

基于平滑先验法的被动声信号趋势项消除

于钟深¹, 方 向¹, 张卫平¹, 黄骏逸¹, 丁 凯²

(1. 解放军理工大学野战工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 总装工程兵科研一所, 江苏 无锡 214035)

摘 要:针对目前去趋势项所用方法中存在需预先假设趋势项类型、计算复杂等问题,提出了基于平滑先验法(SPA)的被动声信号趋势项消除方法。该方法是一种改进的消除非平稳趋势项算法,通过分析不同正则化参数下 SPA 的截止频率,并结合目标声信号中趋势项频率范围,得出正则化参数取值以达到有效去除待处理信号中趋势项的目的,同时保留感兴趣的模式。对装甲目标声信号仿真分析结果表明,处理前后目标声信号时域波形及 PSD 图谱中趋势项去除效果明显,简单有效地分离了原始数据趋势项和周期项,可用来对雷场中目标声信号进行去趋势项预处理。

关键词:平滑先验法;正则化参数;截止频率;仿真分析;PSD 谱图

中图分类号:TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1008-1194(2015)04-0034-03

Passive Acoustic Signal Trend items Removal Based on SPA

YU Zhongshen¹, FANG Xiang¹, ZHANG Weiping¹, HUANG Junyi¹, DING Kai²

(1. College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China;

2. The First Institute of the General Armaments Department, Wuxi 214035, China)

Abstract: Present methods of trend items removing has to presuppose the type of trend items and have a large calculation amount. Aiming at these problems, a new way of smoothness priors approach (SPA) was proposed in this paper. This method is an improved algorithm in removing non-stationary signal trend items. By analyzing the cutoff frequency of SPA with different regularization parameter and combining with the frequency range of signal trend items, reasonable value of regularization parameter was pointed out, in the meantime retain the interesting pattern. Simulation analysis of target signal collected from OTC experiment was conducted. The results showed that the trend items in the samples were effectively eliminated view from the time domain waveform and PSD spectrum before and after the treatment, moreover the trend items and periodic items in primary data was simply and effectively separated, the algorithm could be used to eliminate the trend items of the target acoustic signal in minefield.

Key words: SPA; regularization parameter; cutoff frequency; simulation analysis; PSD spectrum

0 引言

雷场中,智能地雷采样系统的传感器往往受到自身温度变化及周围环境等因素干扰,使得传感器对其响应频率范围以外的频率性能不稳定,测得的信号发生偏离基线的现象,甚至其偏离程度会随时间发生变化,这个变化的过程就叫信号的趋势项^[1]。趋势项的存在,会使时域相关分析或频域功率谱分

析产生很大误差,甚至使低频谱完全失真^[2]。由于雷场中目标声信号本身是非线性的,其受扰轨迹通常是非平稳的,而受扰轨迹中若含有非平稳的趋势项存在,会导致雷场目标特征提取结果产生较大误差。因此在对目标声信号进行特征提取之前有必要去除信号中的趋势项。

目前,去趋势项常用的方法主要有差分法、低通滤波法、滑动平均法^[3]、最小二乘拟合法^[4-5]、小波法^[6]以及经验模态分解法^[7]等。前 4 种方法需要

* 收稿日期:2015-01-13

基金项目:总装预研基金项目(ZLY2008424)

作者简介:于钟深(1991—),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向:智能地雷。E-mail:18061749026@163.com。

预先假设趋势项类型,如线性、多项式或指数趋势等,不适合处理趋势变化比较复杂或随机变化趋势的信号;后两种方法对小波基的选择或分解层次要求比较复杂。针对这些方法存在的不足,本文提出了基于平滑先验法^[8]的被动声信号趋势项消除方法。

1 SPA 算法及其频率响应

1.1 SPA 算法

假设初始信号的时间序列 z 由两部分组成:

$$z = z_s + z_t \quad (1)$$

其中 z_s 是去趋势项之后的序列, z_t 是低频趋势项成分。 z_t 可以用线性观测模型表示为

$$z_t = H\theta + v \quad (2)$$

其中, H 为权矩阵, θ 为回归参数, v 为观测误差,那么任务就转化为采取优化方法估计参数 θ , 从而使 $\hat{z}_t = H\hat{\theta}$ 可用来估计原信号中的趋势项。估计参数 θ 的常用的方法是最小二乘方法。SPA 算法在寻优过程中加入了微分项 $\|D_d(H\theta)\|$, 并使之达到最小以保证 $H\theta$ 滤去的是信号中的趋势项部分:

$$\hat{\theta}_\alpha = \arg \min_{\theta} \{ \|H\theta - z\|^2 + \alpha^2 \|D_d(H\theta)\|^2 \} \quad (3)$$

其中, α 称为规则化参数, D_d 为用离散化的 d 阶微分算子矩阵。 D_d 可按以下方式得到:

设序列 z 中含有 N 个局部极值点, 以列向量 R 表示为 $R = [R_1, R_2, \dots, R_N]^T \in R^N$, R 的一阶趋势以离散方式表示为: $R_1 = [R_2 - R_1, R_3 - R_2, \dots, R_N - R_{N-1}]^T \in R^{(N-1)}$; R 的二阶趋势以离散方式表示为: $R_2 = [R_3 - R_2 - (R_2 - R_1), R_4 - R_3 - (R_3 - R_2), \dots, R_N - R_{N-1} - (R_{N-1} - R_{N-2})]^T \in R^{(N-2)}$, 以此类推, 就可得到 R 的任意阶趋势项的离散表示, R 的 d 阶微分就可由 D_d 表示为:

$$D_d = \begin{bmatrix} d(R_d)_1/dR_1 & \cdots & d(R_d)_1/dR_N \\ \vdots & & \vdots \\ d(R_d)_{N-d}/dR_1 & \cdots & d(R_d)_{N-d}/dR_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)的解为:

$$\hat{\theta}_\alpha = (H^T H + \alpha^2 H^T D_d^T D_d H)^{-1} H^T z \quad (5)$$

$$\hat{z}_t = H\hat{\theta}_\alpha \quad (6)$$

其中 \hat{z}_t 就是需要去除的趋势项的估计值。

矩阵 H 可以通过分析原信号 z 的特性获得, 这里为了分析简便, H 采用单位矩阵 $I \in R^{N \times N}$ 。对于矩阵 D_d , 当其阶数为 2 时可以很好地估计信号中的非周期趋势项, 因此这里 D_d 的阶数取 2, $D_2 \in R^{(N-2) \times N}$ 可以表示为:

$$D_2 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

则原信号去除趋势项后的部分可以表示为:

$$\hat{z}_s = z - H\hat{\theta}_\alpha = [I - (I + \alpha^2 D_2^T D_2)^{-1}]z = Lz \quad (8)$$

1.2 频率响应

式(8)中, L 的作用其实相当于一个高通滤波器, 通过对矩阵 L 的任意行进行傅里叶变换, 可以得到其频率特性。取 $N = 50$, $\alpha = 10$, 根据式(7)和式(8)编程计算, 得到 L 的频率响应如图 1 所示。

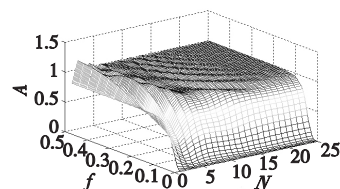


图 1 L 的频率响应图

Fig 1 Frequency response of L

图中, A 代表幅值, f 代表归一化后的频率, 由于对称性的原因, 图中 N 只取了 1~25 之间的数据。由图 1 可以看出, L 的滤波作用绝大部分是平顺的, 只有在信号的初始段和末段, 滤波效果不太理想。给规则化参数 α 赋不同的数值, 对 L 的第 $N/2$ 行作傅里叶变换, 从而得到不同 α 值对应的频率响应, 见图 2。

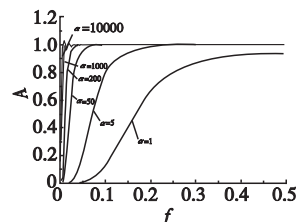


图 2 不同 α 值的频率响应图

Fig 2 Frequency response versus different α

计算得到 α 分别等于 1、5、50、200、1 000 和 10 000 时, 对应的截止频率分别为 0.189、0.090、0.041、0.011、0.006 和 0.001 2 倍采样频率。目标声信号中趋势项频率范围一般在 1~10 Hz, 取 $\alpha =$

10 000, 由于采样频率为 8 kHz, 截止频率等于 9.6 Hz, 这样, 可以保证声信号中的低频趋势项能被有效地去除, 同时保留感兴趣的信号成分。

2 目标声信号的去趋势项及仿真分析

研究对象选取了坦克和装甲车的噪声信号。将坦克设为目标 A, 轮式装甲车为目标 B, 经过场外实验采样, 得到了二者的声信号。对声信号样本进行去除趋势项分析。为了能够清楚显示信号的细节, 这里对每种模式的信号取了 5 000 个采样点。去除趋势项后的声信号波形和原始波形对比图如图 3 所示。

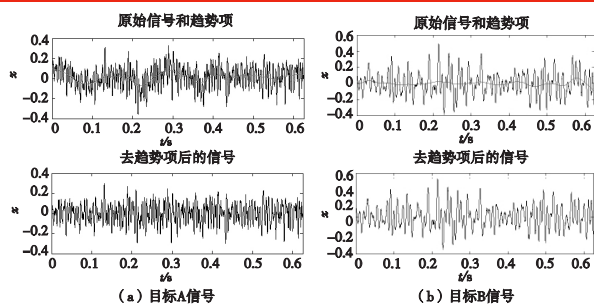


图 3 原始信号及去趋势项后波形对比图

Fig 3 Comparison chart of waveform by original signal and signals without trending components

表 1 去趋势项前后 PSD 峰值及对应频率

Tab 1 PSD peak and corresponding frequency before and after the signals eliminate trending components

信号模式	原始信号		去趋势项后信号		趋势项	
	PSD 峰值	峰值频率/Hz	PSD 峰值	峰值频率/Hz	PSD 峰值	峰值频率/Hz
目标 A	1.007 0	117.2	1.007 0	116.9	0.584 1	5.2
目标 B	0.535 0	84.5	0.534 3	85.9	0.185 3	3.6

经过分析可知, SPA 方法可快速分离了原始数据趋势项和周期项并有效去除目标声信号中含有的趋势项。经过 SPA 方法处理, 所有样本声信号中所包含的趋势项均得到消除, 至此完成了目标声信号预处理的步骤, 为声信号样本进行去噪处理做准备。

3 结论

本文提出基于平滑先验法的被动声信号趋势项消除方法。该方法通过循环运算, 对算法中的规则化参数 α 进行选取, 使其对应的截止频率与目标声信号的频率特性相匹配, 从而有效去除待处理信号

中的趋势项, 同时保留感兴趣的模式。仿真结果表明, 该方法简单有效地分离了装甲目标声信号原始数据趋势项和周期项, 处理前后时域波形及 PSD 图谱中可以看出趋势项去除效果明显, 可用于对雷场中目标声信号进行去趋势项预处理。

为了从频域角度分析, 对 2 种模式的声信号在去除趋势项前后的波形分别作 Welch-PSD 频谱分析, 并作出功率谱密度图, 见图 4。

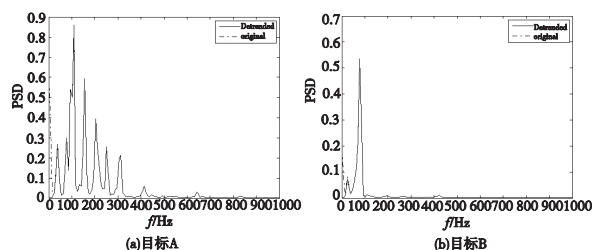


图 4 去趋势项前后信号的 Welch-PSD 谱图

Fig 4 Welch-PSD spectrum before and after the signals eliminate trending components

在图 4 中, 可以清楚看出经过 SPA 法去趋势项后, 低频趋势项得到了有效消除。图 4 和图 3 对照分析可见, 图 3(a) 和 (b) 的信号含趋势项较多, 从 PSD 图上可以看到去除效果明显。表 1 列出 PSD 谱图中去趋势项前后的峰值及对应频率。

参考文献:

- [1] Bendat J S, Piersol A G. Random data: analysis and measurement procedures[M]. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [2] 高品贤. 趋势项对时域参数识别的影响及消除[J]. 振动、测试与诊断, 1996, 14(2): 20-26.

(下转第 41 页)

通过了从检验进入主检验,给出了两种方法。

方法 1: 检验 p 值与函数 $y=x$ 的拟合程度。如果拟合程度较好,说明 p 值服从 $[0, 1]$ 上均匀分布。

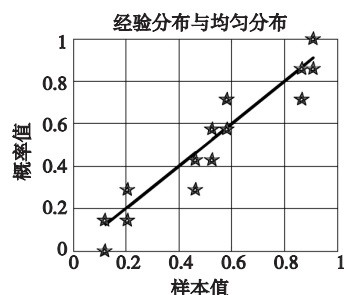


图 5 p 值样本与相应函数值

Fig. 5 P-sample and Corresponding value

方法 2: 生成一组服从 $[0, 1]$ 上均匀分布的数据, 检验这组数据与 p 值的一致性, 经秩和检验, 没有显著性差别, 故 p 服从 $[0, 1]$ 上均匀分布。

该模型同时通过了从、主检验, 说明该模型输出与实际系统输出具有良好的一致性。

4 结论

本文提出了基于飞行试验数据的仿真模型主从一体化检验方法。该方法将仿真模型检验分为两个步骤——从检验和主检验。其中, 从检验步骤验证了单次飞行试验与仿真模型在该次飞行试验输出下的一致性; 主检验从整体上验证了所有飞行试验结果与仿真模型输出的一致性。实例分析表明, 该方法能够依据靶场高价值武器系统小样本量飞行试验数据解决仿真试验数据的可信性问题, 具有更好的检验精度。

参考文献:

[1] 胡玉伟, 马萍, 杨明, 等. 基于改进灰色关联分析的方针数据综合一致性检验方法[J]. 北京理工大学学报, 2013(33): 711-715.

[2] 魏华梁, 李钟武. 灰色关联分析及其在导弹系统仿真模型验证中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 1997, 19(2): 55-61.

[3] 孙勇成, 周献中, 李桂芳, 等. 基于灰色关联分析的仿真模型验证及其改进[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 522-525.

[4] 胡方, 黄建国, 张群飞. 基于灰色系统理论的水下航行器效能评估方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(3): 411-415.

[5] 刘藻珍. 基于飞行试验数据的仿真模型验证方法的研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 281-284.

[6] 李伟, 焦松, 陆凌云, 等. 基于特征差异的仿真模型验证及选择方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(10): 2134-2144.

[7] 孙成松, 花传杰, 李永. 关于仿真可信度评估及仿真VV&A的探讨[J]. 计算机仿真, 2005(5): 74-77.

[8] 王子才, 张冰, 杨明. 仿真系统的校核、验证与验收(VV&A): 现状与未来[J]. 系统仿真学报, 1999(5): 321-325.

[9] 白瑞阳, 吴晓燕, 张玉新, 等. Gabor 变换在仿真模型验证中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(4): 187-188.

[10] 刘飞, 马萍, 杨明, 等. 复杂仿真系统可信度量化研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(1): 1-3.

[11] Sargent R G. Verification and validation of simulation models [C]//Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, New York: IEEE, 2009: 162-176.

[12] Gu H, Song B F. Study on effectiveness evaluation of weapon systems based on grey relational analysis and TOPSIS[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(1): 106-111.

[13] 吴静, 吴晓燕, 陈永兴. 基于改进灰色关联分析的仿真模型验证方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1677-1679.

[14] 魏华梁, 翟宏伟. 最大熵谱估计在导弹系统仿真模型验证中的应用[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 1996, (3): 234-238.

[15] 宁小磊, 赵娜, 吕永佳, 等. 基于阵灰色关联分析的仿真模型验证方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2014(3): 203-205.

(上接第 36 页)

[3] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[L]. 火炮发射及控制学报, 2001(1): 21-23.

[4] MITOV I P. A method for assessment and processing of bin medical signals containing trend and periodic components[J]. Medical Engineering & Physics, 1998, 20(9): 660-668.

[5] 郭虎生, 颜冰, 吴志东. 基于微机电加速度传感器的海

底地震仪[J]. 探测与控制学报, 2013, 6(3): 29-32, 50.

[6] 张小娜, 马伯渊, 田华. 小波分析在微机械陀螺随机漂移建模中的应用[L]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(3): 59-60, 64.

[7] Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. 信号与系统[M]. 刘树棠, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.

[8] Kitagawa G, Gersch W. Smoothness priors analysis of time series [M]. Springer Press, 1996.