

一种基于峰度系数的脉冲噪声检测算法的研究及其FPGA实现

周晓波^① 王洪^{*①} 周郭飞^②

^①(北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

^②(公安部第一研究所 北京 100048)

摘要: 针对激光测振系统中散斑效应导致的语音脉冲噪声, 该文研究了一种基于4阶累积量的峰度检测算法, 推导了峰度系数和归一化峰度系数的数学迭代公式, 并在FPGA的实现中提出了一种峰度系数的动态阈值的判决方法。基于实验数据的仿真结果表明, 该算法较理论公式减少了约25%的计算量, 节省了硬件资源, 对较小幅度的脉冲噪声具有更敏感的检测性能。

关键词: 激光测振; 散斑效应; 脉冲噪声; 峰度检测

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)07-1816-05

DOI: 10.11999/JEIT200460

An Impulse Noise Detection Algorithm Based on Kurtosis and FPGA Implementation

ZHOU Xiaobo^① WANG Hong^① ZHOU Guofei^②

^①(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

^②(The First Research Institute of the Ministry of Public Security, Beijing 100048, China)

Abstract: For the speech impulse noise caused by the speckle effect in the laser vibration measurement system, a kurtosis detection algorithm based on the fourth-order cumulant is studied, and the mathematical iterative formulas for the kurtosis coefficient and the normalized kurtosis coefficient are deduced, and a method for determining the dynamic threshold of kurtosis coefficient is proposed in FPGA. The simulation results based on experimental data show that the algorithm reduces the calculation by about 25% compared with the theoretical formula and saves hardware resources, and has a more sensitive detection performance for lower amplitude impulse noise.

Key words: Laser vibration measurement; Speckle effect; Impulse noise; Kurtosis detection

1 引言

激光在投射到被测物体上时, 物体的振动使激光产生多普勒效应, 这是激光测振技术的理论基础。在实际应用中, 多普勒激光测振系统往往工作在非理想环境下, 例如粗糙的物体表面、激光光学元件的非理想性以及环境噪声等, 多普勒激光信号会产生散斑效应, 信号出现失真, 给解调系统带来了不确定性。这种不确定性会导致解调信号中出现脉冲噪声等问题。这种情况下, 线性系统和2阶统计特性对于这种非高斯非平稳信号的处理存在着局限性, 需要更高阶的统计特性来描述。高阶统计

特性, 意味着更复杂的数学运算。随着计算机技术的技术革新, 复杂的数学运算不再是高阶统计量在工程中应用的桎梏^[1], 高阶统计量的应用范围越来越广泛。

高阶统计特性作为一种特征参数应用在信号分类器中, 能够提高系统的抗噪性能^[2]。近年来, 基于高阶累积量的峰度检测则广泛应用于各个领域: 激光系统中微弱脉冲检测^[3]、机械系统故障检测^[4-6]、电磁应用^[7]、医学脑电图特征诊断^[8]、语音信号增强^[9-12]等方面。国内外利用高阶累积量对语音信号进行研究, 主要应用在静音检测^[9]、功率谱峰度检测^[10]、语音端点检测^[11]、音乐质量评估^[12,13]等方面。本文对基于高阶累积量的峰度检测算法检测脉冲噪声的可行性进行了理论研究, 推导了峰度系数的精确数学迭代公式。为了在FPGA中实现脉冲噪声的实时检测, 进一步简化了迭代公式, 并提出了一种动态阈值的判决方法, 合理地计算量进行了

收稿日期: 2020-06-08; 改回日期: 2020-11-27; 网络出版: 2020-12-02

*通信作者: 王洪 18120019@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(U1534201)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (U1534201)

优化。本文的结构如下：第2节理论阐述高阶累积量的峰度检测算法；第3节对语音的4阶累积量进行研究；第4节推导迭代算法的精确公式；第5节利用MATLAB对算法进行仿真验证；第6节详述FPGA的优化和实现过程；第7节为结论。

2 基于4阶累积量的峰度检测算法

高阶累积量可以自动抑制加性高斯噪声。因此，非高斯的信号，如脉冲噪声，可以利用高阶累积量来对它的统计特性进行描述。

随机变量 x 的 k 阶矩 m_k 定义为其概率密度函数的特征函数 $\Phi(\omega)$ 在原点的 k 阶导数

$$\Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{j\omega x} dx = E\{e^{j\omega x}\} \quad (1)$$

$$m_k = \Phi^k(0) = E\{x^k e^{j\omega x}\}|_{\omega=0} = E\{x^k\} \quad (2)$$

随机变量 x 的 k 阶累积量 c_k 定义为它的累积量生成函数 $\psi(\omega)$ 的 k 阶导数在原点的值

$$\psi(\omega) = \ln \Phi(\omega) \quad (3)$$

$$c_k = \left. \frac{d^k \psi(\omega)}{d\omega^k} \right|_{\omega=0} \quad (4)$$

将 $\psi(\omega)$ 展开成泰勒级数

$$\Psi(\omega) = c_1\omega + \frac{1}{2}c_2\omega^2 + \dots + \frac{1}{k!}c_k\omega^k + \dots \quad (5)$$

由 $\Phi(\omega) = e^{\Psi(\omega)}$ ，推导出4阶累积量和4阶矩的关系及其表达式

$$c_4 = m_4 - 3m_2^2 - 4m_1m_3 + 12m_1^2m_2 - 6m_1^4 \quad (6)$$

对于0均值的高斯随机过程，其高阶(3阶及以上)累积量等于0，换言之，高阶累积量对0均值高斯信号是“盲”的。即对于0均值的随机过程，可以将4阶累积量的计算进行简化，近似估计为

$$c_4 = m_4 - 3m_2^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x^4(i) - 3 \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x^2(i) \right]^2 \quad (7)$$

式(7)由4阶矩和2阶矩计算而来，反映了随机变量在其均值附近的尖锐程度，定义为随机信号的峰度。其归一化的4阶累积量为

$$Nc_4 = \frac{c_4}{m_2^2} \quad (8)$$

3 稳定语音信号的4阶累积量特性

在语音信号处理中，一般是应用高阶统计量固有的高斯抑制和相位保持特性对信号进行处理[14,15]。

根据语音的正弦模型，语音信号是由若干正弦波的叠加，通过带状的对角切片部分可以表达语音的振幅和频率。使用连续时间序列表示成

$$x(t) = a_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + a_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \quad (9)$$

使用该模型对语音信号的4阶累积量进行研究，其峰度系数为

$$\text{Kurtosis} = C_4[0] = \frac{-3(a_1^4 + a_2^4)}{8} \quad (10)$$

归一化峰度系数

$$NKurtosis = \frac{C_4[0]}{[E_s]^2} = \frac{-3(a_1^4 + a_2^4)}{4(a_1^2 + a_2^2)} \quad (11)$$

当 $a_1 \approx a_2$ 时， $C_4[0] = -0.75[E_s]^2$ ；当 $a_1 \gg a_2$ 或 $a_1 \ll a_2$ 时， $C_4[0] = -1.5[E_s]^2$ 。

理论上可以确定语音信号的归一化的峰度系数为 $-1.5 \sim -0.75$ 。若存在脉冲噪声，其非高斯的特性会使得归一化峰度系数高于0。因此，通过阈值判定的方法，能实现在语音信号中将脉冲噪声检测出来。

4 峰度检测算法的迭代公式推导

高阶累积量的计算复杂，运算量极大。在工程应用中，为了能够在FPGA中实现峰度系数的计算，需要利用合理的数学推导和优化对计算公式进行简化。采用数学迭代[16]的方式，能够降低计算复杂度。以下推导了精确的迭代公式，并根据语音信号的特性，进行了一些简化，得到改进的峰度系数迭代公式

$$\hat{c}_{2x}(k-1, 0) = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} x^2(i) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & k\hat{c}_{2x}(k, 0) - (k-1)\hat{c}_{2x}(k-1, 0) \\ &= \sum_{i=1}^k x^2(i) - \sum_{i=1}^{k-1} x^2(i) = x^2(k) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\hat{c}_{2x}(k, 0) = \left(1 - \frac{1}{k}\right)\hat{c}_{2x}(k-1, 0) + \frac{1}{k}x^2(k) \quad (14)$$

令 $\lambda = 1 - 1/k$ ，2阶累积量的迭代公式为

$$\hat{c}_{2x}(k, 0) = \lambda\hat{c}_{2x}(k-1, 0) + (1-\lambda)x^2(k) \quad (15)$$

2阶累积量可以用作信号的能量检测

$$p(k) = \lambda p(k-1) + (1-\lambda)x^2(k) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & k\hat{c}_{4x}(k, 0) - (k-1)\hat{c}_{4x}(k-1, 0) \\ &= \left[\sum_{i=1}^k x^4(i) - \sum_{i=1}^{k-1} x^4(i) \right] - 3kp^2 \\ &+ 3\frac{1}{k-1} [k^2p^2 - 2kpx^2(k) + x^4(k)] \\ &= \frac{k+2}{k-1}x^4(k) + 3\frac{k}{k-1}p^2 - 6\frac{k}{k-1}px^2(k) \end{aligned} \quad (17)$$

当 k 足够大时， $k+2 \approx k$ ，化简后

$$\begin{aligned} \hat{c}_{4x}(k, 0) &= \frac{k-1}{k} \hat{c}_{4x}(k-1, 0) + \frac{1}{k-1} x^4(k) \\ &\quad + 3 \frac{1}{k-1} p^2 - 6 \frac{1}{k-1} p x^2(k) \end{aligned} \quad (18)$$

由于 k 足够大, 则有 $\frac{k-1}{k} + \frac{1}{k-1} = \frac{k^2 - k + 1}{k^2 - k} \approx 1$;
令 $\mu = \frac{k-1}{k}$, 则 $1 - \mu = \frac{1}{k-1}$ 。

4阶累积量的迭代公式化简为

$$\hat{c}_{4x}(k, 0) = \mu \hat{c}_{4x}(k-1, 0) + (1 - \mu) \cdot [x^4(k) + 3p^2 - 6px^2(k)] \quad (19)$$

$$\Delta = x^4(k) + 3p^2 - 6px^2(k) \quad (20)$$

Δ 为4阶累积量的迭代运算的更新因子。

对于语音信号, 可以近似认为: $p \approx x^2(k)$, 则有

$$\Delta = x^4(k) - 3px^2(k) \quad (21)$$

同4阶累积量的推导过程, 推导出改进的归一化4阶累积量的迭代公式为

$$\hat{c}_{4x}(k, 0) = \mu \hat{c}_{4x}(k-1, 0) + (1 - \mu) \left[\frac{x^4(k) - 3px^2(k)}{p^2} \right] \quad (22)$$

改进的归一化更新因子(近似)

$$N\Delta = \frac{x^4(k) - 3px^2(k)}{p^2} \quad (23)$$

根据更新因子使迭代算法收敛的条件, 更新因子是 $x(k)$ 的4次幂函数; 更新因子可和, 且 $\sum_{k=-\infty}^{\infty} |N\Delta| < \infty$ 。改进的归一化更新因子(近似) $N\Delta$ 满足以上两个条件, 因此该迭代公式收敛。

5 MATLAB仿真

利用MATLAB对峰度系数迭代算法进行仿真, 仿真数据为真实采集的带有脉冲噪声的低信噪比语音信号。仿真对比了改进的峰度系数迭代公式和初始迭代公式的检测性能以及不同参数下的归一化峰度系数的检测性能。由图1可看出, 在语音脉冲噪声检测的应用下, 改进的峰度系数迭代算法具有更大的峰度值, 而且在脉冲噪声幅度较小时, 表现出了更敏感的特性, 有利于语音脉冲噪声的检测。

通过调整迭代公式中的遗忘因子 μ , 对归一化峰度系数进行仿真对比。由图2, 遗忘因子 μ 越小, 对于脉冲噪声就会越敏感。而对于正常的语音信号来说, 归一化峰度系数值总是小于0的。

6 FPGA设计与实现

使用FPGA进行数字电路设计, FPGA是定点数的运算方式, 其并行运算的特点能够以更少的硬件资源实现更快速的运算, 从而满足实时性的需

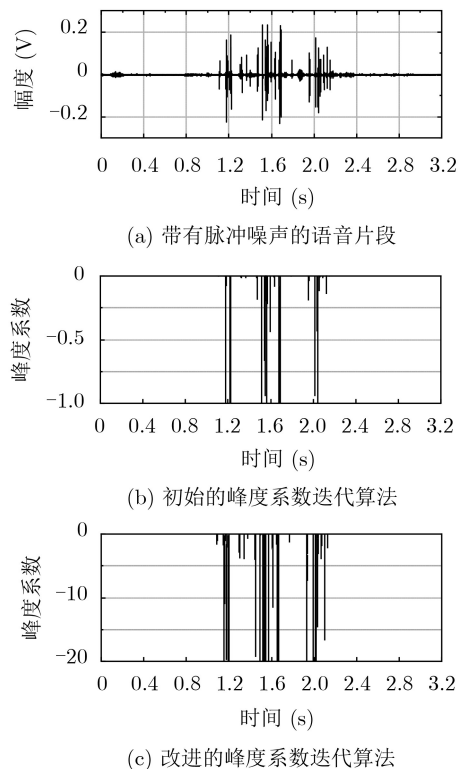


图1 改进的峰度系数迭代算法与初始迭代算法的性能比较($\mu=0.9$, $\lambda=0.9$)

求。以MATLAB的浮点数的模型作为参考, 改进的峰度系数的迭代公式和动态阈值的判决方法在FPGA里的结构图由图3所示, 包含峰度系数计算和动态阈值计算两个模块。系统时钟采用49.152 MHz, 输入解调语音信号的采样频率为32 kHz。

6.1 改进的峰度系数计算和动态阈值判决方法

从MATLAB的仿真结果来看, 归一化峰度的迭代计算能够有效且直观地检测到脉冲噪声, 而且可以以固定的阈值进行判决。然而, 归一化峰度计算中包含了FPGA所不擅长的除法运算, 为了节省硬件资源, 通过结合峰度系数和归一化峰度系数的检测方法, 提出改进的动态阈值判决方法。通过2阶累积量对判决阈值进行实时更新, 同时计算信号的峰度系数, 通过动态阈值进行判决, 对脉冲噪声进行实时检测。

$$\left. \begin{aligned} DT &= T \times p^2 \\ K &\leq DT, \text{ 语音信号} \\ K &> DT, \text{ 脉冲噪声} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

6.2 峰度系数计算量评估

经过第4节的推导, 对初始迭代式(17)和改进的迭代式(18)的计算量进行估算, 如表1。可以看出, 改进的峰度系数方法减少了25%的加减法运算和乘法运算, 降低了硬件电路的实现成本。

6.3 FPGA仿真结果

由第5节的分析结果, 如果使用归一化的峰度

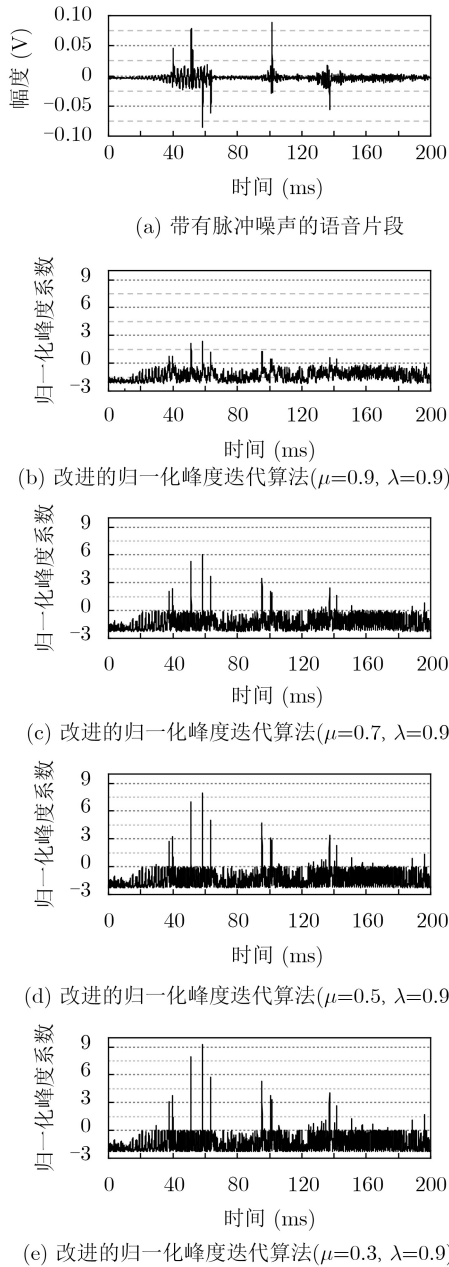


图2 μ 值对峰度系数的影响

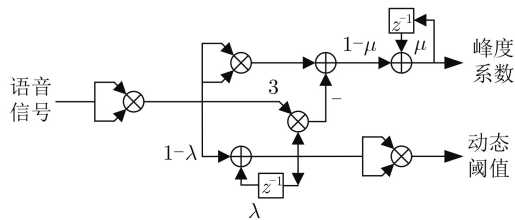


图3 基于FPGA的改进峰度系数迭代方法结构图

表1 4种峰度系数迭代算法计算量对比

算法	±	×	÷
峰度系数	4	8	0
归一化峰度系数	4	8	1
改进的峰度系数	3	6	0
改进的归一化峰度系数	3	6	1

系数对脉冲噪声进行检测，在阈值为0时，可以对脉冲噪声和正常语音信号进行区分，根据式(21)，将阈值设置为-0.1，完成动态阈值的计算。FPGA仿真结果如图4所示，波形从上至下分别是语音信号、峰度系数和动态阈值。仿真结果可以看出，脉冲噪声的峰度系数幅度明显高于正常的语音信号，动态阈值则设定了一个范围，将脉冲噪声与语音信号区分开来。

截取部分仿真数据，在MATLAB中进行分析，图5中，当语音信号产生突发的脉冲尖峰时，峰度系数会大于动态阈值，通过判决，可以认为该部分数据为脉冲噪声。通过置0或者其他抑制方法，可以对脉冲噪声进行抑制。

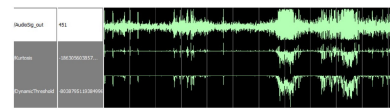


图4 FPGA仿真结果

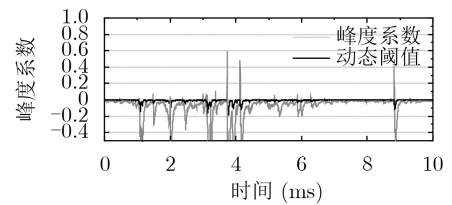
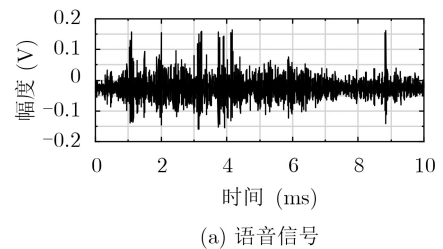


图5 峰度系数与动态阈值分析

7 结论

本文研究了基于高阶累积量的峰度检测算法，从理论层面探讨了该算法在语音脉冲噪声检测中的可行性，根据理论的峰度系数计算公式，推导了峰度系数和归一化峰度系数的数学迭代公式，并进行优化，在降低了25%的计算复杂度的同时，对于较小幅度的脉冲噪声具有更加敏感的检测性能。在FPGA的实现中，提出了动态阈值的判决方法，避免了FPGA所不擅长的除法运算，节省了硬件资源。本文的研究对激光测振系统，语音脉冲噪声检测等方面具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 张旭东. 现代信号分析和处理[M]. 北京: 清华大学出版社,

- 2018: 350–357.
- ZHANG Xudong. *Modern Signal Analysis and Processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018: 350–357.
- [2] ZHANG Yongrong, WANG Jian, WU Guannan, *et al.* Wireless signal classification based on high-order cumulants and machine learning[C]. 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI), Chongqing, China, 2018: 246–250. doi: [10.1109/IICSPI.2018.8690352](https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690352).
- [3] 张廷华, 樊桂花, 孙华燕, 等. 微弱脉冲激光回波信号的峰度检测[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2009, 20(3): 71–74. doi: [10.3783/j.issn.1673-0127.2009.03.017](https://doi.org/10.3783/j.issn.1673-0127.2009.03.017).
- ZHANG Tinghua, FAN Guihua, SUN Huayan, *et al.* The detection of weak pulse laser echo signal by the kurtosis[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2009, 20(3): 71–74. doi: [10.3783/j.issn.1673-0127.2009.03.017](https://doi.org/10.3783/j.issn.1673-0127.2009.03.017).
- [4] JING Shuangxi, YUAN Jinle, LI Xinhua, *et al.* Weak fault feature identification for rolling bearing based on EMD and spectral kurtosis method[C]. 2018 International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), Changchun, China, 2018: 235–239. doi: [10.1109/ICISCAE.2018.8666841](https://doi.org/10.1109/ICISCAE.2018.8666841).
- [5] BENARABI T, ADNANE M, and MANSOUR M. High order statistics for ventricular ectopic beats detection[C]. 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS), Medea, Algeria, 2018: 1–4. doi: [10.1109/ICASS.2018.8651975](https://doi.org/10.1109/ICASS.2018.8651975).
- [6] HU Yue, BAO Wenjie, TU Xiaotong, *et al.* An adaptive spectral kurtosis method and its application to fault detection of rolling element bearings[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(3): 739–750. doi: [10.1109/TIM.2019.2905022](https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2905022).
- [7] 刘卫东, 刘尚合. 基于峰度特征的瞬态电磁信号检测提取方法[J]. *微波学报*, 2018, 34(6): 78–83. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201806017](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201806017).
- LIU Weidong and LIU Shanghe. Transient electromagnetic signal detection and extraction based on kurtosis value[J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(6): 78–83. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201806017](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201806017).
- [8] YAKOUBI M, HAMDI R, and SALAH M B. Abnormal brain detection and analysis of EEG signals[C]. 2018 International Conference on Signal, Image, Vision and their Applications (SIVA), Guelma, Algeria, 2018: 1–5. doi: [10.1109/SIVA.2018.8661078](https://doi.org/10.1109/SIVA.2018.8661078).
- [9] 程培培, 刘越智. 归一化峰度在广播信号处理中的应用[J]. *中国无线电*, 2015(10): 63–64. doi: [10.3969/j.issn.1672-7797.2015.10.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7797.2015.10.034).
- CHENG Peipei and LIU Yuezhi. Application of normalized kurtosis in broadcast signal processing[J]. *China Radio*, 2015(10): 63–64. doi: [10.3969/j.issn.1672-7797.2015.10.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7797.2015.10.034).
- [10] SASAOKA N, HAMAHASHI N, and ITOH Y. Speech enhancement with impact noise activity detection based on the kurtosis of an instantaneous power spectrum[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2017, E100. A(9): 1942–1950. doi: [10.1587/transfun.E100.A.1942](https://doi.org/10.1587/transfun.E100.A.1942).
- [11] 姜因, 谢俊仪. 低信噪比下语音端点检测算法改进设计[J]. *中国刑警学院学报*, 2018(1): 123–128. doi: [10.14060/j.issn.2095-7939.2018.01.024](https://doi.org/10.14060/j.issn.2095-7939.2018.01.024).
- JIANG Nan and XIE Junyi. Design of endpoint detection algorithm in low SNR[J]. *Journal of Criminal Investigation Police University of China*, 2018(1): 123–128. doi: [10.14060/j.issn.2095-7939.2018.01.024](https://doi.org/10.14060/j.issn.2095-7939.2018.01.024).
- [12] PRODEUS A, KOTVYTSKYI I, and GREBIN A. Using kurtosis for objective assessment of the musical signals clipping degree[C]. 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 2019: 655–659. doi: [10.1109/PICST47496.2019.9061420](https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061420).
- [13] PRODEUS A, KOTVYTSKYI I, DIDKOVSKA M, *et al.* Kurtosis and its transformations as objective measures of clipping value and speech quality[C]. The 5th International Conference Actual Unmanned Aerial Vehicles Developments, Kiev, Ukraine, 2019: 21–26. doi: [10.1109/APUAVD47061.2019.8943880](https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943880).
- [14] NEMER E, GOUBRAN R, and MAHMOUD S. Speech enhancement using fourth-order cumulants and optimum filters in the subband domain[J]. *Speech Communication*, 2002, 36(3/4): 219–246. doi: [10.1016/s0167-6393\(00\)00081-9](https://doi.org/10.1016/s0167-6393(00)00081-9).
- [15] NEMER E, GOUBRAN R, and MAHMOUD S. The third-order cumulant of speech signals with application to reliable pitch estimation[C]. The 9th IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal and Array Processing, Portland, USA, 2002. doi: [10.1109/SSAP.1998.739426](https://doi.org/10.1109/SSAP.1998.739426).
- [16] 张安清, 章新华. 四阶累积量的递推估计及其应用[J]. *信号处理*, 2002, 18(1): 88–90. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2002.01.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2002.01.022).
- ZHANG Anqing and ZHANG Xinhua. Recursive estimation of fourth-order cumulants and application[J]. *Signal Processing*, 2002, 18(1): 88–90. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2002.01.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2002.01.022).
- 周晓波: 男, 1973年生, 副教授, 研究方向为信号处理、专用集成电路设计。
- 王 洪: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为信号处理、数字集成电路设计。
- 周郭飞: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为微弱信号处理技术和集成电路设计。