

## 小波域语音降噪多算法对比研究

田玉静<sup>a</sup>, 张民<sup>a</sup>, 左红伟<sup>b</sup>

(青岛理工大学 a. 信息与控制工程学院; b. 土木工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 深入研究了低信噪比输入下小波包语音增强技术, 提出了一种改进的小波包自适应阈值降噪算法。通过与小波软阈值降噪方法的分析与比较, 仿真实验验证了该算法在语音增强领域的有效性。为了获得更好的听觉感受, 进一步探讨了多小波包自适应阈值算法降噪技术及多小波包分析结合维纳滤波语音降噪技术。设计了 4 种算法的语音降噪处理仿真实验, 对比研究了 4 种算法的语音降噪处理效果。通过对多小波包的精细分解和维纳滤波的优化处理, 多小波包维纳滤波在提高输出信号质量、去除噪声干扰方面展现出了卓越的性能。该研究不仅在理论上具有重要意义, 在实际应用中也有着广泛的前景。

**关键词:** 语音降噪; 小波包; 多小波包; 自适应阈值算法; 维纳滤波

中图分类号: TN713.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2026)01-0105-10

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.01.014

## A comparative study on multiple algorithms for speech noise reduction in wavelet domain

TIAN Yujing<sup>a</sup>, ZHANG Min<sup>a</sup>, ZUO Hongwei<sup>b</sup>

(a. School of Information and Control Engineering; b. School of Civil Engineering,  
Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** This paper conducts in-depth research on wavelet packet speech enhancement technology under low signal-to-noise ratio conditions, and proposes an improved wavelet packet noise reduction adaptive threshold algorithm. Through analysis and comparison with the wavelet soft threshold de-noise method, the simulation experiment verifies the effectiveness of the proposed algorithm in the field of speech enhancement. To enhance auditory experience, multi-wavelet packet adaptive threshold noise reduction algorithm and multi-wavelet packet analysis combined with Wiener filtering speech noise reduction technology are further explored. Four algorithms for speech noise reduction are designed and simulated, and the processing effects of the four algorithms are compared. By finely decomposing multi-wavelet packets and optimizing Wiener filtering, multi-wavelet packet Wiener filtering exhibits excellent performance in improving output signal quality and removing noise interference. This study is not only of great theoretical significance, but also has broad prospects in practical applications.

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2022MW214)

作者简介: 田玉静(1975—2025), 女, 山东潍坊人。高级实验师, 主要从事语音信号处理方面的研究。E-mail: 2260006540@qq.com。

**Key words:** speech noise reduction; wavelet packet; multi-wavelet packet; adaptive threshold algorithm; Wiener filtering

随着信息技术的飞速发展,语音通信在人们的日常生活和工作中扮演着越来越重要的角色。然而,在实际的语音传输过程中,往往会受到各种噪声的干扰,严重影响语音的质量和可懂度。因此,语音增强技术应运而生,旨在从含噪语音信号中尽可能地去掉噪声,恢复原始的纯净语音信号。

小波变换作为一种时间-频率分析工具,因具有良好的时频局部化特性和多分辨率分析能力,在语音增强领域得到了广泛的应用。小波包分析是在小波分析的基础上发展起来的一种更加精细的信号分析方法,不仅对低频部分进行细分,而且也对高频部分进行进一步的分解,提供更全面的频率分辨率。语音信号在特定的频率范围内具有特定的模式和结构。小波包能有效拟合人耳基底膜频率分析特性<sup>[1]</sup>,获得较好的噪声消除效果。多小波包作为小波理论的进一步发展,具有许多优于传统小波的特性,如紧支撑性、对称性、正交性等,为语音去噪提供了新的思路和方法。多小波包变换<sup>[2]</sup>将语音信号分解到不同的频率子带,可以更精细地对信号进行多分辨率分析和频率划分,提供更丰富的信号特征信息。在多小波包域中,通过估计语音信号和噪声的功率谱密度,设计维纳滤波器<sup>[3]</sup>,对多小波包变换后的系数进行基于最小均方误差准则的滤波处理,从而达到更优的去噪效果,因而多小波包维纳滤波在信号处理<sup>[4-5]</sup>、语音增强等领域具有广泛深远的应用前景。

## 1 多小波包算法

### 1.1 小波包算法

小波包算法<sup>[6]</sup>主要涉及小波包分解与重构。

小波包分解:设信号为  $x(n)$ ,  $n=0,1,2,\dots,N-1$ ,其中, $N$  为信号长度, $h(k)$  和  $g(k)$  分别为低通和高通滤波器系数, $j_0$  为分解层数,则小波包分解公式为

$$d_{j_0}^{2n}(k) = \sum_l h(l-2k)d_{j_0-1}^n(l) \quad (1)$$

$$d_{j_0}^{2n+1}(k) = \sum_l g(l-2k)d_{j_0-1}^n(l) \quad (2)$$

式中: $d_{j_0}^n$  为第  $j_0$  层的第  $n$  个节点的小波包系数; $k$  为信号位置; $l$  为小波通道数。

小波包重构:

$$d_{j_0-1}^n(k) = \sum_l h(k-2l)d_{j_0}^{2n}(l) + \sum_l g(k-2l)d_{j_0}^{2n+1}(l) \quad (3)$$

小波包对信号的低频和低频部分同时进行细分,形成多个子频带,每个子频带都可以继续进行分解,从而得到更精细的频率划分。

### 1.2 多小波包算法

多小波包具有多个尺度函数和小波函数,可以更精细地对信号进行多分辨率分析,可以针对不同的子带分别进行处理。在没有语音活动的时间段通过对信号的统计分析,估计出各个子带中的噪声水平。设多小波包的尺度函数为  $\varphi(x)$ ,多小波包函数为  $\varphi^i(x)$ , $i=1,2,\dots,r-1$ ,其中, $r$  为多小波的个数。多小波包分析的分解公式如下。

尺度函数:

$$\varphi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - k) \quad (4)$$

多小波包函数:

$$\varphi_{j,k}^i(x) = 2^{j/2} \varphi^i(2^j x - k) \quad (5)$$

式中: $j$  为分解尺度。

信号  $s(x)$  的多小波包系数可通过式(6)~(7)计算。

尺度系数:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) \varphi_{j,k}(x) dx \quad (6)$$

多小波包系数:

$$D_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x) \varphi_{j,k}^i(x) dx \quad (7)$$

多小波包分析的重构公式为

$$\hat{s}(x) = \sum_k C_{J_m,k} \varphi_{J_m,k}(x) + \sum_{i=1}^{r-1} \sum_{j=1}^{J_m} \sum_k D_{j,k}^i \varphi_{j,k}^i(x) \quad (8)$$

式中:  $J_m$  为总分解尺度。

多小波包的多分辨率分析能力可以更好地适应语音信号的时频特性, 在不同的频率范围内对语音和噪声进行更有效的分离。多小波包的对称性有助于减少信号处理中的相位失真, 提高语音质量; 正交性可以保证在变换过程中能量的守恒, 提高信号处理的稳定性。多小波包在语音增强中通过精细信号分解、准确噪声估计和有效阈值<sup>[7]</sup>处理, 能够显著提高语音增强信号的质量。

### 1.3 阈值估计新算法

传统硬阈值估计<sup>[8]</sup>, 即当小波系数  $\omega_{j,k}$  的绝对值大于阈值时, 保持不变; 当系数的绝对值小于等于阈值时, 置为零。软阈值估计, 即当系数的绝对值大于阈值时, 将其减去阈值; 当系数的绝对值小于等于阈值时, 置为零。由于硬阈值噪声消除效果不佳, 文中不做讨论。软阈值函数处理后小波包系数  $\omega'_{j,k}$  见(9)式:

$$\omega'_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - \lambda), & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  为阈值,  $\lambda = \sqrt{2 \ln N}$ ,  $N$  为信号长度;  $\text{sign}(\cdot)$  为符号函数。

研究证明经软阈值处理后, 语音增强清晰度不够<sup>[9]</sup>, 本文提出改进自适应阈值处理算法。设原始信号为  $s(t)$ , 经小波包分解后得到多小波包系数  $d_{j,k}$ 。

阈值处理后的多小波包系数为

$$d'_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(d_{j,k})(|d_{j,k}| - \lambda), & |d_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |d_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{\alpha \hat{\sigma}^2}{\sqrt{\max(\hat{\sigma}^2 - n/2, 0)}} \quad (11)$$

式中:  $\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |d_{j,k}|^2$ ;  $n$  为系数的数量;  $\alpha$  为调整参数,  $0 < \alpha < 1$ 。

软阈值算法与自适应阈值算法阈值函数对比见图 1。

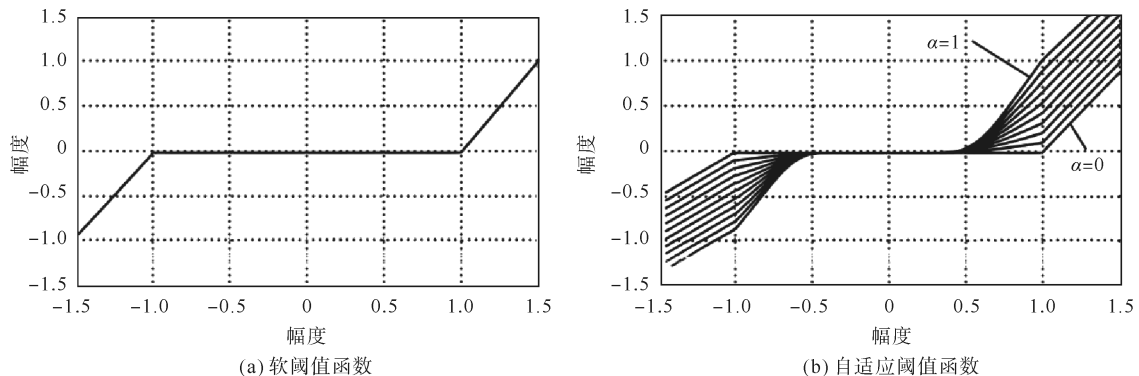


图 1 阈值函数对比

自适应阈值算法结合了小波包分解和自适应阈值处理的优点, 能够根据信号的特点自动调整阈值, 以达到更好的处理效果。

## 2 多小波包维纳滤波算法

维纳滤波器以最小均方误差(LMS)<sup>[10]</sup>为准则, 具有严格的数学理论推导, 在统计意义上是最优的线

性滤波器。它能够在已知信号和噪声统计特性的情况下,有效地从被噪声污染的信号中恢复出原始信号。在多小波域中多小波包维纳滤波可以通过估计语音信号和噪声的功率谱密度,设计维纳滤波器对多小波包变换后的系数进行滤波处理,从而达到去噪的目的。在小波域中,将含噪语音信号的小波系数看作观测值,纯净语音信号的小波系数看作待估计值,通过建立小波系数的统计模型,利用维纳滤波原理对纯净语音信号的小波系数进行估计,从而实现语音增强。维纳滤波器性能稳定,对于平稳随机信号的处理效果较好,只要信号和噪声的统计特性不发生变化,滤波器的性能就相对稳定,可以适应不同类型的信号和噪声,具有一定的通用性。滤波器的设计过程和参数具有明确的物理意义,可以通过分析信号和噪声的统计特性来调整滤波器的参数,以达到更好的滤波效果。

自适应维纳滤波器是在最小均方误差下,从含噪信号中估计出原始信号。与传统维纳滤波器不同,自适应维纳滤波器不需要事先知道信号和噪声的统计特性,而是通过对输入信号的实时分析来调整滤波器参数。最小均方误差算法是一种自适应算法,基于梯度下降法,通过不断调整滤波器系数,使输出信号与期望信号之间的均方误差最小化。在每次迭代中,根据当前的输入信号和误差信号,计算滤波器系数的更新量,并对系数进行更新。

在多小波包维纳滤波中,功率谱密度的计算主要涉及信号和噪声在多小波域的能量估计。

1) 信号功率谱密度估计。设原始信号为  $s(t)$ , 经过多小波包变换后得到多小波包系数  $W_s(j, k, l)$ 。计算信号在不同尺度、位置和通道上的能量:

$$E_s(j, k, l) = |W_s(j, k, l)|^2 \quad (12)$$

信号的功率谱密度估计为

$$S_s(f) \approx \frac{1}{N_0 MK} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L E_s(j, k, l) \quad (13)$$

式中:  $f$  为频率;  $N_0$  为总尺度数;  $M$  为每个尺度上的位置总数;  $J$  为总分解层数;  $K$  为每个位置上的样本总数;  $L$  为多小波包的通道总数。

2) 噪声功率谱密度估计。设噪声信号为  $s'(t)$ , 含噪声信号的多小波包系数为  $W_{s'}(j, k, l)$ 。计算噪声在不同尺度、位置和通道上的能量  $E_{s'}(j, k, l)$ :

$$E_{s'}(j, k, l) = |W_{s'}(j, k, l)|^2 \quad (14)$$

噪声的功率谱密度  $S_{s'}(f)$  估计为

$$S_{s'}(f) \approx \frac{1}{N_0 MK} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L E_{s'}(j, k, l) \quad (15)$$

3) 多小波包维纳滤波算法。维纳滤波器的传递函数为

$$H(f) = S_s(f) / [S_s(f) + S_{s'}(f)] \quad (16)$$

在多小波包域中,对含噪信号的多小波包系数进行滤波,滤波后的系数  $W'(j, k, l)$  为

$$W'(j, k, l) = H(f) W_{s'}(j, k, l) \quad (17)$$

在实际应用中,需要根据具体情况选择合适的多小波包基函数、尺度数等参数,以提高多小波包维纳滤波的性能。对信号和噪声功率谱密度的准确估计是获得良好滤波效果的关键。

### 3 计算过程

#### 3.1 小波包软阈值及自适应阈值语音降噪算法的计算过程

1) 采集含有噪声的语音信号,将其作为输入信号,设为  $x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ , 其中,  $N$  为信号长度。采用一阶高通滤波器  $y(n) = x(n) - ax(n-1)$  进行预加重处理,提升语音信号的高频部分,使频谱更加平坦,利于后续分解,其中,  $a$  为接近 1 的系数,取  $a = 0.97$ 。

2) 小波包分解:选取 sym8 小波基函数,对预加重后的语音信号进行小波包分解,确定总分解层数  $J$ 。使用低通滤波器  $h(n)$  和高通滤波器  $g(n)$  迭代,将信号分解到不同的频带和尺度上,得到小波包系数  $\omega_{j,k}$ , 其中,分解尺度  $j = 2^{j_0}$ ,  $j_0 = 0, 1, \dots, J-1$ ,  $k$  表示在该层的节点索引。

3) 阈值计算:在最高分解层( $J-1$ 层)的高频子带中估计噪声标准差 $\sigma$ ,采用中位数估计法 $\sigma = \frac{\text{median}(|\omega_{J-1,K}|)}{0.6745}$ 计算,其中, $K$ 为遍历最高层的高频子带系数。根据噪声标准差确定软阈值 $T = \sigma\sqrt{2\ln N}$ 。

4) 软阈值处理:对每个小波包系数 $\omega_{j,k}$ 进行软阈值处理。使用公式 $\omega'_{j,k} = \text{sign}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - T)_+$ 计算,其中, $\text{sign}(\omega_{j,k})$ 为符号函数。当 $\omega_{j,k} > 0$ 时, $\text{sign}(\omega_{j,k}) = 1$ ;当 $\omega_{j,k} < 0$ 时, $\text{sign}(\omega_{j,k}) = -1$ ;当 $\omega_{j,k} = 0$ 时, $\text{sign}(\omega_{j,k}) = 0$ ,且 $(|\omega_{j,k}| - T)_+ = \max(|\omega_{j,k}| - T, 0)$ ;  $T$ 为软阈值。

5) 小波包重构:对经过软阈值处理后的小波包系数 $\omega'_{j,k}$ 进行小波包逆变换。按照小波包分解的逆过程,通过使用低通滤波器 $h(n)$ 和高通滤波器 $g(n)$ 的迭代,将处理后的系数重新合成为降噪后的语音信号 $x'(n)$ 。

6) 后处理:对降噪后的语音信号 $x'(n)$ 进行去加重处理,恢复信号的原始频谱特性,抵消预加重的影响。去加重滤波器是预加重滤波器的逆过程,即 $y'(n) = x'(n) + ax'(n-1)$ 。

小波包自适应阈值语音降噪的详细计算过程同上,步骤3)采用自适应阈值计算,自适应阈值见式(10)、式(11)。

### 3.2 多小波包语音降噪算法的计算过程

1) 信号采集与预处理:采集含有噪声的语音信号,设为 $x(n)$ , $n=0,1,\dots,N-1$ ,其中, $N$ 为信号长度。对语音信号进行预加重处理,通过一阶高通滤波器 $y(n) = x(n) - ax(n-1)$ ,提升高频部分,使语音信号的频谱更加平坦。

2) 多小波包分解:选择合适的多小波基函数,如 sym5 多小波等,对预处理后的语音信号进行多小波包分解。总分解层数 $J$ 根据实际情况确定,例如,若要精细分析频域信息,则会选择较多的层数。分解后得到系数矩阵 $\mathbf{W}_{j,k}^m$ ,其中,分解尺度 $j = 2^{j_0}$ , $j_0 = 0,1,\dots,J-1$ ;  $k$ 为节点索引; $m$ 为多小波中的一个小波分支,例如,若为双小波,则 $m = 0,1$ 。分解通过滤波器组迭代运算实现,将信号在不同尺度和频带分解。

3) 多小波包阈值计算与处理:估计噪声标准差 $\sigma$ 。在最高分解层的高频子带中寻找主要由噪声构成的系数来估计。对于双小波情况,计算每个子带中两种小波分支系数绝对值的中位数,再综合得到噪声标准差估计值,从而确定阈值 $T$ 。根据经验和具体噪声类型采用自适应阈值,对多小波包系数进行阈值处理。阈值处理公式为 $\mathbf{W}'_{j,k} = \text{sign}(\mathbf{W}_{j,k})(|\mathbf{W}_{j,k}| - T)_+$ ,其中, $\mathbf{W}_{j,k}^m$ 为系数矩阵, $\text{sign}(\mathbf{W}_{j,k}^m)$ 为符号函数, $(|\mathbf{W}_{j,k}^m| - T)_+ = \max(|\mathbf{W}_{j,k}^m| - T, 0)$ 。

4) 多小波包重构:对经过软阈值处理后的多小波包系数 $\mathbf{W}'_{j,k}$ 进行多小波包逆变换。逆变换算法也是基于滤波器组,按照分解的逆过程,将处理后的系数重新合成为降噪后的语音信号 $x'(n)$ 。

5) 后处理:对降噪后的语音信号进行去加重处理,以恢复信号的原始频谱特性,得到最终的降噪语音信号,去加重滤波器是预加重滤波器的逆过程。

### 3.3 多小波包维纳滤波语音降噪算法的计算过程

1) 信号采集与预处理:采集含有噪声的语音信号,设为 $x(n)$ , $n=0,1,\dots,N-1$ ,其中, $N$ 为信号长度。对语音信号进行预加重处理,使用一阶高通滤波器 $y(n) = x(n) - ax(n-1)$ 提升高频部分,使语音信号频谱更平坦。

2) 多小波包分解:选择合适的多小波基函数,如 sym5 多小波,对预处理后的语音信号进行多小波包分解,总分解层数设为 $J$ 。分解后得到系数矩阵 $\mathbf{W}_{j,k}^m$ ,其中,分解尺度 $j = 2^{j_0}$ , $j_0 = 0,1,\dots,J-1$ ;  $k$ 为节点索引; $m$ 为多小波中的一个小波分支,例如,若为双小波,则 $m = 0,1$ 。分解是通过滤波器组迭代运算实现的,将信号在不同尺度和频带上分解。

3) 多小波包阈值计算与处理:估计噪声标准差 $\sigma$ 。在最高分解层的高频子带寻找主要由噪声构成的系数来估计。对于双小波情况,计算每个子带中两种小波分支系数绝对值的中位数,综合中位数来估计噪声标准差,从而确定阈值 $T$ 。可以用通用阈值或自适应阈值计算,对多小波包系数进行阈值处理。公式为 $\mathbf{W}'_{j,k} = \text{sign}(\mathbf{W}_{j,k})(|\mathbf{W}_{j,k}| - T)_+$ ,其中, $\mathbf{W}_{j,k}^m$ 为系数矩阵, $\text{sign}(\mathbf{W}_{j,k}^m)$ 是符号函数, $(|\mathbf{W}_{j,k}^m| - T)_+ =$

$\max(|\mathbf{W}_{j,k}^m| - T, 0)$ 。

4) 维纳滤波部分:假设含噪语音信号  $x(n)$  由纯净语音信号  $s(n)$  和噪声信号  $s'(n)$  组成,即  $x(n) = s(n) + s'(n)$ 。在多小波包域,估计信号和噪声的功率谱密度<sup>[10]</sup>。根据维纳霍夫方程,计算维纳滤波器的

系数  $\mathbf{H}_{j,k}^m$ 。 $\mathbf{H}_{j,k}^m = \frac{\mathbf{P}_{ss}^{j,k,m}}{\mathbf{P}_{ss}^{j,k,m} + \mathbf{P}_{vv}^{j,k,m}}$ , 其中,  $\mathbf{P}_{ss}^{j,k,m}$  为纯净语音信号在多小波包系数下的功率谱密度估计;  
 $\mathbf{P}_{vv}^{j,k,m}$  为噪声信号在多小波包系数下的功率谱密度估计。用维纳滤波器的系数对多小波包系数进行滤波,得到滤波后的系数  $\mathbf{W}_{j,k}^m = \mathbf{H}_{j,k}^m \mathbf{W}_{j,k}^m$ 。

5) 多小波包重构:对滤波后的多小波包系数  $\mathbf{W}_{j,k}^m$  进行多小波包逆变换。通过滤波器组的逆过程,将系数重新合成为降噪后的语音信号  $x'(n)$ 。

6) 后处理:对降噪后的语音信号进行去加重处理,恢复信号的原始频谱特性,得到最终的降噪语音信号。去加重滤波器是预加重滤波器的逆过程。

## 4 仿真实验

为了验证小波语音增强方法的有效性,选取了语音信号和不同类型的噪声叠加,分别采用小波包软阈值降噪算法、小波包自适应阈值降噪算法、多小波包自适应阈值降噪算法和多小波包维纳滤波算法进行语音增强仿真实验。

噪声数据取自数据库 The Signal Processing Information Base(SPIB),选取了白噪声(White Noise)、餐厅嘈杂噪声(Speech Babble)、粉红噪声(Pink Noise)、工厂车间噪声(Factory Floor Noise)、高频信道噪声(HF Channel Noise)。实验语音来自学术语音数据库(LibriSpeech),男声普通话朗读“孔雀东南飞”语料。

纯净语音信号为  $s(t)$ ,噪声为  $s'(t)$ ,加性叠加,混合信号为  $x(t) = s(t) + s'(t)$ 。仿真实验语音时长 1.6 s。信号的采样率为 8 kHz,帧长  $L = 256(32 \text{ ms})$ 。输入端信噪比为  $-10, -5, 0, 10 \text{ dB}$ 。对  $s(t)$  进行如下仿真实验,仿真实验流程见图 2。

实验过程如下:

1) 采用小波包软阈值降噪。设定小波包自适应阈值函数(wavelet\_packet\_adaptive\_thresholding),接收原始数据、小波函数名称和最大分解层数作为参数。采集含噪语音信号  $x(n)$ ;对  $x(n)$  进行预加重处理,分帧加窗。选取 sym8 作为小波包分解基函数。对预加重后的信号进行小波包分解,得到小波包系数  $\omega_{j,k}$ 。在最高分解层高频子带估计噪声标准差  $\sigma$ ,根据  $\sigma$  计算软阈值  $T$ 。对小波包系数  $\omega_{j,k}$  进行软阈值处理,得到处理后系数  $\omega'_{j,k}$ 。对处理后系数  $\omega'_{j,k}$  进行小波包重构,得到降噪后语音信号  $x'(n)$ ;对  $x'(n)$  进行去加重处理,输出降噪后语音信号。

2) 采用小波包自适应阈值降噪。步骤同上,选取 sym8 作为小波包分解基函数,进行小波包分解,计算每个节点的自适应阈值,并进行自适应阈值处理。最后通过重构得到去噪后的语音信号  $x'(n)$ ;对  $x'(n)$  进行去加重处理,输出降噪后语音信号。

3) 采用多小波包自适应阈值降噪。采集含噪语音信号  $x(n)$ ,对含噪语音信号进行预加重处理分帧加窗。选择合适的多小波基,利用所选多小波基对预处理后的信号进行多小波包分解,得到多小波包系数  $\mathbf{W}_{j,k}^m$ 。在高频子带估计噪声标准差  $\sigma$ 。根据  $\sigma$  确定自适应阈值  $T$ ,对多小波包系数  $\mathbf{W}_{j,k}^m$  按阈值处理规则进行处理,将小于阈值的系数置为 0,保留大于阈值的系数。通过重构得到去噪后的数据,即处理后的系数  $\mathbf{W}'_{j,k}^m$ 。对处理后的系数  $\mathbf{W}'_{j,k}^m$  进行多小波包重构,对重构后的信号进行去加重处理,输出降噪后的语音信号。

4) 基于维纳滤波的多小波包分析去噪法。采集含噪语音信号  $x(n)$ ,对  $x(n)$  进行预加重处理并分帧加窗,得到预处理后信号。选择多小波基,对处理后信号进行多小波包分解,得到系数  $\mathbf{W}_{j,k}^m$ ,估计噪声标准差  $\sigma$ ,根据  $\sigma$  确定自适应阈值  $T$ 。对系数  $\mathbf{W}_{j,k}^m$  进行阈值处理,得到处理后系数  $\mathbf{W}'_{j,k}^m$ ,估计信号、噪声功率谱密度  $\mathbf{P}_{ss}$ 、 $\mathbf{P}_{vv}$ ,计算维纳滤波器系数  $\mathbf{H}_{j,k}^m$ ,用  $\mathbf{H}_{j,k}^m$  对  $\mathbf{W}'_{j,k}^m$  进行滤波,得到滤波后的系数  $\mathbf{W}''_{j,k}^m$ ,对  $\mathbf{W}''_{j,k}^m$  进行多小波包重构,得到降噪后语音信号  $x'(n)$ 。对  $x'(n)$  进行去加重处理,得到最终降噪语音信号。

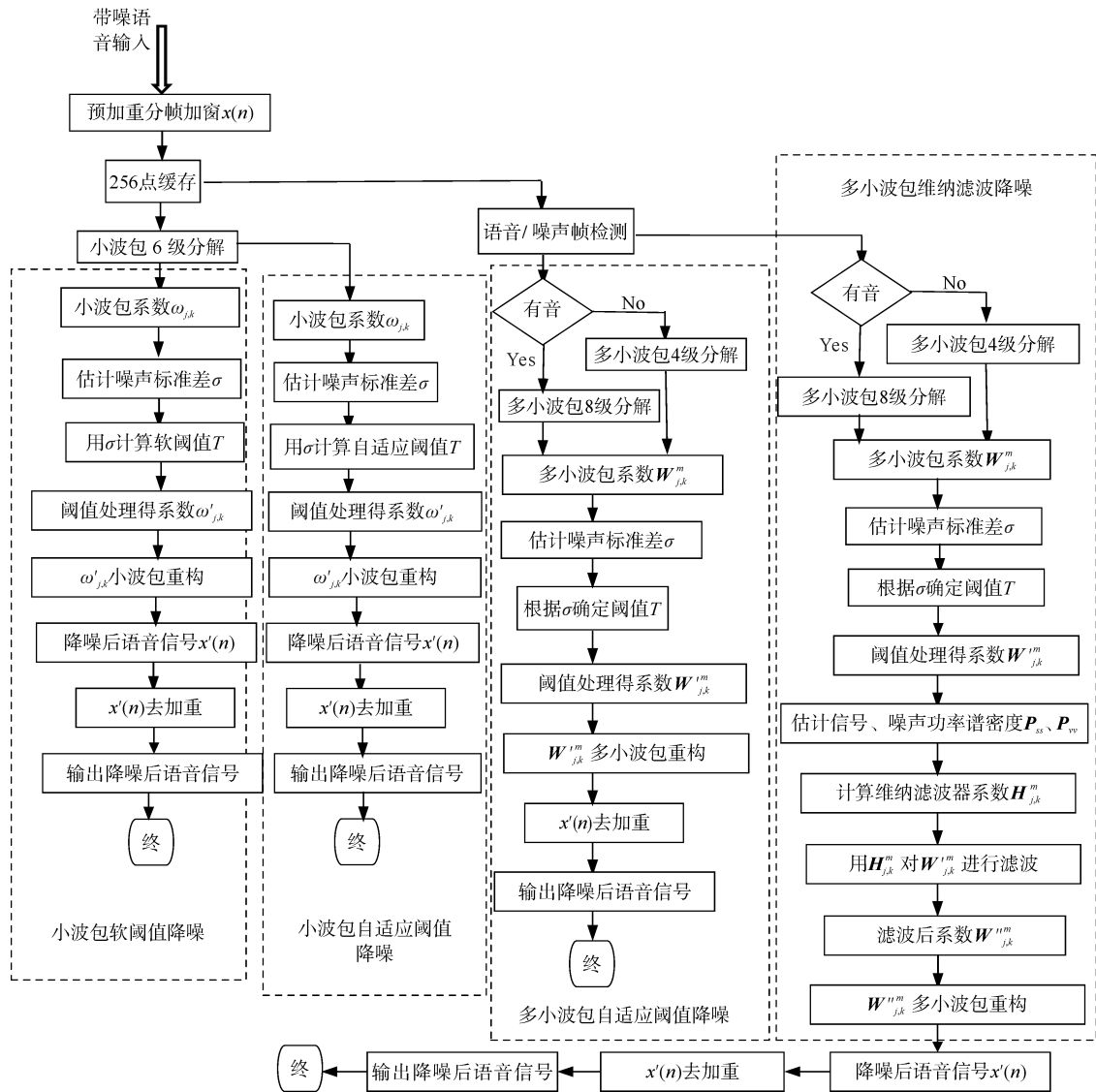


图 2 仿真实验语音降噪算法流程

图 3 为输入端信噪比均为  $-10$  dB 条件下, 4 种算法噪声消除语音波形对比。由波形图可以直观看出小波包软阈值降噪算法语音细节信息损失严重, 信号失真度较大。小波包自适应阈值降噪算法可以自适应地选择合适的阈值, 提高处理效果。多小波包自适应阈值算法可以提取信号的重要特征, 如边缘、峰值等, 通过对信号进行多分辨率分析和阈值处理, 突出信号的局部特征, 提高特征提取的准确性和可靠性。多小波包维纳滤波算法可以根据噪声的特性和语音信号的特点进行优化, 有效地去除噪声, 同时保留信号的重要特征, 进一步提高降噪的效果。

下面对仿真实验结果进行量化客观性能评价。

1) 依据分段信噪比  $SNR_{seg}^{[11]}$  评估。计算语音信号每一帧信噪比, 取其平均值。  $SNR_{seg}$  越大, 消噪效果越好。

$$SNR_{seg} = \frac{10}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \lg \frac{\sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n)]^2}{\sum_{n=0}^{N-1} [f(m, n) - \hat{f}(m, n)]^2} \quad (18)$$

式中:  $f(m, n)$  为纯净语音信号幅值;  $\hat{f}(m, n)$  为消噪声后的信号幅值;  $m$  为帧号,  $M$  为总帧数,  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $n$  为节点号,  $N$  为帧长,  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ 。

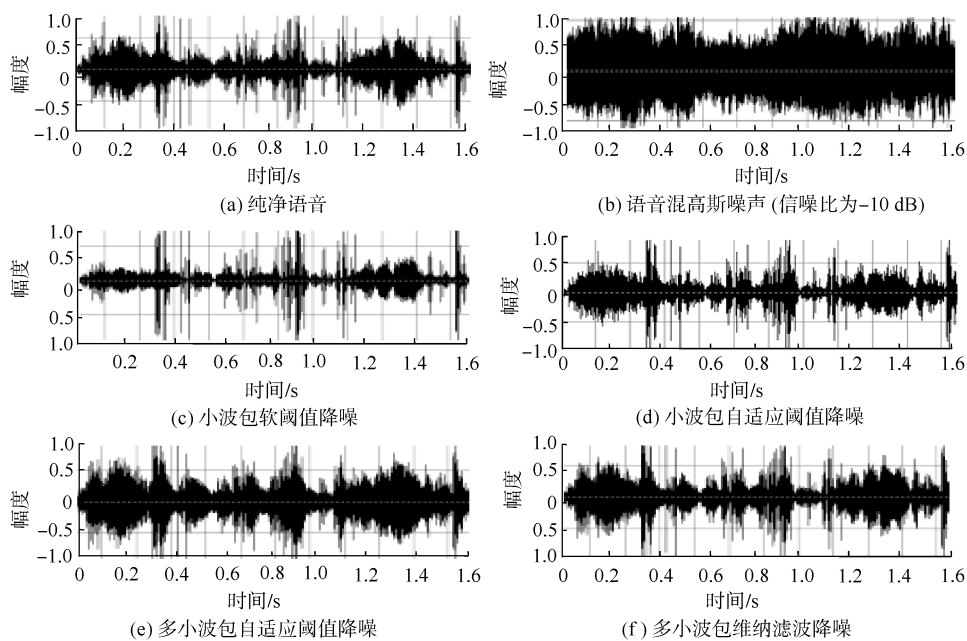


图 3 混白噪声输入信噪比为-10 dB 4 种算法噪声消除语音波形对比

算法增强后的语音  $SNR_{seg}$  结果比较见表 1。

表 1 不同算法分段信噪比

dB

噪声	输入信噪比	分段信噪比			
		小波包软 阈值算法	小波包自适应 阈值算法	多小波包自适应 阈值算法	多小波包维纳 滤波算法
白噪声 (White Noise)	-10	-6.23	-4.46	-2.13	1.14
	-5	-2.87	0.57	1.32	2.94
	0	1.92	2.72	5.05	7.16
	10	12.91	14.32	16.12	18.06
餐厅嘈杂噪声 (Speech Babble)	-10	-7.33	-5.71	-3.07	0.52
	-5	-3.12	0.34	1.87	3.04
	0	1.21	2.83	5.12	7.61
粉红噪声 (Pink Noise)	-10	-7.64	-6.03	-3.47	0.33
	-5	-3.02	0.76	1.43	3.02
	0	1.51	2.94	5.32	7.82
	10	12.76	13.97	15.52	17.71
工厂车间噪声 (Factory Floor Noise)	-10	-6.95	-5.23	-3.54	0.61
	-5	-2.94	0.65	1.61	3.11
	0	1.43	2.86	6.11	7.94
	10	12.36	13.77	15.91	17.82
高频信道噪声 (HF Channel Noise)	-10	-6.23	-5.71	-3.67	0.67
	-5	-2.97	0.72	1.77	3.31
	0	1.47	2.96	5.97	8.03
	10	12.12	13.69	15.76	17.75

2) 依据语音质量感知评估(PESQ)<sup>[12-13]</sup>。采用 ITU-T P. 862 标准评价降噪输出语音的听觉效果,该分值为 4.5~−0.5,得分越高则输出语音音质越好。算法增强后的语音质量感知评估得分结果比较见表 2。

表 2 不同算法语音质量感知评估比较

噪声	输入 信噪比/dB	语音质量感知评估得分/分			
		小波包软 阈值算法	小波包自适应 阈值算法	多小波包自适应 阈值算法	多小波包维纳 滤波算法
白噪声 (White Noise)	−10	0.31	1.32	2.11	2.86
	−5	0.42	1.47	2.63	3.02
	0	0.61	1.72	2.85	3.21
	10	1.32	2.34	3.25	3.69
餐厅嘈杂噪声 (Speech Babble)	−10	0.29	1.21	2.23	2.89
	−5	0.51	1.62	2.78	3.14
	0	0.66	1.83	2.74	3.24
	10	1.29	2.51	3.32	3.71
粉红噪声 (Pink Noise)	−10	0.26	1.19	2.18	2.97
	−5	0.49	1.28	2.65	3.21
	0	0.61	1.79	2.71	3.12
	10	1.34	2.56	3.21	3.74
工厂车间噪声 (Factory Floor Noise)	−10	0.38	1.21	2.54	3.12
	−5	0.47	1.31	2.42	3.23
	0	0.59	1.75	2.61	3.16
	10	1.41	2.47	3.17	3.81
高频信道噪声 (HF Channel Noise)	−10	0.31	1.44	2.64	3.26
	−5	0.39	1.34	2.51	3.16
	0	0.56	1.78	2.81	3.26
	10	1.49	2.52	3.19	3.79

表 1、表 2 实验数据表明:①小波包软阈值算法降噪存在数据过处理,降噪输出的信号分段信噪比值较低,语音质量感知评估得分低。②改进的小波包自适应阈值算法避免了阈值可能导致的过处理或欠处理问题。对于不同类型噪声低信噪比输入,算法可以自适应地选择合适的阈值,提高处理效果。降噪输出信号的分段信噪比和语音质量感知评估得分有所提高。③多小波包自适应阈值算法降噪输出,通过对信号进行多分辨率分析和阈值处理,突出信号的局部特征,提高特征提取的准确性和可靠性,可以有效地去除噪声,同时保留信号的重要特征,有效提高了输出信号的分段信噪比和语音质量感知评估分值。④多小波包维纳滤波算法,表现出更好的性能。基于维纳滤波的去噪法在复杂噪声环境下表现出了较强的鲁棒性,输出信号的分段信噪比和语音质量感知评估分值进一步提高,可获得较好的听觉感受。

## 5 结束语

本文深入研究了小波包语音增强技术,提出了一种改进的小波包自适应阈值算法,通过与小波包软阈值处理方法的分析与比较,仿真实验验证了该算法在语音增强领域的有效性。为了获得更好的听觉感受,进一步探讨了多小波包自适应阈值算法降噪、多小波包分析结合维纳滤波语音降噪技术。通过对多小波包的精细分解和维纳滤波的优化处理,其在提高信号质量、去除噪声干扰方面展现出了卓越的性能。该研究不仅在理论研究上具有重要意义,而且在实际应用中也有着广泛的前景,在机械、图像、音频处理、通信

系统、生物医学信号分析等领域,都能发挥重要作用,可为相关领域的技术进步和创新提供有力的支持。

### 参考文献(References):

- [1] 田玉静,左红伟,董玉民,等. Bark子带小波包自适应阈值语音去噪方法[J]. 计算机应用,2010,30(11):3111-3114.  
TIAN Yujing,ZUO Hongwei,DONG Yumin, et al. Adaptive threshold speech denoising based on Bark scale wavelet package[J]. Journal of Computer Applications,2010,30(11):3111-3114.
- [2] 刘瑞龙,陈清江. 拟半双正交分数阶多小波框架的刻画[J]. 纯粹数学与应用数学,2024,40(2):327-337.  
LIU Ruilong,CHEN Qingjiang. Description of quasi-semi-biorthogonal fractional multiwavelet frame[J]. Pure and Applied Mathematics,2024,40(2):327-337.
- [3] 刘庆强,郑长敏,何红凯,等. 一种基于小波阈值的变步长 LMS 语音降噪算法[J]. 吉林大学学报(理学版),2022,60(4):943-949.  
LIU Qingqiang,ZHENG Changmin,HE Hongkai, et al. A variable step size LMS speech denoising algorithm based on wavelet threshold[J]. Journal of Jilin University(Science Edition),2022,60(4):943-949.
- [4] 陶唐飞,周文洁,况佳臣,等. 融合多小波分解的深度卷积神经网络轴承故障诊断方法[J]. 西安交通大学学报,2024,58(5):31-41.  
TAO Tangfei,ZHOU Wenjie,KUANG Jiachen, et al. Bearing fault diagnosis method of deep convolutional neural network based on multiwavelet decomposition[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2024,58(5):31-41.
- [5] 刘洁,陈劼,韩冰,等. 基于改进小波阈值去噪的深度水下目标分类[J]. 声学技术,2023,42(1):25-33.  
LIU Jie,CHEN Jie,HAN Bing, et al. Deep learning underwater target classification based on improved wavelet threshold denoising[J]. Technical Acoustics,2023,42(1):25-33.
- [6] 张歧,杨阳,魏千盛,等. 基于广义 Beta 小波稀疏域混合约束优化的地震去噪方法研究[J]. 地球物理学报,2023,66(8):3391-3402.  
ZHANG Qi,YANG Yang,WEI Qiansheng, et al. Seismic random noise reduction via generalized Beta wavelet and mixed norm[J]. Chinese Journal of Geophysics,2023,66(8):3391-3402.
- [7] 张晓莉,黄嘉谔. 参数优化 VMD 结合改进小波包阈值的去噪方法[J]. 噪声与振动控制,2024,44(5):128-132.  
ZHANG Xiaoli,HUANG Jiayu. Denoising method of parameter optimization VMD combined with improved wavelet packet threshold[J]. Noise and Vibration Control,2024,44(5):128-132.
- [8] 周东红,周建科,夏同星,等. 三参数小波变换自适应阈值压制地震数据高频随机噪声[J]. 地球物理学报,2023,66(5):2095-2111.  
ZHOU Donghong,ZHOU Jianke,XIA Tongxing, et al. Suppression of high frequency random noise in seismic data by self-adaptive threshold of three parameter wavelet transform[J]. Chinese Journal of Geophysics,2023,66(5):2095-2111.
- [9] 张羽博. 基于自适应分解级数小波去噪的 TDOA 估计算法研究[J]. 无线电工程,2023,53(1):114-121.  
ZHANG Yubo. Research on TDOA estimation algorithm based on adaptive decomposition level wavelet denoising[J]. Radio Engineering,2023,53(1):114-121.
- [10] MANOLAKIS D G,INGLE V K,KOGON S M. Statistical and adaptive signal processing[M]. New York:McGraw Hill,2000.
- [11] 李真,吴文锦,张勤,等. 基于最大后验相位估计的多带谱减语音增强算法[J]. 电子与信息学报,2017,39(9):2282-2286.  
LI Zhen,WU Wenjin,ZHANG Qin, et al. Multi-band spectral subtraction of speech enhancement based on maximum posteriori phase estimation[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2017,39(9):2282-2286.
- [12] 王文益,伊雪. 基于改进语音存在概率的自适应噪声跟踪算法[J]. 信号处理,2020,36(1):32-41.  
WANG Wenyi,YI Xue. An adaptive noise tracking algorithm using improved speech presence probability[J]. Journal of Signal Processing,2020,36(1):32-41.
- [13] 高盛祥,莫尚斌,余正涛,等. 基于多维度注意力机制和复数 Conformer 的单通道语音增强方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2024,36(2):393-403.  
GAO Shengxiang,MO Shangbin,YU Zhengtao, et al. Monaural speech enhancement method based on multi-dimensional attention mechanism and complex Conformer[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition),2024,36(2):393-403.

(责任编辑 赵金环;英文校审 周立俭)