

分形噪声中谐波信号的提取

李海英¹, 陈捷², 孙进才², 陈克安²

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049; 2. 西北工业大学航海工程学院, 西安 710072)

摘要: 本文提出一种分形噪声中谐波信号的提取算法。它利用小波变换对 $1/f$ 噪声的白化作用, 结合自适应自调谐滤波器组, 在小波域实现了分形噪声与谐波信号的分离。仿真结果表明, 该算法能够有效抑制分形噪声, 显著地提高信噪比。

关键词: 分形噪声; 小波变换; 自适应滤波

中图分类号: O422.8 **文献标识码:** A

Extraction of harmonics from fractal Noise

LI Hai-ying¹, CHEN Jie², SUN Jin-cai², CHEN Ke-an²

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In this paper, an extraction algorithm of harmonics in fractal noise is proposed. It is based on the fact that discrete wavelet transform can serve as a whitening filter of $1/f$ noise. Combined with adaptive self-tuning filter banks, the harmonics are separated from fractal noise in wavelet domain. Simulation result shows that the fractal noise is restrained effectively and the signal to noise ratio is improved observably by using this algorithm.

Key word: fractal noise; wavelet transform; adaptive filter

1 引言

以往的分形信号研究中, 主要侧重于白噪声中分形信号的波形与参数估计^[1,2], 噪声中谐波的提取或估计是信号处理领域经常遇到的一类问题, 而对于分形噪声中的谐波频率的估计问题, 最近才有少量报道^[3]。本文首次从信号滤波角度给出这一问题的解决方法, 即利用 $1/f$ 噪声的小波系数是弱相关或不相关的特性, 引入自适应自调谐滤波器组, 进行分形噪声与谐波信号的自动分离。由于现实中许多非平稳噪声符合 $1/f$ 噪声模型, 因此, 本文算法对于具有分形特性的非平稳信号中谐波信号估计和检测问题有较好的应用前景。

2 算法原理

2.1 $1/f$ 噪声的小波变换特性

这里描述的 $1/f$ 噪声采用 Mandelbrot 和 Van Ness 提出的分数布朗运动模型, 因其在数学处理上的简便性而成为统计自相似信号的一个经典模型。

收稿日期: 99-10-20; 修订日期: 99-12-16

作者简介: 李海英(1970-), 女, 博士后。

分数布朗运动的自相关以及增量性质如下:

$$r_B(t, s) = \frac{\sigma^2}{2} [|t|^{2H} + |s|^{2H} - |t-s|^{2H}] \quad (1)$$

$$E[|B(t+\tau) - B(t)|^2] = \sigma^2 \tau^{2H} \quad (2)$$

由(1)式可见, 分数布朗运动 $B(t)$ 是非平稳的, (2)式是其增量的方差公式, 它直观地反映了 $B(t)$ 在时间域的统计自相似性; 其中的指数 H 称为 Hurst 指数(又称余维数), 由于分数布朗运动的分维数 F_d 以概率 1 等于 $2-H$, 因此, H 也反映了分形曲线的粗糙程度。作为一种非平稳过程, 分数布朗运动具有如下经验形式的功率谱:

$$s(f) = c |f|^{-\gamma_b} \quad (3)$$

这里 $\gamma_b = 2H + 1$ 。

因此, 分数布朗运动可作为谱指数为 $1 < \gamma_b < 3$ 的 $1/f$ 噪声的模型。分数布朗运动是一种无规分形, 其统计自相似性反映在它的增量方差与时间增量间存在着幂律关系(2)式。然而这种时间域的自相似性却带来信号处理时的难度。Wornell 等研究了分数布朗运动的小波变换特性, 发现其小波系数可近似为高斯白噪声, 或者说它的自相关具有下面的衰减形式^[4]:

$$E[d_m^n d_l^n] \sim O(|2^m k - 2^n l|^{2(H-R)}) \quad (4)$$

其中 d_m^n 、 d_l^n 分别为 m 、 n 尺度上的小波细节系数, H

为分数布朗运动的 Hurst 指数, 所采用的小波基具有 R 阶消失矩, (4) 式表明了相同或不同尺度上的小波系数近似不相关。因此, 离散小波变换将 $1/f$ 噪声时间域的自相似性变换到小波域的尺度上来, 而且具有白化或去相关作用, 这使得我们可以用传统的平稳信号处理方法对其做进一步地处理。

2.2 谐波估计算法

分形噪声中, 设得到的观测数据为:

$$y(n) = s(n) + b(n) + w(n) \quad (5)$$

其中

$$s(n) = \sum_{i=1}^k A_i \sin(2\pi f_i n + \varphi_i) \quad (6)$$

式中 A_i, f_i, φ_i 分别为第 i 个谐波的幅值、频率和相位; $b(n), w(n)$ 分别为与 $s(n)$ 无关的分数布朗运动和高斯白噪声。本文研究的信号估计问题是从 $y(n)$ 中得到的 $s(n)$ 的估计值 $\hat{s}(n)$ 。对此问题, 由于分形噪声的非平稳性质, 若直接实施平稳信号的最佳滤波, 结果不能令人满意。但是通过离散正交小波变换, (5) 式成为:

$$y_n^m = s_n^m + b_n^m + w_n^m \quad (7)$$

这时 b_n^m 已成为弱相关的平稳过程, s_n^m 仍是强相关的周期信号。这时, 虽然采用不同的滤波估计算法都可以从 y_n^m 中得到 s_n^m 的估计值 \hat{s}_n^m 。但是, 采用分离周期分量与宽带分量的自适应自调谐滤波器, 可以在不需知道 $s(n)$ 许多先验知识的条件下, 得到 \hat{s}_n^m , 这一点更具有实用价值。然而, 这里若直接采用离散小波变换存在一个明显的缺陷, 即如果观测数据是有限长度 N 的, 那么各尺度上 y_n^m 序列长度是按 $2^{-m}N$ 递减的, 这将导致在较大尺度 m 上的 y_n^m 长度急剧缩短, 所以, 这里采用一种可以保证小波系数是与观测数据等长度的移不变的离散正交小波变换^[1]。移不变离散正交小波变换定义为:

$$\tilde{d}_n^m[f] \triangleq d_n^m(T_{-n}f) \quad (8)$$

其中 T_{-n} 为延迟算子; \tilde{d}_n^m 是移不变的, 即

$$\tilde{d}_n^m[Tf] = \tilde{d}_{n-1}^m[f] \quad (9)$$

\tilde{d}_n^m 与 d_n^m 存在上采样关系

$$\tilde{d}_{2^{-m}n}^m[f] = d_n^m[f] \quad (10)$$

实际进行小波多分辨分解计算时, 将 Mallat 算法中的高、低通滤波器系数作上采样即可得 \tilde{d}_n^m 。信号重构时根据(10)式, 直接由 \tilde{d}_n^m 重构。这时, 分形噪声的 \tilde{d}_n^m 仍保留了平稳弱相关的性质, 而且, \tilde{s}_n^m 仍是周期信号, 具体推导如下:

设 $s(n)$ 的最小周期为 L , 即 $s(n+L) = s(n)$, 则

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{n+L}^m[f] &= s_n^m[T_{-(n+L)}f] = s_n^m[T_{-n}f] \\ &= \tilde{s}_n^m[f] \end{aligned} \quad (11)$$

由上述推导可知: \tilde{s}_n^m 仍是以 L 为周期的周期信号, 且其谐波成份与 $s(n)$ 相同。

至此, 可以给出分形噪声中谐波信号估计的多尺度自适应自调谐滤波器 (Adaptive Self-Tuning Filter), 简称 ASTF, 组实现框图如图 1 所示。图中 ASTF 采用基本的横向结构, 利用 Widrow 的 LMS 算法实现^[5]。

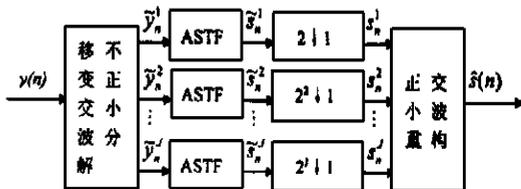


图 1 多尺度自适应自调谐滤波器组框图

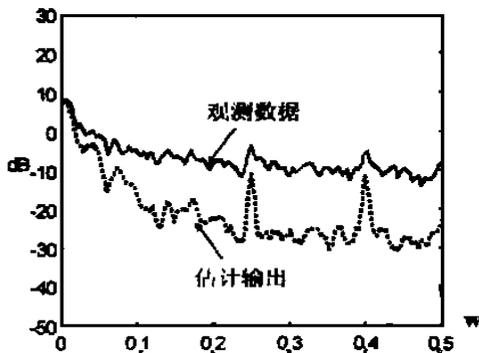


图 2 仿真信号处理结果

3 仿真结果及分析

为了验证本文算法的性能, 我们进行了仿真计算。设观测数据为:

$$\begin{aligned} y(n) &= (\sin 0.57\pi n + \sin 0.87\pi n) \\ &+ [b(n) + w(n)] \cdot \alpha \end{aligned} \quad (12)$$

式中 α 为调节噪声方差的系数, $b(n)$ 的 $H = 0.3$, $w(n)$ 为高斯白噪声, 数据长度为 4096, 算例中分形噪声方差大于白噪声方差, 两者方差之比为 2 : 1, 当然这不是必须的, 这里主要是考察本算法对分形噪声的抑制能力。调节 α 使谐波信号的信噪比足够低, 图 2 是采用本文算法滤波前后的功率谱比较结果, 实线表示观测数据, 虚线表示估计输出, 若采用窄带信噪比定义, 可知谐波信号的信噪比平均由 3.6dB

(下转第 136 页)

很显著的影响。图5是实测 D 与回波信号幅度比值 R (即不同 D 值的回波幅度与 $D=0$ 时回波幅度之比)的关系曲线,其中 d_0 为弯曲振动圆盘的节圆直径。由图可知当 $D=d_0$ 时, R 的值最大,即此时换能器灵敏度最高。

此外,对圆形挡板的厚度的影响也进行了试验,结果表明,采用厚度为0.2mm和0.5mm的不锈钢片做成的圆形挡板,与采用厚度为1.0mm-1.5mm的铝合金片做成圆形挡板对换能器灵敏度无明显影响,实际采用1.0mm厚的铝合金片做成圆形挡板。

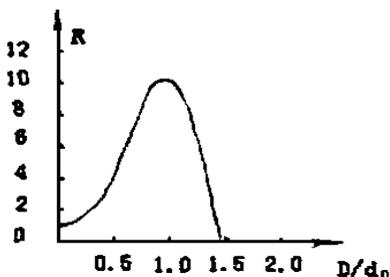


图5 挡板直径 D 与回波幅值比 R 的关系

4.4 发射波拖尾试验

同一换能器不加圆形挡板时,实测换能器的发射波拖尾宽度约为6ms,采用气隙谐振结构并调整 $\delta=K\lambda/2$ 时信号幅度最强,同时发射波拖尾也最窄,约为3.5ms-4ms。可见气隙谐振结构有效减少了换能器的测量盲区。

(上接第132页)

提高到14.5dB,多次独立试验的结果也是一致的。

需要指出的是,这里的正交小波选用Daubechies 4小波,它具有4阶消失矩,根据(4)式的结论,这样可以保证对分形噪声具有较好的白化作用。另外,多分辨分析的最大尺度 L 取为7,因为在大尺度上分形噪声的移不变小波系数相关性较强,所以 L 不能太大。

4 结 语

本文针对分形噪声中谐波信号的提取问题,提出将移不变小波变换与自适应自调谐滤波器组结合起来的滤波算法。从原理上阐明了其可行性,并通过仿真验证了它的有效性。结果表明,通过本算法,能够消除分形噪声的长程相关性,可以在未知谐波信号知识的情况下,得到信号的较好估计。舰船辐射噪

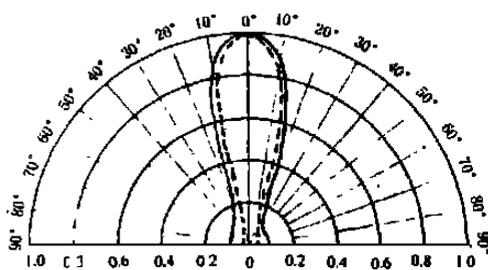


图6 换能器指向性

4.5 换能器的指向性

图6中虚线为不加圆形挡板时换能器的指向性,实线为加圆形挡板并调至谐振后换能器的指向性,比较可看出,采用气隙谐振结构后换能器辐射指向性却略微变差。由于实际应用中通常采用喇叭进行聚焦,以提高指向性,所以指向性完全可以通过加喇叭来补偿。

5 结束语

综上所述,气隙谐振型气介式超声换能器的辐射效率、接收灵敏度以及发射波的拖尾都比圆盘复合振动型气介超声换能器得到了十分显著的改善。

参考文献:

[1] 金长善.超声工程[M].哈尔滨工业大学出版社.
[2] 同济大学声学研究室.超声工业测量技术[M].上海人民出版社.

声是一类非平稳随机信号,研究表明^[6]:它们在一定尺度范围内符合分形布朗运动模型,因此,预计本文提出的方法将有助于从舰船辐射噪声中提取出有用的谐波信息,相关的研究工作正在进一步开展。

参考文献:

[1] Chen B S, Lin C W. Multiscale wiener filter for the restoration of fractals: Wavelet filter bank approach[J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42(11): 2972-2982.
[2] Hirchoren G A, D' Attellis C E. Estimation of fractal signals using wavelets and filter banks[J]. IEEE Trans on SP, 1998, 46(6): 1624-1630.
[3] 肖创柏,李衍达.分形差分高斯噪声中正弦波频率估计[J].通信学报,1996,17(3): 21-26.
[4] Wornell G W, Oppenheim A V. Estimation of fractal signal from noisy measurements using wavelets[J]. IEEE Trans on SP, 1992, 40(3): 611-623.
[5] Widrow B et al. Adaptive noise cancelling: Principle and applications[J]. Proc IEEE., 1975, 63(12): 1692-1716.
[6] 高翔,陆信人.舰船辐射噪声的分形布朗运动模型[J].声学学报,1999,24(1): 19-28.