

引用格式: 陈允锋, 刘超. 一种基于滤波器组设计的多频带组合信号增强方法[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 295-300. [CHEN Yunfeng, LIU Chao. A multi-band combined signal enhancement method based on filter bank design[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(2): 295-300.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.02.022

# 一种基于滤波器组设计的多频带 组合信号增强方法

陈允锋<sup>1</sup>, 刘超<sup>2</sup>

(1. 海装上海局驻无锡地区军事代表室, 江苏无锡 214061; 2. 海鹰企业集团有限责任公司, 江苏无锡 214000)

**摘要:** 针对低信噪比情况下未知多频带组合信号增强及其检测问题, 提出了一种基于滤波器组设计的多频带组合信号增强方法。首先, 依据耳蜗时频分解原理设计伽马通滤波器组, 对传感器采集数据进行分频带处理; 然后, 根据信号与背景噪声在强度和稳定性上的差异性, 对各频带数据进行方差归一化处理, 建立判决统计量; 最后, 依据判决统计量对各频带数据进行判决处理, 实现对多频带组合信号增强。数值仿真结果表明, 在仿真条件下, 该方法能够将数据中未知多频带组合信号信噪比提高 6 dB 以上, 在信号频带未知情况下实现了对多频带组合信号的增强, 提升了能量累积检测方法对未知多频带组合信号检测效果。

**关键词:** 多频带组合; 伽马通滤波器组; 未知信号增强; 判决统计量

中图分类号: TB566

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-02-0295-06

## A multi-band combined signal enhancement method based on filter bank design

CHEN Yunfeng<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>

(1. Navy Military Representative Office in Wuxi Area, Wuxi 214061, Jiangsu, China; 2. Haiying Enterprise Group Co Ltd, Wuxi 214000, Jiangsu, China)

**Abstract:** For enhancement and detection of unknown multi-band combined signal under low signal-to-noise ratio, a multi-band combined signal enhancement method based on filter bank design is proposed. Firstly, according to the time-frequency decomposition principle of cochlear, a Gammatone filter bank is designed to divide the data collected by sensor into different frequency bands. Then, according to the differences of intensity and stability between signal and background noise, the normalized variance processing of the data in each frequency band is carried out to establish the decision statistics, by which, the data in different frequency bands are weighted, so that the multi-band combined signal can be enhanced without searching single filter band. The numerical simulation results show that, under the simulation conditions, the signal-to-noise ratio of the unknown multi-band combined signal is increased by more than 6 dB. When the signal frequency band is unknown, this method can enhance the multi-band combined signal and improve the detection effect of the energy accumulation method on unknown multi-band combined signal.

**Key words:** multi-band combination; Gammatone filter bank; unknown signal enhancement; decision statistics

## 0 引言

信号检测在雷达、声呐和语音等领域中占有重要的地位<sup>[1-4]</sup>。因此, 如何在复杂背景中准确检测感兴趣的信号一直是声呐、雷达和语音等领域中信号处理所关心的研究内容之一。目前, 比较经典和常用的信号检测方法有互相关检测法<sup>[5]</sup>、平方律检波器法<sup>[6-7]</sup>、能量累积检测法<sup>[8-10]</sup>等。其中, 能量累积

检测法由于其复杂度低, 被广泛应用。但是该类检测方法需要一定的信噪比, 在信噪比较低的情况下, 对未知信号检测效果较差, 需要采取一定的滤波手段对数据进行增强处理, 以提高信噪比。

为了对处理数据中期望信号实现增强, 提升信号检测效果, 研究者提出了一些信号的增强方法, 并取得了一定的应用效果, 如参数方法、非参数方法以及统计方法<sup>[11-16]</sup>。在参数方法中主要代表性方法为: 梳状滤波器、维纳滤波和卡尔曼滤波方法等<sup>[11-12]</sup>; 非参数方法主要代表性方法为: 自适应抵消和谱减法<sup>[13-14]</sup>; 统计方法主要代表性方法为: 映射方法, 参数估计和隐马尔科夫模型等<sup>[16-17]</sup>。但这方法在实际应用中还存在一些问题, 如参数方法

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-03-13

作者简介: 陈允锋(1975—), 男, 江苏盐城人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为数字信号处理。

通信作者: 刘超, E-mail: chenyunf1976@sina.com

对所使用的模型依赖性强,需要提取模型参数;非参数方法不需要从传感器采集数据中估计模型参数,由于没有利用潜在的统计信息,不适合处理含非平稳背景噪声数据;统计方法充分利用了统计特点,以概率计算方法实现对信号的增强,但需要依赖一定准则实现对最优结构的选择。

如何应对低信噪比情况下、对未知多频带信号进行增强仍然是富有挑战性的难题。对此,本文提出一种基于滤波器组设计的多频带组合信号增强方法,该方法以人耳耳蜗时频分解原理为基础,设计了伽马通滤波器组,对传感器拾取数据进行分析处理,并根据信号与背景噪声在强度和稳定性上的差异,建立判决统计量,对各频带数据实现判决加权处理,在无需搜索单个滤波频带的情况下,提高了合成数据信噪比,实现了对未知多频带组合信号的增强,进而提升了能量累积检测方法对未知多频带组合信号的检测效果。

## 1 滤波器组设计

在人耳听觉系统中,不同频率的信号可在人耳耳蜗基底膜的不同位置产生最大响应<sup>[17-20]</sup>。对此,可依据人耳耳蜗基底膜频响特性,设计相应滤波器组模拟耳蜗基底膜频响特性,对传感器采集数据进行分解处理,增强未知多频带组合信号所在频带在整个处理频带中的比重。

在模拟人耳耳蜗基底膜时频分解中,本文采用一组相互交叠的伽马通滤波器组模拟实现,滤波器组的时域响应可表示为

$$g_i(n)An^{(L-1)}\exp(-2\pi b_i n)\cos(2\pi f_i n+\varphi_i)\mu(n) \quad (1)$$

式中: $n$ 为采样点; $A$ 为滤波器组增益; $L$ 为滤波器组的阶数,本文取 $L=4$ , $b_i$ 为第 $i$ 个滤波器组衰减因子, $1\leq i\leq I$ , $I$ 为滤波器个数; $f_i$ 为第 $i$ 个滤波器中心频率, $\varphi$ 为滤波器的初始相位,本文取 $\varphi=0$ , $\mu(n)$ 为阶跃函数:

$$\mu(n)=\begin{cases} 0, & n<0 \\ 1, & n>0 \end{cases} \quad (2)$$

衰减因子 $b_i$ 决定了滤波器时域响应衰减速度,其与滤波器带宽有关,关系式为

$$b_i=1.019B_{ER}(f_i), i=1,2,\dots,I \quad (3)$$

式中, $B_{ER}(f_i)$ 为第 $i$ 个滤波器等效矩形带宽,其表示形式为

$$B_{ER}(f_i)=24.7\times\left(4.37\times\frac{f_i}{1000}+1\right), i=1,2,\dots,I \quad (4)$$

对于采样率为 $f_s$ 的数据拾取系统,在处理频带数确定的情况下,由式(3)和式(4)可得到第 $i$ 个滤波

器的中心频率 $f_i$ ,然后由式(1)可得到第 $i$ 个滤波器的时域响应。

为了较为直观说明滤波器组的时频分解功能,图1给出了采样率 $f_s=16$  kHz时,在1 Hz~8 kHz处理频率范围划分为 $I=24$ 个滤波器所得时的频响应图。

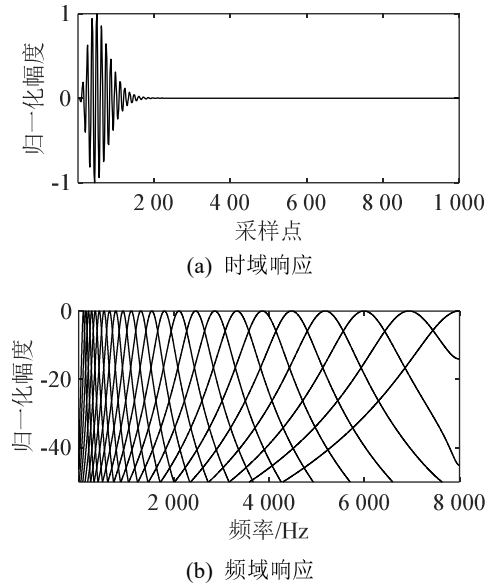


图1 伽马通滤波器组时频响应

Fig.1 Time and frequency response curves of the Gammatone filter bank

由图1可知,滤波器组时域波形是一个振动频率等于其中心频率、振动包络为伽马函数曲线的波形<sup>[17]</sup>;各滤波器中心频率在等效矩形带宽上等间距分布,然后映射到线性尺度,使各个 Gammatone 滤波器的中心频率呈非线性分布,整个滤波器组的频率覆盖范围为0~8 kHz,可对处理数据实现时频分解;另外,每个滤波器都有一个特征频率点,在该频点位置响应最大,达到对响度补偿的最佳效果。同时每个滤波器均有一个拖尾(按指数衰减过程),在响应自身频带时,也可很好地兼顾相邻频带,有助于相邻频带之间的平滑。

## 2 未知多频带组合信号增强方法

### 2.1 判决处理

对传感器采集数据进行分帧处理,可得到 $M$ 帧数据 $x_m(n)$ , $(n=1,2,\dots,N;m=1,2,\dots,M)$ , $N$ 为一帧数据样本长度,采用上述滤波器组对第 $m$ 帧数据 $x_m(n)$ 分别进行分解处理,可得:

$$y_{m,i}(n)=x_m(n)*g_i(n) \quad (5)$$

式中, $g_i(n)$ 为式(1)所示的第 $i$ 个 Gammatone 滤波器,\*为卷积运算符。

对第  $m$  帧、第  $i$  个频带数据进行如下处理，可得到该频带数据对应的判决统计量。

(1) 按式(6)计算每个频带数据  $y_{m,i}(n)$  强度归一化方差，消除不同滤波器等效矩形带宽对判决统计量的影响：

$$D\delta_{m,i} = \frac{1}{b_i} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (y_{m,i}(n) - \bar{y}_{m,i}(n))^2} \quad (6)$$

式中： $\bar{y}_{m,i}(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_{m,i}(n)$ ； $b_i$  为与滤波器带宽有关的衰减因子，其表示形式如式(3)所示。

(2) 按式(7)建立判决统计量：

$$T_i = \begin{cases} 1, & D\delta_{m,i} > \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I D\delta_{m,i} \\ 0, & D\delta_{m,i} < \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I D\delta_{m,i} \end{cases} \quad (7)$$

(3) 根据提到的各频带判决统计量  $T_i$ ，对各频带数据  $y_{m,i}(n)$  进行判决加权处理，并对其进行合成，得到信噪比较高的数据  $z_{m,i}(n)$ ：

$$z_{m,i}(n) = \sum_{i=1}^I T_i \times y_{m,i}(n), \quad n=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

(4) 可采用能量累积检测方法对  $z_{m,i}(n)$  进行处理，实现对未知多频带组合信号的检测。

### 2.2 实现过程

如图 2 所示，传感器采集数据首先通过已设计的滤波器组进行分解，将其分解成与耳蜗非线性频率相对应的子带数据；然后，采用强度和稳定性信息形成判决统计量提取组成因子，构建判决统计量；最后，采用非线性判决加权方法对未知多频带组合信号增强。

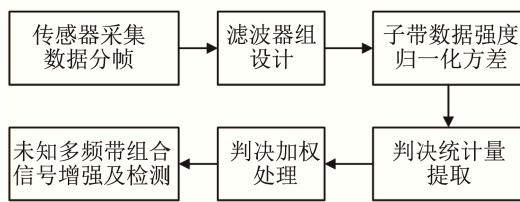


图 2 未知多频带组合信号增强及检测流程图  
Fig.2 Flow chart of unknown multi-band combined signal enhancement and detection

本文方法具体实现过程可分为以下步骤：

输入：传感器拾取数据  $x(n)$ ，频带数  $I$ ，滤波器组增益  $A$  和阶数  $L$ ，分帧数  $M$ 。

输出：增强信号  $z_{m,i}(n)$ ，检测结果。

步骤(1)：对传感器采集数据进行分帧处理，得到本次处理数据  $x_m(n)$ 。

步骤(2)：按照式(1)，设计滤波器组的时域响应函数。

步骤(3)：按式(5)，对本帧处理数据  $x_m(n)$  进行

时频分解，得到各频带分解数据  $y_{m,i}(n)$ 。

步骤(4)：按式(6)计算  $y_{m,i}(n)$  强度归一化方差  $D\delta_{m,i}$ ，消除不同滤波器等效矩形带宽对判决统计量提取的影响。

步骤(5)：依据未知信号与背景噪声在各频带中的能量和稳定性归一化差异性，按式(7)建立判决统计量  $T_i$ 。

步骤(6)：根据提取的各频带判决统计量  $T_i$ ，对各频带数据  $y_{m,i}(n)$  进行判决加权处理，并对其进行合成，得到信噪比较高的数据  $z_{m,i}(n)$ 。

步骤(7)：采用能量累积检测方法对  $z_{m,i}(n)$  进行处理，实现对未知多频带组合信号的检测。

### 3 数值仿真分析

为了较为直观说明上述处理过程能够有效增强未知多频带组合信号，提升现有检测方法对未知信号的检测效果，进行数值仿真分析。系统的采样频率  $f_s$  为 16 kHz，未知信号个数为 2，信号周期为 1 s，1 次处理数据长度为 0.5 s，信号的仿真参数如表 1 所示。

表 1 信号仿真参数  
Table 1 The parameters for simulated signal

信号类型	带宽/kHz	信号长度	起始采样点
脉冲 1	0.5~1	0.2	2 000
脉冲 2	2~3.5	0.1	4 000

仿真中，假定数据处理前对脉冲信号频带、带宽长度均未知，所以在处理数据前只采用了带宽为 100 Hz~8 kHz 的 128 阶 FIR 滤波器对处理数据进行初始滤波处理。

图 3、4 给出了采用本文方法处理前后的数据对比。图 5 为本次处理中所得的判决统计量。处理中基于滤波器组中滤波器个数对频带宽度和运算量影响考虑(滤波器个数越多频带划分越细，但运算量也越大)，所用滤波器组与图 1 所示一致。

为了便于从图中看出信号起止点与仿真参数中点起止是否一致，文中横坐标设置为采样点数。

由图 3 可见，并不能确定是否只有第 4 000 个采样点附近有脉冲；不能确定第 4 000 个采样点附近的脉冲信号带宽；由于在频谱图中不能明显看出信号所在频带位置，不确定是否能够采用单个 FIR 滤波器实现数据中的信号净化，无法通过频域滤波方法实现信号增强。

由图 4 可见，在多频带组合信号未知的情况下，采用本文方法处理可有效滤波处理数据中的噪

声，能够区分第 2 000 个采样点和第 4 000 个采样点附近频带脉冲信号所在位置及其频带范围，提高了数据中多频带组合信号信噪比。同时，由图 1 和图 5 可知，判决统计量为 1 时对应滤波器编号所含

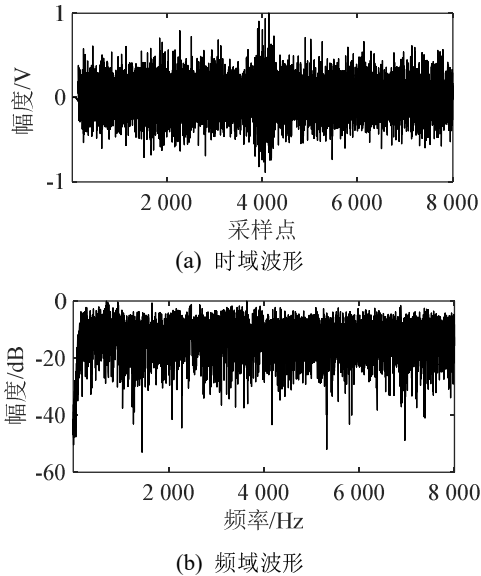


图 3 FIR 滤波后数据的时域波形和频谱  
Fig.3 Time domain waveform and frequency spectrum of the collected data after FIR filtering

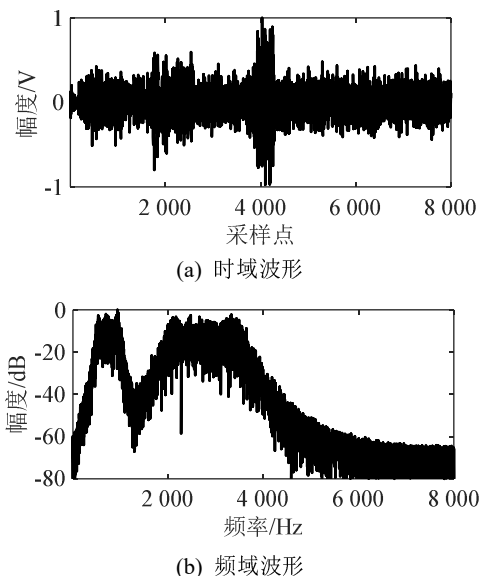


图 4 本文方法处理后数据的时域波形和频谱  
Fig.4 Time domain waveform and frequency spectrum of the collected data after processing by the proposed method

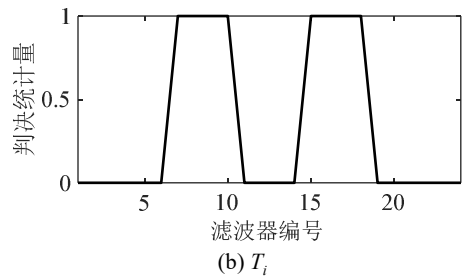
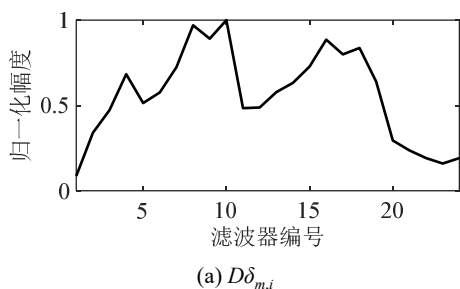


图 5 滤波器组判决统计量  
Fig.5 Decision statistics of filter bank

的频率范围包含信号频率范围 0.5~1 kHz 和 2~3.5 kHz。该仿真结果证实了本文方法能够在低信噪比情况下对未知多频带组合信号实现增强。

为了进一步说明本文方法有助于现有信号检测方法实现对未知信号的检测。图 6 给出了直接采用能量累积检测法检测的未知信号结果，图 7 给出了经本文方法处理后，再采用能量累积检测法对未知多频带组合信号检测结果。

由图 6 和图 7 的结果可知，采用能量累积检测法无法对原始数据(经过 FIR 滤波器滤波处理)进行多频带组合信号检测，无法对第 2 000 个采样点附近未知脉冲信号实现检测；而经本文方法处理后，再采用能量累积检测法对其进行检测，可有效实现对第 2 000 个采样点和第 4 000 个采样点附近的脉冲信号检测。该结果进一步证实了本文方法可提升信号检测方法对未知多频带组合信号的检测效果。

另外，为了进一步说明本文方法可对未知多频带组合信号实现信噪比提升，本文采用信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR)作为评价指标，对采用

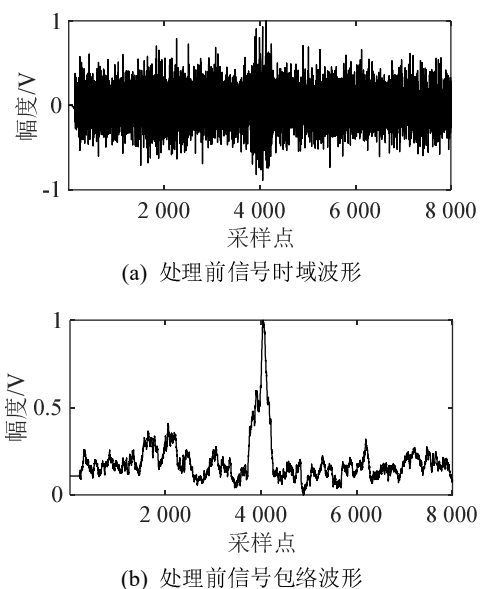


图 6 本文方法处理前未知组合信号检测  
Fig.6 The signal detection result before processing by the proposed method

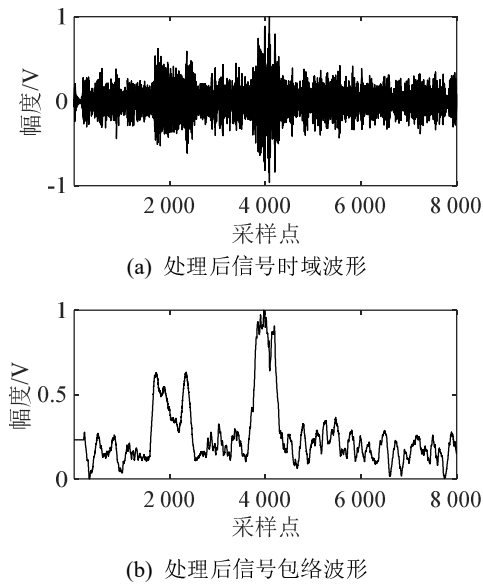


图 7 本文方法处理后未知组合信号检测结果  
Fig.7 The signal detection result after processing by the proposed method

本文方法处理效果进行定量分析，计算公式为

$$R_{SN} = 10 \lg \left( \frac{\sum_{n=1}^N s^2(n)}{\sum_{n=1}^N \hat{s}^2(n) - \sum_{n=1}^N s^2(n)} \right) \quad (9)$$

式中， $s(n)$  为未知信号， $\hat{s}(n)$  为经本文方法处理前后数据。

由式(9)计算可得，对于图 3 中第 2 000 个采样点附近的脉冲信号，信噪比约为 -8.5 dB，经本文方法处理后，其信噪比约为 3.3 dB。该结果表明，在该仿真条件下，经本文方法处理后，信噪比提高了约 12 dB。

图 8 为由 200 次独立统计所得传感器采集数据在不同输入信噪比的情况下，经滤波器组判决统计处理所得的数据信噪比。

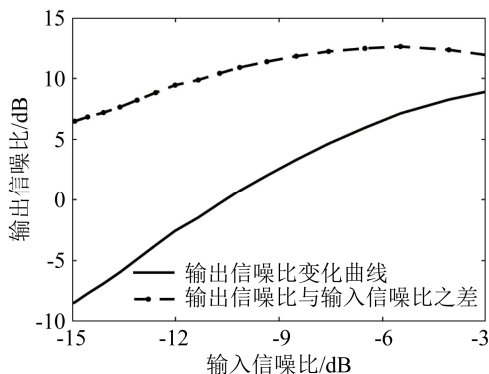


图 8 不同输入信噪时，经本文方法处理后输出信噪比  
Fig.8 The output signal to noise ratios after processing by the proposed method under different input signal to noise ratios

由图 8 可知，经本文方法处理，输出信噪比与输入信噪比之差最小为 6 dB，可有效提升数据中未知多频带组合信号信噪比。该结果进一步验证了本文方法的有效性和可行性。

## 4 结论

针对低信噪比情况下未知多频带组合信号增强及其检测问题，本文首先介绍了伽马通滤波器组设计原理及其具有的时频分解功能；然后利用信号与背景噪声在强度和稳定性上的差异性，建立判决统计量实现对待处理数据进行判决加权处理，在无需搜索单个滤波频带的情况下，提升数据中未知频带信号信噪比。在本文仿真条件下，本文方法能够将未知多频带组合信号信噪比提升 6 dB 以上，在信号频带未知的情况下，实现了对多频带组合信号增强，提升了能量累积检测方法对未知多频带组合信号检测效果。

## 参 考 文 献

- [1] CHAN Y T, LEE B H, INKOL R, et al. Estimation of pulse parameters by autoconvolution and least squares[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(1): 363-374.
- [2] WANG Q, GUO J C, WANG Q Z, et al. Low signal to noise ratio detection for complicated radar pulse[C]//2016 CIE International Conference on Radar (RADAR). Guangzhou, China. IEEE, 2016: 1-4.
- [3] LI J H, ZAKHAROV Y V. Efficient use of space-time clustering for underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(1): 173-183.
- [4] FOSTICK L, LIFSHITZ-BEN-BASAT A, BABKOFF H. The effect of stimulus frequency, spectrum, duration, and location on temporal order judgment thresholds: distribution analysis[J]. Psychological Research, 2019, 83(5): 968-976.
- [5] MIGNERREY P C, TURGUT A, SCHINDALL J A, et al. Evaluation of relative entropy for distributed passive detection of weak acoustic signals[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42(1): 219-230.
- [6] CHEN X X, QIAN Y, XU Y P, et al. Energy estimation of partial discharge pulse signals based on noise parameters[J]. IEEE Access, 2016, 4: 10270-10279.
- [7] FAN X L, WAN Y R, LI T, et al. An adaptive method of pulse detection based on frequency-domain CFAR[C]//2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Shanghai. IEEE, 2016: 1355-1359.
- [8] 倪水平, 常慧刚. 基于能量和小波变换的双门限联合频谱感知[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(4): 117-121.  
NI Shuiping, CHANG Huigang. Double-threshold joint spectrum sensing based on energy and wavelet transform[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(4): 117-121.
- [9] 文凯, 姜赖赢. 一种基于噪声方差估计的自适应多门限能量检测算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 68-72.

- WEN Kai, JIANG Laiying. Algorithm for adaptive multi-threshold energy detection based on noise variance estimation[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 37(3): 68-72.
- [10] 龙颖贤, 张宁, 周峰, 等. 一种基于噪声估计的能量检测自适应门限新算法[J]. 电信科学, 2012, 28(5): 49-53.
- LONG Yingxian, ZHANG Ning, ZHOU Feng, et al. A new adaptive threshold algorithm based on noise estimation for energy detection[J]. Telecommunications Science, 2012, 28(5): 49-53.
- [11] 闵刚, 邹霞, 韩伟, 等. 用于无监督语音降噪的听觉感知鲁棒主成分分析法[J]. 声学学报, 2017, 42(2): 246-256.
- MIN Gang, ZOU Xia, HAN Wei, et al. Unsupervised speech denoising via perceptually motivated robust principal component analysis[J]. Acta Acustica, 2017, 42(2): 246-256.
- [12] GANNOT S. Speech processing utilizing the Kalman filter[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2012, 15(3): 10-14.
- [13] XUE Y, CAO J, TIAN R, et al. Feature extraction of bearing vibration signals using autocorrelation denoising and improved Hilbert-Huang transformation[J]. International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 2012, 6(4): 150-158.
- [14] YANG Y, WEI Y S. Neighboring coefficients preservation for signal denoising[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2012, 31(2): 827-832.
- [15] KANG T G, KWON K, SHIN J W, et al. NMF-based target source separation using deep neural network[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(2): 229-233.
- [16] XU Y, DU J, DAI L R, et al. An experimental study on speech enhancement based on deep neural networks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(1): 65-68.
- [17] 吴姚振, 杨益新, 田丰, 等. 基于 Gammatone 频率离散小波系数的水下目标鲁棒识别[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(6): 906-911.
- WU Yaozhen, YANG Yixin, TIAN Feng, et al. Robust underwater target recognition based on gammatone frequency discrete wavelet coefficients(GFDWC)[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(6): 906-911.
- [18] 茅正冲, 王正创, 王丹. 基于 Gammatone 滤波器组的说话人识别算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(1): 200-203.
- MAO Zhengchong, WANG Zhengchuang, WANG Dan. Speaker recognition algorithm based on Gammatone filter bank[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(1): 200-203.
- [19] 王曙光, 曾向阳, 王征, 等. 水下目标的 Gammatone 子带降噪和希尔伯特-黄变换特征提取[J]. 兵工学报, 2015, 36(9): 1704-1709.
- WANG Shuguang, ZENG Xiangyang, WANG Zheng, et al. Gammatone subband denoising and HHT-based feature extraction for underwater targets[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(9): 1704-1709.
- [20] 李如玮, 潘冬梅, 张爽, 等. 基于 Gammatone 滤波器分解的 HRTF 和 GMM 的双耳声源定位算法[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(11): 1385-1390.
- LI Ruwei, PAN Dongmei, ZHANG Shuang, et al. Binaural sound source localization algorithm based on HRTF and GMM under gammatone filter decomposition[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(11): 1385-1390.