

弦乐合弦声信号时频特征的小波包分析

李功宇, 郑华文, 胡持平

(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 利用小波包分析技术对弦乐合弦声信号进行时频分析, 并采用 Hilbert 变换对小波分解系数时域重构信号进行包络线检波, 得到了合弦声信号幅值的时频等高线相平面图. 与传统傅里叶谱分析技术相比较, 小波变换的时频相平面图能同时反映合弦声信号的构成频率成分及其时域特征.

关键词: 小波分析; 信号重构; 时频分析

中图分类号: TB52, TH911.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)04-0036-04

Analysis of Time - frequency Domain Characteristics of String Music Chord Sound Based on Wavelet Packet Technique

LI Gong-yu, ZHENG Hua-wen, HU Chi-ping

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The musical chord sounds, played by a guitar, are analyzed on time - frequency domain based on the wavelet packet method. Compared with the traditional Fourier Transform, the wavelet time - frequency images, which reflects time & frequency characteristics of signals simultaneously, are more suitable for analyzing signals with time variant characteristics.

Key words: wavelet packet; signal reconstruction; time - frequency domain analysis

0 引言

传统的信号分析是建立在傅里叶变换(Fourier Transform)的基础之上的, 由于傅里叶变换是一种涉及整个时间轴全局的变换, 反映的是信号整个时间轴上的频率统计特性, 而不能提供任何局部时间段上的频率信息^[1].

对于具有非平稳时变特征的弦乐合弦声信号而言, 由于它在不同时间对应着不同的合成音节, 其声音的频率特性随时间而变化^[1]. 因此, 合弦声信号的频率构成及其作用时间等信息极为重要, 因为它们决定着合弦声的音色. 对于此类信号, 传统的时域分析及傅里叶频域分析方法都难以全面反映信号的特征.

小波变换(Wavelet Transform)是近年来快速发展起来的一种数学分析应用技术, 其思想来源于伸缩和平移方法; 小波变换可将分析信号或场在时间、频率甚至方向上进行分解. 由于小波函数仅在有限的频率和时间区域存在, 因而通过小波变换可以获得信号在特定频率空间和时域空间上的准局部特征; 小波系数相平面图像对信号的时域信息和频率信息细节都有所反映. 通过小波变换可以跟踪、分析信号中各种频率成分随时间的变化历程^[2].

本文基于小波包分析技术对吉它弹奏弦乐合弦声进行了三层小波包分解, 并结合 Hilbert 变换的包络线提取技术获取了合弦声小波分解系数时域重构信号的等高线时频相平面图. 由于时频等高线相平面图含有丰富的信号时、频信息, 因而比较全面地反映了合弦声信号各组成音节随时间的变化特征, 对于合弦声音质的分析和评价具有重要的意义.

收稿日期: 2002-06-10.

第一作者简介: 李功宇(1954~), 男, 硕士, 教授; 主要研究方向: 振动及噪声控制、测试技术. E-mail: lgy0203@sina.com

1 小波分析基础

定义基本小波(或母小波)函数为 $\psi(t)$, $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$,且满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

基本小波 $\psi(t)$ 经伸缩和平移后,就可以得到一个小波序列.

连续型小波序列为:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right); a, b \in \mathbb{R}; a > 0 \quad (2)$$

其中: a 为伸缩因子, b 为平移因子.

离散型小波序列为:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k); j, k \in \mathbb{Z} \quad (3)$$

对于任意函数 $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$,其连续小波变换为:

$$W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (4)$$

而其逆变换(信号重构)为:

$$x(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(a, b) \psi_{a,b}(t) da db \quad (5)$$

小波变换的时频窗口形状为两个矩形^[1],窗口中心为 $(b, \pm \omega/a)$,时窗和频窗的宽度分别为 a 和 $1/a$.其中, b 仅影响窗口在时频相平面时间轴上的位置; a 不仅影响窗口在频率轴上的位置,也影响窗口的形状.小波变换具有较好的时频窗口特性.

多分辨率分析(MRA)是小波变换应用于工程信号分析的重要技术方法,其思想等同于多采样率滤波器组.根据多分辨率理论,设离散二进小波函数族 $\{\psi_{j,k}(t); j, k \in \mathbb{Z}\}$ 构成 $L^2(\mathbb{R})$ 中的标准正交基,则对于时变信号 $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 有如下的正交小波分解:

$$x(t) = \sum_{j=1}^N \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{N,k} \psi_{N,k}(t) \quad (6)$$

可以证明,上式中的小波分解系数 $d_{j,k}$ 和尺度分解系数 $c_{N,k}$ 满足下列递推公式:

$$c_{N,k} = \frac{1}{2} \sum_{l \in \mathbb{Z}} g_{j-1,l} h_{l-2k}^* \quad (7)$$

$$d_{j,k} = \frac{1}{2} \sum_{l \in \mathbb{Z}} c_{j-1,l} g_{l-2k}^* \quad (8)$$

式中, h_k 为通滤波系数, g_k 为高通滤波系数; * 表示复共轭.

从信号分析角度看,正交小波变换是将信号通过一个低通滤波器和一个高通滤波器分别进行滤波,在尺度 j 上分解为一组低频序列(近似部分)和高频序列(细节部分);而进一步的分解仅对应于低频序列.由此可见,多分辨率小波分析可以对信号进行有效的时频分解,但因为其变换尺度是按二进制规律变化的,所以其信号的高频段频率分辨率及低频段时间分辨率均较差.

2 弦乐合弦声的小波包分析

小波包分析能够为非平稳时变信号提供一种更加精细的分析方法,它能将分析频带进行多层次划分;针对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解,并根据信号的时频特征,自适应地选择相应的频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高信号的时频分辨率.

小波包的基本参数分别是尺度、位置及频率.在信号的小波包分解中,每一个高频系数也如同低频系数的分解一样,被分解为两部分.因而,小波包分解提供了更精细的分析方法.对于一维信号,小波包分解将产生一个完整的二叉树^[1].

由于具有非平稳时变特征的弦乐合弦声信号,本文采用了三层小波包对其进行分解.三层小波包分解树如图1所示.

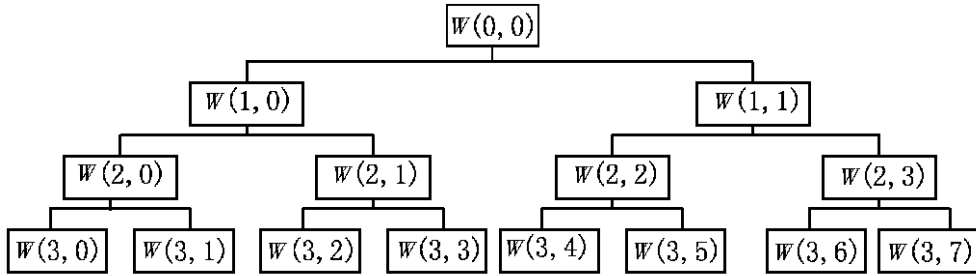


图1 三层小波包分解树

在本文研究中,吉它弹奏合弦声信号的声学测量系统如图2所示.实验过程中,我们选择国产M牌吉它为弹奏弦乐器;丹麦B&K2034双通道信号分析仪为信号采集和分析仪器;信号的小波时频分析基于MATLAB语言小波工具箱实现.

经过实验比较,我们选择了MATLAB小波分析工具箱中的“db28”小波包^[3]第三层分解对吉它弹奏合弦声信号进行时频分析,并采用“Shannon”熵标准.“db28”小波包第三层第一结节点子小波分解函数 $W(3,0)$ 见图3(a);第三层小波包分解函数的全频率(设最高频率为1)滤波特性见图3(b).

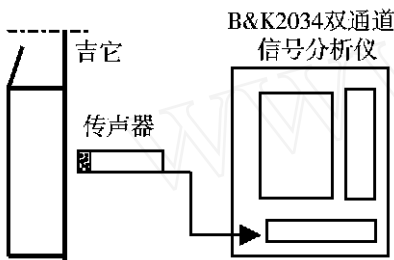


图2 吉它弹奏声测量系统

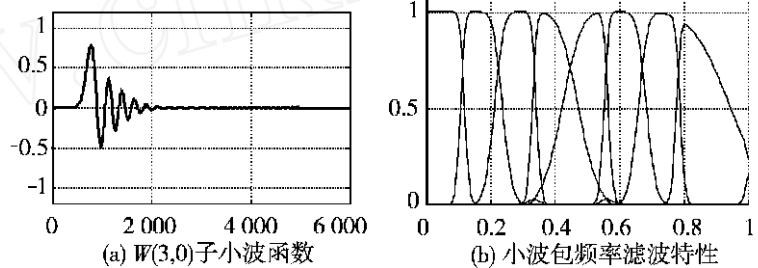


图3 “db28”型小波包函数及其滤波特性

由图3可见,第三层小波包分解函数可将信号全频率范围均匀地分解为8个频带,各频带由低到高所对应的小波包分解节点依此为 $W(3,0)$ $W(3,1)$ $W(3,3)$ $W(3,2)$ $W(3,6)$ $W(3,7)$ $W(3,5)$ $W(3,4)$.合弦声信号经过“db28”小波包第三层分解,可获得8个结点处的信号小波包分解系数.这8个结点的小波包分解系数包含着合弦声信号8个分解频段各频率成分及其随时间变化规律的时频信息.

为了有效提取合弦声信号的时频信息,本文利用小波重构技术对8个结点的小波包分解系数进行时间重构,并通过Hilbert变换对重构时间信号进行包络线检波(如图4所示);进一步,根据8个结点对应频带由低到高将相应的重构时间信号沿纵坐标依此排列构成频率坐标,原信号时间为横坐标,求算并作出各结点重构时间信号的幅值等高线时频相平面图.本文仅以其中的吉它G3空弦弹奏合弦声的小波时频分析结果为例说明(见图5).

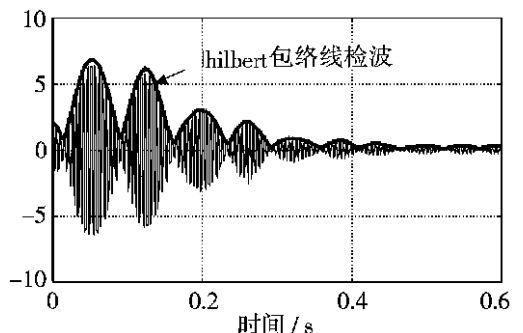


图4 $W(3,1)$ 结点重构信号及其 Hilbert 检波

由图5可见,信号的时间历程(图5a)仅反映信号的时域特征(无频率细节),傅里叶变换(图5b)仅反映信号的频率构成(无时域信息);而小波时频相平面图(图5c)对于合弦声信号的时域信息和频率信息细节都有所反映.

在小波时频相平面图5(c)中,幅值等高线对应的频率坐标反映出合弦声主要频率成分为197 Hz基波

及其两倍及叁倍频谐波;而幅值等高线对应的时间坐标则反映出基波和谐波的“拍”波特征及其作用时间等时域信息.由图可知,合弦声基波以约0.075 s间隔形成渐衰的“拍”波,并持续作用于整个信号时段;高次谐波则随着倍频数的增加而呈现“拍”波作用时间递减的特性.此外,基波和高次谐波幅值并非同时达到最大值,而呈现一种交替作用、此消彼长的和谐运动;且壹倍及两倍频谐波先于基波达到最大值.

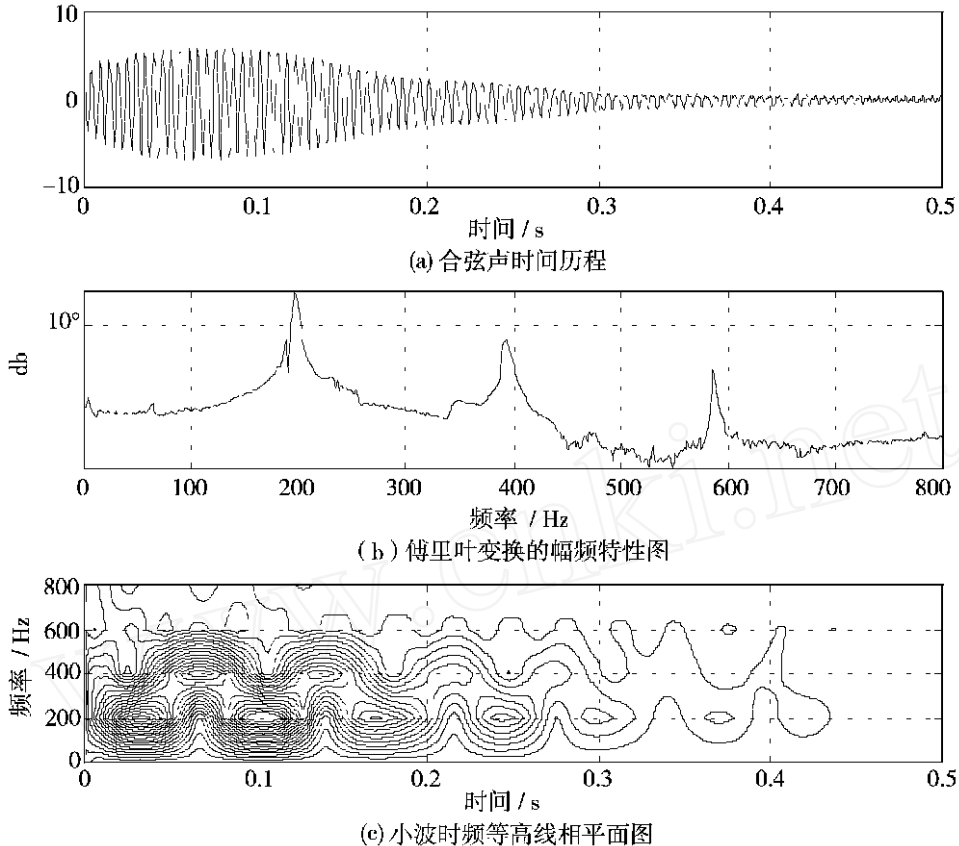


图5 吉它 G3 空弦弹奏合弦声的时、频域特性及小波时频等高线相平面图

3 结论

通过对吉它弹奏合弦声信号的小波包分析可以看出,与传统的傅里叶变换相比,小波时频相平面图对非平稳时变信号的时域信息和频率信息细节都有所反映,含有丰富的信号时、频信息.通过小波变换可以跟踪、分析时变信号中各种频率成分随时间的变化历程.

从技术上讲,更多层小波包分解或最优基小波包可以获得更为合理的信号时频信息.

参考文献:

- [1] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [2] 戚定满,沈焕庭. 小波在瞬态空化噪声分析中应用[J]. 振动与冲击. 2001,20(1):82~84.
- [3] 郑宏兴,姚记欢,张成. MATLAB 5.X 工具箱使用技巧与实例[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2000.