

相位匹配信号与混沌背景分离方法

吴 鹏 王 晨 赵志刚

(沈阳师范大学软件学院 沈阳 110036)

摘 要 针对混沌背景下的信号提取问题,提出了混沌噪声背景下的相位匹配噪声去除方法。它不同于以往的混沌背景下的信号提取方法,不需要相位重构对混沌进行预判估计,也不需要信号和混沌在有限维相空间中进行几何分析。通过对混沌背景下的不同相位不同幅值的正弦信号进行分离仿真验证了本方法的有效性,通过分离度的分析表明,本方法对于弱信号的混沌背景分离效果明显,可以获得很好的去除混沌背景噪声的效果。

关键词 相位匹配,混沌,去噪,双元阵

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Phase Match Separate Method between Signal and Chaos

WU Peng WANG Chen ZHAO Zhi-gang

(Software College, Shenyang Normal University, Shenyang 110036, China)

Abstract In allusion to distilling signal under the chaos background, this paper put forward phase matched separate method in order to clean chaos background. The method is differ from other methods. It neither reconstructs phase to beforeh estimate chaos nor makes geometry analysis of chaos in finity dimension phase space. The method efficiency was validated via imitation under sine signal of different amplitude and phase in chaos background. The separating effect is distinct via separating degree analysis.

Keywords Phase match, Chaos, Denosing, Double array

1 引言

对信号处理和分析的目的是去除信号中的噪声以获取信号的信息,当将噪声全部或部分去除后,可以感知实际有用信号是否存在。背景噪声可以是白噪声或色噪声,同时还存在着信噪比的问题,如果信噪比过于低,那么一些目前使用的去噪方法对信号还原的效果就不算理想了。在背景噪声是有规律的混沌现象的情况下,目前去噪的方式是对混沌模型的估计,然后采用估计结果去除混沌噪声。混沌信号的估计方法目前主要有两种方式,一是利用混沌中相空间的几何特性与信号相空间的几何特性不同的特点使信号和混沌分离;二是利用混沌吸引子使重构相空间轨迹与原空间微分同胚,因此可以寻找到非线性函数逼近嵌入空间中吸引子轨迹的状态映射,对混沌背景进行估计预测,最终达到分离混沌和信号的目的。基于这两种方式,很多方法被提出,如最小相空间体积法、混沌与信号分离的投影法、在预测基础上的 Stark 法和基于线性滤波的非线性逆法等^[1-6]。本文提出相位匹配信号与混沌背景分离的方法,该方法通过信号的相位匹配直接从混沌背景中解出信号,达到信号与混沌背景分离的目的,不需要在最小相空间利用非线性最小化来提取信号,克服了低维流形状态下分离效果差与全局非线性逼近拟合存在很大误差的缺点。

2 相位匹配双阵元去噪算法

相位匹配双阵元的去噪算法首先采用具有两个传感器的线阵来接收信号,接收信号用式子 $r(t) = s(t) + n(t)$ 表示,也就是实际接收到的信号是原始信号与噪声信号的线性相加。图1显示出在一个线阵中只有两个阵元的情况,阵元1与阵元2同时接收信号。

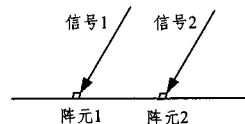


图1 双阵元接收信号图

在图1中阵元1接收信号1,阵元2接收信号2。用数学式子表示为如下形式:

$$\begin{aligned} r_1(t) &= s_1(t) + n_1(t) \\ r_2(t) &= s_2(t) + n_2(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 表示阵元接收到的信号,是已知的信号, $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 是原始信号,需要还原的信号即期望信号,而 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 是各向同性的随机噪声。这里提出一个假设:在噪声环境下,如果阵元1和阵元2的距离非常接近并且在同一时刻进行信号采集,则噪声的各向同性将使接收到的噪声接近于同一噪声,这样式(1)就可以写成如下形式:

到稿日期:2012-10-10 返修日期:2013-02-13 本文受国家自然科学基金项目(60970112,60970157)资助。

吴 鹏(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机系统结构、嵌入式软件开发, E-mail: wu. peng@163. com; 王 晨(1963—),男,硕士,副教授,主要研究方向为系统架构; 赵志刚(1971—),男,博士后,副教授,主要研究方向为计算机网络。

$$\begin{aligned} r_1(t) &= s_1(t) + n(t) \\ r_2(t) &= s_2(t) + n(t) \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)中两式的两边做傅立叶变换,可以得到如下形式:

$$\begin{aligned} R_1(\omega) &= S_1(\omega) + N(\omega) \\ R_2(\omega) &= S_2(\omega) + N(\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

为了研究问题方便,采用极坐标形式的频域将该表达式表示为:

$$\begin{aligned} |R_1| e^{j\varphi_1} &= |S_1| e^{j\alpha_1} + |N| e^{j\beta} \\ |R_2| e^{j\varphi_2} &= |S_2| e^{j\alpha_2} + |N| e^{j\beta} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, φ_1 和 φ_2 、 α_1 和 α_2 、 β 分别为阵元接收到的信号、期望信号和噪声信号的相位角,这些相位角分别是 ω 的函数,其中 $|R|$ 、 $|S|$ 和 $|N|$ 分别为阵元接收到的信号、期望信号和噪声信号谱的幅值。这里的相位角是阵元接收到的信号、期望信号和噪声信号傅立叶变换后虚部与实部比的正反切值^[7-9]。

阵元 1 和阵元 2 的距离被设为 d , 原始信号 $s(t)$ 与二元阵的法线的夹角为 θ , 对于远场信号而言, 波前到达的时间是不一样的, 时间差用式 $\tau = \frac{d}{c} \sin\theta$ 表示, c 为波速。这也就表明, 由于存在波达时间的差异, 使得 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 这两个原始信号存在相位差。由于相位差的存在, 将这两个原始信号在复数域进行相位对齐, 期望信号相位对齐后得到式(5)。

$$|S_2| e^{j\alpha_2} e^{j\omega\tau} = |S_1| e^{j\alpha_1} \quad (5)$$

将式(5)代入到式(4)中得到如下方程组:

$$\begin{aligned} |R_1| e^{j\varphi_1} &= |S_2| e^{j\alpha_2} e^{j\omega\tau} + |N| e^{j\beta} \\ |R_2| e^{j\varphi_2} &= |S_2| e^{j\alpha_2} + |N| e^{j\beta} \end{aligned} \quad (6)$$

对方程组(6)的信号 $s_2(t)$ 进行求解, 将两式相减得到下式:

$$|R_1| e^{j\varphi_1} - |R_2| e^{j\varphi_2} = |S_2| e^{j\alpha_2} (e^{j\omega\tau} - 1) \quad (7)$$

对式(7)进行变换, 即将等号两边写成频域的复数形式得到下式:

$$\begin{aligned} [\operatorname{re}(R_1) - \operatorname{re}(R_2)] + j[\operatorname{im}(R_1) - \operatorname{im}(R_2)] \\ = [\operatorname{re}(S_2) + j\operatorname{im}(S_2)] [(\cos\omega\tau - 1) + j(\sin\omega\tau)] \end{aligned}$$

式中, $\operatorname{re}(\ast)$ 表示取复数的实部, $\operatorname{im}(\ast)$ 表示取复数的虚部, ω 为待测信号的角频率。由复数相等的概念得知, 若两个复数相等, 那么这两个复数的实部和虚部分别相等, 因此得到如下方程组:

$$\begin{aligned} \operatorname{re}(R_1) - \operatorname{re}(R_2) &= \operatorname{re}(S_2)(\cos\omega\tau - 1) - \operatorname{im}(S_2)\sin\omega\tau \\ \operatorname{im}(R_1) - \operatorname{im}(R_2) &= \operatorname{im}(S_2)(\cos\omega\tau - 1) + \operatorname{re}(S_2)\sin\omega\tau \end{aligned}$$

对方程组求解得到:

$$\begin{aligned} \operatorname{re}(S_2) &= \frac{[\operatorname{re}(R_1) - \operatorname{re}(R_2)](\cos\omega\tau - 1) + [\operatorname{im}(R_1) - \operatorname{im}(R_2)]\sin\omega\tau}{2 - 2\cos\omega\tau} \\ \operatorname{im}(S_2) &= \frac{[\operatorname{re}(R_1) - \operatorname{re}(R_2)]\sin\omega\tau - [\operatorname{im}(R_1) - \operatorname{im}(R_2)](\cos\omega\tau - 1)}{2\cos\omega\tau - 2} \end{aligned}$$

从上面的解中可以看到, 信号的实部是通过双阵元接收到的两路信号傅立叶变换后的实部和虚部计算出来的, 信号的虚部与实部同样可以被计算出来。原始信号在频域的复数

形式被计算出来后, 进行傅立叶逆变换就可以估计出期望的原始信号时域波形。采用双阵元可以抵消掉噪声, 同时还可以计算出信号, 对于低信噪比的输入信号, 不需要知道噪声的类型就可以解出信号^[10]。

3 相位匹配法去除混沌背景

使用相位匹配的原理进行信号与混沌背景分离, 在确知噪声背景为混沌状态的情况下, 无需进行相空间重构, 也无需预测下一时间段的混沌状况。将混沌看作背景噪声, 采用相位匹配去噪算法去除混沌背景噪声。

用 Lorenz 方程来进行分析, 在方程中 $\delta=16$, $r=45.92$, $b=4$, 采用四阶 Runge-Kutta 法得到 Lorenz 方程的离散数列, 起始点是 $[-1, 0, 1]$ 的一行三列的行向量, 积分时间的步长是 0.01, 得到 11000 个点, 其中前面的过渡点数是 8000 点, 后面迭代点数为 3000 点。在后 3000 点的 $X(k)$ 中加入角频率 $\omega=100$ 、幅值 $A=2$ 的正弦信号, 得到的空间相图和 X 轴的时序图如图 2 所示。

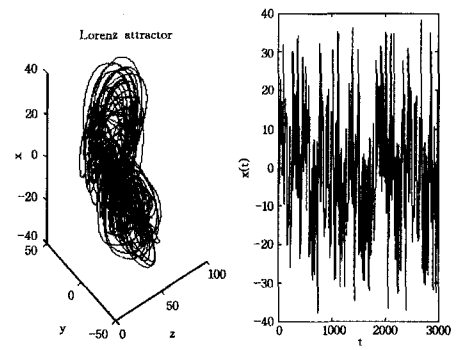


图 2 Lorenz 的相图与 X 轴时序图

图 2 的左侧是 Lorenz 方程形成的相空间的混沌吸引子, 表现得非常混乱, 这是因为在 X 轴中加入了周期信号, 而周期信号对混沌的影响远大于噪声信号。右侧是混沌在 X 轴的时序图, 从时序图上看, 混沌在该轴上毫无规律可言, 形式很像信号加入噪声后产生的时序波形。为了更好地对加入信号的混沌相图进行分析和比较, 将图 2 在 3 个坐标平面上进行投影得到图 3。

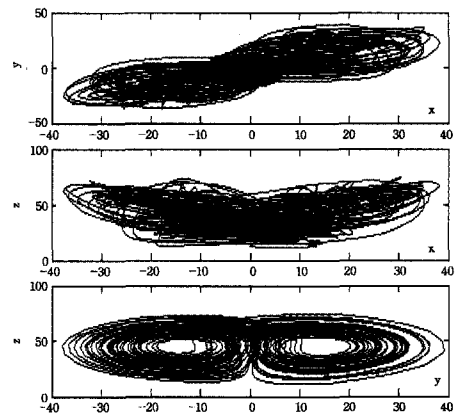


图 3 加入正弦信号的 Lorenz 相图投影

由图 3 可以观察到, 由于在 X 轴加入了周期正弦信号, 因此在 X - Y 平面和 X - Z 平面投影都受到了影响。在 Y - Z 平面上的投影受到的影响相对较小。

为了进行对比, 用图 4 反映加入正弦信号 Lorenz 混沌中

的 3 个坐标轴的时序图,其中 X 轴时序图产生了震荡变化。

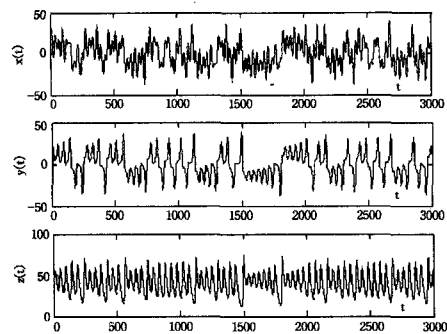


图 4 Lorenz X 轴加入正弦信号坐标轴的时序图

从仿真结果分析得到,在后 3000 点的 $X(k)$ 中加入角频率 $\omega=100$ 、幅值 $A=2$ 的正弦信号后,混沌信号的三维相图变得模糊,吸引子规律性不足。对加入正弦信号的后 3000 点采用双阵元相位匹配提取信号算法,得到的仿真结果如图 5 所示。图 5 验证了相位匹配后的波形与原波形已经非常接近,只是存在细节上的高频波动。

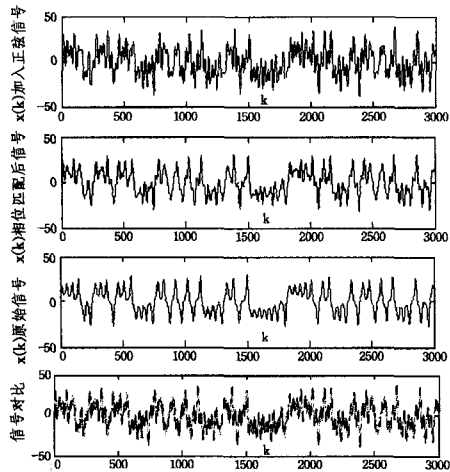


图 5 Lorenz X 轴的各状态时序图

将图 5 进行相位匹配处理后的信号值重新置入 Lorenz 混沌方程中,再次建立空间相图,得到图 6。

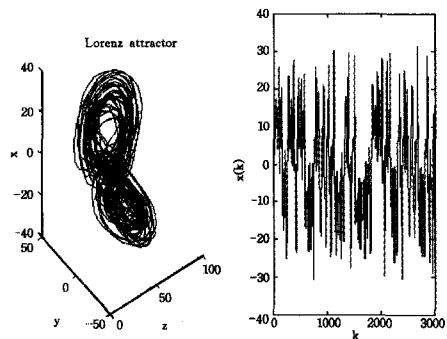


图 6 Lorenz 重构相图

从图 6 可以看出对于 Lorenz 方程, X 轴时域曲线的各个状态下的对比图中原始的 X 轴时域波形与加入正弦信号的 X 轴时域波形差异很大,但与相位匹配处理后的时域波形差异并不大。经过相位匹配信号分离后, $X(k)$ 与原始信号非常的接近,分离效果很好。从图 6 的相空间重构图中可以看到,

三维空间相图基本上与未加入正弦信号的很相似,这几个图的仿真从混沌背景的恢复角度说明了信号与混沌背景的分离效果。为了更好地说明这种效果,用分离度的概念来描述信号与混沌分离的程度。设混沌信号采用四阶 Runge-Kutta 法得到 Lorenz 方程的离散数列,其中原始的 X 分量为 $X(k)$,在加入正弦信号后经过相位匹配分离出正弦信号后得到的 X 分量为 $X'(k)$,用式子: $d = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |X(k) - X'(k)|$ 来表示信号分离的程度,如果分离后是原始信号, d 的值应该为零。表 1 为不同状态下的正弦信号分离度。

表 1 不同幅值和初始相位的正弦信号的分离度表

正弦信号	幅值=2	幅值=5	幅值=6
$\omega=100$	$d=1.9560$	$d=1.4891$	$d=1.1715$
$\omega=200$	$d=2.4531$	$d=1.9756$	$d=1.6754$
$\omega=300$	$d=2.6416$	$d=2.0145$	$d=1.7612$

从表 1 中可以看到角频率小的分离度较小,同一角频率幅值大时分离度相对幅值小的分离度小,信号分离的程度较好。

结束语 论述了相位匹配双阵元去噪方法,将该方法应用于混沌背景信号提取。在 Lorenz 方程建立的混沌背景下加入弱正弦信号,对该信号进行提取,去除混沌背景,通过仿真证明了该方法的有效性。该方法进一步改变了信号的幅值与角频率,通过分离度的分析得出其对于弱信号的混沌背景分离效果明显,可以获得很好的去除混沌背景噪声的效果。

参考文献

- [1] Wang G, Chen D. The application of chaotic oscillators to weak signal detection[J]. IEEE Trans. Signal Proc. , 1999, 46(2): 440-444
- [2] Fradkov A L, Pogromskiy A Y. Speed Gradient Control of Chaotic Continuous-time System[J]. IEEE Trans. Circ Sys. , 1996, 43(11): 907-913
- [3] Cencini M, Falcioni M, Olbrich E, et al. Chaos or noise Difficulties of a distinction[J]. Phys. Rev. E, 2000, 62: 427-437
- [4] Finn J M, Goette J D, Toroczkai Z, et al. Estimation of entropies and dimensions by Nonlinear symbolic time series analysis[J]. Chaos, 2003, 13(20): 444-456
- [5] 王国光. 提取混沌中信号方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007
- [6] 孙海云, 王峰. 基于相空间重构的降噪技术研究[J]. 数学实践与认识, 2007, 37(7): 58-63
- [7] 刘理, 朱维杰, 孙进才. 信号相位匹配原理的正弦信号参数总体最小二乘估计方法[J]. 声学技术, 2004, 23(1): 128-132
- [8] 牛奕龙, 肖卉, 孙进才, 等. 基于相位匹配原理的波达方向遗传搜索算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(7): 156-160
- [9] 吴鹏, 李晶皎, 王爱侠, 等. 相位匹配噪声估计的高阶谱去噪方法[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(12): 2381-2384
- [10] Wu Peng, Liu Jie, Li Jing-jiao. Wavelet Denoising of the Noise Estimation on Phase Matching[J]. International Journal of Innovative Computing Information and Control, 2011, 7(6): 3073-3081