基于短时分形维数的模糊控制滤波

郑会永 肖田元
(清华大学自动化系 CIMS 工程研究中心·北京,100084)
戴冠中 周三川
(西北工业大学自动控制系·西安,710072) (香港理工大学机械轮机系·香港)

摘要:维数是系统的拓扑不变量,从理论上说,Hausdorff 维数是最为重要的维数,但实际应用中几乎无法计算,而分形维数的计算机实现是很方便的.本文基于分形理论中的分形维数概念,给出了复杂时间序列的短时分形维数概念,提出了一种新的滤波方法即基于短时分形维数的模糊控制滤波方法.仿真结果表明,该方法滤波效果良好,可应用于复杂信号的滤波.

关键词:模糊控制;分形;混沌;短时分形维数

1 引 言

混沌分形是当今世界范围内一个极富挑战性、具有巨大前景的前沿课题和学术热点,随着计算机科学和计算技术的发展,其理论研究逐渐深入,应用范围也日益广泛,现在已渗透到图象处理、模式识别、人工智能以及非线性电路等信息科学的许多分支.分形理论的研究对象是非线性系统中产生的不光滑和不可微的复杂几何形体,对应的定量参数是分形维数.分形维数描述了动力学系统及其测量时间序列的复杂程度,是系统的拓扑不变量.分形维数作为图象模式的形态特征已用于图象分析与模式分类、图象生成、内插与计算机仿真、信号滤波、图象压缩编码、分形神经网络,乃至于非线性混沌的研究[1,2].

在工程实践中,人们对于复杂系统的探测,往往通过对某时间变量的观测即时间序列来实现.利用 Takens 状态空间重构理论,根据这些时间序列可以重构出与真实系统拓扑同构的动力学系统.但是测量噪声对系统重构及估计分形维数有着不良影响,因而必须对测量信号进行滤波.本文从分形维数概念出发,提出了一种新的信号滤波方法即基于短时分形维数的模糊控制滤波方法,并对语音信号进行了仿真,结果表明,该方法滤波效果良好.

2 网格分形维数与短时分形维数

2.1 网格分形维数及其最小二乘算法

$\mathbb{R}^n$ 上的网格是指$\mathbb{R}^n$的一个分割,$\mathbb{R}^n=\bigcup X_j$,X_j之间只相差一个平移或旋转,X_j称为一个格子.例如在$\mathbb{R}^2$中常用的网格有正方形网格、矩形网格和三角形网格等.网格的尺寸 Δ 定义为 X_j 的直径(或宽度),并记为 Δ 网格.不同 Δ 的网格格子之间是相似的.关于网格分形及网格分形维数的定义可参看文献[3,4].

事实上,网格分形是一种简单实用的分形方式,特别适用于计算机数字化处理,常用于自然景观与图象的分形.下面给出网格分形维数的实际计算方法.

将$\mathbb{R}^n$划分成尽可能细的 Δ 正方形网格,将集合 X 离散化成数字点集.N_Δ 表示在离散空间(点间间距为 Δ)上集合 X 的点计数.将 Δ 网格放大为 $k\Delta$ 网格,令 $N_{k\Delta}$ 表示离散空间(点间间距为 $k\Delta$)上集合 X 的点计数.这样便有 K 个不同网格宽度上的点计数:$N_{k\Delta}, k=1,2,\cdots,K$,其中 K 充分大,使得 $N_{k\Delta}>1$.令 $x_k=\ln k, y_k=\ln N_{k\Delta}, k=1,2,\cdots,K$.由定理[3]知,当 $\Delta\to 0$ 时:

本文于 1996 年 4 月 15 日收到.1997 年 8 月 4 日收到修改稿.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

$$\ln N_\Delta = -d_N(X)\cdot\ln\Delta + \ln C. \tag{1}$$

C 为常数，由此很容易推导出估计集合 X 的网格分形维数 $d_N(X)$ 的最小二乘算法：

$$d_N(X) = \frac{K\sum x_k y_k - \sum x_k \sum y_k}{K\sum x_k^2 - (\sum x_k)^2} = \frac{K\sum \ln k \ln N_{k\Delta} - \sum \ln k \sum \ln N_{k\Delta}}{K\sum \ln^2 k - (\sum \ln k)^2}. \tag{2}$$

当分辨率即点间间距 Δ 已知时，$\ln N_{k\Delta}$ 作为 $\ln k$ 的函数，不仅常单调下降，而且是凸函数. 于是得到 $d_N(X)$ 的近似结果：

$$d_N(X) \approx \frac{\ln N_\Delta}{\ln K}. \tag{3}$$

其中，$K = \max\{k \mid N_{k\Delta} > 1\}$，$k\Delta$ 为覆盖集合 X 的网格宽度，N_Δ 意义如前.

下面以语音信号为例给出短时分形维数的定义并说明网格分形维数的应用.

2.2 短时分形维数及其算法

一段语音信号可作为函数图象来确定其网格分形维数. 假设语音信号数字化采样频率为 8kHz. 将每秒划分成 62.5 帧，每帧 16ms，每帧包含 128 个采样点.

对第 k 帧，语音采样点序列为 $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \cdots, x_{128}^{(k)}, (x_0^{(k)} = x_{128}^{(k)}, x_{129}^{(k)} = x_1^{(k)})$. 令

$$\begin{cases} D^{(k)}(\Delta) = \sum\limits_{j=1}^{128} |x_j - x_{j+1}|, \\ D^{(k)}(2\Delta) = \sum\limits_{j=1}^{64} (\max\{x_{2j-1}, x_{2j}, x_{2j+1}\} - \min\{x_{2j-1}, x_{2j}, x_{2j+1}\}), \end{cases} \tag{4}$$

$$N^{(k)}(\Delta) = \frac{D^{(k)}(\Delta)}{\Delta}, \quad N^{(k)}(2\Delta) = \frac{D^{(k)}(2\Delta)}{2\Delta}. \tag{5}$$

$N^{(k)}(\Delta)$ 及 $N^{(k)}(2\Delta)$ 分别表示用宽度为 Δ 及 2Δ 的正方形网格覆盖第 k 帧信号的函数图象所需的网格格子数(见图 1). 由网格分形维数定义，定义第 k 帧的短时分形维数 $d_F^{(k)}$ 为：

$$d_F^{(k)} = \frac{\ln N^{(k)}(\Delta) - \ln N^{(k)}(2\Delta)}{\ln 2} = 1 - \log_2 \frac{D^k(\Delta)}{D^k(2\Delta)}. \tag{6}$$

当每帧的时间长度趋于零时，短时分形维数转化为分形维数分布. 如同语音信号不是平稳信号而采用短时 Fourier 变换一样，采用短时分形维数能更加有效地反映信号的变化特征. 因此，可应用于信号滤波，而且和短时能量、短时过零数一样，也是语音信号的重要特征参数，可应用于语音识别与匹配.

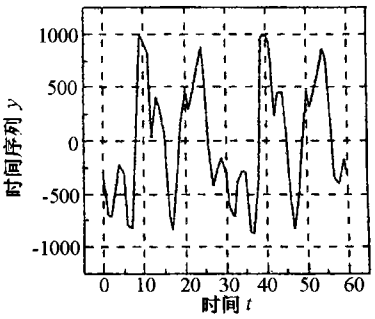


图 1 信号由正方形网格所覆盖

3 基于短时分形维数的模糊控制滤波与实验结果

设 x_i 是语音信号的采样序列. $x_i = s_i + n_i$，s_i 为有用信号，n_i 为噪声. 基于模糊控制参数的平滑方法为

$$y_i = \alpha x_i + (1-\alpha) y_{i-1}, \quad \alpha \in [0,1], \tag{7}$$

α 称为模糊控制参数.

实验表明，α 太小，噪声虽已过滤，但有用信号受损；α 太大，噪声残留太多. 可见，α 取定值不利于噪声过滤. 为提高滤波效果，α 必须有自适应能力，能根据输入信号特性动态地调整取值的大小. 因此，采用短时分形维数就为模糊参数 α 的动态调整提供了依据.

假设模糊控制参数 α 是短时分形维数的函数，即 $\alpha^{(k)} = f(d_F^{(k)})$，我们称 $\alpha^{(k)}$ 为短时模糊控制参数，$f(\cdot)$ 的形式可根据不同场合的不同需要加以设计[4]. 一般准则是：当噪声水平较大时，信号较为曲折，$d_F^{(k)}$ 相应变大，$\alpha^{(k)}$ 取值应较小；而当噪声水平较小时，信号较为平坦，$d_F^{(k)}$ 也

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n

相应变小，$\alpha^{(k)}$ 取值应较大. 这样，模糊控制参数 α 随不同帧而不同. 当 $d_F^{(k)}$ 较大时，信号波动较大；$\alpha^{(k)}$ 较小，易于清除噪声. 反之，当 $d_F^{(k)}$ 较小时，信号较为平稳，$\alpha^{(k)}$ 较大，易于保持信号的原样. 此时，α 具有自适应能力.

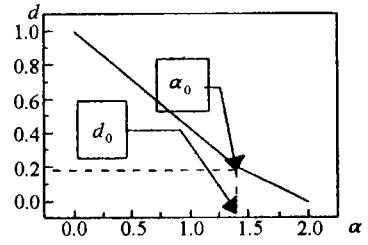


图 2　$d_F^{(k)}$ 与 α 成分段线性函数关系

实验时，取 d_F 与 α 为分段线性关系式，$d_0 = 1.4$，$\alpha_0 = 0.2$（如图 2）. 截取的一段语音信号如图 3 所示，分形模糊滤波结果如图 4 所示. 图 5 画出 α 取固定值 0.05，0.20 以及采用短时分形维数模糊滤波方法的 σ^2-D^2 的坐标图. 由此可见，采用分形模糊滤波的效果优于 α 固定时的滤波.

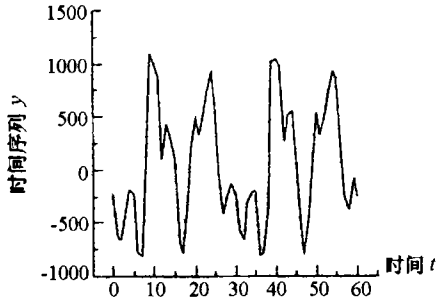


图 3　附加噪声的一段语音信号

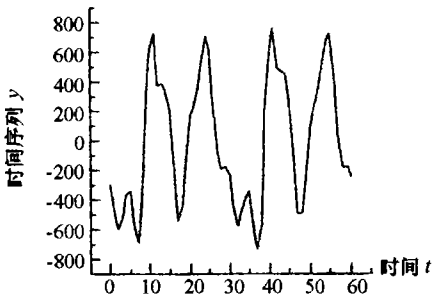
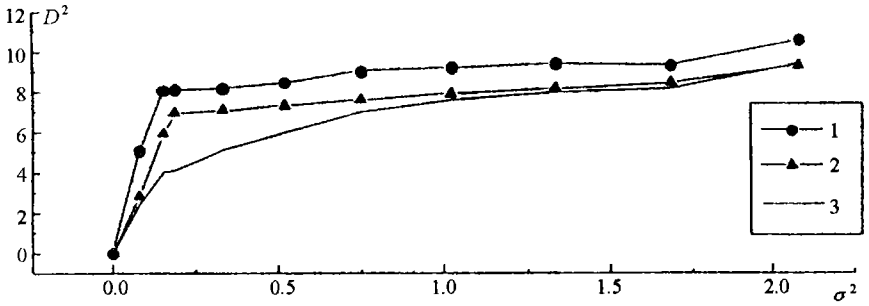


图 4　采用短时分形维数的模糊滤波



1: α=0.05　2: α=0.20　3: 短时分形维数模糊滤波方法

图 5　σ^2-D^2 图，不同噪声强度下的不同滤波效果

4　结论

基于短时分形维数的模糊控制滤波方法可以根据复杂信号的特征动态地调整模糊控制参数的取值. 当短时分形维数较大时，信号波动较大，模糊控制参数较小，易于清除噪声；而当短时分形维数较小时，信号较为平稳，模糊控制参数较大，易于保持信号的原有特征. 这就使得模糊控制参数具有自适应能力. 因此利用此方法对复杂信号进行滤波有着较好的应用前景.

参　考　文　献

1　丁德恒，蔡义发，吕维雪. 三维复杂表面的分数维分析和内插. 计算机学报，1991，14(9)：710－716

1　Lai，X. Y.，Huang，A. S. and Wu，M. J.. Intelligent Interface of Voice and Speech System Using Fuzzy Controller and Fractal Dimension. Proc. ICCPCOL，Florida，1992

3　曾文曲，刘世耀译. 分形几何——数学基础及其应用. 辽宁：东北大学出版社，1991

4　吴敏金. 分形信息导论. 上海：上海科学技术文献出版社，1994

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.n

Fuzzy Control Filtering Based on Short-Time Fractal Dimension

ZHENG Huiyong and XIAO Tianyuan
(Tsinghua University CIMS Center · Beijing, 100084, PRC)
DAI Guanzhong
(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University · Xi'an, 710072, PRC)
ZHOU Sanchuan
(Department of Mechanical Engineering, Hong Kong Polytechnic University · Hong Kong)

Abstract: Along with the development of computer science and technology, the researches in chaos and fractal theories and applications cause public attentions and many important results are obtained. It is well known that fractal dimension is the important dimension but difficult to compute. In order to overcome this defect, the short-time fractal dimension, which can exactly depict the local features of complex signals, is given. Based on this concept, a new fuzzy control signal filtering method (SFDF) is put forward. The advantage of SFDF is that the fuzzy control parameter can be dynamically revised according to the complex signal's feature. We apply SFDF to voice signal filtering and the simulation results show that the filtering effect is satisfactory.

Key words: fuzzy control; fractal; chaos; short-time fractal dimension

本文作者简介

郑会永 1968年生. 1997年毕业于西北工业大学自动控制系并获博士学位. 现在在清华大学自动化系做博士后研究工作. 主要研究兴趣为: 时间序列分析与处理, 非线性科学中的混沌与分形理论, 计算机集成制造等.

肖田元 清华大学自动化系教授. 博士生导师. 现任清华大学国家CIMS工程研究中心副主任. 研究领域为仿真技术研究, 虚拟制造等.

戴冠中 见本刊1998年第1期第23页.

周三川 1968年生. 1991年毕业于西北工业大学应用数学系, 现为香港理工大学机械轮机系硕士研究生. 主要研究兴趣为系统辨识, 模糊神经网络等.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.n