

红外成像传感器 1/f 噪声的预测与补偿*

杨峰 朱红 赵亦工

(西安电子科技大学机电工程学院,测控工程与仪器系,陕西,西安,710071)

摘要 分析了红外成像传感器 1/f 噪声的产生机理,提出了用混沌学的观点对红外成像传感器 1/f 噪声进行预测与补偿,降低噪声强度的新方法. 利用该方法对实验数据进行处理,取得了较好的效果.

关键词 混沌, 1/f 噪声, 红外, 预测.

PREDICTION AND COMPENSATION OF 1/F NOISE IN INFRARED IMAGING SENSORS*

YANG Feng ZHU Hong ZHAO Yi-Gong

(Department of Measurement and Control Engineering and Instrument
Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract The generating mechanism of 1/f noise in infrared imaging sensors is analyzed. A new method predicting and compensating the 1/f noise in infrared imaging sensor is presented. The experimental results on the data sampled in practical situation shown the effect of the method.

Key words chaos, 1/f noise, infrared, prediction.

引言

红外成像传感器的 1/f 噪声(亦称为闪烁噪声)是一种低频噪声. 频率低端的 1/f 噪声比频率高端的白噪声在强度上至少要高一个数量级到几个数量级^[1],从而制约了成像制导系统和搜索跟踪系统对弱小目标的探测能力. 因此降低红外成像传感器的 1/f 噪声的强度,对于提高红外成像系统对弱小目标的探测能力具有重要意义.

宏观上 1/f 噪声表现为慢起伏低频色噪声,其概率密度函数具有长拖尾的特点,其功率谱密度具有长拖尾的特点,其功率谱密度与频率之间呈 1/f 的规律^[2]. 长期以来,1/f 噪声都被当作一种随机噪声进行处理,但是,由于它是一种低频闪烁噪声,用传统的基于随机理论的处理方法,难以取得十分满意的结果. 本文以现代非线性科学中的混沌理论为基础,研究 1/f 噪声内在的确定性非线性动力学模型,研究以该模型为依据抑制 1/f 噪声的方法.

1 红外成像传感元件 1/f 噪声的产生机理

红外成像传感器的传感元件属化合物半导体. 根据半导体器件噪声特性理论,半导体器件中的噪声,按照产生的物理机理的不同,可分为热噪声、散粒噪声、g-r 噪声、1/f 噪声 4 大类^[1]. 前二者是白噪声,主要出现在中、高频段,幅度与频率无关,而 1/f 噪声是色噪声,出现在低频段,幅度与频率成反比^[1].

1/f 噪声的基本特征表现为:在一个相当宽的频率范围内,1/f 噪声的功率谱密度与频率成反比. 1/f 噪声的上限频率视 1/f 噪声与白噪声融合的频率点而定,而下限频率在实际中已被测量并达到 10^{-9} Hz^[2].

国内外对半导体器件中 1/f 噪声的微观产生机理研究已进行多年,结论是 1/f 噪声是由器件内的杂质和工艺缺陷造成的^[1,3]. 当器件制作完成后,其内部的杂质分布和工艺缺陷就是确定的,因此,从原

* 国家自然科学基金(批准号 69982008)和国家教委优秀年轻教师基金(批准号 2000 年度)资助项目

稿件收到日期 2002 - 01 - 23, 修改稿收到日期 2002 - 10 - 28

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 69982008) and by National Education Commission for excellent young teachers(No. 2000)

Received 2002 - 01 - 23, revised 2002 - 10 - 28

理上讲, $1/f$ 噪声实际上是器件内杂质分布和工艺缺陷所决定的复杂的、确定性的非线性动力学系统所产生的. 现代非线性科学理论的研究表明:一个确定性的非线性系统,在进入混沌状态后可以产生貌似随机的复杂的不确定现象,并在很多情况下都有 $1/f$ 形式的功率谱. 因此,根据上面的分析,可以得出结论:红外传感元件产生的 $1/f$ 噪声是一种确定性的混沌信号,至少其中包含着确定性的成分.

经典的信号处理方法是把 $1/f$ 噪声看成是一种随机信号,并用随机理论进行处理,之所以难以取得满意的效果,关键在于没有把握住噪声信号的本质特征,使得处理方法与噪声信号的本质特征不匹配. 本文将根据 $1/f$ 噪声的混沌特征,构造新的处理方法.

2 混沌的基本概念

为方便下面讨论,首先给出混沌系统的定义^[4]:

定义:设 V 是一个度量空间,映射 $f:V \rightarrow V$ 若满足下列 3 个条件,便称 f 在 V 上是混沌的:

- (1) 对初值敏感依赖:对于任意的 $\delta > 0, \varepsilon > 0$ 以及任意的 $x \in V$,在 x 的 ε 邻域内存在 y 和自然数 n ,使得 $d(f^n(x), f^n(y)) > \delta$;
- (2) 拓扑传递性:对 V 上任意一对开集 X 和 Y ,存在正整数 $k > 0$,使得 $f^k(X) \cap Y \neq \emptyset$;
- (3) f 的周期点集在 V 中稠密.

对初值敏感依赖性,表明无论两个初值 x 和 y 距离得多么近,在 f 的作用下两者的轨道最终都可能分开任意大的距离,而且在每个点 x 的附近都可以找到离它很近但在 f 的作用下最终分离的点 y ,对于这样的 f ,任何微小的初始误差,经过数次迭代后都会导致结果的很大偏差.

拓扑传递性意味着任一点的邻域在 f 的作用下将“布满”整个度量空间 V . 换言之, V 不可能分解成两个在 f 下互不影响的子集合.

前二条表现了一定的随机性,但第三条周期点集的稠密性,却又表明系统具有很强的确定性和规律性,形似紊乱实则有序. 描述这种有序性最直观的方法就是奇异吸引子:具有分数维(Fractal dimension)的吸引子称为奇异吸引子. 直观地讲,奇异吸引子具有无穷多层次,将每一个小部分放大后仍然具有无穷多层次. 奇异吸引子与普通吸引子有如下区别^[4]:

- (1) 从整体上看,系统是稳定的,吸引子外的一

切运动都要收缩到吸引子上;但从局部看,吸引子内部的运动又是不稳定的,相邻的运动轨道要相互排斥,最终按指数型分离;

- (2) 吸引子不是填满某一区域,而是具有许多空洞,除了较大的空洞外,还有不同层次的空隙,使得吸引子具有无穷层次的自相似结构;

- (3) 与稳定的周期点不同,奇异吸引子不断分开和折叠,使其上的运动敏感地依赖初始条件;

- (4) 奇异吸引子具有不同于一般几何体的无穷层次的自相似性.

由上述理论可知,一方面,尽管混沌系统是一个确定性的系统,但由于混沌系统对初值的敏感性,加上计算时不可避免的计算误差,使得预测混沌系统的长期行为变得不可能. 但是从另一方面看,由于奇异吸引子存在高度的自相似性,貌似复杂的系统可能遵循简单的规律,又使得混沌系统的短期预测变为可能.

综合上面的论述可知,红外传感元件产生的 $1/f$ 噪声,是一种包含着确定性规律的混沌信号,可以用混沌的理论来分析并进行短期预测.

3 混沌信号奇异吸引子的相空间重构

一般地,我们采集到的 $1/f$ 噪声信号都是一个时间序列,为了证实信号的混沌性并提取信号的混沌特征,首先要进行混沌信号的相空间重构,通过重构的相空间,获得混沌信号的奇异吸引子,从中提取出信号中蕴涵的混沌信息,并通过这些信息,对混沌信号进行短期预测.

一个系统在某一时刻的状态称为相,描述系统状态变化轨迹的空间称为相空间. 设采集到的混沌信号是一组间隔为 Δt 的单变量时间序列: $x(t) = x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$. 由于该时间序列是由系统状态变量相互作用的结果,若要分析其中包含的系统全部状态变量的信息,就要将其扩展到高维空间,该高维空间称为由时间序列重构出的混沌系统相空间^[4,5].

根据 Takens 的理论^[4],假设混沌系统奇异吸引子的分数维为 D ,若要完整地描述混沌系统状态变化轨迹的性态,嵌入的相空间的维数 m 应大于 $2D$. 在这种条件下,在重建的相空间中,奇异吸引子的轨迹没有伪邻近点(轨迹在低嵌入维数下形成的投影交点). 从单变量时间序列中重构奇异吸引子相空间,可以采取时间差法^[5-7],其中包含 3 个步骤:

- (1) 计算延迟时间 τ ;

(2) 计算嵌入维数 m ;

(3) 按间隔 τ 从时间序列构成奇异吸引子轨迹向量: $y_j = (x_j, x_{j+\tau}, \dots, x_{j+(m-1)\tau})$.

3.1 延迟时间

延迟时间的选择是一个相互矛盾的问题: τ 必须足够大, 使得系统的所有自由变量都有机会影响到 $x(t)$, 否则每个坐标的相关性过强, 轨迹向同一方向挤压, 无法解读出轨迹包含的信息; τ 又必须足够小, 使得连续两点的动力学系统特性连续. 因此, τ 的选择只能是一个折衷的方案, 本文采用计算互信息熵的方法来计算延迟时间 τ .

根据香农信息理论, 事件 a_i 与 b_j 之间的互信息熵 I_{AB} 为^[6,7]

$$I_{AB} = \sum_{ij} P_{AB}(a_i, b_j) \log_2 \left[\frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right], \quad (1)$$

将 A 视为由 $x(t+i\tau)$ 组成的集合, B 为 $x(t+i\tau+\tau)$ 组成的集合, 上式则变成

$$I(\tau) = \sum_i P[x(t+i\tau), x(t+i\tau+\tau)] \log_2 \left\{ \frac{P[x(t+i\tau), x(t+i\tau+\tau)]}{P[x(t+i\tau)]P[x(t+i\tau+\tau)]} \right\}. \quad (2)$$

一般地, 选取 $I(\tau)$ 的第一个最小值点作为延迟时间^[4].

3.2 嵌入维数

正确计算嵌入维数是极其重要的一环: 嵌入维数过低, 会形成由于空间投影造成的伪邻近点, 使数据不纯而造成预测的失败; 嵌入维数过高, 不仅会大大地增加计算时间, 还会使邻近点被错误地排除掉. 在没有任何先验知识的情况下, 应该利用多种方法进行计算来保证结果的正确性.

方法一: 利用盒维数计算嵌入维数^[5]

盒维数的定义: 设 A 是 R^n 空间上的任意非空的有界子集, 对于每一个 $\varepsilon > 0$, $N(A, \varepsilon)$ 表示用来覆盖 A 的半径为 ε 的最小闭球数, 如果极限 $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(A, \varepsilon)}{-\ln \varepsilon}$ 存在, 则称 $D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(A, \varepsilon)}{-\ln \varepsilon}$ 为 A 的盒维数.

为了计算一个时间序列 $X(t)$ 的盒维数, 可将时间序列分成若干长度为 ε 的小段, 计算不同 ε 时与 $X(t)$ 相交的小球的个数 $N(X(t), \varepsilon)$, 然后以 $-\ln \varepsilon$ 为横轴, $\ln N(X(t), \varepsilon)$ 为纵轴描出点 $[-\ln \varepsilon, \ln N(X(t), \varepsilon)]$, 通过直线的最小二乘拟合, 来估计时间序列 $X(t)$ 的盒维数 D . 嵌入维数取为 $m > 2D$ 的最小正整数.

方法二: 利用关联维数计算嵌入维数^[6,7]

当已知了延迟时间 τ 以后, 可以利用相空间向量的关联积分来计算嵌入维数. 相空间向量的关联积分 $c(r)$ 的定义为^[5]

$$c(r) = \frac{2}{T_n(T_n - 1)} \sum_{i=(N-1)\tau+1}^N \sum_{j>i}^N \theta(r - \|X_i - X_j\|), \quad (3)$$

其中 $T_n = N - (n - 1)\tau$, 是由长度为 N 的时间序列所能构成的 n 维相空间中向量的个数; r 为判定距离是否相邻的距离门限值; $\|X_i - X_j\|$ 为向量 X_i 与 X_j 的距离; $\theta(x)$ 为 Heaviside 函数: $\theta(x) = 0(x < 0)$, $\theta(x) = 1(x \geq 0)$.

若 D 为时间序列的关联维数, 对于给定的距离门限 r , $c(r) = r^D$, 即

$$D = \ln c(r) / \ln r. \quad (4)$$

增大相空间的维数 n , 若时间序列有分数维的奇异吸引子存在, 随着 n 的增大, 关联维数的 D 也应增大, 且增加率逐步减少. 当 n 增大到一定程度时, D 开始趋于饱和值 D_s . D_s 就是时间序列奇异吸引子的关联维数, 获得 D_s 的最小 n , 就是所需的嵌入维数 m .

根据获得的延迟时间 τ 和嵌入维数 D , 将时间序列以 τ 为延迟时间分为若干长度为 m 的向量, 这些向量在相空间中的轨迹就构成了时间序列的奇异吸引子, 从而完成混沌系统的相空间重构.

4 混沌信号的预测

从重构出的相空间, 可以了解奇异吸引子的很多特征. 根据混沌系统的理论, 相空间奇异吸引子中的状态轨迹连续, 在有限的空间内相互吸引和排斥; 相互紧邻, 但又不交叠; 相邻的轨迹运动趋势相同; 状态轨迹有类周期重复的现象.

根据奇异吸引子的上述特点, 利用相邻轨迹的空间相邻性, 对于前一刻轨迹上空间相邻的点, 短时间内它们轨道上的后继点在空间上也应该是邻近的. 由此可以建立如下所述的混沌时间序列零阶预测方法.

对于相空间中的向量 $y_n = [x_n, x_{n+\tau}, \dots, x_{n+(d-1)\tau}]$ 和 $y_m = [x_m, x_{m+\tau}, \dots, x_{m+(d-1)\tau}]$, 规定它们的夹角为

$$\text{angle} = \frac{\sum_{i=0}^{d-1} X_{n+i\tau} \times X_{m+i\tau}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{d-1} X_{n+i\tau}^2 \times \sum_{j=0}^{d-1} X_{m+j\tau}^2}}, \quad (5)$$

设 y_n 是已知的相空间向量, 若在已知的相空间向量

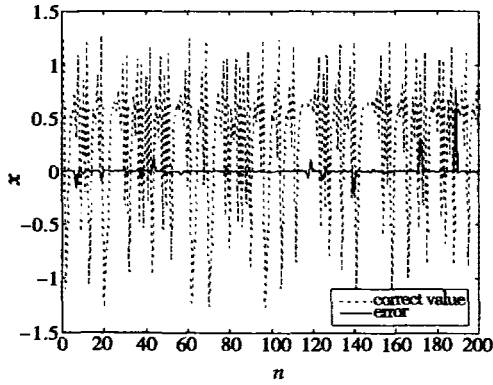


图1 Henon 吸引子的零阶预测
Fig. 1 Zero-order prediction of Henon attractor

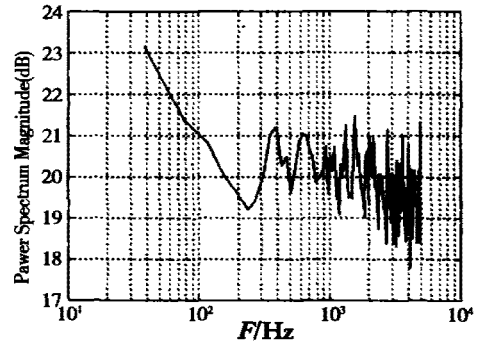


图3 红外数据 Group1 的功率谱密度
Fig. 3 PSD of infrared data Group1

中 y_m 与 y_n 的夹角最小,即可认为 y_n, y_m 是邻近点,那么,它们的下一个状态点 y_{n+1}, y_{m+1} 应该也是邻近点.所以在已知了 y_n, y_m, y_{m+1} 以后,可以近似地用 y_{m+1} 的值来代替 y_{n+1} 的值.实现用 y_{m+1} 的值预测 y_{n+1} 的值.在获得了混沌信号的预测值之后,通过简单的相消,即可实现混沌信号的补偿.

为了评估预测的性能,定义补偿率 ρ 如下

$$error(n) = \hat{x}(n) - x(n), \tag{6}$$

$$\rho = 1 - \frac{\text{var}(error(n))}{\text{var}(x(n))}. \tag{7}$$

式(7)中 var 表示取方差.

4.1 理想混沌信号的预测与补偿

利用上述方法,对 Henon 吸引子进行预测, Henon 吸引子的计算公式如下

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= 1 + a \times y_n - b \times x_n^2 \\ y_{n+1} &= x_n, \end{aligned} \tag{8}$$

式(8)中 $a=0.3, b=1.4$.

设已知式(8)计算获得的 25 000 点数据,对于每一个向量 y_n ,在 25 000 个点中寻找使 angle 最小的 y_m ,认为 y_n 和 y_m 是邻近点,利用零阶预测方法进行

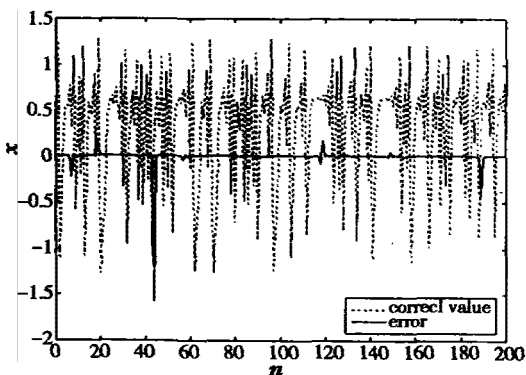


图2 Henon 吸引子的一阶预测
Fig. 2 One-order prediction of Henon attractor

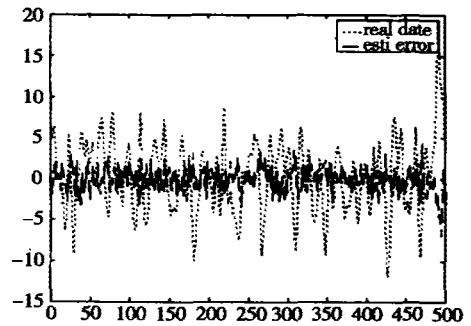


图4 红外数据 Group1 预测结果
Fig. 4 Prediction of infrared data Group1

行预测.对 25 000 个已知数据点之后的 200 个数据进行预测的结果如图 1 所示(虚线为原始信号,实线为补偿后的结果),补偿率 $\rho = 99.91\%$.

利用相邻轨迹运动趋势的趋同性,还可建立一阶预测方法.若 y_n, y_m 是邻近点,它们运动的方向也应该是相似的,而且从直观的角度,这种相似性大于空间位置的相似性.轨道的方向可以用一阶差分来表示,可以利用以下公式进行预测:

$$y_{n+1} = y_n + y_{m+1} - y_m, \tag{9}$$

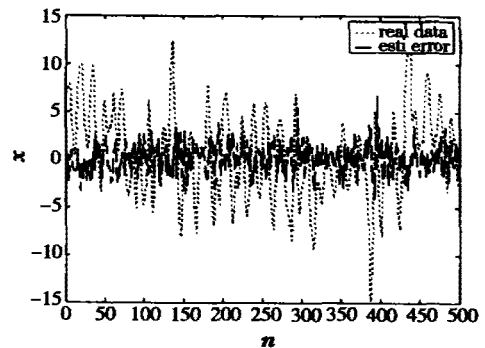


图5 红外数据 Group2 的预测结果
Fig. 5 Prediction of infrared data Group2

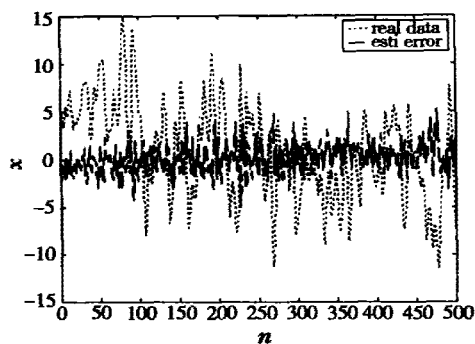


图6 红外数据 Group3 的预测结果
Fig.6 Prediction of infrared data Group3

利用前 25 000 个已知数据点对之后的 200 个数据进行预测,结果如图 2 所示(虚线为原始信号,实线为补偿后的结果), $\rho = 99.94\%$ 。通过数值比较,一阶预测的总体效果好于零阶预测,但在个别点上劣于零阶预测,原因是 Henon 奇异吸引子在相空间中的状态轨迹存在折返点,在折返点处一阶预测的效果不好。

4.2 实际红外传感器 $1/f$ 噪声的预测

下面介绍通过相空间重构,对红外传感器 $1/f$ 噪声进行预测与结果补偿,共使用了 4 组红外传感器的 $1/f$ 噪声数据,编号分别为 Group1, Group2, Group3 和 Group4。采集设备:8~12 μm 非制冷型凝视焦平面红外热像仪,型号为 Palm IR-250。

下面以数据 Group1 说明红外传感器 $1/f$ 噪声的特征,其采样频率为 $f = 50\text{Hz}$,共 $N = 20\,000$ 个点。根据信号的功率谱密度图 3 可以看出:(1)红外传感器的噪声信号存在明显的约为 200Hz 的转折频率;(2)在 200Hz 以下,噪声信号的功率谱呈现良好的 $1/f$ 的特征;(3)在 200Hz 以上,噪声信号的功率谱接近白噪声。

噪声补偿实验参数说明:

(1)利用计算互信息熵的方法,确定延迟时间 τ ;

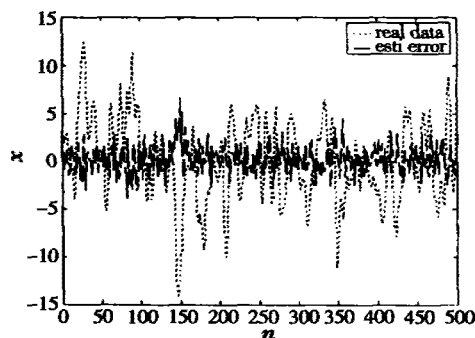


图7 红外数据 Group4 的预测结果
Fig.7 Prediction of infrared data Group4

(2)利用计算关联维数的方法,确定嵌入维数 m ;
(3)对 4 组数据均采用一阶预测的方法进行处理;

(4)利用 20 000 个已知数据,预测之后的 500 个数据。

其中,实线为补偿后的结果,虚线为原始信号。

数据 Group1 的采样频率为 50Hz,数据记录长度为 20 500 个点。 $\tau = 2, m = 5$,预测与补偿的结果如图 4 所示,其中虚线为实际信号,实线为预测误差,补偿率 $\rho = 90\%$ 。

数据 Group2 的采样频率为 50Hz,数据记录长度为 20 500 个点。 $\tau = 2, m = 5$,预测与补偿的结果如图 5 所示,补偿率 $\rho = 92.55\%$ 。

数据 Group3 的采样频率为 50Hz,数据记录长度为 20 500 个点。 $\tau = 2, m = 5$,预测与补偿的结果如图 6 所示,补偿率 $\rho = 91.24\%$ 。

数据 Group4 的采样频率为 50Hz,数据记录长度为 20 500 个点。 $\tau = 2, m = 5$,预测与补偿的结果如图 7 所示,补偿率 $\rho = 90.2\%$ 。

从实际数据仿真实验结果可以看出:采用本文提出的噪声补偿方法后,非平稳的红外传感器噪声被转换为低强度的“类白”噪声,噪声功率在总体上降低了 10 倍以上,信噪比提高了 10db 以上,从而能够检测在原始噪声中无法探测到的弱小目标信号。

REFERENCES

- [1] ZHUANG Yi-Qi, SUN Qing. *Noise of Semiconductor Device and Low Noise Technology*, Beijing: National Defence Industry Press (庄奕琪、孙青. 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术. 北京:国防工业出版社), 1993: 80—83
- [2] Keshner M S. $1/f$ noise. *Proc. of the IEEE*, 1982, **70**(3): 212—218
- [3] Kirton M J, Uren M J, Collins M, et al. Individual defects at the Si:SiO₂ interface. *Semiconductor Science Technology*, 1989, **4**(12): 1116—1126
- [4] CHEN Shi-Hua, LU Jun-An. *Introduction of Chaotic Dynamics*. Wuhan: Wuhan Water Conservancy and Electricity Power University Press (陈士华、陆君安, 混沌动力学初步. 武汉:武汉水利电力大学出版社), 1998: 95—101
- [5] Abarbanel H D I, Frison T W, Tsimring L S. Obtaining order in a world of chaos. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1998, **15**(3): 49—65
- [6] Liebert W, Schuster H G. Proper choice of the time delay for the analysis of chaotic time series, *Phys. Lett. A*, 1988, **142**(1): 107—111
- [7] Kennel M B, Brown R, Abarbanel H D J. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(6): 3403—3411