

蛋鸡声音信号去噪方法对比分析

杜晓冬 滕光辉

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 声音分析技术已成为研究动物行为、动物福利的一种重要工具,蛋鸡声音可用来评价其健康或福利状况,然而规模化蛋鸡舍中存在较多风机噪声等声源干扰,这对准确识别蛋鸡发声有很大影响。本文以海兰褐蛋鸡为例,预处理获取的声音信号,以减少风机噪声的干扰。利用数字化声音采集平台采集不同类型的蛋鸡发声和风机噪声音频,采用 LabVIEW 软件进行声音信号处理并分析蛋鸡声音和风机噪声的时频特征。同时,对比分析不同去噪方法(IIR 滤波器去噪、小波阈值去噪和改进谱减法去噪)在去除风机噪声方面的效果。结果表明,在信噪比为 $-8 \sim 20$ dB 声音环境下,改进谱减法均方根误差最小(0.03 ~ 0.38),算法运行耗时最短(6 ~ 7 ms),在实际应用中去噪效果较好,可为规模化蛋鸡舍中风机噪声环境下的蛋鸡声音信号处理和分析提供参考。

关键词: 蛋鸡; 声音信号处理; 风机噪声; 改进谱减法; 去噪

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0327-07

Improved De-noising Method of Laying Hens' Vocalization

DU Xiaodong TENG Guanghui

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Sound analysis has become an important tool for studying the behavior, health and welfare of animals in recent years. Monitoring laying hens' sound can be used to evaluate their health or welfare. However, large-scale henhouses exist more noise interference such as a typical fan noise, which has a great effect on accurately recognizing poultry vocalization. Hy-line brown laying hens were taken as an example and poultry sound signal pretreatment was applied for reducing the fan noise interference as far as possible. Different types of laying hens' vocalization and fan noise were recorded by digital sound collection platform. LabVIEW software was used for sound signal processing and analyzing time-frequency characteristics of the fan noise as well as poultry vocalization. Meanwhile, compared with different noise reduction methods, including IIR filter de-noising, wavelet threshold de-noising and improved spectral subtraction methods, and the effect of different de-noising methods were evaluated. Results showed that the sound frequency of laying hens were mainly distributed between 400 Hz and 2 500 Hz, and fan noise frequency distribution was between 0 Hz and 1 000 Hz. In the acoustic environment of SNR within $-8 \sim 20$ dB, the improved spectrum subtraction method had the minimum root mean square error (0.03 ~ 0.38) with the shortest processing time (6 ~ 7 ms), which had good outcome in practical application. This study provided foundation for analyzing laying hens' vocalization in fan noise environment of large-scale henhouses.

Key words: laying hens; sound signal processing; fan noise; improved spectral subtraction algorithm; de-noising

引言

通过监测动物发声可了解其自身的健康状况以

及个体需求,也是一种评价动物行为、福利的辅助方法^[1]。目前,已有学者对家畜动物的声音开展了相关的研究^[2-8]。

收稿日期: 2017-06-10 修回日期: 2017-07-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700204)

作者简介: 杜晓冬(1990—),男,博士生,主要从事设施养殖过程控制与环境研究,E-mail: duxiaodong@cau.edu.cn

通信作者: 滕光辉(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境智能控制和数字农业研究,E-mail: futong@cau.edu.cn

对于家禽动物发声,国内外学者开展了蛋鸡发声分类识别、肉鸡啄食声同采食行为之间关联、鹅不同行为的发声分类识别的相关研究^[9-17]。然而,在家禽动物发声研究方面较多在消音室或实验室理想声音环境中获取^[15,17-19],而实际蛋鸡养殖环境中,往往存在较多由风机、清粪设备、饲喂设备、集蛋设备等运转产生的噪声。目前,在蛋鸡发声研究方面迫切需要一种有效的去噪方法来保证得到较纯净的声音样本数据,降低噪声的干扰,以利于后期准确地声音信号辨识。传统去噪方法是将被噪声干扰的信号通过滤波器,滤掉其中噪声频率部分,但对于瞬间信号、非平稳信号等存在着一定的局限性。尽管已有研究人员能够利用小波阈值去噪、IIR 滤波器、FIR 滤波器等方法来去除动物声音中的背景噪声,但是试验效果较好的小波去噪方法计算过程较复杂,导致算法运行效率低下,无法较好地应用到实时处理算法中^[13,20]。

谱减法具有算法简单、运算量小、便于实现快速处理的特点,在声音去噪和增强方面相对于其它方法有较好的效果,并且被广泛采用^[21-25]。本文主要以产蛋期海兰褐蛋鸡声音和舍内风机噪声为试验对象,比较改进谱减法去噪和其他常用去噪方法在实际噪声环境中的去噪效果,以选取有效的去噪方法,为后期蛋鸡发声特征提取及蛋鸡声音识别提供基础。

1 声音信号去噪原理与方法

1.1 IIR 滤波器

传统的滤波器以特定方式来改变信号的频率特性,衰减声音信号中的噪声频率部分。滤波器的分类方法较多,其中根据单位脉冲响应的时域特性可分为无限脉冲响应(Infinite impulse response, IIR)滤波器和有限脉冲响应(Finite impulse response, FIR)滤波器2类。根据滤波器的功能可分为低通滤波器(Low pass filter, LPF)、高通滤波器(High pass filter, HPF)、带通滤波器(Band pass filter, BPF)、带阻滤波器(Band stop filter, BSF)。本文选择 IIR 带通滤波器,IIR 滤波器是一种递归型数字滤波器,其 U 阶常系数线性差分方程式为^[13,26]

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) - \sum_{i=0}^U a_i y(n-i) \quad (1)$$

相应的系统函数为^[27]

$$H(z) = \frac{\sum_{r=0}^M b_r z^{-r}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (2)$$

式中 $x(n-i)$ ——前 i 个输入参数
 $y(n-i)$ ——前 i 个输出参数
 a_k, a_i, b_r, b_i ——滤波器系数
 n ——采样编号 z ——复变量
 M, U ——输入的个数

1.2 小波滤波器

一维小波去噪方法包括3个步骤^[13,26,28]:①一维信号的小波分解。②小波分解系数的阈值量化处理。③一维小波的重构。

其中,最关键的一步是选取阈值和阈值量化处理方式。阈值包括硬阈值和软阈值2种,本文仅讨论软阈值情况^[13]。小波系数软阈值处理过程为

$$d_i = \begin{cases} \text{sgn}(D_i)(|D_i| - \delta) & (|D_i| > \delta) \\ 0 & (|D_i| \leq \delta) \end{cases} \quad (3)$$

式中 d_i ——小波系数估计值
 D_i ——带噪声信号的小波系数
 δ ——软阈值

本文选取基于史坦(Stein)无偏似然估计(Stein's unbiased risk estimation, SURE)原理的自适应阈值 δ_s 和基于最大最小均方差的阈值 δ_m 2种去噪效果较好的阈值进行比较分析^[13,20]。

设信号 $s(k)$ ($k=1, 2, \dots, U$) 为离散时间序列,序列长度为 U ,令信号 $y(k)$ 为 $|s(k)|$ 的升序序列,则 SURE 阈值 δ_s 定义为

$$\delta_s = \sqrt{\min \delta(k)} \quad (4)$$

$$U - 2k + \sum_{i=1}^k y(i) + (U - k)y^2(k)$$

其中 $\delta(k) = \frac{\quad}{U}$ (5)

Minimax 阈值 δ_m 为

$$\delta_m = \begin{cases} 0 & (U \leq 32) \\ 0.3936 + \frac{0.1829 \lg U}{\lg 2} & (U > 32) \end{cases} \quad (6)$$

1.3 谱减法去噪

早期谱减法是将时域带噪信号傅里叶变换到频域,将其功率谱和噪声功率谱作差得原始信号的功率谱估计,对差值功率谱开平方获取原始信号幅度估计,恢复其相位做傅里叶逆变换,最终得到谱减法去噪后的时域信号^[23-25]。然而,经典谱减法去噪效果并不理想,算法处理后的信号会残留一些“音乐噪声”,对原始信号有干扰^[25]。近年来,相关研究者提出改进谱减法,极大提升算法去噪效果,本文采用的改进谱减法去噪流程如图1所示^[23,25]。

改进谱减法计算公式为^[23,25]

$$P(w) = P_s(w) - \alpha P_n(w) \quad (7)$$

其中
$$P_s(w) = \begin{cases} P(w) & (P(w) > \beta P_n(w)) \\ \beta P_n(w) & (P(w) \leq \beta P_n(w)) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $P_s(w)$ ——带噪信号功率谱幅值
 $P_n(w)$ ——噪声的功率谱幅值
 α ——过减因子, $\alpha \geq 1$
 $P(w)$ ——去噪信号功率谱幅值
 β ——谱下限参数, $0 < \beta \leq 1$

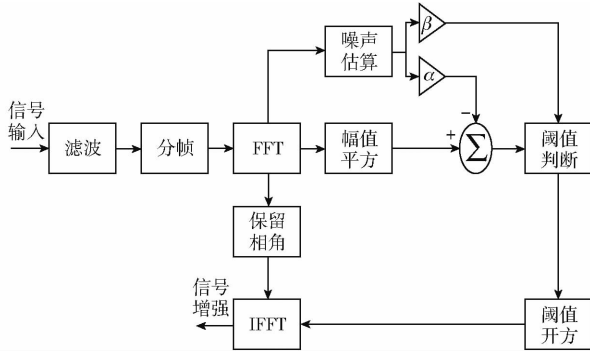


图 1 改进谱减法去噪流程图

Fig. 1 Flow chart of improved spectral subtraction algorithm

1.4 评价方法

蛋鸡发声是非平稳随机信号,但在 10 ~ 30 ms 的分析帧内可被近似看作平稳信号。假设纯净语音信号 $s(n)$ 被加性噪声 $e(n)$ 所污染,产生不同信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) 下的带噪信号 $s(n)$ 为^[20,22,24-25]

$$s(n) = f(n) + re(n) \quad (9)$$

式中 r ——噪声水平

$f(n)$ ——原始纯净信号

信噪比是用来评价声音信号中噪声强度的常规方法,其计算公式为^[20,25]

$$r_{snr} = 10 \lg \frac{\sum_{n=0}^L f^2(n)}{\sum_{n=0}^L (s(n) - f(n))^2} \quad (10)$$

式中 L ——信号长度

声音信号去噪效果的客观评价通常以输入声音信号与输出声音信号之间的误差来判别声音质量。常用方法是计算原始纯净信号 $f(n)$ 与去噪后估计信号 $h(n)$ 之间的相对均方根误差 (Root mean square error, RMSE),相对均方根误差越小,表明去噪后的估计信号与原始纯净信号越接近,去噪效果越好,具体计算公式为^[13,20]

$$R = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{n=0}^L (f(n) - h(n))^2} \quad (11)$$

此外,去噪方法的建模时间和建模后算法处理数据的运行耗时也是对声音信号去噪效果的客观评价^[15]。选用基于 LabVIEW 软件平台上处理相同数

据信息的算法运行耗时来客观评价不同去噪方法的运行效率。

2 试验设计

前期声音采集试验在中国农业大学上庄实验站模拟鸡舍进行,采集声音数据包括纯净的蛋鸡声音、风机噪声以及含风机噪声的蛋鸡声音。纯净蛋鸡声音的获取是在上庄实验站的半消音室内完成,具体环境信息和数据的获取过程参考文献[13,29]。风机噪声和含风机噪声的蛋鸡声音数据在实验站 3 号模拟鸡舍内获取,试验平台包括饮水线、产蛋箱以及料槽等(图 2),舍内配备有一台 T35-11 系列轴流风机,共饲养 24 只同一批次的海兰褐种鸡(5 只公鸡,19 只母鸡)。声音采集试验于 2016 年 11 月—12 月开展,此阶段种鸡生长周龄为 38 ~ 42 周。后期现场应用试验分别在中国农业大学上庄实验站栖架养殖鸡舍和北京延庆德青源生态农场规模化笼养蛋鸡舍开展,两栋鸡舍通风方式均为纵向机械通风,都配有自动化集蛋系统、饲喂系统和清粪系统。栖架养殖鸡舍饲养规模约为 2 000 只蛋种鸡,笼养鸡舍饲养规模约为 9 万只商品鸡。音频信息采集平台选用美国微软公司 Kinect for Windows V1 型嵌入式麦克风阵列(4 通道同步采集、32 位分辨率、16 kS/s 的采样频率),录音软件为美国国家仪器公司 (National Instruments, NI) 的 LabVIEW 软件,利用 NI Sound and Vibration Assistant 2015 编写音频采集程序,单声道采集,音频连续采样,以 50 s 声音数据为一个存储单元,2 个数据单元间隔 10 s,数据以 wav 文件存储于现场工控机中。本文筛选蛋鸡声音的方法参照文献[13]。采集的音频数据利用 LabVIEW 软件提供的声音与振动工具包 (SVM toolkit)、高级信号处理工具包 (ASP toolkit) 进行处理、分析。借助工具包中 Express VI 可实现不同去噪方法,并获取不同去噪方法的 RMSE 以及算法运行耗时。

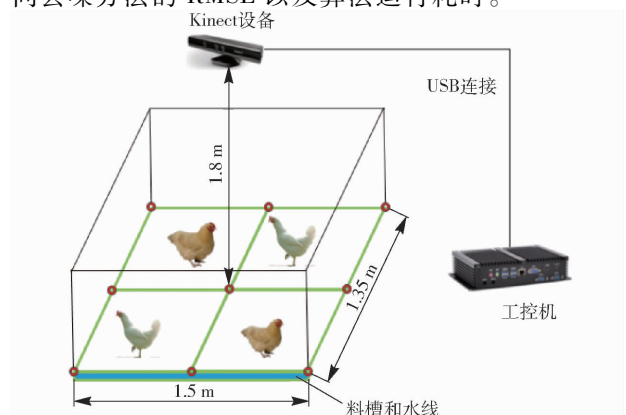


图 2 试验平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test platform

3 试验结果与讨论

鸡舍内常见的动物声音是蛋鸡产蛋叫声、公鸡打鸣声等。本文主要针对蛋鸡产蛋期间的产蛋叫声进行研究分析,公鸡打鸣声的分析方法与此方法类似,在此不再赘述。噪声主要是风机噪声,清粪设备、饲喂设备等运转噪声属于固定时段发生,且持续时间较短,而风机设备全时段运转,其噪声对获取蛋鸡纯净声音有很大干扰。本文风机噪声主要由 T35-11 系列轴流风机正常运行产生,利用经验公式计算可知其基频低于 200 Hz^[30]。

蛋鸡产蛋叫声在时域波形图上表现出有规律的

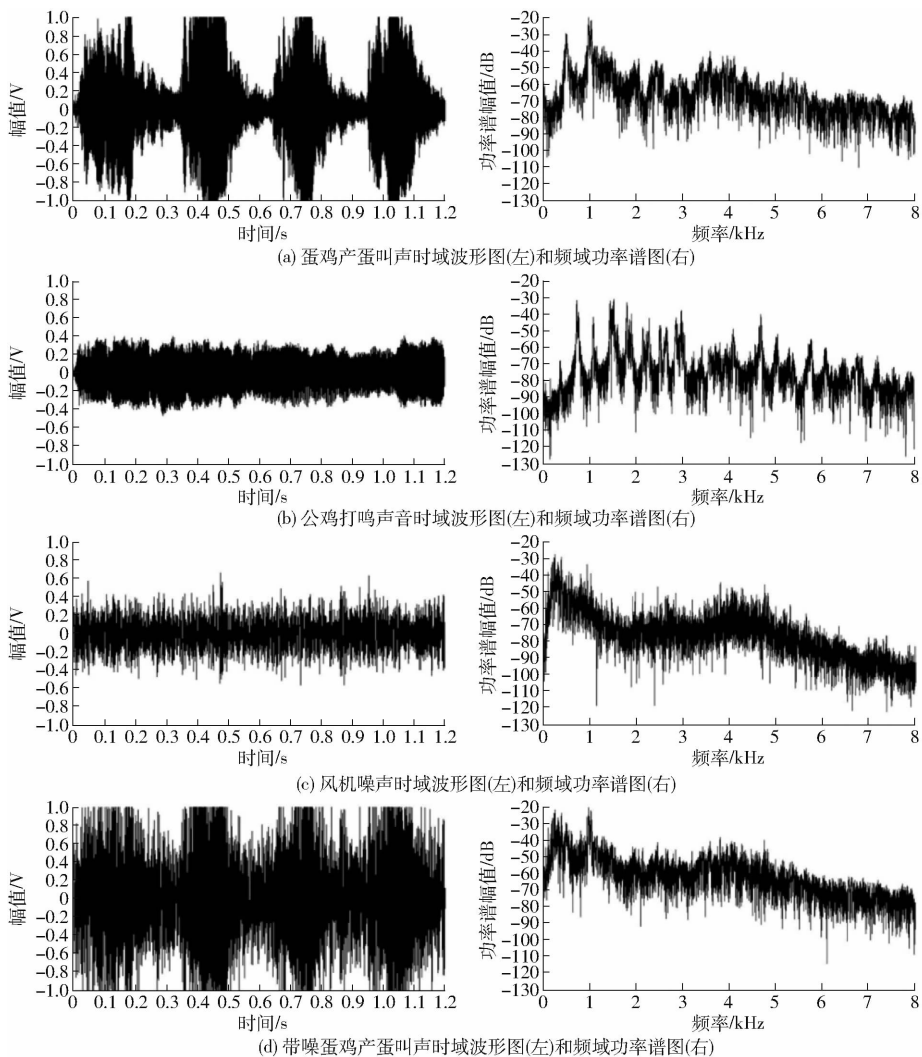


图3 4种不同声音的时域波形图和功率谱频域图

Fig.3 Time domain waveform and power spectrum diagrams of four different sounds

将带噪蛋鸡声音信号分别经过 IIR 滤波器、小波 SURE 阈值去噪、小波 Minimax 阈值去噪、改进谱减法去噪的处理^[13,20]。去噪算法参数设定参照文献^[13],IIR 滤波器选取带通滤波功能,截止频率范围设置为 0.4~2.5 kHz,拓扑结构选取 Butterworth,阶数设 5 阶;小波去噪方法中的小波基选用

周期性振动,在频率图上表现出了 2 个显著的共振峰值,分别位于 0.5 kHz 和 1 kHz 附近(图 3a)。公鸡打鸣声音在时域上没有明显的周期性振动规律,而在频域上表现出多个显著的共振峰值(图 3b)。蛋鸡声音频率主要分布在 0.4~2.5 kHz 之间,同曹晏飞等^[12-13]研究结果一致。风机噪声频率主要分布在 0~1 kHz 之间(图 3c),其频率成分和蛋鸡声音频率成分在频域上有重叠部分,但是两者之间存在明显的差异^[10]。从图 3d 中可以看出,在低信噪比下加性噪声会对蛋鸡声音信号产生一定干扰,有效地过滤噪声,对进一步提取纯净蛋鸡发声特征、准确地识别蛋鸡声音有很大帮助。

Daubechies-03,小波分解层数选择为 7 层;改进谱减法去噪 α 过减因子设为 4, β 谱下限参数设为 0.001^[13]。不同的去噪方法在不同的信噪比下均方根误差如表 1 所示。

结果表明,在测试的所有信噪比条件下,IIR 滤波器和小波 Minimax 阈值的 RMSE 均大于小波 SURE

表 1 不同去噪方法的相对均方根误差

Tab.1 RMSE of different de-noising methods

信噪比/ dB	IIR 滤波器	小波去噪		改进 谱减法
		SURE	Minimax	
-8	0.62	0.46	0.39	0.38
-5	0.44	0.35	0.35	0.32
0	0.35	0.31	0.35	0.20
5	0.32	0.22	0.34	0.13
10	0.30	0.19	0.34	0.08
15	0.30	0.17	0.33	0.05
20	0.29	0.16	0.33	0.03

阈值和改进谱减法的 RMSE,表明小波 SURE 阈值和改进谱减法去噪效果优于前两种方法;在 -8 ~ 0 dB 低信噪比条件下,小波 Minimax 阈值去噪效果要好于 IIR 滤波器去噪效果,而 5 ~ 20 dB 高信噪比下,IIR 滤波器去噪效果较优。随着信噪比的增加,小波 SURE 阈值的 RMSE 逐渐变小,表明其去噪效果逐渐变优,主要是因为小波 SURE 阈值的选取是通过极小化 SURE 准则函数确定,同曹晏飞等^[13]试验结果一致。然而,改进谱减法去噪效果明显优于其他 3 种方法,在各信噪比条件下其 RMSE 均为最小,主要是因为风机噪声属于加性噪声,其噪声功率谱相对稳定,如果已知风机噪声功率谱可有效去除风机噪声,使用该方法的前提是已知鸡舍内现有噪声源,而规模化鸡舍中常见噪声源主要有风机噪声、清粪设备噪声、饲喂设备噪声、集蛋设备噪声,掌握常见噪声源的功率谱特点即可获取较纯净的蛋鸡声音信号。此外,表 2 不同去噪方法的运行耗时体现了 4 种去噪方法的运行耗时。在 -8 ~ 20 dB 不同信噪比条件下,各算法运行耗时相对稳定,IIR 滤波器

和改进谱减法的运行耗时最短,分别为 7 ~ 9 ms 和 6 ~ 7 ms,但是 IIR 滤波器去噪效果较差,而改进谱减法去噪效果最优;小波 SURE 阈值去噪效果较好,但是运行耗时长达 12 ~ 13 ms;小波 Minimax 阈值去噪效果较差,并且运行耗时最长,18 ~ 21 ms。总体来看,不同信噪比条件下,改进谱减法的去噪效果均优于 IIR 滤波器、小波 SURE 阈值、小波 Minimax 阈值的去噪方法^[13],并且其算法的运行耗时最短,可适用于实时地分析、处理蛋鸡声音信号。

表 2 不同去噪方法的运行耗时

Tab.2 Elapsed time of different de-noising methods

信噪比/dB	IIR 滤波器	小波去噪		改进谱 减法
		SURE	Minimax	
-8	8	12	18	7
-5	9	13	21	7
0	7	13	21	6
5	9	13	20	7
10	9	12	19	7
15	7	12	19	6
20	8	12	19	7

为了进一步验证去噪方法在实际规模化蛋鸡舍中的应用效果,选取规模化鸡场采集的 1 h 音频样本数据(60 条记录)进行处理,分析后的声音片段如图 4、5 所示。由试验结果可知,IIR 滤波器去噪后的波形振幅在一定程度上减小,如图 4b 所示在 0.8 s 和 2.9 s 附近振幅约为 0.6 V 的信号分别被滤除和衰减,而小波 Minimax 阈值去噪后的较多原始信号的波形信息被滤除,失真较严重,如图 5d

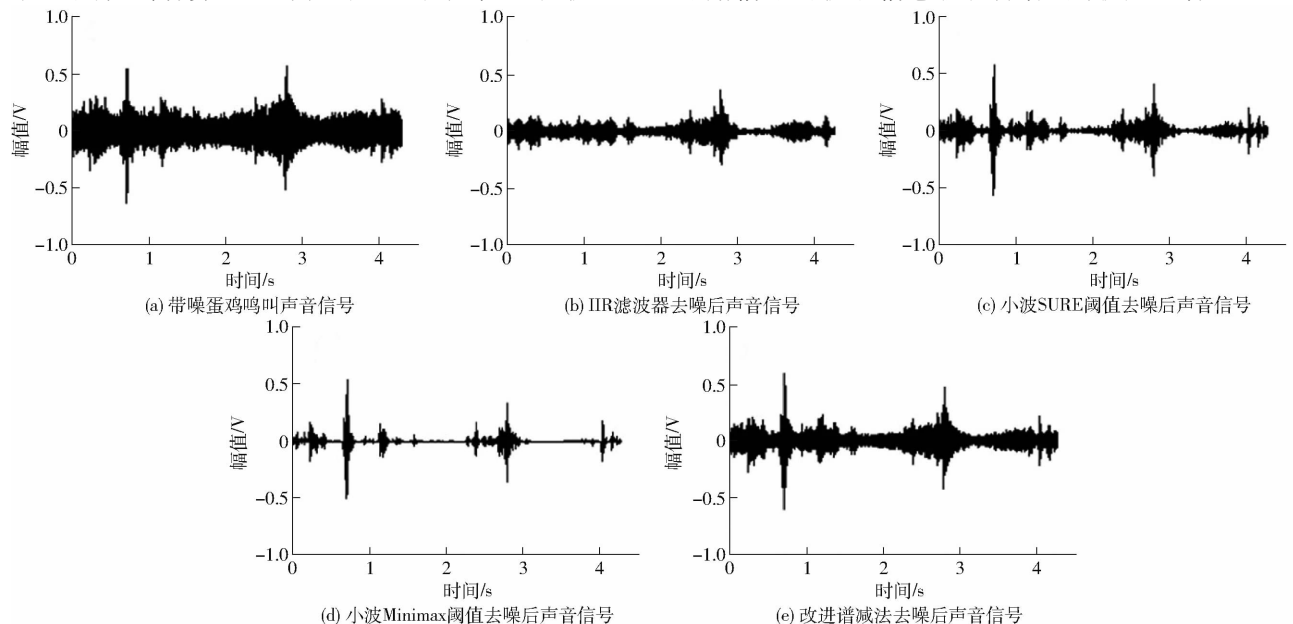


图 4 栖架养殖蛋鸡舍内声音去噪方法应用效果

Fig.4 Practical effects of sound de-noising methods in a perching system henhouse

所示,在0.8 s附近振幅约为0.5 V的信号被衰减为0.25 V。小波 SURE 阈值和改进谱减法去噪处理还原的数据同原始信号相比失真较小,小波 SURE 阈值去噪处理后的波形振幅衰减较小,然而改进谱减法相对于小波 SURE 阈值去噪方法来说,

更多的原始信号信息被保留,还原的信号较为平滑。由此可知,在实际应用中改进谱减法去噪效果要优于 IIR 滤波器、小波 SURE 阈值、小波 Minimax 阈值去噪方法,并且处理速率较快,可被广泛应用于动物声音去噪研究中。

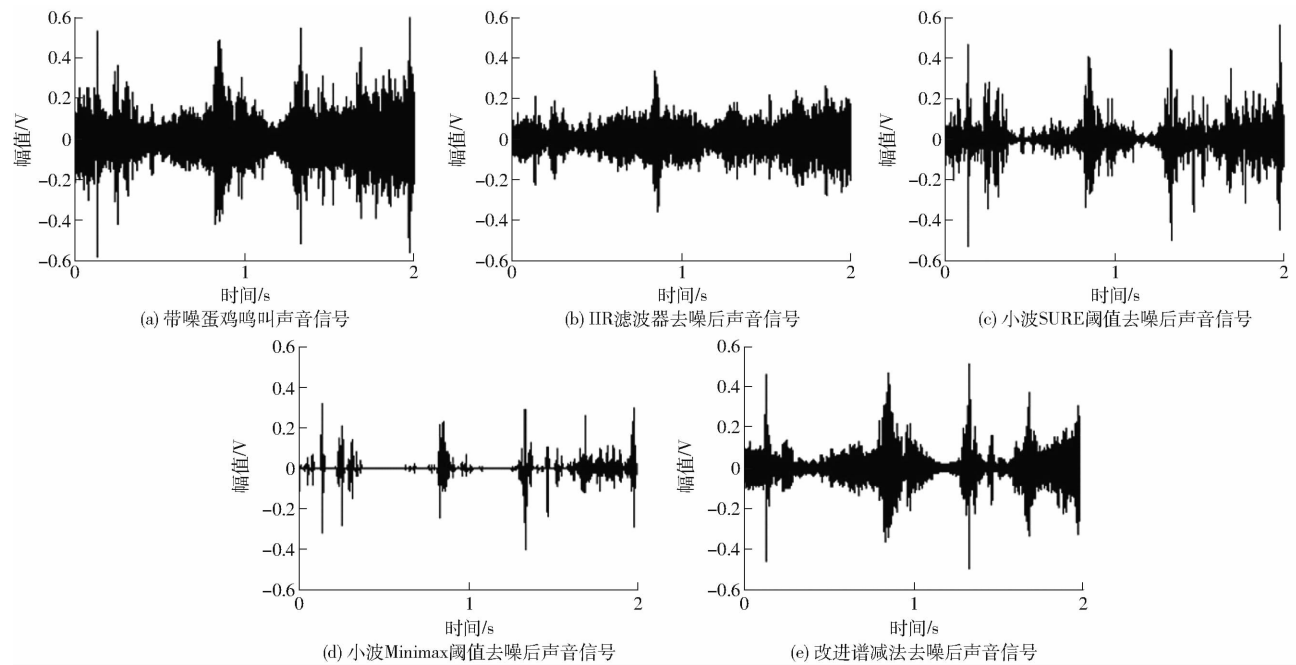


图5 笼养蛋鸡舍内声音去噪方法应用效果

Fig.5 Practical effects of sound de-noising methods in a cage system henhouse

4 结束语

分析了蛋鸡声音和风机噪声在频率范围上的差异,同时比较了 $-8 \sim 20$ dB不同信噪比条件下,IIR滤波器去噪、小波阈值去噪和改进谱减法去噪对蛋鸡声音信号的去噪效果,结果表明,改进谱减法的去噪效果最优,并且其算法运行耗时最短,同时在实际

应用中有较好的去噪效果。采用改进谱减法去噪的关键在于获取准确的噪声信号功率谱,各种声音信号混叠势必会对蛋鸡声音信号和噪声信号的功率谱特征提取提出了挑战,后续研究可从不同信噪比条件下声音信号的谱减法参数动态选取、自动提取声音信号中的噪声源等方面展开,为实现在线实时辨识蛋鸡声音信号提供前期的基础研究。

参 考 文 献

- MANTEUFFEL G, PUPPE B, SCHÖN P C. Vocalization of farm animals as a measure of welfare[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2004, 88(1-2): 163-182.
- 宣传忠,武佩,张丽娜,等. 羊咳嗽声的特征参数提取与识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 342-348. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160348&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.048.
- XUAN Chuazhong, WU Pei, ZHANG Li'na, et al. Feature parameters extraction and recognition method of sheep cough sound[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 342-348. (in Chinese)
- 宣传忠,武佩,马彦华,等. 基于功率谱和共振峰的母羊发声信号识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 219-224.
- XUAN Chuazhong, WU Pei, MA Yanhua, et al. Vocal signal recognition of ewes based on power spectrum and formant analysis method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 219-224. (in Chinese)
- FERRARI S, PICCININI R, SILVA M, et al. Cough sound description in relation to respiratory diseases in dairy calves[J]. Preventive Veterinary Medicine, 2010, 96(3-4): 276-280.
- EXADAKTYLOS V, SILVA M, AERTS J M, et al. Real-time recognition of sick pig cough sounds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 207-214.
- FERRARI S, SILVA M, GUARINO M, et al. Cough sound analysis to identify respiratory infection in pigs[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 64(2): 318-325.
- GUARINO M, JANS P, COSTA A, et al. Field test of algorithm for automatic cough detection in pig houses[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 62(1): 22-28.

- 8 SILVA M, FERRARI S, COSTA A, et al. Cough localization for the detection of respiratory diseases in pig houses[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 64(2): 286–292.
- 9 AYDIN A, BERCKMANS D. Using sound technology to automatically detect the short-term feeding behaviours of broiler chickens [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 121: 25–31.
- 10 曹晏飞, 陈红茜, 滕光辉, 等. 基于功率谱密度的蛋鸡声音检测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 276–280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150240&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.040.
CAO Yanfei, CHEN Hongqian, TENG Guanghui, et al. Detection of laying hens vocalization based on power spectral density [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 276–280. (in Chinese)
- 11 AYDIN A, BAHR C, BERCKMANS D. A real-time monitoring tool to automatically measure the feed intakes of multiple broiler chickens by sound analysis[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 114: 1–6.
- 12 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)
- 13 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)
- 14 AYDIN A, BAHR C, VIAZZI S, et al. A novel method to automatically measure the feed intake of broiler chickens by sound technology[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 101: 17–23.
- 15 余礼根, 滕光辉, 李保明, 等. 栖架养殖模式下蛋鸡发声分类识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 236–242. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130941&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.041.
YU Ligen, TENG Guanghui, LI Baoming, et al. Classification methods of vocalization for laying hens in perch system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 236–242. (in Chinese)
- 16 STEEN K A, THERKILDSEN O R, KARSTOFT H, et al. A vocal-based analytical method for goose behaviour recognition[J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 3773–3788.
- 17 EVANS C S, EVANS L. Chicken food calls are functionally referential[J]. *Animal Behaviour*, 1999, 58(2): 307–319.
- 18 李志忠, 滕光辉. 子带特征参数在家禽应激发声识别中的应用[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(3): 143–146.
LI Zhizhong, TENG Guanghui. Application of subband feature of poultry vocalization for identifying their status [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(3): 143–146. (in Chinese)
- 19 李志忠, 滕光辉. 基于改进 MFCC 的家禽发声特征提取方法[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 202–205.
LI Zhizhong, TENG Guanghui. Feature extraction for poultry vocalization recognition based on improved MFCC [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(11): 202–205. (in Chinese)
- 20 VAN HIRTUM A, BERCKMANS D. Considering the influence of artificial environmental noise to study cough time-frequency features[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266(3): 667–675.
- 21 王熙, 李应. 多频带谱减法用于生态环境声音分类[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(3): 190–193.
WANG Xi, LI Ying. Multi-band spectral subtraction method applied to natural sounds classification [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(3): 190–193. (in Chinese)
- 22 林琴, 张道信, 吴小培. 一种基于改进谱减法的语音去噪新方法[J]. *计算机技术与发展*, 2007, 17(7): 63–66.
LIN Qin, ZHANG Daoxin, WU Xiaopei. A new speech denoising algorithm based on improved spectral subtraction [J]. *Computer Technology and Development*, 2007, 17(7): 63–66. (in Chinese)
- 23 BEROUTI M, SCHWARTZ R, MAKHOUL J. Enhancement of speech corrupted by acoustic noise[J]. 1979 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1979: 208–211.
- 24 BOLL S F. Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1979, 27(2): 113–120.
- 25 UPADHYAY N, KARMAKAR A. Spectral subtractive-type algorithms for enhancement of noisy speech: an integrative review [J]. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 2013, 5(11): 13–22.
- 26 薛年喜. MATLAB 在数字信号处理中的应用[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- 27 PROAKIS G J, MANOLAKIS G D. Digital signal processing: principles, algorithms, and applications[M]. UK: Pearson Education, 2013.
- 28 韩纪庆, 张磊, 郑铁然. 语音信号处理[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- 29 余礼根, 滕光辉, 李保明, 等. 蛋鸡发声音频数据库的构建与应用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 150–156.
YU Ligen, TENG Guanghui, LI Baoming, et al. Development and application of audio database for laying hens [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(24): 150–156. (in Chinese)
- 30 王振东. 离心风机噪声频谱特性分析[J]. *林业劳动安全*, 2002, 15(2): 24–25.
WANG Zhendong. Frequency characteristics analysis of centrifugal blower noises [J]. *Forestry Labour Safety*, 2002, 15(2): 24–25. (in Chinese)