

基于相空间投影技术的舰船目标信号降噪处理

武勇, 景志宏, 刘振霞

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:由于很多混沌信号具有较宽的频谱成分,致使传统的滤波降噪方法存在很大的局限性。线性滤波器非但不能有效地抑制混沌信号中的噪声,相反,还可能会使混沌信号失真。文中利用相空间投影技术对具有混沌特征的时间序列进行降噪处理,并将其应用于舰船目标噪声信号的降噪分析中,结果证实了所提方法的可行性和有效性。

关键词:混沌;时间序列;降噪

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2004)04-0047-03

由于系统本身常受到外界的干扰,对于实际系统来说噪声影响是不可避免的。噪声在不同程度上影响混沌时间序列分析方法的有效性,甚至会使分析方法失效^[1-6]。如动力系统的两个重要参数,吸引子的维数和 Lyapunov 指数,两者对很小的噪声都非常敏感,噪声使计算吸引子维数变得更加复杂,除非对数据采取降噪预处理,否则实验数据中的噪声可能会完全掩盖潜在的分形结构。因此,研究混沌时间序列的降噪问题具有重要的意义。

传统的信号处理方法中,降噪是通过滤波来实现的。而对于混沌信号的研究发现,很多混沌信号的时间序列具有宽的频谱成分,一些被抑制的频率成分可能就是动力系统的一部分。而且,混沌系统的频谱结构随时间不断发生变化,这种不稳定的谱结构给滤波带来了很大的困难。对于映射系统、低采样率的连续系统以及低噪声水平的混沌时间序列,线性滤波器非但不能有效地抑制混沌信号中的噪声,相反,还可能会使混沌信号失真,从而增加了其复杂性^[6]。

本文引入非线性相空间投影算法^[1,3,6],并将其应用于水下目标辐射信号的降噪分析中,实验表明该方法对混沌信号具有一定的降噪效果。

1 相空间投影算法

假设映射 \hat{F} 是一个光滑函数,在每点 X_n 附近对 \hat{F} 进行局部线性化:

$$\hat{F}(X) = \hat{F}(X_n) + J_0(X - X_n) + O(\|X - X_n\|^2) \approx J_n X + b_n \quad (1)$$

J_n 是 \hat{F} 在点 X_n 的雅可比矩阵,采用延时坐标法表示线性化的关系方程(1)。一个 $m-1$ 维映射 $x_n = F(x_{n-m+1}, \dots, x_{n-1})$ 可表述为 $\bar{F}(x_{n-m+1}, \dots, x_n) \equiv \bar{F}(X_n) = 0$, 或线性化为

$$a^{(n)} \cdot R(X_n - \bar{X}^{(n)}) = 0 + O(\|X_n - \bar{X}^{(n)}\|^2) \quad (2)$$

其中, $\bar{X}^{(n)} = |u_n|^{-1} \sum_{n' \in u_n} X_{n'}$ 是 X_n 的一个小邻域 u_n 内大量延时矢量的中心。对角线权矩阵 R 将使降噪集中在延时矢量最稳定的中间坐标,这可以通过选择大的 R_{11} 和 R_{mm} , 并令其它对角线项 $R_{ii} = 1$ 而获得。对于 $R = I$, 我们将获得正交的投影。对于噪声序列 s_n , 上述关系不是十分有效,只是等于某些与噪声有关的误

收稿日期: 2003-01-06

基金项目: 第28届中国博士后科学基金资助项目

作者简介: 武勇(1968-),男,陕西西安人,讲师,主要从事移动通信研究;

景志宏(1965-),男,河北邢台人,副教授,博士(后),主要从事目标识别、信号处理、移动通信等研究。

差:

$$\mathbf{a}^{(n)} \cdot \mathbf{R}(\boldsymbol{\beta}_n - \bar{\boldsymbol{\beta}}^{(n)}) = \eta_n \quad (3)$$

这就意味着在相空间中,对线性近似而言,存在着一个吸引子不趋向的方向 $\mathbf{a}^{(n)}$ 。

通常动力学的准确维数 $m - 1$ 并不知道,而且,对于一般映射,转变成延时坐标将使确定描述动力学的维数 m 最小值增加。我们在 m 维上采用延时重构,而动力学将轨迹限制在维数为 m_0 的一个低维流形上,这样,我们就能找到 $Q = m - m_0$ 个互相独立的子空间 $\mathbf{a}^q, q = 1, \dots, Q$, 满足方程(2)及(3),称这 Q 个矢量组成的线性空间为点 \mathbf{X}_n 处的零空间。由于无噪吸引子不扩展到该空间,所以在该空间中找到的 $\boldsymbol{\beta}_n$ 分量一定就是由于噪声引起的。相空间投影降噪算法就是试图验证该零空间,然后剔除 $\boldsymbol{\beta}_n$ 的相应分量。

假定零空间是 Q 维,找出 Q 个标准正交矢量 \mathbf{a}^q , 这样,在这些矢量上的局部投影是最小的。如果采用表达式 $\mathbf{z}_n = \mathbf{R}(\boldsymbol{\beta}_n - \bar{\boldsymbol{\beta}})$, 则 \mathbf{z}_n 在零空间上的投影是 $\sum_{q=1}^Q \mathbf{a}^q \cdot (\mathbf{a}^q \cdot \mathbf{z}_n)$ 。为了正确选择矢量集 \mathbf{a}^q , 要求 $\sum_{n' \in u_n} [\sum_{q=1}^Q \mathbf{a}^q \cdot (\mathbf{a}^q \cdot \mathbf{z}_{n'})]$ 最小。如果借助拉格朗日系数 λ^q 使 \mathbf{a}^q 具有单位长度,并利用矢量 \mathbf{a}^q 是正交的这一事实,我们必须使拉格朗日值最小。

$$L = \sum_{n' \in u_n} \left[\sum_{q=1}^Q \mathbf{a}^q \cdot (\mathbf{a}^q \cdot \mathbf{z}_{n'}) \right]^2 + \sum_{q=1}^Q \lambda^q \cdot (\mathbf{a}^q \cdot \mathbf{a}^q - 1) \quad (4)$$

对每个 q 分别产生

$$C\mathbf{a}^q - \lambda^q \mathbf{a}^q = 0, \quad q = 1, \dots, Q \quad (5)$$

C 是邻域 u_n 内矢量 $\mathbf{z}_{n'}$ 的 $m \times m$ 协方差矩阵

$$C_{ij} = \sum_{n' \in u_n} (\mathbf{z}_{n'})_i (\mathbf{z}_{n'})_j \quad (6)$$

方程(5)的解只是 C 的特征值 λ^q 和正交特征矢量 \mathbf{a}^q , 整体最小由对应 Q 个最小特征值的特征矢量给出,这样,矢量 \mathbf{z}_n 的噪声分量可通过估计 $\hat{\mathbf{z}}_n$ 而去除。

$$\hat{\mathbf{z}}_n = \mathbf{z}_n - \sum_{q=1}^Q \mathbf{a}^q \cdot (\mathbf{a}^q \cdot \mathbf{z}_n) \quad (7)$$

最后,按照原始延时矢量 $\boldsymbol{\beta}_n$ 写出结果

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_n = \boldsymbol{\beta}_n - \Delta\boldsymbol{\beta}_n = \boldsymbol{\beta}_n - R^{-1} \sum_{q=1}^Q \mathbf{a}^q [\mathbf{a}^q \cdot \mathbf{R}(\boldsymbol{\beta}_n - \bar{\boldsymbol{\beta}})] \quad (8)$$

如果在一个维数为 m_0 的流形内的点被噪声污染,这些点将以与噪声值相应的量在流形周围各个方向上扩散。在无噪的情况下, Q 个最小的主要方向将有零特征值,而剩下的方向局部地生成流形。在有噪声的情况下,把 Q 个具有最小特征值的方向确定为由噪声控制的方向,并投影到由 m_0 个最大主方向所生成的超曲面。

对每一个嵌入矢量 $\boldsymbol{\beta}_n$ 分别做投影,在嵌入空间上产生一组校正矢量。由于标量时间序列的每个元素以 m 个不同嵌入矢量的一个成分出现,最终,对于每个数据值有很多不同的校正向量。取其平均,通过选择适当的权值,取消对第一个以及最后一个分量的校正。在嵌入空间,已修正的矢量并不严格位于由方程(2)定义的局部子空间,而且,邻域内的所有点变化很小,致使当校正后协方差矩阵有新的特征矢量,多次重复校正过程直到收敛。

2 实测数据实验

远距离检测目标和识别目标是目前亟待解决的难题。由于环境背景的影响,声纳接收设备中收到的信号中含有大量的干扰噪声,这使得远程探测及弱信号处理变得非常困难,因此,降低噪声是进行有效分析的重要手段。以往常用线性滤波的方法来滤除舰船目标辐射信号中的有害噪声,滤波效果存在很大的局限性。已经证明,舰船目标辐射信号中具有非线性成分。因此,用相空间投影降噪方法对舰船目标辐射信号时间序列进行降噪处理,不失为一种有效性的途径。

图1为含噪声的3类目标辐射信号的波形图。

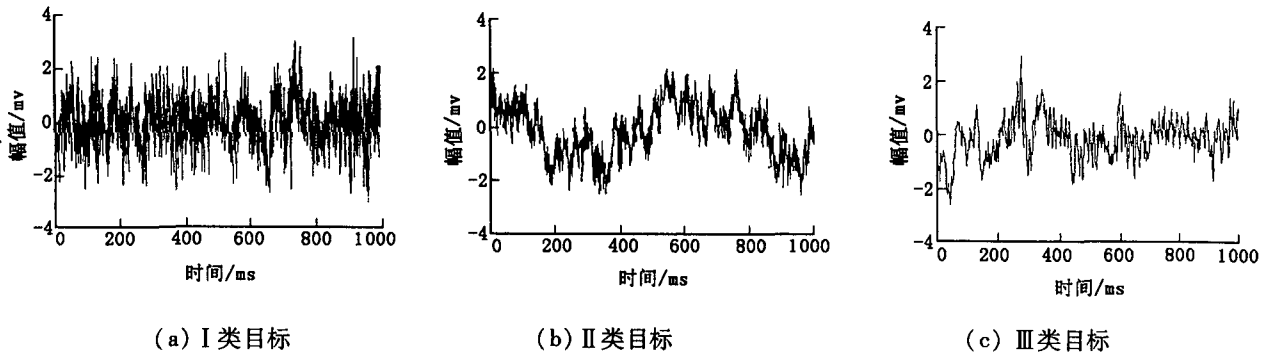


图1 含噪声的3类目标波形

根据 Takens 相空间重构定理知道,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。由于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,受到噪声污染的轨道经过降噪处理后,可以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。

采用相空间投影算法对其进行降噪处理得到如图2所示的结果。图2中,每类目标左图为降噪前的吸引子图, $x(t)$ 表示实验测得的时间序列;右图为降噪后的吸引子图, $y(t)$ 表示降噪后的时间序列。

从结果中不难看出: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。说明采用相空间投影技术可以达到一定的降噪效果。

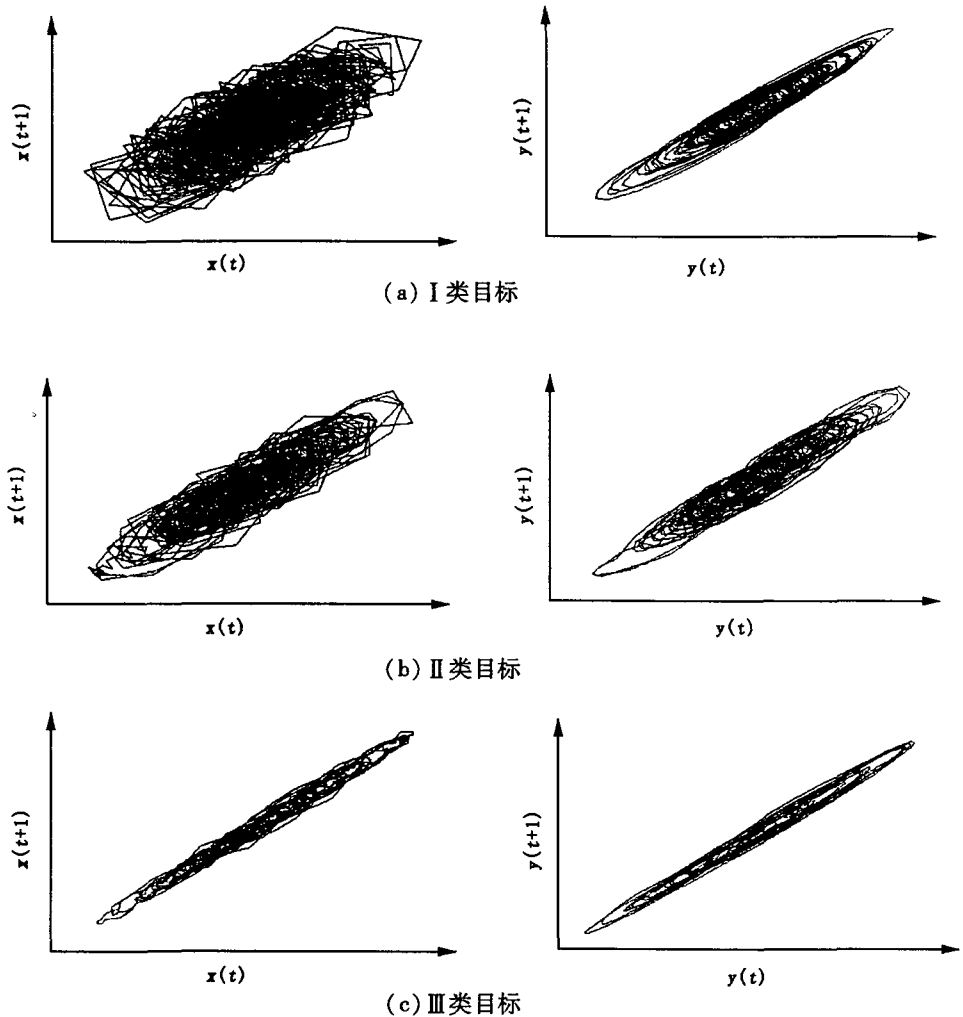


图2 3类目标降噪前后的吸引子图

参考文献:

[1] Marcus Richter, Thomas Schreiber, Daniel T Kaplan. Fetal ECG Extraction With Nonlinear State - Space Projections[J]. IEEE Trans, on Biomedical Engineering, 1998, 45(1): 133 - 136.

[2] Marcus Richter, Thomas Schreiber. Phase Space Embedding of Electrocardiograms[J]. Physical Review E, 1998, 58(5): 6392 - 6397.

[3] Thomas Schreiber, Daniel T, Kaplan. Signal Separation By Nonlinear Projections: The Fetal Electrocardiogram[J]. Physical Review E, 1996, 53(5): R4326 - R4329.

(下转第 66 页)