

小波去噪在频谱编码传输中的应用

郭代飞, 高振明, 张坚强

(山东大学电子工程系, 济南 250100)

摘 要: 本文详细介绍了数字信号的频谱编码传输方法和小波门限去噪法, 研究了小波门限法在双极性线性相位编码中的去噪性能. 为了找到最佳的小波去噪方案, 本文对各种影响小波去噪性能的参数作了比较研究. 最后对小波去噪的运算量进行了统计. 结果表明, 小波变换在去噪性能和实时处理方面均具有实用价值.

关键词: 频谱编码; 门限法; 双极性线性相位编码

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 10-0127-03

Application of Wavelet De-noising to Spectrum-Coding Transmission

GUO Dai-fei, GAO Zhen-ming, ZHANG Jian-qiang

(Dept. of Electronic Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: This paper introduces both the method of the spectrum-coding transmission of digital signal and that of wavelet threshold de-noising in detail, and also studies the performance of the method of wavelet threshold de-noising used in the bipolar linear-phase coding. To find the best scheme of wavelet de-noising, various parameters that influence the performance of wavelet de-noising are studied in this paper. In the end, the statistics of the operational volume of wavelet de-noising is made. The result indicates that the wavelet transform has practical value in the performance of de-noising and real-time processing.

Key words: spectrum coding; method of threshold; the bipolar linear-phase coding

1 引言

数字信号的频谱编码传输方法的基本原理是^[3], 用待传输的二进制数字信号对频谱进行编码, 通过 IFFT 转换成普通的模拟信号送信道传输. 在接收端, 对收到的模拟信号进行抽样、FFT 变换, 恢复成原来的频谱, 从而识别出发送端的数字信号. 本文主要是把小波变换用于信号去噪, 从而提高接收端信号的信噪比, 降低误码率.

2 数字信号的频谱编码传输方法^[3]

一个带宽为 f_m 的模拟信号 $a(t)$, 以 f_s 抽样率对 $a(t)$ 进行抽样, 其中 $f_s \geq 2f_m$, 则抽样后的信号为一抽样序列 $x(n)$, 序列 $x(n)$ 的离散傅里叶变换为:

$$X(K) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} x(n) e^{-j2\pi Kn/N} \quad (1)$$

可以证明, 若 $X(K)$ 满足^[4]

$$X(K) = X(N-K)^*, \quad K=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

则时域序列 $x(n)$ 将是实序列.

数字信号的频谱编码就是将待传输的二进制数字信号对频谱进行频域编码, 通过 IFFT 转换成普通的模拟信号送信道传输. 它的实现框图如图 1 所示. 图中, 输入数据为二进制数据序列, 经过频谱编码、傅里叶逆变换、并/串变换后, 再通过

D/A 变换成模拟信号送信道传输. 在接收端, 在去除噪声处理后, 经 A/D 变换、串/并变换、傅里叶变换和译码, 还原为原输入的二进制数据序列.

假设输入数据用 $\{X(K), K=0, 1, 2, \dots, n\}$ 表示, 将信源数据经一定的编码后, 每 N 个数据作为一帧, 进行逆傅立叶变换 IFFT, 变为信源的时域离散谱, 由式 (2) 可以得到

$$x(n) = \frac{1}{N} \left(X(0) - X\left(\frac{N}{2}\right) + \operatorname{Re} \left(2 \sum_{K=1}^{N/2-1} X(K) W_N^{-Kn} \right) \right) \quad (3)$$

可见, 此时 $x(n)$ 为实序列, 关于数字信号的频谱编码传输已提出的编码方式有:

- (1) 双极性线性相位编码方法;
- (2) 双极性幂级数相位编码方法;
- (3) 双极性余弦相位编码方法;
- (4) 4QAM 编码方法.

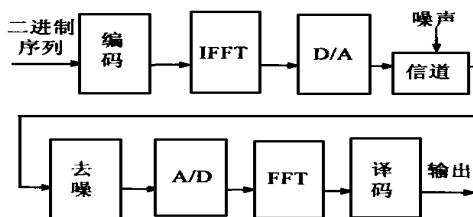


图 1 频谱编码实现框图

本文主要使用双极性线性相位编码方法来研究小波变换在频谱编码传输中去噪的性能。双极性线性相位编码方法为:

$$\text{幅度满足 } X^*(K) = \begin{cases} +1, 0 \leq K \leq N-1, a_K=1 \\ -1, 0 \leq K \leq N-1, a_K=0 \end{cases}$$

相位满足: $((N-1) \times K \times \pi) / N$ 。从而, 双极性线性相位编码的频谱表达式为:

$$X(K) = X^*(K) \times e^{-j((N-1) \times K \times \pi) / N} \quad (4)$$

由于双极性幅度编码中, 信源信息只包含于幅度谱中, 所以判决时只需取出其幅度进行判决即可。一般设定判决门限为“0”, 幅度大于“0”, 判决为“1”; 幅度小于“0”, 判决为“0”; 幅度等于“0”, 判为误码。

3 小波门限法与去噪原理

有噪信号经过小波变换后, 得到其小波变换后的离散细节信号和离散逼近信号。可以证明^[6], 噪声的离散细节信号的幅度随着小波变换级数的增长而不断减小, 且其方差也在不断减小。对于所有的尺度, 白噪声的离散细节信号的系数的方差随着尺度的增加会有规律地减小, 但有用信号的小波变换的平均功率与尺度并没有什么关系。同样, 对应于信号的离散细节信号的幅度和方差也并不随着尺度的增大而减小。利用有噪信号的小波变换的这一特性, 可以选择一个门限, 然后利用这个门限对信号小波变换后的离散细节信号和离散逼近信号进行处理, 从而达到信号去噪的目的, 这就是小波门限去噪方法。

3.1 软门限和硬门限

选择 x 为给定的门限, 对于软门限, 有

$$y = \begin{cases} \text{sign}(x) \cdot (|x| - x), & |x| > x \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

对于硬门限, 有

$$y = \begin{cases} x, & |x| > x \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

硬门限可以描述为: 当数据的绝对值小于给定的门限时, 令其为零, 而数据为其他值时不变; 而软门限可以描述为: 当数据的绝对值小于给定的门限时, 令其为零, 然后把其他数据点向零收缩。采用软门限方法产生的数据没有不连续点, 而采用硬门限方法产生的数据在给定的点 x 和它关于零点的对称点 $-x$ 处各有一个不连续点, 并且软门限有着很好的数学特性, 实践证明, 它是有效的方法。

3.2 门限选择的准则

根据现有的资料文献^[5], 对于被高斯白噪声污染的信号基本噪声模型, 选择门限一般可以用以下准则。

无偏风险估计准则: 对应于每一个门限值, 求出与其对应的风险值, 使风险最小的门限就是我们所要选取的门限。

固定门限准则: 利用固定形式的门限, 可以取得比较好的去噪特性。门限的选取算法是: 设 n 为待估计矢量的长度, 取长度二倍的常用对数的平方根为门限。

混合准则: 混合准则实际上是无偏风险估计准则和固定门限准则的混合。

极小极大准则: 采用固定门限获得理想过程的极小极大

特性。极小极大原理是在统计学中为设计估计量而采用的, 由于去噪信号可以假设为未知回归函数的估计量, 则极小极大估计量是实现在最坏条件下最大均方误差之最小的任选量。

最后应指出, 对小波离散细节信号进行处理时, 所选取门限还可能需再乘上原始信号在某个尺度下离散细节信号的中值。按此为区分不同方法的依据, 还可以分为三种方法: 第一种方法是缺省中值方法, 直接令中值为 1; 第二种方法是参考小波变换在第一级变换的离散细节信号的中值, 运算量要比第一种大一些; 第三种方法则需要参考在每一个尺度上对离散细节信号的中值, 在每一个尺度上估计出该尺度离散细节信号的的门限, 然后用这个门限对该尺度的离散细节信号进行处理。

4 小波变换去噪在双极性线性相位编码方法中的应用

利用小波变换能够有效地去除噪声, 提高信号的信噪比。如果在信号的接收端对接收到的信号进行高速采样, 经过小波变换、门限选择、离散细节信号的修改和小波反演后去除噪声, 将会有效地提高接收信号的信噪比, 降低误码率。在频谱编码方法中采用小波变换方法去除噪声的原理框图如图 2 所示。

在对信号进行 A/D 转换时, 需要对信号进行高速采样, 这是因为在信道中的噪声一般为高斯白噪声, 若仅仅按照信号本来的采样间隔来对接收到的信号采样, 则对信道中的噪声的采样频率过低, 不容易发现高斯白噪声的统计规律, 也就没有办法区分噪声信号与有用信号, 只有提高采样频率, 才能发现高斯白噪声的统计规律, 从而把高斯白噪声和有用信号区分开来。在信号的高速采样中, 采用三次样条函数拟合的方法, 使之采样频率提高 N 倍。

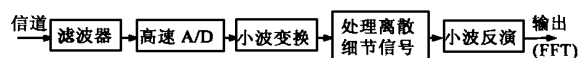


图 2 小波变换方法去除噪声的原理框图

小波变换在频谱编码方法中去除噪声的性能受到频谱编码每一帧信号长度 N , 接收端采样速率, 小波去噪采用的中值处理方法、不同的门限估计准则和不同的小波等因素的影响。为了找到小波去噪的最佳方法, 本文采用 Matlab 编程语言编制运算程序对小波去噪中所有可能的参数进行了遍历运算。

首先取信号的长度 N 为 512, 采用 4 倍采样频率和参考信号小波变换的第一级离散细节信号的中值处理方法及 sym4 小波, 使用软门限对小波变换的离散细节信号进行处理, 比较在双极性线性相位编码中采用不同门限估计准则的去噪性能。四种准则去噪性能的比较曲线如图 3 所示, 图中 ABCD 分别代表固定门限准则, 极小极大准则, 混合准则, 无偏风险估计准则, 很容易看出, 固定门限准则和极小极大准则的去噪性能比较差, 远远不如其他两种门限选择准则。无偏风险估计准则和混合门限准则两者的去噪性能是差不多的, 在噪声幅度为 0.7 ~ 1.2 时, 信噪比的增益为 13 ~ 30dB, 当噪声的幅度小于 0.6 时, 经过小波去噪后误码率几乎为 0。

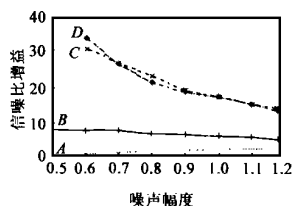


图3 不同门限估计准则
去噪性能比较

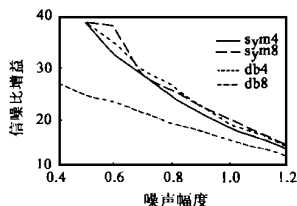


图4 不同小波族中去噪
小波的性能比较

下面在同样条件下,选用混合门限准则,比较 sym4, sym8, db4, db8 小波的去噪性能,其去噪性能曲线如图 4 所示.由图中可得出结论:sym4 小波与 db4 小波的滤波器长度为 8,两者的去噪运算量相同,sym4 的效果要差一些:sym8 小波与 sym4 和 db4 的效果相差无几,但比与之长度相等的 db8 小波,其去噪效果要好得多.

在频谱编码中,不同的信号长度 N 的取值,其去噪的效果是不同的.下面的实验采用 sym8 小波、混合门限准则,分解级数为 5,而 N 的数值分别为 256、512、1024、2048,得到图 5 曲线所示,图中 ABCD 分别表示 N 为 1024、512、2048、256 时的去噪性能曲线.可以看出,当 N 的数值为 256 时,其小波去噪性能最差,这是因为 N 的数值太小,不容易发现信号和噪声的统计规律,随着信号长度 N 的加大,小波去噪的性能较好.当 N 的数值为 1024 和 2048 时,两者的相差无几.但是随着 N 值的增大,信号处理的时延加大,实时性变差.

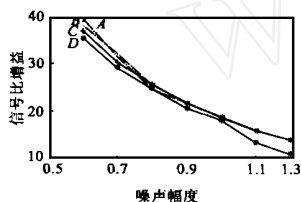


图5 不同信号长度
去噪性能比较

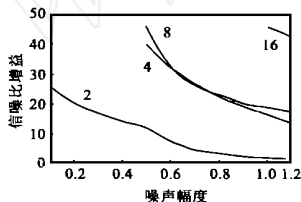


图6 不同采样率时
去噪性能比较

在信号接收端,对信号采样的频率要求是原始采样频率的数倍,图 6 是采样倍数分别为 2、4、8、16 时的小波去噪信噪比增益.可以看出,采样倍数为 2 时的去噪性能最差,而采样倍数为 16 时的去噪性能最好;当采样倍数为 4 和 8 时区别并不大,但后者的运算量是前者的两倍.

最后,在实际应用中,还要考虑在信号的接收端 DSP 进行小波变换去噪时是否能够满足实时性.下面对小波变换去噪的运算量进行统计分析.表 1 是当信号长度 N 值为 512 时,不同的 DSP 运算速度对应的每秒钟可传输比特数.第一列的数据是 DSP 芯片的处理速度,单位是 MIPS (Million Instruction Per Second);第二列是采用 sym4 小波进行 512 点去噪所需的时间,单位是秒,斜线后的数据是利用 DSP 每秒钟能够处理的比特数;第三列数据的含义和第二列的一样.现有的 DSP 芯片 TMS320C8X 的运算速度已经达到 1600 MIPS.

表 1 不同 DSP 运算速度的性能比较

	sym4 小波 N 位运算时间 及每秒比特数	sym8 小波 N 位运算时间 及每秒比特数
100	$1.16 \times 10^{-3} / 441\text{K}$	$2.195 \times 10^{-3} / 233\text{K}$
200	$5.8 \times 10^{-4} / 882\text{K}$	$1.098 \times 10^{-3} / 466\text{K}$
400	$2.9 \times 10^{-4} / 1.76\text{M}$	$5.48 \times 10^{-4} / 932\text{K}$
800	$1.45 \times 10^{-4} / 3.52\text{M}$	$2.74 \times 10^{-4} / 1.87\text{M}$
1600	$7.25 \times 10^{-5} / 7.04\text{M}$	$1.37 \times 10^{-4} / 3.73\text{M}$

如果用该 DSP 芯片实施小波去噪,当采用 sym4 小波时,每秒钟可以处理 7M 比特二进制信息,当采用 sym8 小波时,每秒钟可以处理 3.7M 比特二进制信息.这是因为 sym8 小波的滤波器长度是 sym4 小波滤波器长度的两倍,故两者的处理速度相差一半.

5 结论

在数字信号的频谱编码传输系统的接收端,利用小波变换对接收到的信号进行高速采样,并进行小波变换、细节信号的处理、小波反演等过程,可以极大地提高信号的信噪比.文中对小波变换在双极性编码中的去噪性能进行了研究.对采用不同的门限估计方法、不同的中值处理方法、不同的小波、不同的采样频率的去噪性能进行了比较.计算机模拟的结果表明,如果取 N 为 512,采用 4 倍采样频率和参考信号小波变换的第一级离散细节信号的中值处理方法和 db4 或 sym8 小波对频谱编码传输系统进行小波去噪,误码率能够降低 2~4 个数量级,尤其是当信道中的噪声幅度较小时,系统的误码率几乎为零.而各种去噪方案中,采用 db4 小波进行信号去噪的性能较好,且其运算量也比较小.最后本文对小波变换在频谱编码中去噪的运算量进行了统计,结果显示小波去噪完全能够满足信号实时处理的要求.

作者简介:



郭代飞 1998 年山东大学通信工程专业获工学学士学位.现为通信与信息系统硕士研究生,在导师指导下,参加国家自然科学基金资助课题——小波变换的理论与技术研究,在国内核心期刊已发表学术论文 2 篇.



高振明 教授,1965 年毕业于山东大学无线电电子学专业.多年来通信技术领域从事教学和科研工作.承担和完成省科委“七五”、“八五”、“九五”攻关课题 3 项,两项获省科技进步奖;在国内学术刊物和国际学术会议发表学术论文 30 余篇,合作编著《通信网与通信系统》一部.