

文章编号: 1001-2486 (2002) 03-0064-03

## 一种基于估计熵的自适应模糊滤波器 及其在箭遥信号处理中的仿真应用\*

朱双鹤<sup>1</sup>, 尚庆宣<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

**摘要:**介绍了一种基于估计熵的自适应模糊滤波器,并将其应用于宽带噪声中火箭遥测速变信号的数字滤波。讨论了自适应模糊滤波算法,给出了应用实验结果。分析和实验表明,这种新型滤波器能根据信号的复杂程度自动调节其参数,对宽带噪声中非平稳随机信号有较好的滤波效果。

**关键词:**估计熵; 自适应模糊滤波器; 随机信号; 遥测信号处理

**中图分类号:**TP391; TN911.7 **文献标识码:**A

## An Adaptive Fuzzy Filter Based on Approximate Entropy and Its Simulation Application in Rocket Telemetry Signal Processing

ZHU Shuang-he<sup>1</sup>, SHANG Qing-xuan<sup>2</sup>

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Introduces an adaptive fuzzy filter based on approximate entropy and applies the filter to the digital filter of rocket telemetry signal in the wideband noise. The adaptive fuzzy filter algorithm is discussed, and the experimental filtering results of rocket telemetry signal in white noise are given. Both analysis and experiment show that the parameters of this novel filter can adjust itself according to the complexities of the signal. It filters better than the average subsection fuzzy filter for the non-steady stochastic signal in the wideband noise.

**Key words:** approximate entropy; adaptive fuzzy filter; stochastic signal; telemetry signal processing

在火箭遥测系统信号传输中经常遇到的情况是随机信号加窄带高斯过程,就是说信号在传输过程中受到相加性窄带白噪声干扰。白噪声是一种理想的宽带随机过程,其功率谱密度在整个频域内均匀分布,功率谱密度为常数  $S_0$ 。由于遥测传输系统中包含有各种仪器设备,它们限制了系统的总带宽,所以在系统的输出端得到的白噪声是窄带随机过程,即限带白噪声。假设遥测数据传输系统的等效带宽为  $\omega_0$ ,则限带白噪声的功率谱密度为

$$S_n(\omega) = \begin{cases} S_0 & \omega \in [-\omega_0, +\omega_0] \\ 0 & \omega \notin [-\omega_0, +\omega_0] \end{cases}$$

由于火箭遥测速变参数信号的带宽一般都小于 10kHz,所以  $\omega_0$  远远大于遥测信号的带宽。这类其能量分布于整个系统带宽上的噪声干扰,降低了遥测数据处理时谱分析的频率分辨率和谱分析结果真实性<sup>[1]</sup>。

经典的数字滤波器是一个线性系统,它不适用于宽带噪声中非平稳随机信号的滤波。现代数字滤波器中的卡尔曼滤波器是时变参数滤波器,它和自适应滤波器都适用于非平衡随机信号的滤波<sup>[2]</sup>。但是,在实际的遥测信号处理时,既无法确切知道卡尔曼滤波所要求的信号的统计特征,也很难提供自适应滤波器所必须的参考信号。

估计熵是近年来新发展的一种能准确地度量时间序列信号复杂程度的统计量<sup>[3]</sup>,对于  $N$  点时间

\* 收稿日期: 2001-11-12

基金项目: 航天基础科学研究项目基金资助(98D24417)

作者简介: 朱双鹤(1940—),男,教授。

序列  $\{x_n(i)\} (i=1, 2, \dots, N)$ , 估计熵  $ApEn$  的定义为:

$$ApEn(m, r) = \lim_{n \rightarrow \infty} [\varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r)]$$

其中  $\varphi^m(r) = (N - m + 1)^{-1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \left[ \sum_{j=1}^{N-m+1} H\{r - d_m[x_m(i), x_m(j)]\} (N - m + 1) \right]$

(这里  $H(\cdot)$  为 Heaviside 函数)

$$d_m[x_m(i), x_m(j)] = \max_k |u(i+k) - u(j+k)| \quad k=1, 2, \dots, m$$

$$x_m(i) = [u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)] \quad i=1, 2, \dots, N-m+1$$

利用估计熵在数据样本少且存在噪声时其统计特性也很稳定的优点, 黄俊等人<sup>[4]</sup>提出了一种基于估计熵的平均分段模糊滤波方法, 但该计算方法的缺点是, 当某段信号序列的复杂程度有较大变化时, 会影响模糊滤波效果。

## 1 基于估计熵的自适应分段模糊控制滤波器

### 1.1 不等间隔分段方法

平均分段计算估计熵, 有可能使信号的特征段被割裂开, 从而使信号的特征段 (信号的估计熵较大的子数据段) 处于不同的计算估计熵的段落中。当信号序列的复杂程度有较大不同时, 会影响模糊滤波的性能。自适应分段的实质是, 它是一种不等间隔分段方法, 能够保证在一个计算估计熵的数据段中, 信号的复杂程度相对来说比较一致。不等间隔分段方法为:

(1) 设数据总点数为  $N$ , 计算估计熵所需最少数据样本数  $N_0$ , 一般取  $N_0 \geq 8$ ;

(2) 把分析数据平均分为  $k$  个子数据段 ( $k = N/N_0$ ), 得到  $k$  个子数据段的估计熵  $(ApEn)_k$ ,  $k=1, 2, \dots, N/N_0$ ;

(3) 求平均估计熵  $(ApEn)_{pj} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^{N/N_0} (ApEn)_k$  和最大值  $(ApEn)_{\max} \in \{(ApEn)_k\}, k=1, 2, \dots, N/N_0$ ;

(4) 如果  $(ApEn)_{\max} - (ApEn)_{pj} \geq r$ , 将所有满足条件  $(ApEn)_k \geq (ApEn)_{pj}$  的相邻子数据段合并,  $r$  一般取  $0.05 \sim 0.1$ ;

(5) 将剩余数据部分的子数据段按步骤 (3)、(4) 再进行合并;

(6) 如果  $(ApEn)_{\max} - (ApEn)_{pj} < r$ , 则把对应于  $(ApEn)_{\max}$  的子数据段和相邻子数据段合并, 其余部分的数据分段间隔不变。

考虑加性噪声干扰, 选择被测信号序列模型为  $x_n = s_n + n_n$ , 其中  $s_n$  为期望信号序列,  $n_n$  为零均值高斯白噪声序列。这时, 期望信号序列由下面的模糊滤波方程得到:

$$s_n = \sum_{k=-N}^N f(ApEn, n-k) \times x_{n-k}$$

$f(\cdot)$  是窗口宽度为  $2N+1$  的模糊控制数字滤波器的加权系数, 由噪声分布函数决定。它是模糊滤波方程的隶属函数, 在滤波计算时作归一化处理。

### 1.2 自适应分段模糊滤波方法

由于估计熵能准确地度量信号复杂程度, 因而它随信号复杂程度的改变而自适应地改变, 从而自动调节滤波器的结构, 达到模糊滤波的目的。自适应分段模糊滤波方法为:

(1) 找出遥测信号特征段;

(2) 将数据系列不等间隔分为  $L$  段;

(3) 计算每个子数据段的估计熵  $ApEn(m, r)_i, i=1, 2, \dots, L$ 。

根据噪声的概率分布函数选取隶属函数形式, 计算隶属函数并使其归一化。对于高斯白噪声, 它

符合正态分布, 选取  $f(ApEn, n-k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[ApEn \times (n-k)]^2}{2}}$

(4) 进行模糊滤波  $s_n = \sum_{k=-N}^N f(ApEn, n-k) \times x_{n-k} \quad n=1, 2, \dots, N$

关于  $m, r$  的取值, 对于  $m = 1, m = 2, r$  的值为  $0.1 \sim 0.2, SD$  统计效果较好 ( $SD$  为观测信号序列的标准偏差)。

### 2 应用实验结果

遥测速变参数  $Zygd$  为 CZ- $\times \times$  火箭某段固体发动机联结处法向低频振动参数。图 1 为遥测参数  $Zygd$  在星箭分离时的波形, 信号中迭加有均值为零的高斯白噪声; 图 2 为采用平均分段法模糊滤波的结果; 图 3 为采用自适应分段法模糊滤波的结果。可以看出, 采用自适应分段法的模糊滤波器输出信噪比有一定的改善。

实验表明, 对于给定的数据系列, 存在一个相对最佳的分段数  $N_{0pt}$ 。当该给定的数据序列分为  $N_{0pt}$  段时, 模糊滤波效果最好; 当数据序列分段数小于  $N_{0pt}$  时, 滤波器对噪声的控制不够; 当数据序列分段数大于  $N_{0pt}$  时, 滤波器对变化剧烈的信号反应不够灵敏。

### 3 结论

基于估计熵的自适应模糊控制滤波的不等间隔分段计算估计熵方法克服了平均分段计算估计熵方法的不足, 提高了滤波器输出信号的信噪比, 但计算量有所增加。这种模糊控制滤波器适用于非平稳随机信号的数字滤波, 对受到宽带噪声及其他噪声干扰的箭遥信号滤波有一定的应用价值。需要指出的是, 在进行自适应模糊滤波时必须事先知道干扰噪声的概率密度函数解析式并符合某种模糊分布, 这是它的局限性。

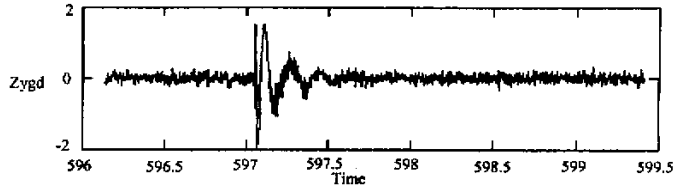


图 1 Zygd 在星箭分离时的波形

Fig.1 Zygd waveform as satellite separates from rocket

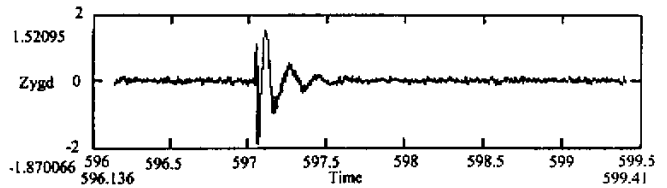


图 2 平均分段法模糊滤波的结果 ( $N_{0pt} = 16$ )

Fig.2 Zygd waveform using average subsection method to the fuzzy filter ( $N_{0pt} = 16$ )

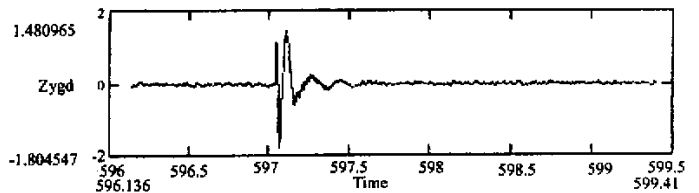


图 3 自适应分段法模糊滤波的结果 ( $N_{0pt} = 12$ )

Fig.3 Zygd waveform using adaptive subsection method to the fuzzy filter ( $N_{0pt} = 12$ )

### 参考文献:

- [1] 赵松年, 于允贤. 信号分析与遥测技术 [M]. 北京: 地震出版社, 1983.
- [2] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [3] Pincus S. Approximate Entropy (ApEn) as a Complexity Measure [J]. Chaos, 1995, 5 (1): 110 - 117.
- [4] 黄俊, 裴文江等. 基于估计熵的模糊滤波 [J]. 数据采集与处理, 1998, 6: 44 - 47.

