

水下目标辐射噪声时间序列的非线性降噪处理*

侯平魁 龚云帆 杨毓英 史习智

(上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室 上海 200030)

林良骥

(大连测控技术研究所 大连 116013)

1999 年 9 月 21 日收到

2000 年 4 月 25 日定稿

摘要 噪声是信号检测和目标识别的障碍。对水下目标辐射噪声降噪,过去常用线性的方法来对信号进行滤波。对于线性系统产生的信号,用线性滤波方法可以达到较好的效果但对非线性系统产生的信号或受非线性因素影响较大的信号,用线性滤波方法不能很好地滤除噪声。已经证明,水下目标辐射噪声信号中具有明显的非线性成分。因此,本文提出运用非线性方法对水下目标辐射噪声时间序列进行降噪处理。通过降噪前后重构吸引子、关联积分曲线斜率及信噪比的比较,表明该方法对去除水下目标辐射噪声时间序列中的噪声干扰十分有效。

PACS 数: 43.30, 43.60

Nonlinear noise reduction of the underwater target radiated noise time series

HOU Pingkui GONG Yunfan YANG Yuying SHI Xizhi

(State Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise, Shanghai JiaoTong Univ. Shanghai 200030)

LIN Liangji

(Dalian Scientific Test and Control Technology Institute Dalian 116013)

Received Sept. 21, 1999

Revised Apr. 25, 2000

Abstract Noise affects strongly the detection of signals and target recognition. A lot of literatures have been printed on the linear noise reduction for the underwater target radiated signal. For linear systems, linear filtering methods are compatible. However, these noise reduction methods are not fit for the signal from nonlinear systems or the signal affected severely by the nonlinear factor.

Non-linearity of signals radiated by the underwater target have been proved in the latest literature. This presentation provided the noise reduction results with the nonlinear method. Irregular signals from nonlinear sources exhibit genuine broad band spectra and there is no justification to identify any continuous component in the spectrum as noise. Instead, structure in the reconstructed phase space will be exploited. This paper presents the difference between the reconstructed attractor of experimental time series and the noise reduced time series. Also, the difference of the correlation dimension and the signal-to-noise between experimental time series and the noise reduced time series is provided. According to the result, the nonlinear noise reduction method is effective for the underwater target radiated noise time series.

* 国家自然科学基金资助项目 (编号 69772001)

引言

噪声污染对于实际物理过程来说是不可避免的, 系统本身受到的外界干扰以及数据采集过程等都会使获得的实验数据中混入噪声。研究表明, 水下目标辐射噪声信号中有很强的非线性特性, 它的最大李雅普诺夫指数是正值, 表明它是混沌的^[1], 这就给运用非线性降噪提供了依据。在信号处理领域, 消噪是长期困扰研究者的课题, 由于噪声的影响, 使得远程探测及弱信号处理变得非常困难。降低噪声是对信号进行有效分析的不可或缺的手段。在信号检测和目标识别中, 非线性的作用是显而易见的, 很小的噪声也会使吸引子维数和李雅普诺夫指数的计算失去意义, 因此在计算目标噪声信号时间序列的分维数以及估计它的李雅普诺夫指数之前, 必须进行降噪处理。本文首先以典型的混沌系统为例说明了方法的有效性, 然后对水下目标辐射噪声时间序列进行降噪处理, 通过比较降噪前后重构吸引子相图、关联曲线的形状及信号信噪比的对比, 说明了用非线性降噪方法对水下目标辐射噪声时间序列的进行降噪的有效性。

1 方法

在传统的信号处理方法中, 降低噪声是通过滤波来实现的, 而滤波是基于对信号进行频谱分析, 在获得信号的频谱分布状况下进行的。对线性滤波方法, 使用线性滤波器, 只要时间序列足够长, 对于周期和准周期信号中的噪声是可以彻底滤除的, 这主要基于信号在频域中的分布特点。但是, 对于由非线性系统产生的信号中的噪声, 由于信号的频谱和噪声的频谱都表现为宽带连续谱, 使传统的线性滤波方法则显的无能为力。这就需要探索新的适用于滤除非线性信号的降噪方法。随着非线性时间序列分析分法的推广, 人们对该领域的研究越来越关注^[1-10]。Broomhead 和 King 最早将主分量分析方法引入非线性时间序列用来滤除信号中的噪声^[3]; Kostelich 和 Yorke 研究了动力系统的降噪问题, 提出利用实验数据构造局部线性动力学来降噪的方法^[4]; Schreiber 和 Grassberger 提出使用局部线性模型来实现降噪的方法, 其结果使得关联维数的计算准确性得以显著改善^[7,8]。本文基于非线性系统的局部线性拟合, 通过寻找邻域内的近似轨道来对原来的轨道进行修正, 达到降噪的目的, 其方法如下。

对测得的一维时间序列 $\{s_n\}$, 取其中的任意一点 s_r 作为参考点, 它的 1 个前序点 (Predecessors) 为: $s_{r-1}, \dots, s_{r-1}$, 而它的 k 个后序点 (Successors) 为: $s_{r+1}, \dots, s_{r+k}$ 。以点 S_r 与它的 1 个前序点和 k 个后序点表示 d 维嵌入空间中的一:

$$\overline{S_r} = (s_{r-1}, \dots, s_{r-1}, s_r, s_{r+1}, \dots, s_{r+k})^T,$$

且满足嵌入维数 $d = 1 + 1 + k$ 。嵌入空间中的点 $\overline{S_i}$, $\overline{S_j}$ 和 $\overline{S_m}$ 等 N 个点是 $\overline{S_r}$ 的邻域 $\cup_{S_r}^N$ 中的点, 它们满足线性近似关系式:

$$\begin{aligned}\overline{S_{i+1}} &= A\overline{S_i} + B, \\ \overline{S_{j+1}} &= A\overline{S_j} + B, \\ \overline{S_{m+1}} &= A\overline{S_m} + B,\end{aligned}\quad (1)$$

其中, A 和 B 为待定系数。

由上面方程组 (1) 可以得出, 时间序列 $\{s_n\}$ 中的任意一个参考点 s_r 可以通过它和它的前序点 $s_{r-1}, \dots, s_{r-1}$ 以及后序点 $s_{r+1}, \dots, s_{r+k}$ 的线性组合来表示, 即:

$$\begin{aligned}s_r &= a_{-1}s_{r-1} + \dots + a_{-1}s_{r-1} + a_0s_r + \\ &\quad a_1s_{r+1} + \dots + a_ks_{r+k} + b.\end{aligned}\quad (2)$$

该线性近似关系在该点所在嵌入空间的小邻域 $\cup_{S_r}^N$ 适用。然后采用最小二乘拟合方法, 在点 $\overline{S_r}$ 的 N 邻域内满足极值条件下^[9]:

$$\sigma^2 = \sum_{\overline{S_i} \in \cup_{S_r}^N} (\overline{aS_i} + b - s_i)^2 = \min. \quad (3)$$

求得 $\overline{a}(a_{-1}, \dots, a_{-1}, a_0, a_1, \dots, a_k)$ 和 b 。这样就可以根据式 (2) 来计算比点 s_r 更接近真实混沌轨道的一点 y_r , 重复上述过程, 在一定的可接受范围内就可以得到比原来的噪声混沌轨道相对干净的混沌轨道, 达到降噪的目的。文献 9 中给出了算法的物理意义, 如图 1 所示。

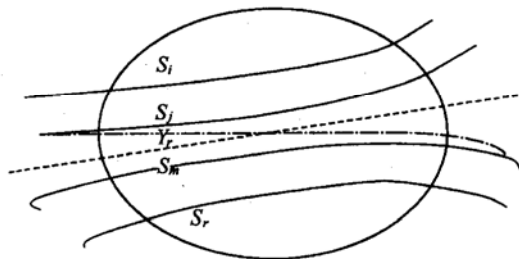


图 1 算法原理图

实线: 表示噪声混沌轨道 点划线: 代表真实混沌轨道
虚线: 表示最小二乘拟合轨道

y_{r-1} 、 y_r 和 y_{r+1} 表示重构空间中一条真实的混沌轨道, 由于受到噪声的干扰, 与它对应的实际采样值为 s_{r-1} 、 s_r 和 s_{r+1} 。在噪声混沌轨道的充分小邻域内, 还存在着另外一些噪声混沌轨道 s_{i-1} 、 s_i 、 s_{i+1} ; s_{j-1} 、 s_j 、 s_{j+1} ; s_{m-1} 、 s_m 、 s_{m+1} 等, 所有噪声混沌轨道在充分小的邻域 U 内都满足线性关系式 (2), 它们在邻域内都近似为直线。由于噪声的干扰, 真实混沌轨道 y_{r-1} 、 y_r 和 y_{r+1} 并不与噪声轨道 s_{i-1} 、 s_i 、 s_{i+1} ; s_{j-1} 、 s_j 、 s_{j+1} ; s_{m-1} 、 s_m 和 s_{m+1} 等混在一起。为了逼近真实混沌轨道 y_{r-1} 、 y_r 和 y_{r+1} , 用到达个条噪声轨道距离平方和最小的一条直线, 即采用最小二乘拟合方法。在求出最小二乘拟合直线后, 让噪声混沌轨道 s_{r-1} 、 s_r 和 s_{r+1} 向该直线投影, 所得投影就是所要求的降噪后的混沌信号。

2 实验数据及分析结果

2.1 典型混沌时间序列的降噪

在非线形信号处理中, Henon 映射是典型的混沌系统。这里我们以 Henon 映射产生的时间序列来验证方法的有效性。对 Henon 映射方程:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= 1 - ax^2 + y_n \\ y_{n+1} &= bx_n \end{aligned}$$

取 $a = 1.4$, $b = 0.3$, 迭代产生长度为 10000 的时间序列 $x(n)$ 。对 $x(n)$ 用均值为零, 标准差为 0.05 的白噪声进行干扰得噪声混沌时间序列 $y(n)$, 其延迟取 $tal = 1$ 时的相图如图 2 所示。从图中可以看到, 由于噪声的干扰原本精细的 Henon 映射奇怪吸引子的分形结构变得模糊了。运用该算法对噪声混沌时间序列 $y(n)$ 进行降噪处理, 迭代 20 次得到降噪后的时间序列 $y'(n)$, 图 2 中显示了其延迟取 $tal = 1$ 时的相图。比较降噪前后的相图可得: 经过降噪处理后的时间序列, 其吸引子的精细结构能够清楚地显示出来。

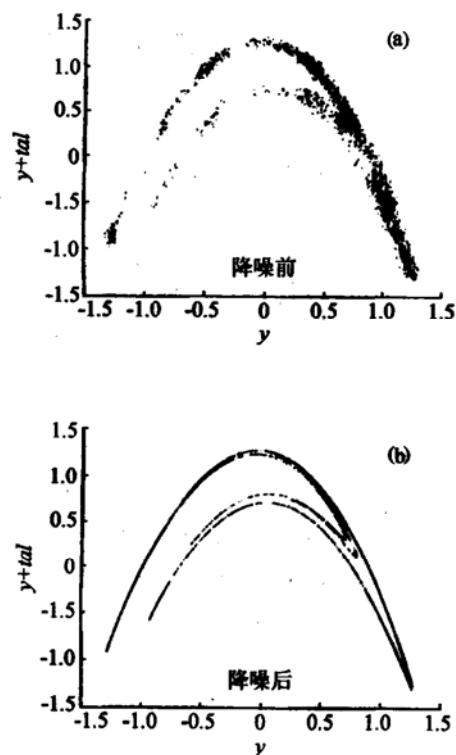


图 2 典型混沌系统: Henon 映射降噪前后相图比较

2.2 水下目标辐射噪声序列降噪

众所周知, 水下目标识别技术是现代军事领域中进行反潜战的关键技术之一, 而在强噪声弱信号环境下对目标进行识别则更为关键, 这就要求对获得的信号进行降噪处理以提高信号的信噪比, 过去的降噪方法主要是运用线性的滤波器来实现, 只能在一定程度上提高信号的信噪比, 这主要是由于水下目标辐射噪声信号具有很强的非线性, 限制了线性滤波器的作用。下面通过相图的比较来说明非线性时间序列降噪方法对水下目标辐射噪声信号进行降噪处理的有效性。

本文采用的水下目标辐射噪声信号是海上实测信号, 采样频率为 25 kHz, 每个样本采样时间为 3 s, 实验示意图如图 3 所示。

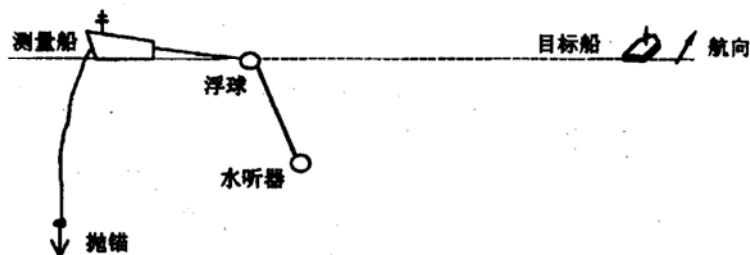


图 3 噪声信号采集示意图

2.2.1 吸引子相图比较

根据 Takens 相空间重构定理可知, 一个非线性动力系统可以通过观测时间序列重构的吸引子来描述。Hammel 等人通过流形分解方法严格证明的遮蔽定理 (Shadowing lemma) 指出: 噪声会影响非线性系统的运动轨道, 使其偏离原来的运动轨道, 受到噪声影响的噪声轨道经过降噪处理后可获得一条满足系统方程的干净轨道, 即系统的真实运动轨道。反映在相图上就是: 受到噪声干扰后, 吸引子相图由原来的光滑曲线变成不规则的形状。

实验测得的时间序列用 $x(t)$ 来表示, 算法中取嵌入维数为: $l = k = 2, d = l + k + 1 = 5$, 循环次数为 20, 降噪处理后的时间序列用 $y(t)$ 来表示。我们分别以 $x(t)$ 和 $y(t)$ 为横坐标, $x(t + tal)$ 和 $y(t + tal)$ 为纵坐标演示其相图, 如图 4 所示。其中, $tal = 1$ 。图中显示, 降噪前水下目标辐射信号时间

序列的吸引子相图很不规则, 经过降噪处理后, 吸引子相图变得十分光滑。

2.2.2 关联积分曲线局部斜率的比较

关联维数不仅能够量化奇怪吸引子的分维数大小从而作为判定动力系统出现混沌运动特征指标, 而且还可以用来比较降噪的效果。在相空间重构中, 随着嵌入维数的增加, 由时间序列重构出的吸引子在根据关联积分曲线计算关联维数时, 曲线斜率将在等于关联维数后保持稳定, 曲线出现一段平台区域; 当时间序列中混有噪声时, 关联积分曲线的斜率将不断升高, 引起斜率继续升高是由于随机噪声充满相空间的各个方向, 平台区域缩小甚至消失。图 5 中给出了降噪前后关联积分曲线斜率的比较, 维数取从 1 到 12 共绘出 12 条曲线。从图 5 可见: 降噪前没有出现明显的平台, 而降噪后的平台十分明显。

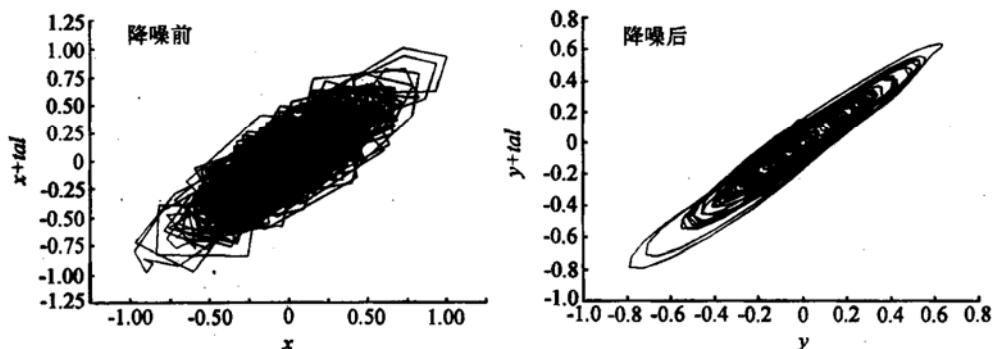


图 4(a) 数据 1

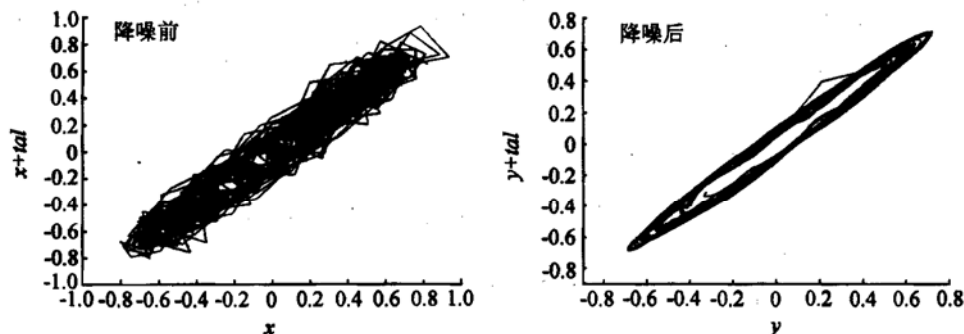


图 4(b) 数据 2

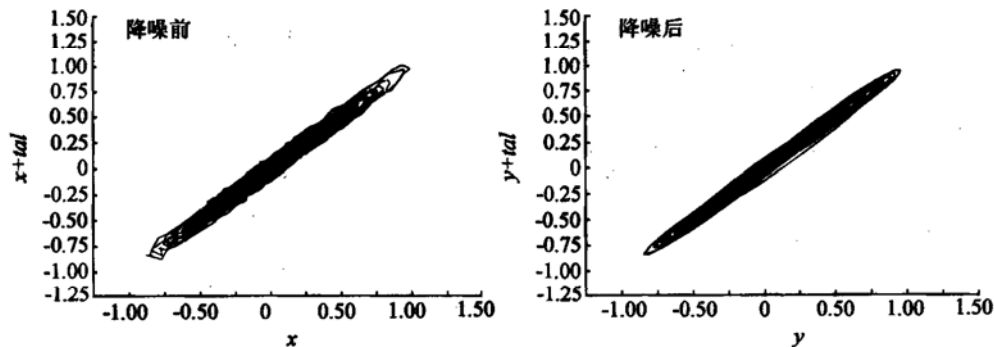


图 4(c) 数据 3

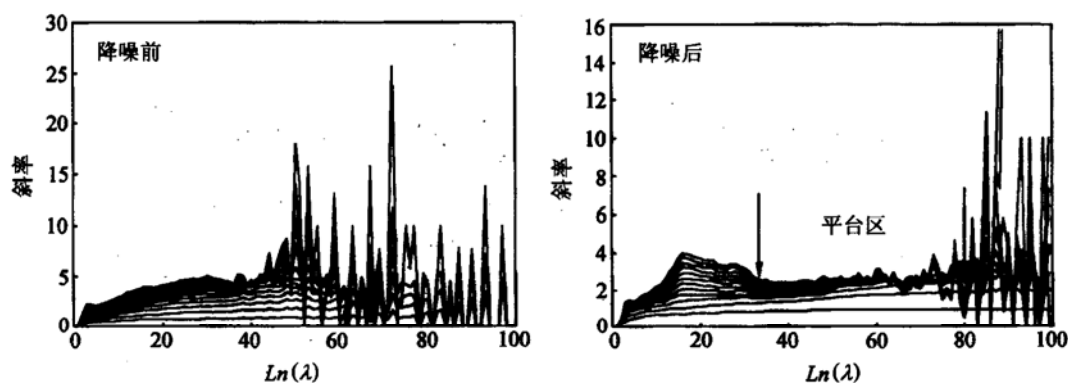


图5 降噪前后关联积分曲线斜率的对比

 λ 为盒子半径

2.2.3 信噪比的比较

信噪比是衡量降噪效果的统计量。为了量化降噪的效果, 根据传统的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio SNR) 的定义:

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{\text{signal}}}{\sigma_{\text{noise}}} \right), \quad (4)$$

其中, σ_{signal} 和 σ_{noise} 分别是信号和噪声的方差, 本文定义经过降噪后的信噪比为:

$$\text{SNR}' = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{x-y}} \right), \quad (5)$$

其中, σ_y 和 σ_{x-y} 分别表示降噪后的时间序列 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 和噪声序列 $x_1 - y_1, x_2 - y_2, \dots, x_n - y_n$ 的方差。表 1 给出了根据公式 (5) 计算的信噪比。

表 1 3 组数据的 SNR' 计算结果

	数据 1	数据 2	数据 3
信噪比 SNR'(dB)	26.3541	19.1876	20.9836

从公式 (5) 可知, 定义的信噪比尽管不代表观测时间序列的信噪比, 但是它反映经过降噪处理后, 信噪比的提高的量。

3 结论

降噪是水下目标信号处理领域的一项关键课题, 降噪的好坏对目标检测及识别的优劣十分关键。在传统的线性滤波方法不能够达到理想效果的情况下, 根据水下目标辐射信号中具有非线性成分的特点, 尝试非线性时间序列的降噪方法无疑是一个理想

的选择。本文讨论了非线性时间序列的降噪问题, 给出了非线性降噪算法的实现方法, 以水下目标辐射信号时间序列为应用背景, 通过降噪前后时间序列的吸引子相图、关联积分曲线的斜率和信噪比的比较, 表明应用非线性时间序列降噪方法对水下目标辐射噪声信号进行降噪是有效的。

参 考 文 献

- 1 Frison T W, Abarbanel H D I, Cembrola B J. Neales chaos in ocean ambient "noise". *Journal of Acoustical Society of American*, 1996; 99(3): 1527—1539
- 2 Abarbanel H D I. Analysis of observed chaotic data. New York: Springer, 1996
- 3 Kantz H, Schreiber T. Nonlinear time series analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- 4 Kostelich E J, Schreiber T. Noise reduction in chaotic time-series data: A survey of common methods. *Physical Review E*, 1993; 48(3): 1752—1765
- 5 Grassberger P, Hegger R, Kantz H, Schaffrath C. On noise reduction methods for chaotic data. *Chaos*, 1993; 3(2): 127—141
- 6 Davies M. Noise reduction schemes for chaotic time series. *Physica D*, 1994; 79: 174—192
- 7 Kantz H, Schreiber T, Hoffmann I. Nonlinear noise reduction: A case study on experimental data. *Physical Review E*, 1993; 48(2): 1529—1538
- 8 Richter M, Schreiber T, Kaplan D K. Fetal ECG extraction with nonlinear state-space projections. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1998; 45(1): 133—136
- 9 Gong Y F, Ren W, Shi X Z, Xu J X, Hu S J. Recovering strange attractors from noisy interspike intervals of neuronal firings. *Physics Letters A*, 1999; 258: 253—262
- 10 Schreiber T, Richer M. Nonlinear projective filtering in a data stream. 1999