

基于经验模态分解的模态域 MVDR 方法研究

李关防, 惠俊英

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 矢量阵 MVDR 波束形成可有效地实现信号的空间谱估计, 但它仅适用于窄带信号, 当各目标强度相差较大时, 难以实现对弱目标的有效检测. 经验模态分解具有突出信号局瞬特征的特点, 可将多分量信号分解成多阶固有模态函数. 结合固有模态函数特性和 MVDR 窄带信号要求, 提出了矢量阵模态域 MVDR 波束形成算法, 并将中心频率的概念应用于固有模态函数, 以此作为模态域 MVDR 波束形成算法的中心频率. 海试结果表明: 本方法可增强弱目标所在方位空间谱的能量, 有效地实现强干扰下弱目标的检测.

关键词: 经验模态分解; 模态域 MVDR 波束形成; 矢量阵; 中心频率

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 05-0942-05

A Study of Mode Domain MVDR Algorithm Based on Empirical Mode Decomposition

LI Guarfang, HUI Junying

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The vector array MVDR beam forming algorithm only suitable for narrow-band signals can estimate the spatial spectrum effectively, and it was difficult to detect the weak target when targets energy differ in large scale. The empirical mode decomposition (EMD) can emphasize signals' local characteristic and decompose multicomponent signals into many intrinsic mode functions (IMFs). Combining the IMF characteristic and the MVDR narrow-band signal request, this dissertation proposes the vector array mode domain MVDR beam forming algorithm, and considers the IMF's center frequency as the center frequency. The sea trial results show this algorithm can enhance the weak signal's spatial spectrum energy, and realize the weak target's detection effectively in strong interference.

Key words: empirical mode decomposition; mode domain MVDR beam forming (MMVDR); vector array; central frequency

1 引言

空间谱估计在声纳、雷达等领域具有重要意义. 最早的空间谱估计方法是常规波束形成, 这种方法具有良好的稳健性, 但其方位分辨力由瑞利限决定^[1]. 为了提高方位分辨力, Capon 提出了最小方差无畸变波束形成方法 (minimum variance distortionless response MVDR)^[2], 该方法旨在保持期望方向信号不发生畸变的条件下, 使整个系统输出的能量最小, 借此可以将系统所受干扰和噪声的影响降至最低. 在脉冲噪声环境下, 分数阶低阶 MVDR 波束形成可实现对噪声的有效抑制^[3]. 目标辐射噪声往往是宽带的, 对于 MVDR 波束形成, 通常是将信号分成若干频段, 在每个频段上求出互谱密度矩阵进行空间谱估计, 依据在不同频段上信噪比的不同, 比较各子带空间谱, 选取最优频段可有效地实现目标的检测.

但当多个目标能量相差较大时, 窄带 MVDR 波束形成算法对弱目标的检测能力降低, 即无法实现强干扰(目标)下弱目标的检测.

经验模态分解 (EMD-empirical mode decomposition) 是一种能突出信号局瞬特征的非线性处理方法, 它能把多分量信号分解成具有某种物理意义的单分量信号^[4], 即把干扰和目标信号分解为不同的固有模态函数 (IMF-Intrinsic mode function), 由于干扰和目标信号的模态特征不同, 在一定程度上在某些模态会实现对弱信号的局部增强. 本文结合 IMF 窄带准单分量信号的特性和 MVDR 窄带信号要求, 提出了矢量阵 MMVDR 波束形成算法, 将中心频率的概念应用于 IMF, 以 IMF 的中心频率作为 MMVDR 算法的中心频率, 并综合利用了矢量阵阵增益的优势, 有效的增大了弱目标所在方位空间谱的能量, 实现了强干扰背景下弱目标的检测.

2 经验模态分解

希尔伯特黄变换 (HHT-Hilbert-Huang Transform) 是 Huang 等人提出的一种时频分析方法, 其核心是经验模态分解 (EMD). EMD 的实质是依据不同的时间尺度特征将多分量信号分解成一系列的单分量信号, 即固有模态函数 (IMF)^[5]. EMD 是一种以信号为驱动的自适应的设定时间尺度进行分解的算法, 与小波变换类似, 它可看作是一种恒 Q 滤波器组^[6,7].

依据单分量信号的性质, Huang 等人把 IMF 定义为: (1) 在整个信号中, 过零点和极值点数目相等或最多相差一个, 此条件使得每一阶 IMF 都基本属于一个窄带的随机过程; (2) 由局部极大值、极小值点拟合的上、下包络曲线的均值曲线处处为零, 即信号关于时间轴局部对称.

经验模态分解的具体步骤如下:

(1) 找出信号 $s(t)$ 的所有极大值和极小值点, 由此采用三次样条插值法拟合上、下包络线 $up(t)$ 、 $dawn(t)$, 求均值曲线 $m(t) = [up(t) + dawn(t)]/2$, 余项 $r(t) = s(t) - m(t)$.

(2) 判断 $r(t)$ 是否满足 IMF 的条件, 如不满足, 即把 $r(t)$ 看作新的 $s(t)$, 重复步骤 1, 直到 $r(t)$ 满足 IMF 的条件, 否则把它看作分解出的第一阶 IMF.

(3) 将上一步中的 $m(t)$ 当作原信号 $s(t)$, 重复步骤 1、2, 依次分解出各阶的 IMF, 直至余量为单调函数或极值点数不超过两个时, 停止分解.

EMD 是依据时间尺度由小到大对信号进行分解的, 因此在低阶 IMF 中蕴含更多的高频成分, 随着 IMF 阶数的升高, 其频带呈现出不断降低的趋势, 但这与传统的分频带滤波又有所不同, 它可以突出信号的某些局部特性.

3 矢量阵 MVDR 波束形成算法

3.1 矢量阵 MVDR 波束形成原理

在远场平面波条件下, 对于 M 元矢量传感器组成的均匀直线阵列, 二维平面内的 k 个信号入射到该矢量阵列上, 第 k 个信号的方位为 θ_k , 以基阵法线方向为 90° , 则第 m 个阵元的输出为:

$$X_m(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}_m(\theta_k) [1, \cos\theta_k, \sin\theta_k]^T s_k(t) + \mathbf{n}_m(t) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{a}_m(\theta_k)$ 是阵元 m 对于第 k 个信号的声压方向矢量, $s_k(t)$ 是第 k 个信号的波形, $\mathbf{n}_m(t)$ 是第 m 阵元的噪声矢量, 是一个三维列向量.

令 $\mathbf{u}_k = [1, \cos\theta_k, \sin\theta_k]^T$, \mathbf{u}_k 称为矢量传感器的方向矢量, 将该阵列的输出排成一个列向量, 符号 $X(t)$

表示:

$$\begin{aligned} X(t) &= [X_1(t), X_2(t), \dots, X_M(t)]^T \\ &= [\mathbf{a}(\theta_1) \odot \mathbf{u}_1, \mathbf{a}(\theta_2) \odot \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{a}(\theta_K) \odot \mathbf{u}_K] \\ &\quad S(t) + N(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ 称为信号源矢量, $N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$ 是阵列接收到的噪声矢量, $\mathbf{a}(\theta_k) = [1, e^{-j\beta_k}, \dots, e^{-j(M-1)\beta_k}]^T$.

矢量阵的方向矢量用 $\mathbf{a}_v(\theta_k)$ 来表示, 则:

$$\mathbf{a}_v(\theta_k) = [1, e^{-j\beta_k}, \dots, e^{-j(N-1)\beta_k}]^T \odot \mathbf{u}_k = \mathbf{a}(\theta_k) \odot \mathbf{u}_k \quad (3)$$

其中 $\beta_k = 2\pi d \cos\theta_k / \lambda$ (λ 为阵元间距, $\theta = 0^\circ$), $\lambda = c/f_{MVD R}$, c 为声速, $f_{MVD R}$ 为窄带信号的中心频率 (与 IMF 阶次有关). d 为阵元间距, λ 为波长.

基阵的加权输出 $y(t, \theta) = \mathbf{W}^H X$, 权矢量 \mathbf{W} 为:

$$\mathbf{W}^H = [w_1(\theta), w_2(\theta), \dots, w_M(\theta)]^T \quad (4)$$

其每个元素均为三维行向量. 分别对声矢量传感器输出的一路声压信号和两路转速信号加权, 因此波束形成向量 \mathbf{W}^H 是一个 $3M$ 维列向量, θ 是波束的指向角. 波束形成向量的每一个元素均为复数, 其模表示对阵元输出信号的幅度加权, 辐角表示对阵元输出信号的相位延迟.

波束输出功率为 $\overline{y^2(t, \theta)} = \langle y^H y \rangle$, 即:

$$P(\theta) = \overline{y^2(t, \theta)} = \mathbf{W}^H \mathbf{R}_v \mathbf{W} \quad (5)$$

式(5)中 \mathbf{R}_v 为矢量阵列协方差矩阵, $\mathbf{R}_v = E\{XX^H\}$, 式中 H 表示共轭转置, $E\{\cdot\}$ 表示集合平均.

MVDR 波束形成试图使噪声及非观测方向上的干扰贡献的功率最小, 同时又保持观测方向上的信号功率不变. 即在满足条件 $\|\mathbf{W}^H(\theta) \mathbf{a}_v(\theta)\| = 1$ 下, 使波束输出功率 $P(\theta) = \mathbf{W}(\theta)^H \mathbf{R} \mathbf{W}(\theta)$ 最小.

利用 Lagrange 乘子法解最优加权向量, 代价函数为:

$$H(\theta) = P(\theta) + \mu [1 - \mathbf{W}^H(\theta) \mathbf{a}_v(\theta)] \quad (6)$$

式中 μ 为常数. 可求得 MVDR 的最优权为 \mathbf{W}_{MVDR} :

$$\mathbf{W}_{MVDR} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_v(\theta)}{\mathbf{a}_v^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_v(\theta)} \quad (7)$$

则 MVDR 输出的空间谱为 $P(\theta)$:

$$P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}_v^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_v(\theta)} \quad (8)$$

3.2 仿真研究

采用五元矢量阵, 阵元间距为 $d = 6.25\text{m}$ (120Hz 时的半波间距), 声速 $c = 1500\text{m/s}$, 接收信号包括三部分: 位于 85° 方位的干扰信号、位于 104° 的目标信号、高斯白噪声 (只是为了行文方便, 前者称为干扰信号, 后者称为目标信号). 上述三种信号均采用带宽为 $9\text{Hz} \sim 110\text{Hz}$ 的滤波器产生的互相独立的高斯白噪声进行仿

真, 快拍长度为 1s, 每次分析 15 个快拍, 干扰的信噪比(干扰与各向同性噪声功率比)为 7dB, 目标的信噪比采用 6dB 和 0dB 两种情况, 图 1、2 给出 10 次独立的仿真结果:

仿真结果表明: 当信号和干扰强度接近时, 矢量阵 MVDR 波束形成器能在抑制左右舷模糊的情况下, 很好的检测到目标和干扰的方位; 但随着信号强度的减弱, 检测能力也逐渐变差, 即在强干扰下, 对

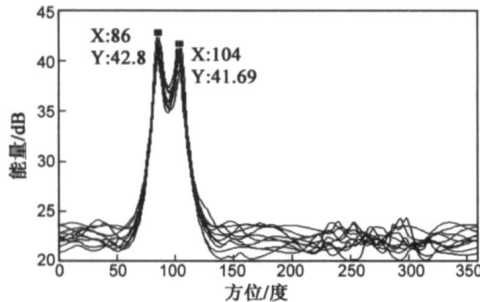


图1 目标信噪比为6dB

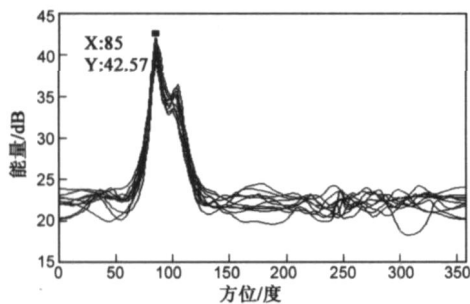


图2 目标信噪比为0dB

弱目标的检测能力降低, 为了改进强干扰下对弱目标的检测性能, 文中提出了模态域最小方差无畸变响应波束形成算法(MMVDR).

4 模态域 MVDR 波束形成(MMVDR)

EMD 可将多分量信号分解成一系列 IMF 的和, 且各阶 IMF 满足窄带准单分量信号的特性. EMD 算法可以突出信号的局瞬特征, 利用 IMF 的解析信号的谱特性可有效地实现为弱目标的检测^[8]. 本文针对最小方差无畸变响应波束形成算法(MVDR)弱目标检测能力的不足, 结合 IMF 窄带特性及其对弱目标检测的优势, 将矢量传感器阵列接收到的声压、振速信息分别进行 EMD, 求解声压、振速的 IMF 的解析信号, 将声压、振速对应阶 IMF 的解析信号利用 MVDR 算法实现空间方位谱估计, 即基于 EMD 的模态域最小方差无畸变响应波束形成算法(MMVDR). 算法流程如图 3 所示:

对窄带 IMF, 各阶 IMF 的中心频率 f_{IMF} :

$$f_{IMF} = \frac{\sum_i (f_i * E_{IMF}(f_i))}{\sum_i (E_{IMF}(f_i))} \quad (9)$$

其中 f_i 为频点, $E_{IMF}(f_i)$ 为该阶 IMF 在频点 f_i 处的

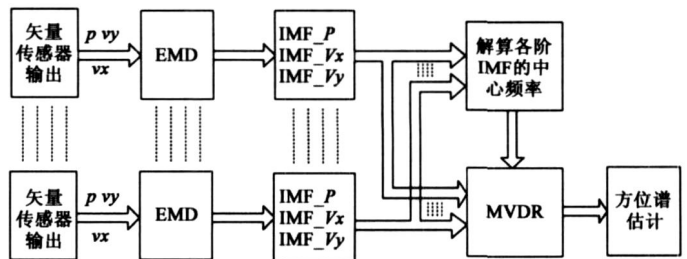


图3 MMVDR算法框图

能量. 综合利用各阵元的声压、振速对应阶的 IMF 可求得更接近于真实情况的各阶 IMF 的中心频率, 并以此作为窄带 MVDR 波束形成的中心频率.

MMVDR 输出的空间谱为 $P_{IMF}(\theta)$:

$$P_{IMF}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}_v^H(\theta) \mathbf{R}_{IMF}^{-1} \mathbf{a}_v(\theta)} \quad (10)$$

其中 \mathbf{R}_{IMF}^{-1} 为对应阶矢量 IMF 的协方差矩阵.

5 试验研究

阵元间距 0.5m 的 5 元均匀矢量线阵, 该阵列经过减振处理后安装于水下平台上, 工作频带 0.2~2.5kHz, 采样频率 f_s 为 37kHz. 在 200° 附近有一强干扰源, 分析数据总长度为 67s, 目标在 18s 时开始辐射声信号(以数据起始为零时刻), 由 90° 向 180° 方向运动并且距离逐渐增大, 试验概况如图 4 所示.

MVDR 波束形成算法要求信号为窄带信号, 将接收信号划分为若干子带, 在各子带内分别进行 MVDR 波束形成, 试验分析表明当频带为 1350-1450Hz 时, 对目标的检测能力最好, 此处只给出该频带的空间谱历程如图 5 所示, 图 6 为利用 MMVDR 处理的结果(第一阶 IMF).

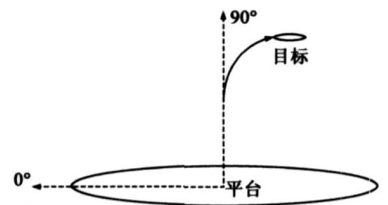


图4 实验示意图

矢量阵方位历程图

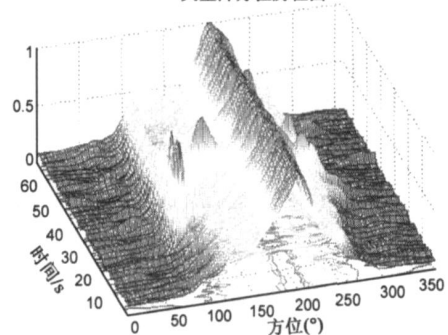


图5 窄带MVDR空间谱历程

信号经过带通滤波(1350-1450Hz)后, 利用 MVDR 进行空间谱估计, 图 5 结果表明: 在窄带 MVDR 波束形

矢量阵方位历程图(MMVDR)

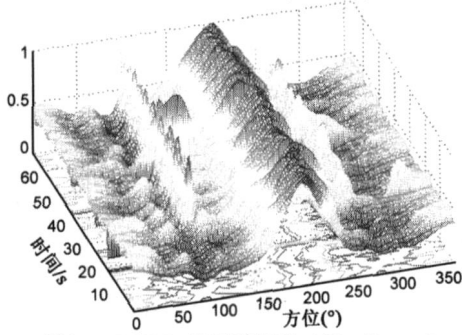


图6 MMVDR空间谱历程(第一阶IMF)

成得到的空间谱的历程图上, 当目标刚出现时, 距离平台较近, 目标强度与平台干扰强度可比拟, 矢量阵窄带 MVDR 波束形成算法可有效地估计目标方位, 在 40s 后, 随着目标的远离, 目标信号相对于本地干扰属于弱信号, 由图 5 可知目标方位谱(约在 90° 方向)变得很弱, 不利于弱目标的检测, 这与仿真结果相一致. MMVDR 利用了 EMD 的突出弱局部信号的特性, 将 IMF 准单分量信号的窄带特性和窄带 MVDR 波束形成算法的优势相结合, 有利于实现对弱目标的检测. 图 6 表明: 目标在远离时, 尽管接收到的目标信号强度降低, 但 MMVDR 输出的空间谱在目标方位的强度未受到影响, 可以有效地实现对弱目标的检测, 检测能力优于窄带 MVDR 波束形成算法.

标稳定后(第 28s)和目标远离时(第 67s)四个不同时刻空间谱图的对比(MMVDR 为第一阶 IMF 空间谱), 结果表明: 在 13s 时, MMVDR 的旁瓣较窄带 MVDR 高; 在 18、28、67s 时, 利用 MMVDR 波束形成算法有效的增大了弱目标所在方位空间谱的能量, 更有利于实现弱目标的检测, 在目标稳定后和远离时, 即第 28s 和 67s 效果尤为明显.

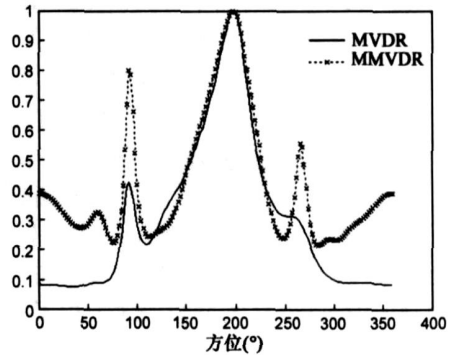


图9 第28秒空间谱对比

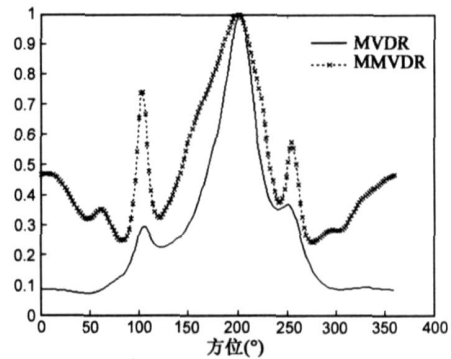


图10 第67秒空间谱对比

矢量阵方位历程图(MMVDR)

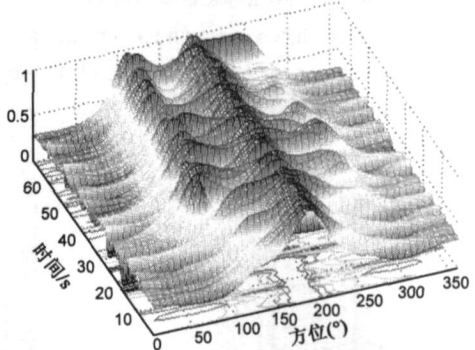


图11 MMVDR空间谱历程(第二阶IMF)

图 11 为第二阶 IMF 采用 MMVDR 方法得到的空间谱历程图, 在不影响弱目标检测能力的同时, 较第一阶 IMF 有更好的抑制左右舷模糊和噪声背景能量的优势. 总之, MMVDR 波束形成算法能自适应的将宽带信号分解成具有准单分量特征的窄带信号, 从利用该方法估计的空间谱历程图上可有效地检测到弱目标的方位及出现时间, 且多阶的 IMF 可为目标检测提供更多信息,

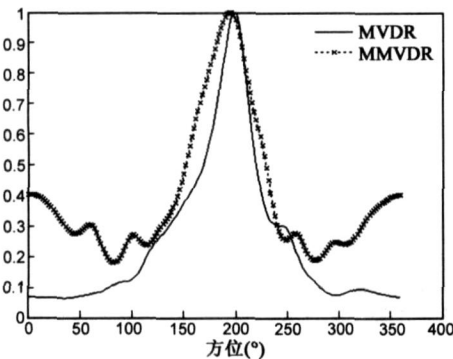


图7 第13秒空间谱对比

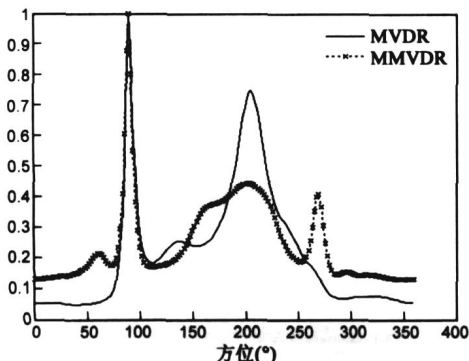


图8 第18秒空间谱对比

通过对目标出现前(第 13s)、出现时刻(第 18s)、目

增加了算法的稳健性。

6 结论

MVDR 波束形成算法适用于窄带信号的空间谱估计,但当各目标强度相差较大时, MVDR 波束形成算法难以实现对弱目标的有效检测. 经验模态分解在突出信号局瞬特征的基础上,可将多分量信号分解成多阶 IMF 的和,在一定程度上实现了对弱信号的局部放大.

本文结合 IMF 窄带准单分量信号的特性和 MVDR 窄带信号要求,提出了矢量 MMVDR 波束形成算法,首次将中心频率的概念应用于 IMF,以 IMF 的中心频率作为 MMVDR 算法的中心频率,并综合利用了矢量阵的优势,改进了窄带 MVDR 波束形成算法检测弱目标能力差的不足. 海试结果表明:文中所示算法在保持强干扰空间谱能量不变的情况下,有效的增大了弱目标所在方位空间谱的能量,可有效地实现强干扰下弱目标的检测.

参考文献:

- [1] Harry L. Van Trees. Optimum Array Processing (Part IV) [M]. New York, America: John Wiley & Sons, Inc., 2003, 48 - 52.
- [2] Capon J. High resolution frequency wavenumber spectrum analysis [J]. Proc IEEE, 1969, 57(8): 1404- 1418.
- [3] 何劲, 刘中. 脉冲环境中鲁棒的自适应波束形成方法 [J]. 电子学报, 2006, 34(3): 464- 468.
He Jin, Liu Zhong. Robust Adaptive Beamforming Method in Impulsive Noise [J]. Acta Electronica Sinica 2006, 34(3): 464 - 468. (in Chinese)
- [4] 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]. Proceeding of the Royal Society of London Series A, 1998, 454: 903- 995.

- [5] 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. Hilbert-Huang 变换中的理论研究 [J]. 振动与冲击, 2002, 21(4): 13- 17.
Zhong Youming, Qin Shuren, Tang Baoping. Study On The Theory Of Hilbert Huang Transform [J]. Journal of Vibration And Shock, 2002, 21(4): 13- 17. (in Chinese)
- [6] Patrick Flandrin, Gabriel Rilling, Paulo Goncalves. Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004 11(2) 112- 114.
- [7] Zhao hua WU, Norden E. Huang. A study of the characteristic of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. Proceeding of the Royal Society of London Series A, 2004, 460: 1957- 1611.
- [8] 苏中元, 贾民平. 基于希尔伯特-黄变换周期平稳类微弱故障信号检测 [J]. 东南大学学报, 2006, 36(3): 389- 392.
Su Zhongyuan, Jia Minping. Detection of weak fault signal about cyclostationary by Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Southeast University, 2006, 36(3): 389- 392. (in Chinese)

作者简介:



李关防 男, 1982 年出生于河南濮阳, 现为哈尔滨工程大学水声工程学院博士研究生, 主要研究方向: 矢量信号处理, 时频分析.
E-mail: liguanfang@sina.com



惠俊英 男, 1939 年出生, 现为哈尔滨工程大学水声工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向: 矢量信号处理, 水声工程, 阵列信号处理等.