

基于二次对数能量熵小波包的母猪哺乳声去噪方法研究*

闫丽^{1,2} 沈明霞¹ 刘龙申¹ 孙昕³ 姚文⁴ 徐亚妮¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 黑龙江八一农垦大学信息技术学院, 大庆 163319;

3. 哈尔滨医科大学基础医学院, 哈尔滨 150081; 4. 南京农业大学动物科技学院, 南京 210095)

摘要:以小梅山母猪发出的哺乳呼噜声及其它干扰噪声为研究对象,利用噪声能量在频域内均匀分布,其对应的信息熵值最大的特性,根据噪声类型不同,选择不同小波包层数结合信息熵计算,去除环境噪声混叠的影响。试验结果表明,母猪呼噜声的频率范围在0~800 Hz内,仔猪争乳尖叫声的频率大于1 000 Hz,其他干扰噪声的频率范围0~8 000 Hz内;分别经过5层和3层的db10小波包分解,利用对数能量熵软阈值去除0~8 000 Hz主噪声及1 000~8 000 Hz内的残留噪声,且重构信号中母猪哺乳声的波形特征保持较好,获得令人满意的滤波处理结果,为进一步研究畜舍环境下母猪哺乳声音特征提取及识别提供了数据预处理方法。

关键词: 母猪 哺乳呼噜声 环境噪声 小波包变换 对数能量熵 去噪

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0330-07

Denosing Method of Log Energy Entropy Quadratic Wavelet Packet in Sows' Lactating Vocalization

Yan Li^{1,2} Shen Mingxia¹ Liu Longshen¹ Sun Xin³ Yao Wen⁴ Xu Yani¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. College of Information and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

3. School of Basic Medical Sciences, Harbin Medical University, Harbin 150081, China

4. College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Nurse grunting of lactating sows, as a signal to attract piglet sucking, the frequency of which has a fixed relationship with the motive of sow's milk secretion, will benefit for building a feeding pattern between the sow and its' piglets. As an important trait of good maternal behavior, nurse grunting can be one of the criterion in maternal behavior. However, the noises from environment and piglets screams often disturb the recognition and extraction of time- and frequency-domain characteristics. The nurse grunting of Xiaomeishan sows combining with the noises from environmental interference noise and piglets' screaming calls were used in this study. Firstly, according to the energy of noise is even-distributed in the frequency domain, which corresponds to the maximum entropy characteristics, the layers of wavelet packet was selected, and the entropy of corresponding wavelet packet coefficient was calculated. Secondly, the power ratio was calculated to distinguish the types of noise. Finally, the different denosing methods in sound signal with different kinds of noise were compared. The results showed that the main frequency range of a nurse grunting was ranged from 0 Hz to 800 Hz, while the frequency of piglets' screaming calls was ranged from 1 000 Hz to 8 000 Hz, and the frequency of other interference noise was distributed from 0 Hz to 8 000 Hz. The power ratios of 0 Hz to 1 000 Hz in pure nurse grunting without noise, with environmental noise, and with screaming calls were 1, between 0.85 to 0.97, and between 0

收稿日期: 2015-08-07 修回日期: 2015-09-10

* 公益性行业(农业)科研专项资金资助项目(201003011)、黑龙江省青年科学基金资助项目(QC2014C078)和中华医学会医学教育分会资助项目(2012-LC-22)

作者简介: 闫丽, 博士生, 黑龙江八一农垦大学讲师, 主要从事设施养殖研究, E-mail: bynd_yanli@163.com

通讯作者: 沈明霞, 教授, 博士生导师, 主要从事机器视觉和信息农业研究, E-mail: mingxia@njau.edu.cn

to 0.8, respectively. Meanwhile, with db10 as a wavelet packet basis, the 5 layers and 3 layers wavelet packet transform were used, the main noise ranging from 0 Hz to 8 000 Hz and residual noise ranging from 1 000 Hz to 8 000 Hz can be removed. Therefore, the reconstructed signal can be used to analyze the feature of nurse grunting in Xiaomeishan sows.

Key words: Sow Nurse grunting Environmental noise Wavelet package transform Log energy entropy Denoise

引言

作为猪场最主要的生产力,母猪肩负繁育仔猪的重要职能,其哺育后代的能力好坏将直接影响养殖场的经济效益,对母性能力判定的最好方法就是其母性行为的表达。母猪属于群居动物,母仔间的关爱可通过母猪声音诱唤的母性行为展现。例如,母猪会发出“哼哼呼噜”的唤乳声吸引仔猪前来吮乳,并通过哼叫速率的改变引导仔猪在按摩与吮乳之间变换^[1],判断哺乳的发起者及成功与否^[2-3]。1965年起国外学者就已开展对母猪唤乳声的研究,但多以长白猪^[4]及长白猪×大白猪的二元杂交^[5]等洋种母猪为研究对象。随着集约化水平不断提高,狭小、贫瘠的生活环境造成母猪长期应激及行为规癖,限制了其母性行为的正常表达,也导致产仔率与仔猪死亡率同步上升的负效应。我国地方猪种的母性能力突出、泌乳力强,其主要表现为泌乳前唤乳、俯卧前驱赶及保护和抚慰仔猪等行为^[6],在非人为干涉条件下表现出良好的哺育后代的能力;哺乳期母性行为受 PRLR 基因控制^[7],具有显著的遗传效应,育成率高的母猪,其后代的育成率同样较高^[8],因此,以哺乳期唤乳声为母性行为的评价标准之一,选育母性良好的母猪作为后备母猪,有助于从遗传育种角度挖掘母猪的母性,提高断奶前仔猪的成活率。然而,目前针对我国地方猪种相关的声音研究鲜有报道,且前人的唤乳声音数据均是在消音室或其受外界噪声干扰小的环境中获取的,实际的母猪分娩圈内往往存在嘈杂的环境噪声;同时,哺乳母猪与其仔猪共同生活,仔猪的叫声也极大影响着对母猪哺乳发声的准确定位,因此,去除噪声干扰是声音分析的基础。

常见的去噪方法包括滤波器去噪、小波去噪。前者基于信号与噪声频域分离的前提,但对于频域混叠的信号,常以平滑非平稳信号的突变点、牺牲清晰度为代价。而小波去噪利用小波变换的多分辨率特点,使噪声表现为白化趋势,并保留了原信号的非平稳特性^[9]。在此基础上,改进的小波熵去噪方法可有效地提取强噪声下的弱信号,应用于语音信号^[10]、心电信号识别^[11]及机械故障诊断^[12]等方面。

与小波变换相比,小波包变换是一种更精细的分解方法,使低、高频部分具有同等时频分辨率^[13],因此,本文利用小波包变换与信息熵结合的软阈值方法,以江苏地方猪种小梅山母猪为研究对象,采集母猪哺乳声、仔猪尖叫声及其他环境噪声混杂的声音数据,根据信号和噪声的频域分布差异,选择对数能量熵计算软阈值,并依据不同噪声的频域特征,选择分解层数,构建基于二次对数能量熵的小波包去噪方法,旨在探讨该方法在畜舍复杂噪声环境下的去噪效果。

1 声音采集及特征分析

1.1 数据采集

小梅山猪是中国地方猪种太湖猪的一个品系。作为世界产仔冠军,小梅山母猪具有高繁殖力、强泌乳及护崽能力,哺乳时会发出“哼哼呼噜”声,表现出良好的母性行为。试验在江苏省句容市小梅山原种猪场的母猪分娩舍内进行,选择生产 10 d 后的 5 头小梅山母猪及其新生仔猪为试验对象,将每头母猪及其仔猪饲养在离地 30 cm 的 2.2 m × 1.8 m (长 × 宽)高床限位栏中,采食槽和饮水器分别位于母猪限位区前端及左侧供母猪使用,乳头饮水器位于栏体后部供仔猪自由采水。选用 Takstar 生产的 PC-K600 型麦克风(频率响应 0.02 ~ 20 kHz,灵敏度 (-36 ± 2) dB)放置在限位区外侧距离地板 70 cm 高度处,以防止母猪触碰干扰,选用 MP3Recorder 录音软件,设置采样频率 f_s 为 16 kHz,16 位、单声道采集的音频数据以 .wav 格式存储于现场服务器,配以海康威视 DS-2CE5582P 型摄像头、海康威视 DS-7924H-SH 型 24 路硬盘录像机及 2TB 硬盘实现 2015 年 1 月 18—27 日不间断母仔行为音、视频记录,如图 1 所示。利用聚酯乙烯隔音材料搭建临时的声音采集室,采集较纯净的声音数据,包括母猪哺乳声音及仔猪争乳尖叫声。

1.2 声音信号特征

1.2.1 母猪哺乳声

哺乳呼噜声(Grunt)是母猪哺乳时,随着其嘴部开合而发出的、振幅低中变化的、类似于“呼噜”的声音,是仔猪按摩、吮乳带给母猪的触觉刺激所引起

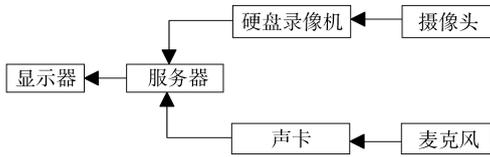


图1 音、视频采集系统

Fig.1 Data collection system in audio and video

的,每个声音持续 0.4 ~ 1.2 s,间隔 1 s 以内^[14],声音的时频域信息如图 2a 所示,其中频率能量集中在 0 ~ 800 Hz 内,与人类打鼾声基本一致^[15-16]。

1.2.2 噪声

噪声是指哺乳时,除母猪嘴部发声以外的其他声音,包括仔猪争乳发出的尖叫声及其环境干扰声。

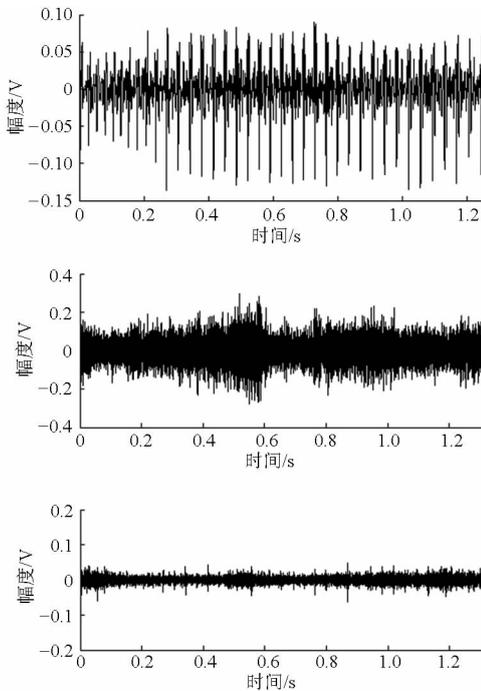


图2 母猪声音与噪声的时、频域特性

Fig.2 Time- and frequency-signal of lactating sow's calls and noises

(a) 单个哺乳声 (b) 仔猪争乳尖叫声 (c) 其他高频干扰声

畜舍内实际采集的声音往往是一种或多种噪声与母猪发声的重叠,此时信号被淹没在强噪声中,然而去除信号中的噪声常常会丢失大量有用信息,因此本文设计一种通用的去噪方法,适用于不同噪声类型,实现对母源哺乳声的损失尽量小。

2 去噪方法

2.1 声音分类

频率功率比(Frequency power ratio)方法通过计算信号在不同频率段的功率比进行信号分类^[17-18],其中频率功率比^[19]的定义为

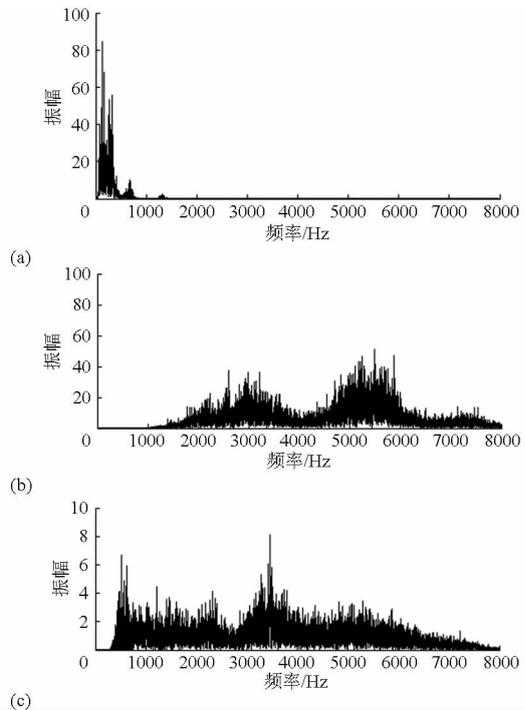
$$R_k = \frac{1}{W} \int_{l_k}^{h_k} P_f df \quad (1)$$

(1) 仔猪争乳尖叫声

仔猪尖叫声(Scream)是仔猪在争抢哺乳位置时,因饥饿或被同伴挤压而发出的、具有明显正向音高变化的、频率在 1 kHz 以上的长时间叫声^[17],时频域特征如图 2b 所示。

(2) 其他干扰噪声

畜舍环境嘈杂,其中以白噪声和粉红噪声最为常见。白噪声(White noise)具有连续的噪声谱,包含各种频率成分的噪声,其频率分量在 0.02 ~ 20 kHz 的可听范围内都是均匀的。粉红噪声(Pink noise)是分形的,在一定的范围内信号具有相同或类似的能量,其频率分量功率主要分布在中低频段,干扰噪声的信息如图 2c 所示。



$$\text{其中} \quad W = \int_0^{f_s/2} P_f df \quad (2)$$

式中 P_f ——频率 f 的功率谱密度
 h_k, l_k ——第 k 段频域的上、下限
 W —— $[0, f_s/2]$ 内的功率总和

2.2 基于信息熵的小波包去噪方法

2.2.1 小波包变换

小波包变换是小波变换的推广,它克服了小波分解对高频段频率分辨率低的缺点。在小波包分解中,利用 Mallet 算法对每一个小波系数进行再分解,设第 j 个尺度的分解系数为 $C_j = \{C_{j,k}\}$, $k = 1, 2, \dots, 2^j$, 则得到第 $j+1$ 尺度的分解系数^[20]为

$$C_{j+1,2k} = \sum_u h(u-2k) C_{j,k} \quad (3)$$

$$C_{j+1,2k+1} = \sum_u g(u-2k)C_{j,k} \quad (4)$$

式(3)、(4)中, h 、 g 分别表示低通和高通滤波器。对分解后的小波系数, 利用阈值去噪法去除由噪声产生的小波系数。

2.2.2 软阈值计算

阈值去噪法通常分软、硬阈值去噪两种方法, 本文选用软阈值去噪法, 不会产生附加振荡, 而且对大于阈值的分解系数进行收缩处理, 从而得到分解系数的软阈值估计为

$$C_k^j = \begin{cases} \text{sign}(C_k^j)(|C_k^j| - \lambda) & (|C_k^j| \geq \lambda) \\ 0 & (|C_k^j| < \lambda) \end{cases} \quad (5)$$

式中, 阈值 λ 计算选择固定形式(Fix form)策略, 则有

$$\lambda = \sigma_n \sqrt{2 \lg(N_k \lg N_k / \lg 2)} \quad (6)$$

式中, σ_n 是噪声的方差, N_k 为信号采样的数目, 结合 1.2.2 节环境噪声及仔猪尖叫声分别在 $[0, -8000]$ 、 $[1000, 8000]$ 区间均匀分布特性, 对噪声的估计可结合信息熵方法。

2.2.3 信息熵

信息熵(Entropy)是信号中含有信息量的度量, 通过熵值大小来反映概率分布的均匀程度。设 $E = \{E_k\}$ 是小波包变换的系数矩阵 $C_{j,k}$ 的能量, 其中 $k = 1, 2, \dots, 2^j$, 根据对数能量熵(Log energy)方法^[21]定义信息熵为

$$E_{\text{logenergy}}(k) = \lg(C_{j,k}^2) \quad (7)$$

则总能量 E_{sum} 为第 j 尺度下信息熵的累加和, 即

$$E_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^{2^j} E(k) \quad (8)$$

将信息熵变换成一个概率分布序列, 设概率分布函数为

$$p_k = \frac{E_k}{E_{\text{sum}}} \quad (9)$$

因此, p_k 越大, 说明其所在区间的信号分布越均匀, 则 p 为最大区间的小波包分解系数记为噪声, 其方差等于

$$\sigma_n = \frac{\text{median}(C_{j,k})}{0.6745} \quad (10)$$

其中, median 函数返回给定数值的中值。

2.2.4 二次信息熵小波包去噪方法的步骤

2.2.4.1 一次信息熵小波包去噪

(1) 选择与哺乳声音信号相似的 db10 作为小波基函数, 根据哺乳声音特征分析, 其频率响应集中在 $0 \sim 800$ Hz 内, 设置分解尺度为 5 的小波包变换, 则整个频率范围以 250 Hz 为单位等间隔分解为 $[0, 250]$ Hz, $(250, 500]$ Hz, $(500, 750]$ Hz, \dots , $(7750,$

$8000]$ Hz, 共 32 个频率区间。

(2) 依据 2.2.2 节和 2.2.3 节定义方法计算每个区间的信息熵, 并将熵值最大区间视为噪声, 来估计阈值, 通过软阈值去噪处理, 得到近似的小波包分解系数, 重构声音信号。

各区间内均匀分布的环境噪声的信息熵值最大, 因此, 一次小波熵去噪可有效去除 $[0, 8000]$ Hz 的环境干扰声, 即低频 $[0, 800]$ Hz 的干扰噪声得到有效去除, 获得干净的母猪哺乳声; 然而, 仔猪争乳尖叫声与其干扰噪声所处的频域不同, 采用一次小波包分解和信息熵阈值化处理无法得到理想的去噪效果, 根据残留噪声频域特征, 选择二次小波包分解层数, 进行二次信息熵去噪处理后得到小波包分解系数, 重构母猪哺乳声音信号。

2.2.4.2 二次信息熵小波包去噪

仔猪争乳尖叫声的频率响应集中在 $(1000, 8000]$ Hz, 对 2.2.4.1 节得到的声音信号进行尺度为 3 的小波包再分解, 重复 2.2.4.1 节步骤(2), 得到二次去噪后的声音信号。

3 结果与分析

采集畜舍内的实际声音信号, 按照所含的噪声类型分类; 选择不同噪声种类, 利用 2.2.4 节定义的去噪方法检验其性能。

3.1 噪声分类

采集舍不同噪声的哺乳信号, 如图 3a 所示, 其中蓝色表示纯净的哺乳声音; 绿色信号的最大振幅与蓝色信号基本一致, 仅以 0 为中心的幅带较宽, 是受到环境噪声的影响; 蓝绿色和红色信号同为环境噪声和仔猪争乳叫声构成的噪声与哺乳声的混合信号, 前者的信噪比(SNR)大于 -10 dB, 后者小于 -10 dB。按照 1.2 节对声音及噪声的特征分析, 将频域划分为 $0 \sim 1000$ Hz、 $1000 \sim 2000$ Hz、 $2000 \sim 3000$ Hz、 $3000 \sim 4000$ Hz、 $4000 \sim 5000$ Hz、 $5000 \sim 6000$ Hz、 $6000 \sim 8000$ Hz 共 7 个频带, 对图 3a 的声音信号计算各个频带的频率功率比, 如图 3b 所示, 其中以 $0 \sim 1000$ Hz 的数据曲线变化最显著: 纯净的声音信号在该频带的频率功率比接近 1, 仅带环境噪声的哺乳声的频率功率比隶属于 $[0.85, 0.97]$, 含有混合噪声的哺乳声的频率功率比在 $[0, 0.8]$ 之间, 其中信噪比大于 -10 dB 声音的频率功率比为 $[0.2, 0.8]$, 而信噪比小于等于 -10 dB 声音的频率功率比则小于 0.1。因此, 计算声音信号 $0 \sim 1000$ Hz 的频率功率比值, 可实现含噪声的声音信号种类区分。

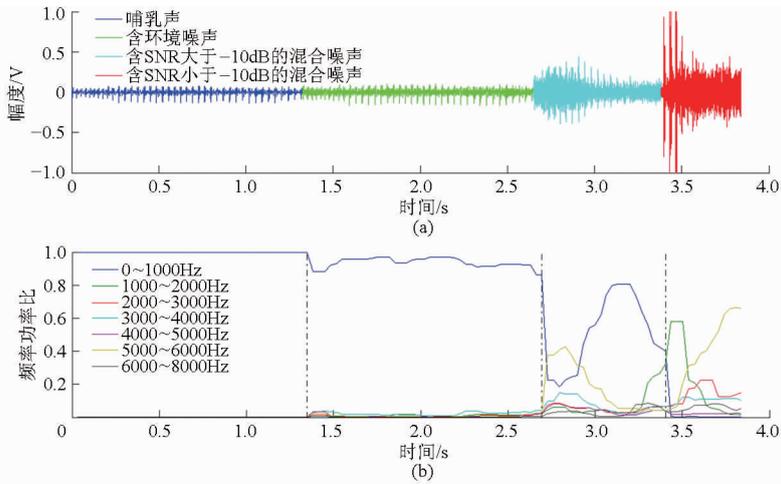


图3 不同噪声类型与母猪声音混合信号及其对应的频率功率比

Fig. 3 Signal and frequency power ratio in mixing vocalization with different types of noise and sows' calls

(a) 声音信号 (b) 频率功率比

3.2 去噪性能评价

3.2.1 不同噪声类型去噪性能评价

在纯净的哺乳声音信号中分别添加表1所列的噪声,依据信噪比 SNR 及均方根误差 RMSE 的公式^[18-19]分别计算 Rigorous SRUE 阈值、Shannon 熵小波包及本文提出的一、二次 Log energy 熵小波包4种方法的去噪效果,详见表1。表1中,去噪前3类声音的信噪比都是负值,且小于-1,说明噪声的能量大于信号的能量,此时信号被淹没在强噪声中,其中仅含环境噪声的声音信号的 SNR 最高,对比基于信息熵(包括 Shannon 熵、Log energy 熵及二次 Log

energy 熵)小波包去噪法与小波阈值去噪法,前者的 SNR 更大、RMSE 较小、去噪效果更理想,其主要原因是小波包变换在整个频域上具有相同的频率分辨率,结合信息熵计算软阈值,可实现对频域内均匀分布的环境噪声进行有效去除。然而对于类型更复杂,SNR 更小的混合噪声而言,使用一次信息熵小波包去噪法的总体性能比较接近,对混合噪声进行了部分去除,而二次 Log energy 熵小波包去噪法则在此基础上,对残留噪声进一步去除。去噪结果显示:对于含不同种噪声的声音信号进行二次 Log energy 熵小波包去噪处理,其 RMSE 均低于 0.05。

表1 不同去噪方法的性能评价

Tab.1 Performance evaluation in different types of denoising

去噪方法	含环境噪声(SNR 为 -1.15 dB)		含混合噪声(SNR 为 -9.52 dB)		含混合噪声(SNR 为 -10.32 dB)	
	SNR	RMSE	SNR	RMSE	SNR	RMSE
Rigorous SRUE 阈值	5.12	0.16	6.27	0.09	3.82	0.46
Shannon 熵小波包	29.80	9.2×10^{-3}	4.86	0.11	8.35	0.17
Log energy 熵小波包	29.80	9.2×10^{-3}	5.90	0.09	8.36	0.18
二次 Log energy 熵小波包	29.80	9.2×10^{-3}	11.72	0.03	24.71	0.04

3.2.2 不同信噪比去噪性能评价

利用 Adobe Audition 软件将母猪哺乳声与含混合噪声以不同音轨混合,构成 -1 dB、-5 dB、-10 dB 及 -15 dB 4 种信噪比的声音信号,分别选择一次、二次 Log energy 熵小波包去噪方法。从表2可知,混合噪声下,无论信噪比高或低,采用二次 Log energy 熵小波包去噪所得的 RMSE 均小于一次去噪的结果,但随着 SNR 的降低,一、二次 Log energy 熵小波包去噪方法的 RMSE 随之增加,去噪的效果相对下降;同时,当 SNR 进一步降低(小于 -15 dB),母猪发声被噪声完全覆盖,会严重破坏仔猪正常的吮乳行为^[22]。

表2 混合噪声下不同信噪比去噪性能评价(RMSE)

Tab.2 RMSE of denoising with different SNRs of mixed noise

SNR/dB	一次 Log energy 熵小波包去噪	二次 Log energy 熵小波包去噪
-1	0.11	0.02
-5	0.12	0.02
-10	0.18	0.04
-15	0.21	0.07

图4a是母猪分娩舍内实际采集的声音信号,除母猪哺乳声音外,还存在仔猪尖叫声和粉红噪声、白噪声等环境噪声,噪声信号遍布了整个频域。利用一次 Log energy 熵小波包去噪的效果如图4b所示,

发现仔猪尖叫声及白噪声得到一定的去除, 尤其与哺乳声频域叠加的 $[0, 800]$ Hz, 但是在大于 1 000 Hz 的高频依然存在部分残留; 进行二次小波包变换的

效果如图 4c 所示, 其中大于 1 300 Hz 高频噪声得到完全去除, 而频域在 $0 \sim 800$ Hz 的哺乳声音信号得到较完整保留。

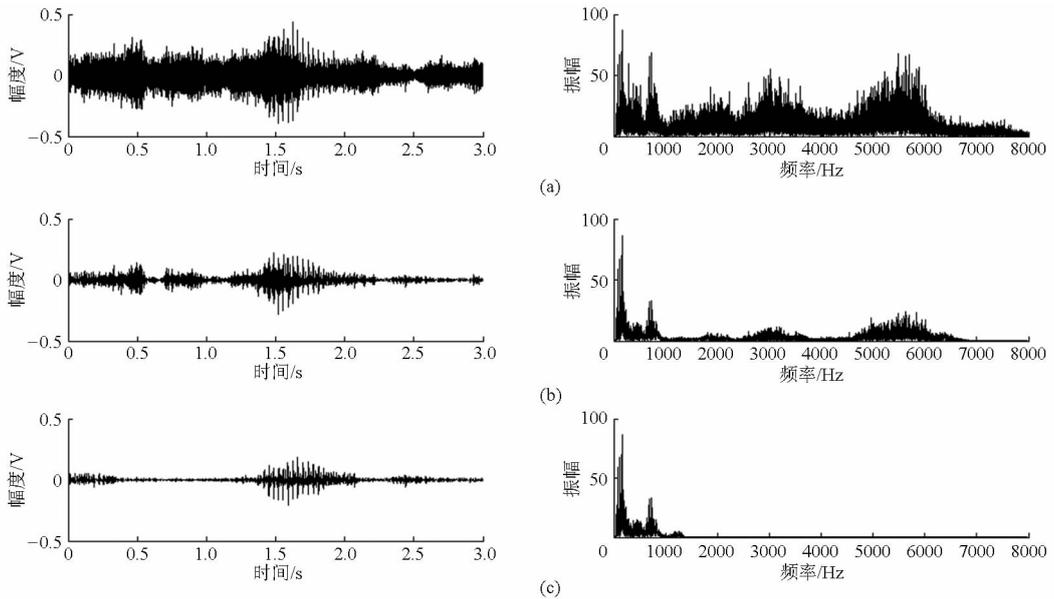


图 4 基于二次 Log energy 熵的小波包去噪效果

Fig. 4 Denoising method of the quadratic wavelet packet with Log energy entropy

(a) 含混合噪声的哺乳声信号 (b) 一次 Log energy 熵小波包去噪的结果 (c) 二次 Log energy 熵小波包去噪的结果

4 结论

(1) 针对噪声均匀分布特性, 利用信息熵计算软阈值及小波包变换在整个频域的高分辨率, 提出小波包与 Log energy 信息熵结合的去噪方法, 去除畜舍环境内的复杂噪声。

(2) 计算 $0 \sim 1\,000$ Hz 频率功率比, 用于区分不

同声音信号, 可进一步明确所含噪声的种类。

(3) 利用二次 Log energy 熵小波包变换, 可有效去除大于 1 300 Hz 高频混合噪声及 $0 \sim 1\,300$ Hz 中的白噪声, 对 $0 \sim 800$ Hz 哺乳声音信号得到较完整的保留, 该方法适用于不同信噪比及不同种噪声, 具有一定普适性。

参 考 文 献

- 1 da Cunha R G T. As good as it sounds; understanding piggish[J]. Pig Progress, 2006, 22(8): 13-15.
- 2 孙亚楠. 猪的母性行为及其仔猪环境应变能力研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
Sun Yanan. Investigation on maternal behavior and offspring resilience to environmental change in pigs[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 3 Farmer C, Robert S. Behavioural responses of sows and piglets from two genotypes to recorded nursing grunts played throughout lactation[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2006, 96(1): 33-42.
- 4 Schon P C, Puppe B, Gromyko T, et al. Common features and individual differences in nursing grunting of domestic pigs (*Sus scrofa*): a multi-parametric analysis[J]. Behaviour, 1999, 136(1): 49-66.
- 5 Blackshaw J K, Jones D N, Thomas F J. Vocal individuality during suckling in the intensively housed domestic pig[J]. Applied Animal Behaviour Science, 1996, 50(1): 33-41.
- 6 吕慎金, 杨燕. 母猪母性行为及其遗传研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2008, 44(19): 55-58.
Lü Shenjin, Yang Yan. The development of maternal behavior and genetic background in sow[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2008, 44(19): 55-58. (in Chinese)
- 7 崔世泉, 李剑虹, 崔卫国, 等. 母猪哺乳初期的母性行为与催乳素受体基因多态性关系的初探[J]. 遗传, 2007, 29(1): 47-51.
Cui Shiquan, Li Jianhong, Cui Weiguo, et al. Preliminary study on the relationship between sow maternal behaviour during early lactation and polymorphism of PRLR gene[J]. Hereditas, 2007, 29(1): 47-51. (in Chinese)
- 8 Baxter E M, Jarvis S, Sherwood L, et al. Genetic and environmental effects on piglet survival and maternal behaviour of the farrowing sow[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2011, 130(1): 28-41.
- 9 曹晏飞, 滕光辉, 余礼根, 等. 含风机噪声的蛋鸡声音信号去噪方法比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 212-218.

- Cao Yanfei, Teng Guanghui, Yu Ligen, et al. Comparison of different de-noising methods in vocalization environment of laying hens including fan noise[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 212–218. (in Chinese)
- 10 陈晓娟, 王文婷, 贾明超, 等. 基于小波熵自适应阈值的语音信号去噪新方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(3): 753–755.
Chen Xiaojuan, Wang Wenting, Jia Mingchao, et al. New denoising method for speech signal based on wavelet entropy and adaptive threshold[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(3): 753–755. (in Chinese)
- 11 侯宏花, 桂志国. 基于小波熵的心电信号去噪处理[J]. 中国生物医学工程学报, 2010, 29(1): 22–28, 34.
Hou Honghua, Gui Zhiguo. Denosing processing of ECG signal based on wavelet entropy[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2010, 29(1): 22–28, 34. (in Chinese)
- 12 何正友, 蔡玉梅, 钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 38–43.
He Zhengyou, Cai Yumei, Qian Qingquan. A study of wavelet entropy theory and its application in electric power system fault detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 38–43. (in Chinese)
- 13 杨国安, 钟秉林, 黄仁, 等. 机械故障信号小波包分解的时域特征提取方法研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20(2): 25–31.
Yang Guoan, Zhong Binglin, Huang Ren, et al. Research on the extraction method of time_domain symptoms based on wavelet packet decompositions of mechanical fault signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(2): 25–31. (in Chinese)
- 14 Marthe Kiley. The vocalizations of ungulates, their causation and function[J]. Z. Tierpsycholog., 1972, 31(2): 171–222.
- 15 Qian Kun, Fang Yuzhuo, Xu Zhiyong, et al. Comparison of two acoustic features for classification of different snore signals[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2013, 36(4): 455–459.
- 16 许辉杰, 黄魏宁, 余力生, 等. OSAHS 患者不同阻塞部位鼾声频域特性分析[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2011, 19(1): 28–32.
Xu Huijie, Huang Weining, Yu Lisheng, et al. Spectral analysis of snoring sound and site of obstruction in obstructive sleep apnea/hypopnea syndrome[J]. Journal of Audiology and Speech Pathology, 2011, 19(1): 28–32. (in Chinese)
- 17 Per Jensen, Bo Algers. An ethogram of piglet vocalizations during suckling[J]. Applied Animal Ethology, 1984, 11(3): 237–248.
- 18 Zhong Yue, Xu Lisheng, Yan Li, et al. Adaptive R-wave detection method in dynamic ECG with heavy EMG artifact[C]//2012 IEEE International Conference on Information and Automation, 2012: 83–87.
- 19 曹晏飞, 余礼根, 滕光辉, 等. 蛋鸡发声与机械噪声特征提取及分类识别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 190–197.
Cao Yanfei, Yu Ligen, Teng Guanghui, et al. Feature extraction and classification of laying hens' vocalization and mechanical noise[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 190–197. (in Chinese)
- 20 Zhang Ming, Li Kaicheng, Hu Yisheng. Classification of power quality disturbances using wavelet packet energy and multiclass support vector machine[J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2012, 31(2): 424–442.
- 21 Serap Aydin, Hamdi M S, Sadik Kara. Log energy entropy-based EEG classification with multilayer neural networks in seizure[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2009, 37(12): 2626–2630.
- 22 张俊辉, 顾宪红, 郝月. 母猪与仔猪的声音联系及互作[J]. 中国畜牧兽医, 2011, 38(8): 113–117.
Zhang Junhui, Gu Xianhong, Hao Yue. Voice contact and interaction of parent-offspring in domestic pigs[J]. Chinese Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2011, 38(8): 113–117. (in Chinese)