

基于改进的小波阈值函数语音增强方法^①

董 胡¹, 谭乔来²

¹(长沙师范学院 电子与信息工程系, 长沙 410100)

²(湘南学院 电子信息与电气工程学院, 郴州, 423000)

摘要: 传统的小波阈值去噪方法会造成有用语音信号的损失, 信噪比改善情况不理想. 通过分析小波去噪原理, 提出了一种改进的小波阈值函数语音增强方法. 该方法结合小波软、硬阈值函数去噪的优点, 克服了硬阈值函数的不连续及软阈值函数存在偏差的缺点. 该方法首先对清浊音信号进行判断, 接着采用变化的阈值对清浊音信号的小波系数进行不同的阈值处理. 仿真实验结果表明, 改进的方法非常适用于强噪声背景下的语音增强, 无论在保留含噪语音信号中的清音信息, 还是在信噪比改善指标上均优于传统的软阈值法、谱减法 and 听觉感知小波变换法.

关键词: 小波变换; 语音增强; 阈值函数; 信噪比; 谱减法

Improved Speech Enhancement Method Based on Wavelet Threshold Function

DONG Hu¹, TAN Qiao-Lai²

¹(Electronic and Information Department, Changsha Normal University, Changsha 410100, China)

²(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Xiangnan University, Chenzhou 423000, China)

Abstract: The traditional wavelet threshold denoising method can cause the loss of useful speech signal, and the improvement of signal to noise ratio is not ideal. By analyzing the principle of wavelet denoising, an improved speech enhancement method of wavelet threshold function is proposed. The method combining the advantages of wavelet denoising for soft and hard threshold function, which can overcome disadvantage of discontinuous and bias for hard threshold function and soft threshold function respectively. The method makes judgment for voiced signal in the first place, then uses changed threshold to the wavelet coefficients of voiced and unvoiced signal in processing. The simulation experimental results show that the improved method is very suitable for speech enhancement under strong noise background, no matter keeping the voiced speech information in the noise speech signal or improving signal-to-noise ratio index, the improved method is better than traditional soft threshold method, the spectrum subtraction and the wavelet transform of auditory sensation.

Key words: wavelet transform; speech enhancement; threshold function; signal to noise ratio; spectral subtraction

信号去噪是信号处理领域的经典问题之一. 传统的去噪方法主要包括线性滤波方法和非线性滤波方法, 如中值滤波和 Wiener 滤波等. 传统的去噪方法的不足在于使信号变换后的熵增高、无法刻画信号的非平稳特性且无法得到信号的相关性. 为克服上述缺点, 人们开始使用小波变换解决信号去噪问题. 语音信号具有一定的特殊性, 直接采用阈值处理效果不太理想. 由

于语音中的清音包含了相对多的高频成分, 直接使用阈值处理时可能会被当作噪声而处理掉^[1-4]. 随机噪声的小波变换高频系数幅值随着尺度的增加而快速衰减, 且高频系数的方差也快速地衰减. 传统的软、硬阈值法去噪都存在一定的不足, 即软阈值法去噪会使得去噪后的信号丢失某些特征, 而硬阈值法去噪在信号平滑度存在欠缺, 因此本文在此基础上进行了改进, 提出

① 基金项目: 湖南省教育厅项目(12C0952); 湖南省大学生研究性学习和创新性实验项目(601); 郴州市科技计划项目(CZ2014039); 湘南学院科研项目(2014XJ63)

收稿时间: 2014-12-08; 收到修改稿时间: 2015-01-26

了一种改进的小波阈值函数语音增强方法. 该方法结合软、硬阈值函数的优点, 采用变化阈值对清浊音信号作不同的阈值处理, 既遏制了噪声, 又减少了对有效语音段信息的损伤, 增强了信噪比.

1 小波去噪原理

小波对突变点位置的确定非常有效. Mallat 等建立了小波变换与刻画信号奇异性的 Lipschitz 指数之间的密切关系, 利用小波变换来分析信号的奇异性及奇异位置和奇异程度是比较有效的^[5]. 用 Lipschitz 指数描述函数的局部奇异性. 设 n 是一个非负整数, $n < a \leq n+1$, 如果存在两个常数 A 和 $h < h_0$, 均有:

$$|f(x_0 + h) - P_n(h)| \leq A|h|^a \quad (1)$$

则称 $f(x)$ 在点 x_0 为 Lipschitz a .

如果上式对所有 $x_0 \in (a, b)$ 均成立, 且 $x_0 + h \in (a, b)$, 则称 $f(x)$ 在 (a, b) 上是一致 Lipschitz a . 显然, $f(x)$ 在点 x_0 的 Lipschitz a 刻画了函数在该点的正则性, 则称 $f(x)$ 在 x_0 点是 Lipschitz a . 在小波变换中, 局部奇异性定义为:

设 $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$, 如果 $f(x)$ 对 $\forall x \in \delta x_0$, 小波 $\psi(x)$ 满足且连续可微, 并且有 n 阶消失矩 (n 为正整数), 则有:

$$|W f(s, x)| \leq Ks^n \quad (2)$$

其中 K 为常数. 由此可知, 如果函数 $f(x)$ 的 Lipschitz 指数 $n > 0$, 则该函数的小波变换系数将随着尺度的增大而增大; 反之, 若 $n < 0$, 则函数 $f(x)$ 的小波变换系数将随着尺度的减小而减小. 比较不同尺度间小波变换模极大值的变化情况^[6,7], 去除系数随尺度增加而减小的点(对应噪声极值点), 再由保留的模极大值点用交替投影法进行重建, 即可以达到去噪目的.

2 改进的小波阈值函数语音增强方法

设带噪语音信号为:

$$f(k) = s(k) + n(k), k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

式中, $f(k)$ 为含噪语音信号, $s(k)$ 为纯净语音信号, $n(k)$ 为加性高斯白噪声, N 为语音信号长度. 首先对带噪语音信号 $f(k)$ 进行离散序列小波变换, 得到含噪声的小波系数; 然后用设定的阈值作为门限对小波系数进行处理, 仅让超过门限的小波系数用于小波变换

来重构语音信号^[8].

Donoho 提出的硬阈值函数表达式为:

$$T_h(r, t) = \begin{cases} r, & |r| \geq t \\ 0, & |r| < t \end{cases} \quad (4)$$

软阈值函数表达式为:

$$T_h(r, t) = \begin{cases} \text{sgn}(r)(|r| - t), & |r| \geq t \\ 0, & |r| < t \end{cases} \quad (5)$$

上式中, t 表示阈值函数的阈值. 一般而言, 硬阈值函数 $T_h(r, t)$ 在 t 处不连续且利用它重构的信号会产生振荡; 而硬阈值函数 $T_h(r, t)$ 虽连续性好, 但 $T_h(r, t)$ 与 r 存在偏差且会影响重构信号与真实信号之间的近似程度. 文献[9]给出了硬、软阈值函数折衷法, 构造的阈值函数表达式如下:

$$T_h(r, t) = \begin{cases} \text{sgn}(r)(|r| - kt), & |r| \geq t \\ 0, & |r| < t \end{cases} \quad (6)$$

上式中, k 的取值范围: $0 \leq k \leq 1$. 分析可知, 当 $k = 1$ 时, 该阈值函数在 $\pm t$ 处连续; 反之, 而当 $k \neq 1$ 时, 此阈值函数在 $\pm t$ 处不连续. 经过该折衷法处理后的信号可能会产生振荡.

$$T_h(r, t) = \begin{cases} \text{sgn}(r) \left[|r| - \frac{t}{1 + \exp(\frac{2r}{t})} \right], & |r| \geq t \\ 0, & |r| < t \end{cases} \quad (7)$$

改进的阈值函数具有无穷阶连续导数, 与硬、软阈值函数比较, 具有较明显的优点, 具体分析函数如下:

$$f(x) = x - \frac{t}{1 + \exp(\frac{2x}{t})} \quad (8)$$

当 $x > 0$ 时,

$$\frac{f(x)}{x} = \frac{x - \frac{t}{1 + \exp(\frac{2x}{t})}}{x} = 1 - \frac{t}{x[1 + \exp(\frac{2x}{t})]} \rightarrow 1 (x \rightarrow \infty)$$

当 $x < 0$ 时,

$$\frac{f(x)}{x} = \frac{x - \frac{t}{1 + \exp(\frac{2x}{t})}}{x} = 1 - \frac{t}{x[1 + \exp(\frac{2x}{t})]} \rightarrow 1 (x \rightarrow -\infty)$$

通过分析可知式(8)是以直线 $f(x)=x$ 为渐近线. 也即改进小波阈值函数以 $T_h(r,t) = r$ 为渐近线, 当 r 增大时 $T_h(r,t)$ 逐渐接近 r , 避免了软阈值函数 $T_h(r,t)$ 与 r 之间存在偏差缺点. 与此同时, 当阈值 t 较小时, 改进的阈值函数的表现与硬阈值函数相当. 因此, 与传统的硬、软阈值相比, 改进的阈值函数提高了信号的重构精度, 改善了去噪效果, 具有明显的优势. 硬阈值函数、软阈值函数及改进的阈值函数之间的关系如图 1 所示.

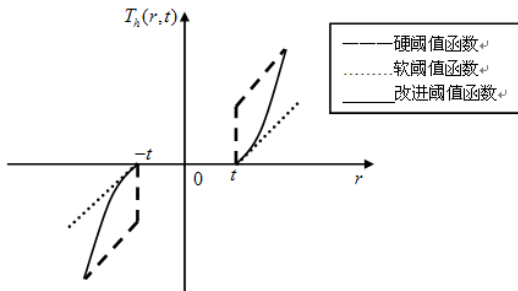


图 1 硬阈值函数、软阈值函数及改进的阈值函数之间关系

设置一个阈值作用于带噪语音 $f(k)$ 各尺度下的小波系数, 仅让超过阈值的小波系数参加反变换, 重构出去噪后的语音 $\hat{s}(k)$. Donoho 将阈值设置为^[10]:

$$t = \sigma \sqrt{2 \lg N} \tag{9}$$

式中 σ 表示噪声方差, 上述阈值方法对不同的尺度采用相同的阈值, 去噪效果不理想. 由前面分析可知, 随着尺度的增加, 噪声的模极大值减小, 故阈值也应随着尺度的增加而减小^[11], 因此定义新阈值如下:

$$t(j) = \sigma \sqrt{2 \lg N} / (2^{j/2} \ln(j+1)) \tag{10}$$

随着尺度 j 的增大, $t(j)$ 的值逐渐减小, 使得阈值与噪声在小波变换各尺度上的传播特性保持一致. 采用阈值法处理语音信号时, 要防止清音部分信息受到破坏; 因为清音部分包含了一些类似噪声的高频成分, 如果去除了清音中的高频成分会严重影响到重构语音的品质. 根据清音、浊音信号在不同尺度上的小波变换系数分布的不同, 对清浊音作如下判别处理: 首先对被噪声污染的语音信号做多层小波分解, 计算每个尺度上的平均能量; 再进行清浊音判断, 如果输入的语音段满足^[12]: ① 最小尺度上的信号能量最高(即高频

段信号能量最强); ② 最大尺度上的信号能量与最小尺度上的信号能量之比小于 0.9, 则判断为清音. 最后对清浊音段采用不同的阈值处理: 若为清音, 则只对最小尺度上的小波系数处理, 否则对全部小波系数进行阈值处理; 最后, 重构语音信号.

3 仿真结果与分析

利用 *Matlab* 软件对本文提出的改进阈值函数方法进行仿真实验. 在实验室安静环境下录制纯净的连续语音信号, 采样频率为 16000Hz, 16bit 量化, 单声道, 数据长度为 45000 点, 背景噪声为高斯白噪声, 帧长取 220 点, 帧移为 70 点. 通过改变噪声强度, 分别构成 -5dB、0dB、5dB、10dB 四种不同信噪比含噪语音信号. 采用 *Daubechies* 小波进行分解, 分解层数为 5, 语音样本为“身上穿着一件厚袍子”. 图 2 至图 5 分别是用软阈值法、谱减法、听觉感知小波变换法及本文提出的改进阈值函数法进行语音增强的结果比较.

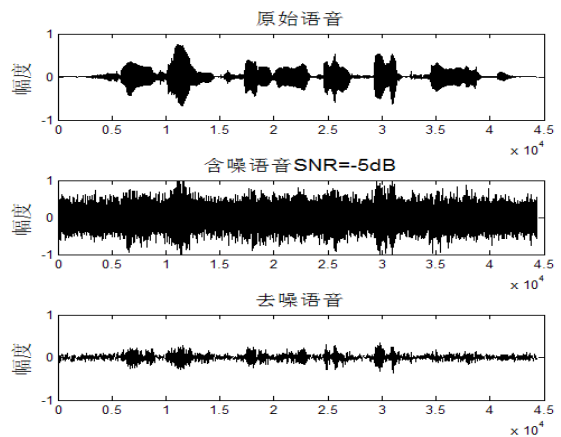


图 2 软阈值函数在 SNR=-5dB 时去噪效果

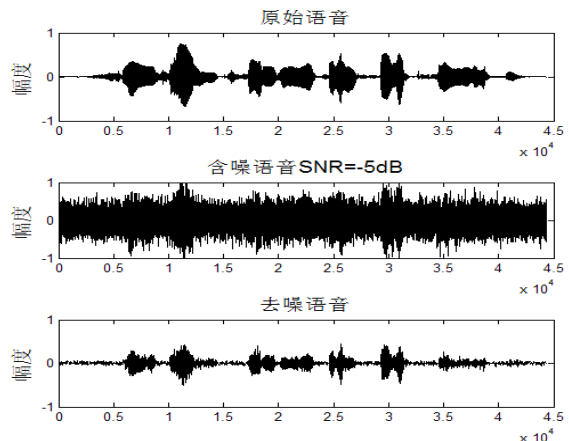


图 3 谱减法在 SNR=-5dB 时去噪效果

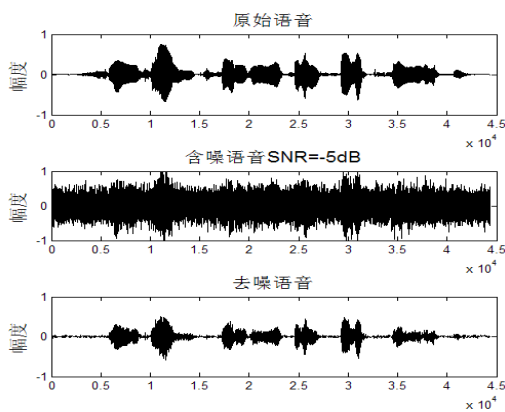


图 4 听觉感知小波变换在 SNR=-5dB 时去噪效果

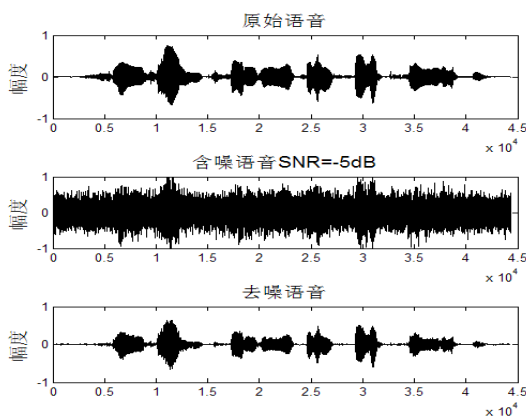


图 5 本文提出的改进阈值函数在 SNR=-5dB 去噪效果

比较上述四种语音增强方法可知,在强噪声背景下,本文提出的改进阈值函数语音增强方法的去噪效果要优于软阈值法、谱减法及听觉感知小波变换法。此外,对于清音部分的检测(如语音样本中“子”),本文提出的改进阈值函数方法效果最佳,而另外三种语音增强方法却几乎无法有效地检测出清音部分信号,且软阈值法、谱减法和听觉感知小波变换法对语音有一定的损伤。实验证明,采用本文提出的改进阈值函数方法后语音信噪比得到较大的提高,经过主观试听,去噪后的语音清晰,比较接近原始纯净语音信号。

为对本文提出的改进小波阈值增强方法作出评价,将输出信噪比(SNR_{out})和均方误差(MSE)作为衡量指标,评价指标定义如下:

输出信噪比按公式(11)计算^[13]:

$$SNR_{out} = 10 \lg \left\{ \frac{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \hat{s}(k)}{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L [f(k) - \hat{s}(k)]^2} \right\} \quad (11)$$

均方误差按公式(12)计算^[14]:

$$MSE = E[|\hat{S} - S|^2] = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [\hat{S}(k) - s(k)]^2 \quad (12)$$

表 1 给出了在不同信噪比下使用四种语音增强方法后的输出信噪比(SNR_{out})、均方误差(MSE)。

表 1 使用四种语音增强方法后的 SNR 和 MSE

输入信噪比 SNR/dB	软阈值法		谱减法		听觉感知小波法		本文提出的方法	
	SNR _{out} /dB	MSE	SNR _{out} /dB	MSE	SNR _{out} /dB	MSE	SNR _{out} /dB	MSE
10	14.28	0.0021	19.01	0.0016	23.11	0.0010	32.46	0.0005
5	9.79	0.0037	12.23	0.0031	17.83	0.0025	22.03	0.0019
0	5.63	0.0068	8.47	0.0052	10.64	0.0046	14.35	0.0032
-5	0.95	0.0084	2.91	0.0071	5.92	0.0058	7.12	0.0047

从表 1 中可知,当输入信噪比相同时,本文提出的改进小波阈值函数法的语音增强效果显著,含噪语音信号经过语音增强后,输出信噪比随着输入信噪比的增大而增大,且增强后的语音品质较好。在相同的信噪比条件下,本文提出的改进小波阈值函数法的增强语音的均方误差也明显小于另外三种语音增强方法。

4 结语

本文提出了一种改进的小波阈值函数的语音增强方法,该方法不仅具备硬、软阈值函数的优点,也在一定程度上弥补了硬、软阈值函数的缺陷。通过仿真实

验,验证了本文提出的方法比软阈值法、谱减法和听觉感知小波法对含噪语音信号的语音增强效果更好。该方法既可有效地去除白噪声又能减小有效语音段的畸变;另外,根据小波最大尺度和最小尺度信号能量之比及清浊音采用不同的阈值处理,对清浊音进行了良好的判别,较好地保留了语音中的清音信号,同时又提高了信噪比。在强噪声环境下,本文提出的改进的小波阈值函数方法有更好的语音增强效果。

参考文献

1 Bahoura M, Rouat J. Wavelet speech enhancement based on the teager energy operator. IEEE Signal Processing Letters,

- 2001, 8(1): 10-12.
- 2 崔兆国,周萍.基于TEO能量谱减法的语音增强技术的研究.计算机应用与软件,2014,31(1):151-153.
 - 3 王继曾,王婵飞.基于最佳门限消噪语音增强一种新方法的研究与实践.计算机应用与软件,2009,26(1):253-254.
 - 4 周夕良.基于 μ 律拟合的小波自适应阈值去噪算法.计算机工程与应用,2011,47(27):141-143.
 - 5 张德丰.MATLAB小波分析.北京:机械工业出版社,2012.
 - 6 金彩虹.基于Lipschitz指数的小波阈值去噪方法.噪声与振动控制,2008,28(6):13-16.
 - 7 张旭东,詹毅,马永琴.不同信号的小波变换去噪方法.石油地球物理勘探,2007,42(B08):118-123.
 - 8 谭乔来,钱盛友,陈亚琦.一种改进阈值函数的小波语音去噪方法.电声技术,2008,32(2):52-54.
 - 9 徐晨,赵瑞珍,甘小冰.小波分析应用方法.北京:科学出版社,2004.
 - 10 Donoho DL. Denoising by soft thresholding. IEEE Trans. on Inform. Theory, 1995, 41(3): 613-627.
 - 11 马晓红,宋辉,殷福亮.自适应小波阈值语音增强新方法.大连理工大学学报,2006,46(4):561-566.
 - 12 李冲泥,胡光锐.一种改进的子波域语音增强方法.通信学报,1999,20(4):88-91.
 - 13 李野,吴亚锋,刘雪飞.基于感知小波变换的语音增强方法研究.计算机应用研究,2009,26(4):1313-1315.
 - 14 邓玉娟.基于小波包的阈值语音去噪算法研究.电声技术,2009,33(9):65-69.