E_i = (\sum_{n=1}^N h^{(i)}(n)) / N \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (4)$$

$$V_i = \frac{E_1}{0.719} 2 \cdot 01^{-i} \quad i = 2, 3, \dots, L \quad (5)$$

图 3 表示含有 5 dB 高斯白噪声的 Piece-Regular 信号经 EMD 分解, 自适应地分解出的 8 个 IMFs 和 $r(n)$ 的实际能量与噪声能量的对比。从图 3 中可看出, IMF4 ~ IMF9, $r(n)$ 主要含有有用信息, 利用它们进行信号重构, 将信噪比从 5 dB 提高到 9.107 6 dB, 显然该方法能够有效地将噪声与有用信号分离开。

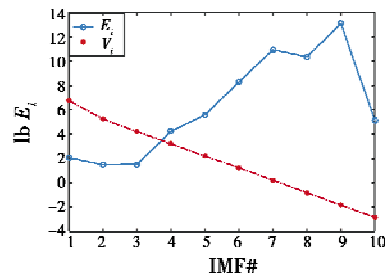


图 3 IMFs 实际能量与噪声能量对比

Fig. 3 Actual energy vs estimated energy of IMFs

然而, 由于实际战场中环境噪声复杂, 在主要含有有用信息成分的 IMFs 中仍然含有能量较低的噪声成分。受小波阈值去噪的启发, 本文提出基于阈值 EMD 的去噪方法。由于 IMF 具有零均值的特性, 在任意由

相邻零点构成的区间 $z_j^{(i)} = [z_j^{(i)}, z_{j+1}^{(i)}]$ 的 IMF_s 能量较低,因此根据区间 $z_j^{(i)}$ 中的极值 $h^{(i)}(r_j^{(i)})$ 计算阈值。若在区间 $z_j^{(i)}$ 中只存在噪声成分,则对应的 $h^{(i)}(r_j^{(i)})$ 的绝对幅度将低于阈值;反之,区间存在较强的有用信号成分,则对应的 $h^{(i)}(r_j^{(i)})$ 的绝对幅度将超过阈值。由于信号与噪声具有相同带宽,因此在 $E_i > V_i$ 的 IMF_s 中运用阈值,将有效去除噪声。于是根据小波阈值提出基于区间 EMD 的硬阈值函数^[10]为

$$\tilde{h}^{(i)}(z_j^{(i)}) = \begin{cases} h^{(i)}(z_j^{(i)}) & |h^{(i)}(r_j^{(i)})| > T_i \\ 0 & |h^{(i)}(r_j^{(i)})| \leq T_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: $j=1,2,\dots,N_i^{(i)}$; $h^{(i)}(z_j^{(i)})$ 表示第 i 个 IMF 在区间 $[z_j^{(i)}, z_{j+1}^{(i)}]$ 的取值, EMD 阈值的算式根据 DONOHO 提出的阈值确定模型做如下改进^[11],即

$$T_i = \sigma \sqrt{V_i \ln N(i)} \quad i=1,2,\dots,L \quad (7)$$

式中: σ 是信号标准差; V_i 是噪声能量,根据式(5)计算得出; $N(i)$ 是信号长度。根据式(6),若区间极值小于阈值,则该区间不含有用信号,将会被置为零,但是会导致 Gibbs 效应,信号平滑度受严重影响。为了弥补上述不足,结合小波软阈值改进上述阈值,构造如下改进阈值函数

$$\tilde{h}^{(i)}(z_j^{(i)}) = \begin{cases} h^{(i)}(z_j^{(i)}) \left(\frac{|h^{(i)}(r_j^{(i)})| - \frac{T_i}{(e^{|h^{(i)}(r_j^{(i)})|} - T_i)}}{|h^{(i)}(r_j^{(i)})|} \right) & |h^{(i)}(r_j^{(i)})| > T_i \\ 0 & |h^{(i)}(r_j^{(i)})| \leq T_i \end{cases} \quad (8)$$

最终,采用改进阈值函数对实际能量大于噪声能量的 IMF_s 重构信号,得到去除噪声的信号为

$$y(n) = \sum_{i=m}^n \tilde{h}^{(i)}(n) \quad (9)$$

含 5 dB 高斯白噪声的 Piece-Regular 信号经区间改进阈值 EMD 去噪的结果,在 IMF_s 部分重构信号去噪的基础上,信噪比提高了 10.8097 dB,如图 4 所示。

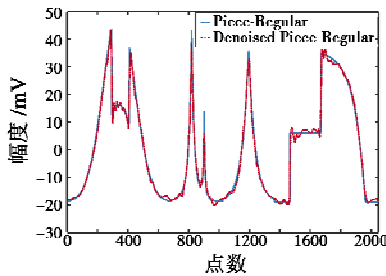


图4 改进阈值 EMD 去噪信号

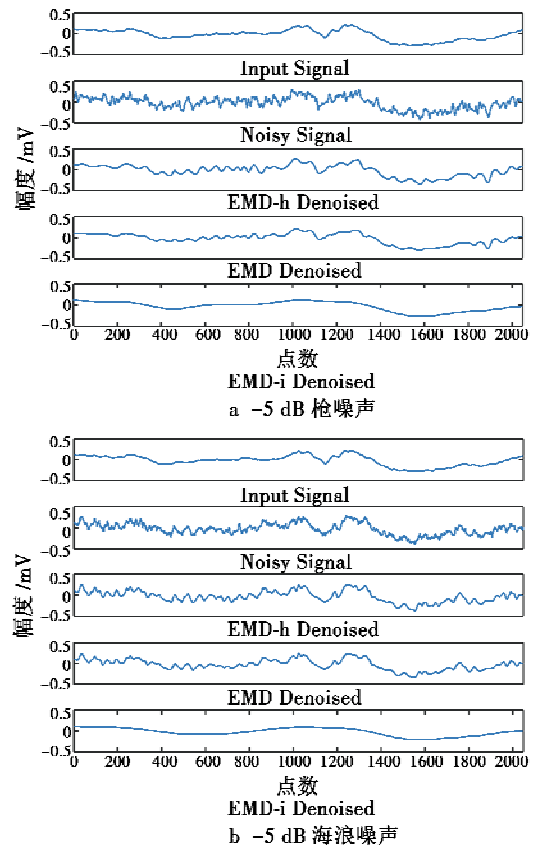
Fig.4 Signal denoised by improved threshold EMD

2 仿真与结果分析

为了验证本文提出方法的性能,采用 Freesound 数

据库的直升机声信号,采样率为 44.100 kHz,信号长度为 2048。为了模拟实际战场噪声环境,将测试声音分别与不同环境噪声按不同信噪比合成。实验所用的枪噪声、海浪噪声、风噪声均为实地采集,高斯白噪声由噪声发生器生成。为了验证改进阈值 EMD(EMD-i)的去噪性能,本文以相同的数据用文献[3]中的方法(EMD)和文献[4]的硬阈值(EMD-h)去噪方法进行比较。

首先从视觉上观察去噪效果,如图 5 所示,展示了输入纯净的飞机声信号,添加 -5 dB 噪声后的信号,利用文献[3]的 EMD、文献[4]的 EMD-h 和本文 EMD-i 3 种方法去噪的对比。图 5a 加入的噪声为 -5 dB 枪噪声,图 5b 加入的噪声为 -5 dB 海浪噪声,图 5c 加入的噪声为 -5 dB 风噪声,图 5d 加入的噪声为 -5 dB 高斯白噪声。比较 3 种去噪算法的性能,本文改进阈值 EMD 去噪性能明显优于其他 2 种算法,经过 EMD-i 去噪后的信号与纯净信号具有同等的光滑性和相似性,图 5d 中文献[3]方法对高斯白噪声的去噪性能较好,是因为经过改进的阈值综合了信噪比和平滑度这 2 个指标,去噪性能的评价指标是由多个因素共同组成,结合多种指标来说,本文方法的性能最优。文献[3]的 EMD 去噪性能比文献[4]的 EMD-h 去噪性能稍好,主要表现在对高斯白噪声的去噪,但是 EMD-h 去噪过后对信号的平滑度影响较大,造成 Gibbs 效应,甚至失真。



EMD-i Denoised
b -5 dB 海浪噪声

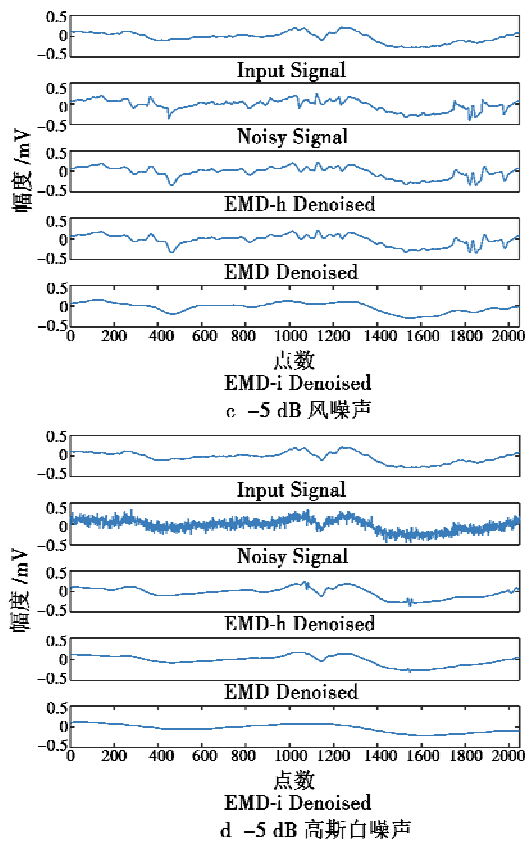


图5 直升机声信号去噪性能比较

Fig.5 Performance of different methods for helicopter sound signal denoising

表1 直升机声信号去噪性能比较

Table 1 Performance of denoising methods for helicopter sound signal

噪声类型	输入 SNR/dB	SNR/dB			RMSE			r/%		
		EMD-h	EMD	EMD-i	EMD-h	EMD	EMD-i	EMD-h	EMD	EMD-i
枪	-10	3.6640	3.5100	6.8014	0.0510	0.0543	0.0031	11.5155	8.3400	17.2013
	-5	4.4167	4.8156	7.4444	0.0161	0.0176	0.0101	11.4070	8.2727	16.5814
	0	6.2114	6.0159	9.2188	0.0051	0.0062	0.0032	11.4729	8.3576	16.7153
	5	9.4866	9.5630	12.8837	0.0016	0.0017	0.0009	12.7262	9.1612	18.9981
	10	13.4110	12.9956	17.1216	0.0005	0.0008	0.0002	13.9931	10.4979	20.9355
海浪	-10	8.9337	8.5696	10.7103	0.0145	0.0308	0.0122	9.0831	4.0119	6.9535
	-5	9.5594	9.5678	11.3662	0.0053	0.0074	0.0038	9.0681	4.0360	7.0601
	0	11.2672	10.1259	13.1098	0.0051	0.0035	0.0012	9.2847	4.4096	7.2378
	5	14.4307	13.9875	16.4191	0.0004	0.0006	0.0003	9.9345	4.7896	8.0229
	10	18.8170	18.4593	20.8127	0.0001	0.0003	0.00004	12.0508	7.1586	9.9153
风	-10	8.7072	8.7896	13.4418	0.0157	0.0164	0.0066	27.7504	24.8965	28.4165
	-5	9.1598	9.2129	14.8090	0.0053	0.0062	0.0018	22.4645	20.7896	27.7125
	0	11.1363	11.1132	15.8880	0.0016	0.0019	0.0006	25.0900	21.7853	29.1639
	5	14.4038	14.4256	19.9432	0.0005	0.00035	0.0001	26.4899	23.5894	27.8061
	10	17.1546	17.1789	22.7620	0.00025	0.00021	0.00006	24.5324	23.7412	29.8746
高斯白噪声	-10	3.3389	5.1236	7.3030	0.1164	0.1137	0.1121	0.0003	0.0004	0.0001
	-5	4.1642	6.7895	8.0513	0.0362	0.0368	0.0034	0.0424	0.0005	0.0006
	0	5.8935	8.7513	9.7409	0.0114	0.0119	0.0115	0.0100	0.0028	0.0029
	5	10.9928	10.4278	12.0396	0.0036	0.0041	0.0035	0.0035	0.0189	0.0146
	10	15.3308	15.8974	17.2441	0.0011	0.0012	0.0010	0.1604	0.0475	0.0577

为了更进一步验证本文提出算法的去噪性能,对纯净飞机声信号分别加入 -10 dB, -5 dB, 0 dB, 5 dB 和 10 dB 的不同噪声,对比 EMD, EMD-h 和 EMD-i 的去噪性能,采用 SNR, RMSE 和 r 来定量地分析算法的去噪性能。SNR 为信号与噪声能量的比值,用 dB 表示,去噪后 SNR 越高,有用信息所占的比重越大,去噪效果越好;RMSE 为去噪前后信号的标准差,用来衡量观测值与真值之间的偏差也即信号的相似度, RMSE 越小,去噪前后的信号相似度越高,去噪效果越好; r 为去噪后信号与去噪前信号的逐差的方差之比, r 越小,去噪后信号曲线越平滑,去噪效果越佳,算式如下。

$$R_{s,N} = 10 \lg \left| \frac{\sum_{n=1}^N x^2(n)}{\sum_{n=1}^N (y(n) - x(n))^2} \right| \quad (10)$$

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (y(n) - x(n))^2}{N}} \quad (11)$$

$$r = \frac{\sum_{n=1}^N (y(n+1) - y(n))^2}{\sum_{n=1}^N (x(n+1) - x(n))^2} \quad (12)$$

式中: $x(n)$ 为原始信号; $y(n)$ 为去噪信号。

经过多次仿真运行,得到直升机声信号去噪后的 SNR, RMSE, r 值如表 1 所示。

表1中加粗的数值表示在相同条件下,性能最优的去噪算法。从表1可知,改进后的阈值EMD(EMD-i)去噪对于上述4类典型低空环境噪声的去噪效果总体最佳,具有较大的SNR和较小的RMSE。比如对于输入信噪比为0 dB的海浪噪声,改进阈值EMD去噪后的SNR为13.1098 dB, RMSE为0.0012,而EMD-h(EMD)去噪后的SNR为11.2672(10.1259)dB, RMSE为0.0051(0.0035), r 为9.2847%(4.4096%)。对于去噪后信号的平滑度,EMD去噪占优势,从阈值函数可以看出,改进阈值的性能是综合硬阈值与软阈值的优点,但也难免保留其缺点,改进阈值函数对于信号的平滑度没有改进,但是就整体性能来说,本文改进阈值EMD对大部分环境噪声的去噪效果更佳,达到去除噪声的同时尽可能多地保留有效信号的目的,并且信噪比提高较多。

3 总结

本文提出了改进阈值的EMD的低空环境噪声去除方法,定量分析其去噪性能。4种典型的战场低空环境噪声按输入信噪比-10 dB, -5 dB, 0 dB, 5 dB和10 dB加入到纯净的直升机声信号。运行大量仿真并利用信噪比、均方根误差和平滑度指标这3个量化去噪性能的参数验证了本文所提方法对低空环境噪声的去除能力较强,在去除噪声的同时,保留了较多的有用信号,为后续特征提取和目标识别奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 郭凤霞, 戚俊, 陈斐楠. 基于小波变换的声雷达模拟信号去噪研究[J]. 现代雷达, 2016, 38(3): 86-90.
- [2] 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[M]. London: The Royal Society, 1998.
- [3] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 31(1): 417-457.
- [4] KOPSINIS Y, MCLAUGHLIN S. Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4): 1351-1362.
- [5] 曾向阳, 杨宏晖. 声信号处理基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015.
- [6] WU W, PENG H. Application of EMD denoising approach in noisy blind source separation[J]. Journal of Communications, 2014, 9(6): 506-514.
- [7] CRESSIE N. Deterministic/stochastic wavelet decomposition for recovery of signal from noisy data[J]. Technometrics, 2000, 42(3): 262-276.
- [8] FENG M, ZHOU Y, YU Z. EMD-based denoising for side-channel attacks and relationships between the noises extracted with different denoising methods[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2013.
- [9] PATRICK F, PAULO G, GABRIEL R. EMD equivalent filter banks, from interpretation to applications[M]//DUAN J Q, LUDWIG A, ROBERTO C, et al. Hilbert-Huang Transform and Its Applications. Singapore: World Scientific, 2005.
- [10] YANNIS K, STEPHEN M. Empirical mode decomposition based denoising techniques[C]//The 1st IAPR Workshop on Cognitive Information Processing, CIP 2008, 2008: 57-74.
- [11] STÉPHANE M. A wavelet tour of signal processing[M]. Cambridge: Academic Press, 1998.
- [12] JOHNSON-LINDENSTRAUSS with binary coins[J]. Journal of Computer & System Sciences, 2003, 66(4): 671-687.
- [7] DIACONIS P, FREEDMAN D. Asymptotics of graphical projection pursuit[J]. Annals of Statistics, 1984, 12(3): 793-815.
- [8] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants IT-80[J]. IRE Transaction of Information Theory, 1962, 8(2): 179-187.

(上接第57页)

压缩跟踪算法[J]. 自动化学报, 2015, 41(11): 1961-1970.

- [5] ZHUANG J. Compressive tracking based on HOG and extended haar-like feature[C]//IEEE International Conference on Computer and Communications, 2017: 326-331.
- [6] ACHLIOPTAS D. Database - friendly random projections :