

基于 ARMA 模型滤波的微弱信号辨识

高丽丽¹, 何松柏²

(1. 四川理工学院理学院, 四川 自贡 643000; 2. 电子科技大学电子工程学院, 成都 610054)

摘要:双线性时频分布能更全面地表征复杂背景下瞬态机械故障信号特征,但双线性时频变换固有的交叉项干扰严重影响了算法的时频分辨率。探讨了双线性时频分析技术在微弱瞬态信号辨识中的应用,提出采用 ARMA 模型滤波的方法来抑制双线性 Wigner - Ville 时频变换的交叉项干扰,并给出算法推导。结合实验数据,对比平滑伪 Wigner - Ville 算法的信号辨识结果,表明基于 ARMA 模型预滤波的双线性时频分析能更好的抑制交叉项干扰,具备更高的时频分辨能力和瞬态微弱信号辨识能力。

关键词:ARMA 模型滤波;双线性时频分布;微弱信号辨识

中图分类号:TM937

文献标识码:A

引言

机械故障信号是在机械运行状态下的瞬态异常信号,通常是宽频带、持续时间短且完全掩盖在背景干扰下的微弱信号。这种瞬态的故障信号蕴含机械运行状态的重要信息,对这类微弱信号进行辨识具有重要意义^[1]。

近年来,国内外在微弱信号辨识技术方面进行了大量的研究,如对电流模式的数字滤波器研究、SDH 中泊松分布误码块及误码率的有关研究、相位噪声对 IM/DD 通信系统特性影响的研究、新型相关接收技术的研究、复加性白高斯噪声中随机幅值多项式相位信号边界分析等,都是围绕着复杂干扰下提高信噪比、信号辨识而进行的研究工作。但采用通频带或时间序列概率统计的手段辨识瞬态微弱信号很难达到较好的效果,时频分析技术为瞬态微弱信号辨识提供了好的思路。

时频分析中,短时傅立叶变换和小波变换可以将瞬态微弱信号的能量变化展现出来,但其对背景噪声干扰的抑制能力有限,对低信噪比瞬态分量的分辨率较低。Cohen 类双线性时频变换则具有较高的时频分辨率和噪声抑制能力,而交叉项干扰是影响双线性时频辨识的关键因素。在抑制或衰减交叉项干扰方面,国内外学者从预滤波、自适应处理、核函数优化等多方面做了大量研究,并取得了较好的效果^[2]。本文提出一种基于 ARMA

模型数字滤波的 Wigner - Ville 时频分布辨识算法,并结合试验数据,通过与成熟的抑制算法对比分析,验证了本算法在微弱瞬态信号辨识方面的良好性能。

1 Wigner - Ville 分布及改进算法

双线性时频变换是具有二维和变换的 Cohen 类时频分布,其表达式为

$$P(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(u + \tau/2) z^*(u - \tau/2) \varphi(\tau, v) e^{-j2\pi(v+tf-uv)} dudvd\tau \quad (1)$$

$\varphi(\tau, v)$ 是核函数,即 Cohen 类分布是以核函数加权模糊函数的二维傅立叶变换。当 $\varphi(\tau, v) = 1$,即为 Wigner - Ville 分布定义式

$$W_{z(t, f)} = \int_{-\infty}^{\infty} z(t + \tau/2) z^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi\tau f} d\tau \quad (2)$$

虽然 Wigner - Ville 分布表示能量分布,具有较好的时频聚集性,但是对于多分量信号,由卷积定理,其分布会出现交叉项。时频分布的交叉项是震荡的,一般较严重,幅度可以达到自主项的两倍,造成时频信号的特征模糊不清。因此抑制交叉项对时频分布非常重要。

交叉项与时频分布的有限支撑特性密切相关,所以一般通过核函数的设计来抑制交叉项,即加窗平滑。主要有伪 Wigner - Ville 分布(PWD)、平滑 Wigner - Ville 分布(SWD)、平滑伪 Wigner - Ville 分布(SPWD)等几

种。其中,平滑伪 Wigner - Ville 分布^[3]:

$$SPWD_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t - u + \frac{\tau}{2})z^*(t - u - \frac{\tau}{2})g(u)h(\tau)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (3)$$

式中 $g(u), h(\tau)$ 是两个实的偶窗函数,为简化计算,一般取指数函数。且 $h(0) = g(0) = 1$ 。

通过核函数抑制交叉项的方法,在一定程度上削弱了交叉项干扰的影响,但加入一个核函数,会给整个算法增加相当大的运算量。

2 预滤波法抑制交叉项的方法

2.1 系统的通带滤波

针对目标信号的频率特性,可以采取通带预滤波的方法削弱交叉项干扰,即在保证信号不失真的条件下滤掉大部分其他频带的噪声,尽量减少信号的多余分量,可以有效的消弱交叉项的干扰。根据目标信号的先验知识,本文关注的变速箱瞬态故障信号的能力主要集中在 400 Hz 以下的频域内^[4],故首先对采集的信号进行低通预滤波,并对时间序列信号进行中值平滑,初步滤除高频干扰和奇异信号。

低通滤波器可通过模拟滤波或数字滤波完成,本文采用在采集电路加入一截止频率 500 Hz 的四阶巴特沃兹(ButterWorth)低通滤波器。选择四阶而不是更高的阶次,是考虑到辨识系统的实时性,尽量减少系统辨识的时延。

四阶的巴氏低通滤波器由两个二阶滤波器串联组成,模型表示为

$$G = \frac{1}{1 + jb_1 \frac{w}{w_x} - (\frac{w}{w_x})^2} * \frac{1}{1 + jb_2 \frac{w}{w_x} - (\frac{w}{w_x})^2} \quad (4)$$

每个二阶滤波器的形式相同, w_x 相等,但它们的 b 值不同。对于任意偶数阶的巴氏滤波器,其增益函数 G 应满足 $G^2 = GG^*$, 由模型导出参数 $b_1 = 1.845, b_2 = 0.7654$ 。

2.2 ARMA 模型滤波抑制交叉项干扰

低通滤波对背景干扰的衰减作用是有限的,为了更好的滤除干扰成分,本文提出对背景平稳噪声建模,采用模型化补偿滤波的思路尽可能保留瞬态信号,滤除平稳缓变的噪声干扰。平稳或缓慢变化的背景噪声信号,可以近似地用一个参数缓慢变化的 ARMA 模型来描述,以 ARMA 模型参数构成滤波器,能有效地滤除背景噪声。当动态目标信号的频谱与背景噪声的频谱不重叠或重叠很少时,滤波器的输出含有明显的信号波形,且失真很小。当目标信号频谱与海浪噪声频谱重叠较重

时,滤波器对信号有衰减,但对于短时动态信号,由于滤波器惯性的存在,滤波器输出是与信号同频率的指数衰减信号。目标信号虽有失真,但能保证较高的输出信噪比^[5]。

假设原始输入 $S(n)$ 是目标信号 $v(n)$ 和背景噪声 $u(n)$ 的线性迭加

$$S(n) = v(n) + u(n) \quad (5)$$

噪声 $u(n)$ 为 ARMA 型噪声,即满足

$$u(n) + a_1u(n - 1) + \dots + a_Nu(n - N) = b_0e(n) + b_1u(n - 1) + \dots + b_mu(n - M) \quad (6)$$

其中 $(a_1, a_2, \dots, a_N), (b_0, b_1, \dots, b_M)$ 为模型系数 $e(n) \rightarrow N(0, \sigma^2)$ 正态噪声。噪声 $u(n)$ 长时间存在,瞬态目标信号 $v(n)$ 在某时刻后才到达,并持续较短时间。定义滤波器的系统函数为

$$W(Z) = \frac{E(z)}{U(z)} = \frac{\sum_{j=0}^m b_j z^{-j}}{\sum_{i=0}^N a_i z^{-i}} \quad (7)$$

其中: $U(z), E(z)$ 分别是背景噪声 $u(n)$ 和残差 $e(n)$ 的 Z 变换。当 $a_0 = 1$ 时,该滤波器为 ARMA 模型噪声的白化滤波器,其幅频特性函数为

$$|W(e^{-j\omega T})| = \frac{\sigma}{\sqrt{U_0(\omega)}} \quad (8)$$

$SP_0(\omega)$ 是噪声的功率谱函数。为了使滤波器在背景噪声频带以外具有平坦的频率响应特性,在噪声谱 $SP_0(\omega)$ 上迭加一个方差小的白噪声谱 σ_0^2 , 则

$$U(\omega) = U_0(\omega) + \sigma_0^2 \quad (9)$$

滤波器的频率特性可改写为

$$|W(e^{-j\omega T})| = \frac{\sigma}{\sqrt{U_0(\omega) + \sigma_0^2}} \quad (10)$$

假设输入信号 $v(n)$ 的频率范围是 $(0, \omega_x)$, 则输入信噪比为

$$\left(\frac{V}{U}\right)_i = \frac{\int_0^{\omega_x} V(\omega) d\omega}{\int_0^{\omega_x} U(\omega) d\omega} \quad (11)$$

输出信号频谱为

$$|Y(\omega)|^2 = |W(e^{-j\omega T})S(\omega)|^2 = \sigma^2 + \frac{\sigma^2 V(\omega)}{U(\omega)} \quad (12)$$

从式(12)可知,当输入只有背景噪声时,即 $V(\omega) = 0$, 此时滤波器输出是方差为 σ^2 的白噪声。

当噪声频谱和信号频谱重叠较少,在信号频段,即 $V(\omega)$ 显著的区间, $U(\omega) \approx \sigma_0^2$, 因而有

$$|Y(\omega)|^2 = \sigma^2 + \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} V(\omega) \quad (13)$$

滤波器的输出含有明显的目标信号波形。由于在背景噪声显著频段,滤波器的幅频响应正好是背景噪声谱的倒数,当用背景噪声激励滤波器时,滤波器的输出是方差为 σ^2 的白噪声,由时间序列的 ARMA 模型理论知道,此时滤波器的输出功率达到最小,因此,该滤波器能对平稳背景噪声进行有效抑制。在噪声显著频段以外,滤波器的频率响应近似为常数,此时,滤波器对信号引进的失真很小。

3 算法的数据仿真与分析

试验数据来自加工机床变速箱齿轮的震动测试。变速箱工作在载荷状态,变速齿轮 26 齿,压电传感器低通滤波截止频率 500 Hz,采样频率 4 kHz,信号输出范围 ± 5 V。图 1(a) 为一段时域信号, (b) 是采用经典周期图处理方法得到频谱图。

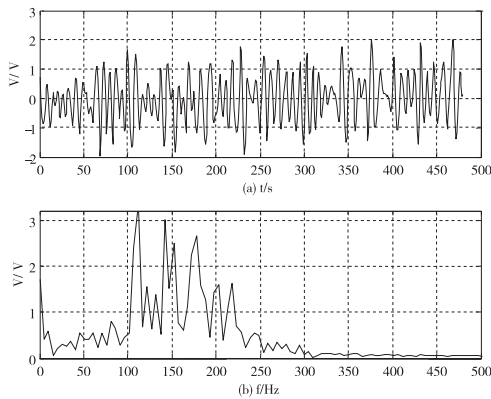


图 1 信号的时域及频域波形

仪器记录的瞬态故障信号位于 137 ~ 186 s 的时间段,频率覆盖 0 ~ 100 Hz 的范围,图 1 显示故障信号被完全掩盖在背景噪声中,时域和频域的滤波手段很难将故障信号分离出来。

图 2 是含噪信号的 WVD 分布平面图和三维图,即使在时频域内,瞬态故障信号也被与之毗邻的噪声信号完全掩盖,局部信噪比都很小。图 3 是信号进行平滑加窗处理的 Wigner - Ville 分布,即 SPWV 分布,与图 2 对比,SPWV 算法对噪声有明显的抑制作用,并较好的保留了瞬态信号,这说明加窗平滑后,有效的抑制了交叉项干扰的影响,提高了频域的分辨率。但交叉项干扰的影响仍然使得信号周边信息杂乱,不利于故障信号的辨识和提取。

图 4 是先对信号进行了 ARMA 模型滤波再进行 SPWV 变换的结果,对比图 3,基于 ARMA 模型滤波后的 SPWV 更好的消除或抑制了交叉项的干扰,并准确的保留了瞬态故障信号,可以比较清晰的辨识 150 s 时段 0 ~

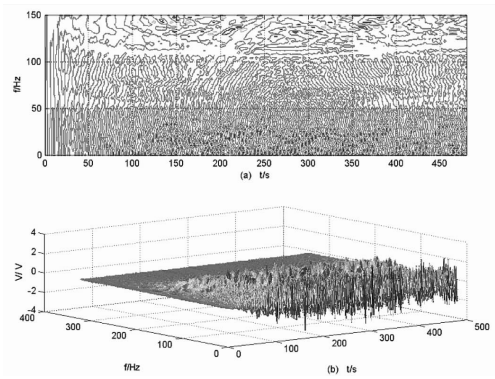


图 2 强噪信号的 WVD 分布

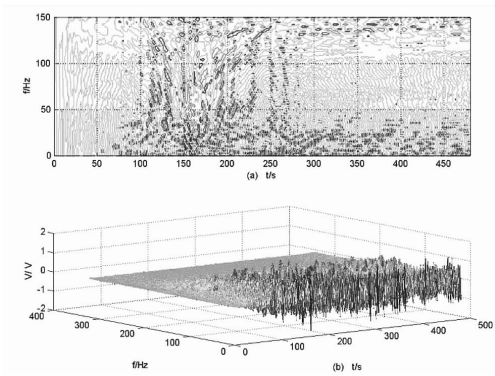


图 3 平滑伪 Wigner - Ville (SPWV) 分布

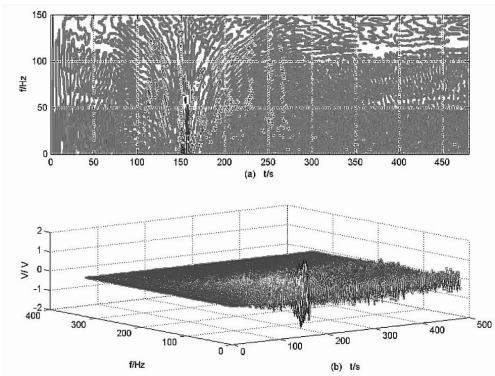


图 4 ARMA 模型滤波后的 SPWV 分布

100 Hz 频段的瞬态故障信号。所以在弱信号辨识方面,基于 ARMA 模型化预滤波的 Wigner - Ville 分布等时频分析方法具备更高的时频分辨率和信号辨识能力。

4 结束语

瞬态故障信号处理领域的微弱信号辨识的研究有着重要的社会经济意义。时频技术应用于微弱信号辨识,是一种有效而实用的方法。本文利用 ARMA 模型滤波算法抑制 Wigner - Ville 分布固有的交叉项干扰影响,对算法进行了改进,对比分析可见新的算法能更好的检测强噪声背景下微弱的瞬态信号,具备更高的时频分辨

率和信号辨识能力。但算法运算量较大,对低频信号,可以通过减少采样数据、FFT等提高该技术的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 何正嘉. 机器设备平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [2] 刘斌, 张斌珍. 微弱信号辨识技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [3] 姚天任, 孙洪. 现代数字信号处理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1999.
- [4] Zhang Yanping, Huang Shuhong, Hou Jinghong, et al. Continuous Wavelet Grey Moment Approach for Vibration Analysis of Rotating Machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(5): 1202-1220.
- [5] Soderstrom T, Mahata K, Soverini U. Identification of Dynamic Errors-in-Variables Models: Approaches Based on Two-Dimensional ARMA Modeling of the data[J]. Automatica, 2003, 39(5): 929-935.

Time-Frequency Identification of Weak Signal Using ARMA Filter

GAO Li-li¹, HE Song-bai²

(1. School of Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Bilinear time-frequency distribution can token overall mechanical failure signal characteristics, but it's found that strong cross-terms exist which results in frequency aliasing and information loss. The time-frequency analyze is used to identificate the weak winking signal in complex background. Arithmetic based on ARMA model filter is bring forward to solve cross-terms problem. It is simulated in experiment data and contrasted to Smooth-Puppet Wigner-Ville arithmetic. The conclusion is that arithmetic of ARMA model pre-filter restrained cross-terms disturbance better and is of better weak winking signal identification ability.

Key words: ARMA model pre-filter; bilinear time-frequency distribution; weak signal identification