

小波消噪阈值算法优化

田玉静¹, 左红伟²

(1. 青岛理工大学现代教育技术中心, 青岛 266033; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266033)

摘要: 在研究小波固定阈值消噪方法, 讨论阈值估计经验公式的基础上, 针对加性噪声小波变换后的统计特征, 提出了一种自适应阈值优化算法, 该算法可以较准确地估计噪声水平, 在消噪的同时保留语音信号中的弱特征成分。通过仿真实验验证, 优化算法较传统算法能够更加有效地消除语音噪声, 获得最大信噪比。

关键词: 小波阈值消噪; 阈值算法; 优化算法; 阈值函数

中图分类号: TN713.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-04-0503-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.04.015

Optimization threshold algorithm of wavelet de-noising

TIAN Yu-jing¹, ZUO Hong-wei²

(1. Modern Education and Technology Center, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: An adaptive optimization threshold algorithm is presented based on the experiential wavelet threshold expressions after the classical wavelet threshold de-noising methods are studied. According to the statistical characteristics of the wavelet noise, the scales of noise threshold are estimated exactly with the optimization algorithm, the weak features of speech signal can be preserved effectively and the noise is eliminated adequately at the same time. The simulation result shows a better effect of the optimization algorithm on noise reduction than the conventional algorithm, and an optimal signal to noise ratio could be obtained.

Key words: wavelet threshold de-noising; threshold algorithm; optimization algorithm; threshold function

1 引言

语音处理的目的是获取信号的准确特征, 消噪是一切处理的前提保障。传统的噪声消除方法存在着保护信号局部特性和抑制噪声之间的矛盾。

近十年来发展成熟的小波技术, 在信号消噪应用中体现了传统方法没有的优越性, 由于小波变换具有良好的时频局部化性质, 利用小波变换的“数学显微镜”特性, 能有效地从混合信号中提取出有用信号。

小波消噪方法^[1]一般分为三类:

- (1) 基于小波变换的模极大值原理消噪。
- (2) 基于小波变换域内系数相关性消噪。
- (3) 小波阈值消噪。

小波阈值消噪是在小波变换的基础上提出来的, 该方法简单有效, 在最小均方误差意义下产生的估计信号是原始信号的近似最优估计, 其他线性

估计则无法达到同样的效果。

2 小波阈值消噪原理及算法

2.1 小波阈值消噪原理

小波阈值消噪的基本思想源于 Dohono 理论^[2], 根据该理论, 一个叠加了噪声的有限长信号可表示为:

$$f(k)=s(k)+n(k) \quad (1)$$

其中 $f(k)$ 是为含噪信号, $s(k)$ 为原始信号, $n(k)$ 为高斯白噪声, 服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布, 由于小波变换是线性变换, 所以对带噪信号 $f(k)=s(k)+n(k)$ 作离散小波变换后, 得到的小波系数 $\omega_{j,k}$ 仍由两部分组成, 一部分是真实信号 $s(k)$ 对应的小波系数, 记为 $\mu_{j,k}$; 另一部分是噪声 $n(k)$ 对应的小波系数, 记为 $\nu_{j,k}$ 。小波阈值消噪方法在最小均方误差(MSE)意义上是有效的, 此方法的基本思想是:

- (1) 对带噪信号 $f(k)$ 小波变换, 得到一组小波系数 $\omega_{j,k}$;
- (2) 通过对 $\omega_{j,k}$ 进行阈值处理, 得到估计小波系数 $\hat{\omega}_{j,k}$, 使得 $\|\hat{\omega}_{j,k}-\mu_{j,k}\|$ 尽量小;
- (3) 利用 $\hat{\omega}_{j,k}$ 进行小波重构, 得到估计信号

收稿日期: 2008-11-02; 修回日期: 2009-03-17

作者简介: 田玉静(1975-), 女, 山东潍坊人, 工学硕士, 研究方向为语音信号处理。

通讯作者: 田玉静, E-mail: tyj@qtech.edu.cn

$\hat{f}(k)$, 即为消噪后的信号。

2.2 阈值算法分析

小波阈值消噪方法的关键是阈值处理, 包括阈值的估计和阈值函数的选取。硬阈值(hard-threshold method)和软阈值(soft-threshold method)在实际中得到了广泛应用, 下面分别讨论:

用 mallat 塔式分解^[3]对式(1)中 $f(k)$ 进行子波分解, 根据式(2)完成变换得到 $f(k)$ 在各尺度下的子波系数 $\omega_{j,k}$, 即:

$$\omega_{j,k}(a,b) = \frac{1}{a^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(k) h^* \left[\frac{k-b}{a} \right] dk \quad (2)$$

根据子波系数估计门限阈值 T , 用门限函数对各尺度下的子波系数进行筛选。

式(3)为硬阈值门限函数:

$$\varpi_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k} & |\omega_{j,k}| \geq T \\ 0 & |\omega_{j,k}| < T \end{cases} \quad (3)$$

式(4)为软阈值门限函数:

$$\varpi_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - T) & |\omega_{j,k}| \geq T \\ 0 & |\omega_{j,k}| < T \end{cases} \quad (4)$$

门限阈值 T 估计的经验公式为:

$$T = \gamma \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \ln(n)} \quad (5)$$

式(5)中 γ 为常数取 0.1, n 为子波系数的个数, 门限阈值 T 的合理性依赖于对噪声方差 σ 估计的准确度, 用中值估计器估计噪声方差 σ :

$$\sigma = \text{Median} \left(\frac{\omega_{j,k}}{0.6745} \right) \quad (6)$$

由于每层子波分解时, 门限为常数, 因此上述方法称为固定门限子波消噪。

硬阈值法及软阈值法都有其缺陷, 如硬阈值函数的不连续性, 软阈值函数中估计得到的小波系数与信号的小波系数之间存在的恒定偏差等。

为克服这些缺陷, 在阈值门限函数选取上国内外学者做了大量工作, 提出了诸多改进函数^[4], 也达到了比较好的效果, 如式(7)所示, 式中 $a=0.5$:

$$\varpi_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k} - aT + \frac{2aT}{1 + \exp(\omega_{j,k})} & |\omega_{j,k}| \geq T \\ 0 & |\omega_{j,k}| < T \end{cases} \quad (7)$$

为了理解上述三种阈值函数算法, 图 1 示意图可直观地对比阈值函数的不同。

3 阈值优化算法

子波变换的实质是子波对基波的分解, 子波系数 $\omega_{j,k}$ 反映了信号在参数尺度空间下 b/a (其中 a, b

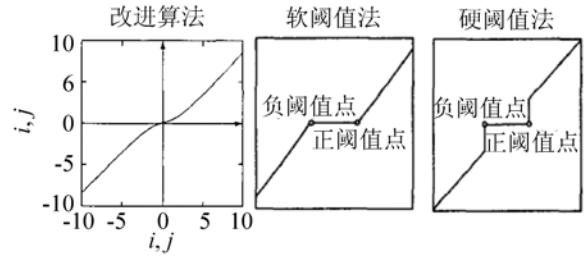


图 1 阈值函数示意图

Fig.1 Threshold function sketch map

分别为子波函数的尺度伸缩和平移因子) 时刻包含单位基波的幅度, 在每层分解的高频系数幅度是线性增大的, 采用传统固定门限消噪, 存在两个问题:

(1) 在低噪声段, 弱信号子波系数可能低于门限值, 被误判为噪声消除。

(2) 在高噪声段, 噪声的子波系数可能高于门限值, 被误判为信号保留。

消噪首先要准确估计信号中的噪声, 在不同尺度下的分布情况, 才能最好地消除噪声, 保留有用信息。根据随机信号的标准差或方差的定义, 信号的标准差反映离散信号中各点到信号均值的分散程度。因此, 噪声信号的标准差在一定程度上反映了噪声的大小^[5]。

当噪声经过小波变换后, 它们在不同的尺度下就表现出不同的统计特性, 其方差也随着尺度水平的改变而改变^[6]。由于噪声是时变的, 为达到较高消噪水平, 门限也应该是时变的, 因此对不同的子波系数使用不同的小波阈值, 自适应阈值优化算法如下:

(1) 估计噪声的方差 σ^2 , 噪声方差可利用 Robust 均值估算方法确定:

$$\sigma^2 = \frac{\text{Median}(\omega_{i,j}^2)}{0.6745}, \quad \omega_{i,j} \in \text{subband}(\text{子带}) \quad (8)$$

(2) 计算每个子带的方差 σ_i^2 :

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{M^2} \sum_{\omega_{i,j} \in \text{subband}} (\omega_{i,j})^2, \quad M \text{ 是子带大小} \quad (9)$$

(3) 为每个子带计算相应的阈值: $\lambda = \left(\frac{\sigma^2}{\sigma_i^2} \right)$; 将

每层小波系数排列, 构成向量:

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_i \dots p_N], \quad p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_N;$$

$$\gamma_i = \frac{N + (i-m)p_i + \sum_{i=1}^m p_i}{N} \quad (10)$$

其中 N 为小波系数的个数, m 为小波分解层数;

(4) 计算阈值:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^k}{0.6745N} (\gamma_i)^{1/2} \cdot \lambda \quad (11)$$

d_i^k 为第 k 层中第 i 个小波系数;
($1 < k < m, 1 \leq i \leq N$)

(5) 用阈值函数式(7)求得估算小波系数, 得到新的小波系数;

(6) 根据新的小波系数, 用小波逆变换重建“消噪”的语音。

4 实验验证

定义同一语音信号消噪处理后, 最小均方误差(MSE)越小, 信噪比(SNR)越大, 则消噪效果越好, 定义形式为^[7]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [f(k) - \hat{f}(k)]^2 \tag{12}$$

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{\sum_{k=1}^N [f(k)]^2}{\sum_{k=1}^N [f(k) - \hat{f}(k)]^2} \right) \tag{13}$$

式(12)、(13)中 $f(k)$ 为原始信号在取样点 k 的幅值, $\hat{f}(k)$ 为消噪后的信号在位置 k 的幅值, N 为信号长度。

为了验证阈值优化算法在语音消噪中的有效性和优越性, 分别采用固定阈值的硬软阈值函数, 改进函数和自适应阈值优化算法进行计算机仿真语音消噪实验^[8]。

原始语音信号采样率为 11.025kHz、16 位量化, 噪声为高斯白噪声, 信噪比为 0.53dB, 采用的小波基是 db4 小波, 分解层数为 5 层, 消噪仿真过程中优化算法的自适应阈值选择曲线见图 2, 传统算法与优化算法量化比较见表 1。

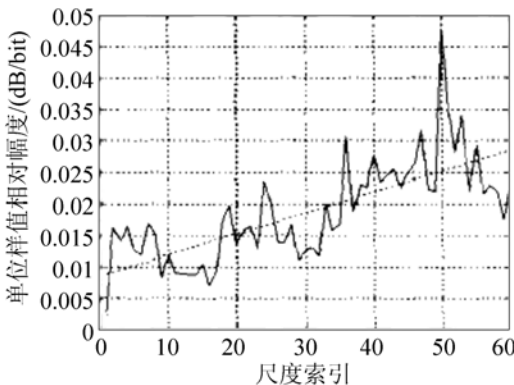


图2 最优阈值选择曲线
Fig.2 Graph for optimization threshold selection

表 1 四种算法 SNR 和 MSE 比较

Table 1 MSE and SNR results of four methods

	硬阈值算法	软阈值算法	改进阈值算法	阈值优化算法
SNR/dB	3.67	7.14	9.61	14.79
MSE	3.42	2.83	2.48	2.07

优化算法消噪后信号的信噪比提高了 9~15dB, 且完好地保留了信号中的弱特征信息; 用固定阈值消噪方法, 处理后信噪比提高 2~11dB, 消噪后幅度最小的语音特征成分的失真达到 50% 以上。

分别采用硬阈值算法、软阈值算法和优化阈值算法对带噪语音进行小波阈值消噪处理, 语音消噪波形和原始语音波形对比可以更加直观地验证算法优越性, 采用不同小波阈值算法对带噪语音消噪, 消噪前后波形对比见图 3。

虽然优化阈值消噪可以比较好地去除噪声, 但

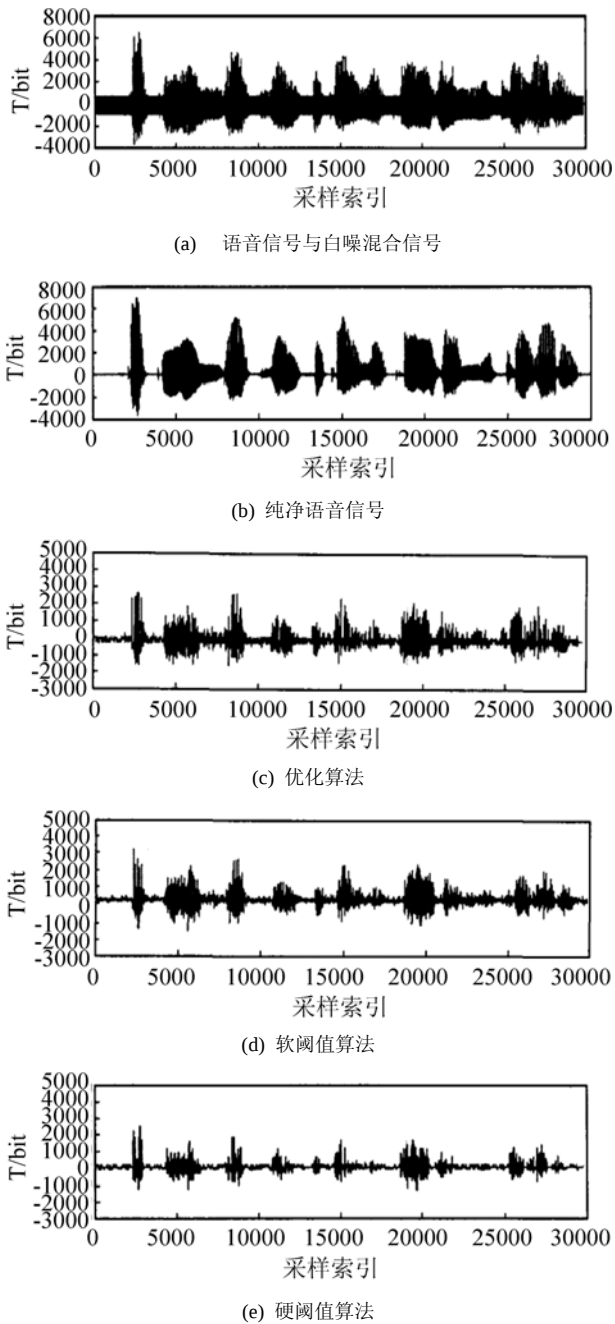


图3 小波阈值消噪波形比较图
Fig.3 Comparison of different wavelet threshold de-noising speech waveforms

消噪后信号幅度下降,即语音声强减弱,由于人耳对声强感觉灵敏,且具有很大动态范围,因此可将消噪语音采用语音放大系统提高声强,也可将消噪信号进行预加重滤波,采用线性预估(LP)分析,提取共振峰频率进行语音合成以达到理想的效果。在采用单纯小波阈值消噪无法满足应用需求时,可考虑将小波变换与自适应滤波相结合(如变换域LMS),但计算量和存储量很大。

5 结 语

小波消噪技术正在各领域信号处理^[9]中发挥越来越重要的作用,成为研究的热点^[10]。本文充分考虑小波系数和噪声的统计特性,提出一种依据信号统计特征估计信号噪声水平的自适应优化阈值语音消噪计算方法,使小波系数的正负两个方向得到均匀压缩,更符合噪声的统计特性。自适应阈值优化算法较传统固定阈值算法消噪效果更好,但这是以增加计算复杂度为代价的。如何更加准确估计噪声水平,将是后续研究的努力方向。

参 考 文 献

- [1] YANG D L, XU M X. A noise cancellaion method based on wavelet transform[A]. The Second International Symposium on Chinese Spoken Language Processing(SCSLP)[C]. Beijing, 2006: 117-201.
- [2] 田玉静, 左红伟. 语音消噪应用研究[J]. 声学技术, 2008, 27(4): 557-561.
- [3] TIAN Yujing, ZUO Hongwei. Speech de-noising application study[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(4): 557-561.
- [4] Chang Sun W, Kong Y, Yang Sung I. Speech enhancement for non-stationary noise environment by adaptive wavelet packet[J]. ICASSP, 2002: 561-564.
- [5] L.K.Shark, C.Yu. De-noising by optimal fuzzy thresholding in wavelet domain[J]. IEEE Electronics Letters, 2004, 36(6): 581-582.
- [6] 赵治栋, 潘敏, 陈裕泉. 小波收缩中统一域值函数及其偏差、方差与风险分析[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(4): 536-539.
- [7] ZHAO Zhidong, PAN Min, CHEN Yuquan. Bias, Variance and risk analysis of uniform threshold function in waveletshrinkage[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(4): 536-539.
- [8] Jansen M. Asymptotic behavior of the minmum Meam squared error threshold for noisy wavelet Coefficients of piecewise smooth signals[J]. IEEE Trans. on Signal Proc, 2001, 49(6): 1113-1118.
- [9] HASAN M K, SALAHUDDIN S, KHAN M R. Modified a priori SNR for speech enhancement using spectral subtraction rules[J]. IEEE Signal Process, 2004, 11(4): 450-453.
- [10] Jackson L. Digital Filtering and Signal Processing with MATLAB Exercises[M]. Third edition. Kluwer Academic Publishers, 2006: 139-176.
- [11] 赵春晖, 马梅真. 基于提升小波变换和分形维数的声纳图像识别[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 811-816.
- [12] ZHAO Cunhui, MA Meizhen. Sonar image recognition based on lifting scheme and fractal dimension[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 811-816.
- [13] 张建伟, 张效民. 小波分析及其在水声工程中的探讨[J]. 声学技术, 1997, 16(2): 47-50.
- [14] ZHANG Jianwei, ZHANG Xiaomin. Research on wavelet analysis applications to underwater acoustics[J]. Technical Acoustics, 1997, 16(2): 47-50.