

文章编号: 1001-1986(2005)05-0070-02

# 小波多尺度分析在煤厚探测中的应用

于师建<sup>1</sup>, 王宗胜<sup>2</sup>, 刘延欣<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学, 山东 泰安 271019; 2. 鲍店煤矿, 山东 邹城 273500)

**摘要:**根据声波反射法探测顶煤厚度中存在的问题, 提出了将小波多尺度分析应用到实际煤厚探测信号分析中的信号处理方法。结果表明: 小波多尺度分析大大改善了煤层顶板弱反射波的识别能力, 提高了煤厚探测的精度。

**关键词:**小波, 多尺度分析, 煤层厚度, 探测

**中图分类号:**P631.443 **文献标识码:**A

## Application of wavelet multiresolution analysis to detecting thickness of coal seam

YU Shi-jian<sup>1</sup>, WANG Zong-sheng<sup>2</sup>, LIU Yan-xin<sup>2</sup>

(1. Shandong Science and Technology University, Taian 271019, China;

2. Baodian Mine, Zoucheng 273500, China)

**Abstract:** According to the problem existing in detecting the thickness of the coal seam, put forward the signal processing method for wavelet multiresolution analysis applying to analyzing the actual detecting signal. The processing results of the actual detecting signals indicate that the ability to identify the weak reflected wave is considerably improved and the accuracy to detect the thickness of the coal seam is increased.

**Key words:** wavelet; multiresolution analysis; thickness of the coal seam; detecting

## 1 引言

受探测条件所限, 采用极小偏移距弹性声波反射法探测煤厚, 特别是探测放顶煤开采顶煤厚度, 由于声波震源、信号处理等关键性技术问题未能得到很好的解决, 仍处在探索与研究阶段<sup>[1]</sup>。其突出问题是如何从实测信号中识别来自煤层顶板煤岩界面的反射波。因为煤厚探测的实测信号波形复杂, 反射波能量弱, 直接从实测信号中识别反射波极其困难, 这也是影响煤厚探测精度的一个重要原因。

小波分析是上世纪 80 年代中期, 在传统 Fourier 分析的基础上发展起来的新兴学科。由于小波基是一种包含尺度伸缩和时间平移的双参数的正交基, 用小波基分解的平方可积函数空间中的任意函数, 同时具有时间域和频率域双重局部分辨能力。这里, 作者在煤厚探测信号处理中采用小波多尺度分析方法, 对实测信号采用 db4 小波按不同尺度分解到相应尺度的小波空间中, 借助于小波分析对信号突变点识别能力强的特点, 比较清晰地获得了煤岩界面的反射波信号, 取得了理想的煤厚探测效果。

## 2 小波多尺度分析<sup>[2,3]</sup>

多尺度分析是将被处理的信号用正交变换在不

同尺度级上进行分解, 分解得到在低一级上的信号为平滑信号, 在高一级上的信号为细节信号。S. Mallat<sup>[4]</sup>给出了基于多尺度分析的快速小波塔式算法:

给定一尺度函数  $\varphi(t)$ , 其平移与伸缩函数  $\varphi(2^{-j}t-k)$  线性张成  $L^2(R)$  的闭子空间  $V_j$ , 则有:

$$\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots \subset V_j \subset \dots, \quad (1)$$

$$\bigcup_{j=-\infty}^{+\infty} V_j = L^2(R), \quad \bigcap_{j=-\infty}^{+\infty} V_j = \{0\}. \quad (2)$$

对于一小波函数  $\Psi(t)$ , 其平移与伸缩函数  $\Psi(2^{-j}t-k)$  线性张成闭包  $W_j$ ,  $L^2(R)$  可以分解为空间  $W_j$  的直和:

$$L^2(R) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j = \dots \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \dots. \quad (3)$$

而多尺度分析子空间  $V_0$  可以用有限个子空间逼近:

$$V_0 = V_1 \oplus W_1 = V_2 \oplus W_2 \oplus W_1 = \dots = V_N \oplus W_N \oplus W_{N-1} \oplus \dots \oplus W_2 \oplus W_1. \quad (4)$$

若令  $f_j \in V_j$  代表分辨率为  $2^{-j}$  的函数  $f \in L^2(R)$  的逼近(即函数  $f$  的平滑部分), 而  $d_j \in W_j$  代表逼近的误差即函数  $f$  的细节部分, 则(4)式意味着:

$$f_0 = f_1 + d_1 = f_2 + d_2 + d_1 = \dots = f_N + d_N + d_{N-1} + \dots + d_2 + d_1. \quad (5)$$

注意到  $f=f_0$ , 所以上式可写作:

$$f=f_N+\sum_{i=1}^N d_i. \tag{6}$$

这表明,任何函数  $f\in L^2(R)$  都可根据分辨率为  $2^{-N}$  时  $f$  的平滑部分和分辨率为  $2^{-j}(1\leq j\leq N)$  下  $f$  的细节“完全重构”。

3 煤厚探测实测信号分析

煤厚探测得到的振动记录波形是比较复杂的,包括了直达纵波和横波、面波及其他低频干扰波。由于采用小偏移距声波反射法,加之煤层残余厚度较大(4~6 m),通常反射波信号叠加在面波和后续低频干扰波上,即在原来按一定频率连续变化的振动信号中,突然叠加上了具有一定强度而频率不同的反射波信号,由此将使反射波到达之后的信号在时频特性上有所变化,而且在反射波初至时刻将产生第一种类型的间断点。既使反射波频率与后续波频率一致或接近,只要存在相位差,信号仍将具有局部突变特征。利用小波多尺度分解对信号局部特征分析的能力,可以方便地识别出信号的突变点位置。

图 1 为鲍店煤矿 23<sub>上</sub>08 综采工作面顶煤厚度实测信号,及采用 db4 小波基对信号进行 4 层小波分解图。由小波多尺度分析理论知,原始信号与各层分解结果有如下关系:

$$s(t)=a^4(t)+d^4(t)+d^3(t)+d^2(t)+d^1(t), \tag{7}$$

式中  $s(t)$  表示实测原始信号; $a^4(t)$  为第 4 层分解的低频分量,表征了实测信号的低频概貌; $d^1(t)\sim d^4(t)$  分别为第 1 层至第 4 层分解的高频分量,分别表征第 1 层至第 4 层的高频细节部分。

由图 1 可以看出,直达波信号能量强,频率高,后续波为一能量较强的低频波,来自煤层顶板界面的反射波就叠加在低频后续波上。由于反射信号微弱,从实测振动波形  $s(t)$  上很难识别反射波的到达时刻。 $a^4(t)$  实际上为低通滤波器输出的波形,已经把具有高频特征的突变信息滤掉了,只表示实测记录的低频概貌。 $d^4\sim d^1$  高频分量的能量主要集中在 4.5 ms 以前,反映了直达纵和横波的振动信息。 $d^4$  分量在 5 ms 后可以大体看到反射波的信息,但因频率低,分辨力较低。 $d^3$  分量在 4.5~6.5 ms 间可以看到两个较为明显的振动包络,分别显示了两个反射波信息。由此知反射波振动频率主要分布在  $d^3$  频段内。信号分解到  $d^3$  分量时对煤岩界面反射波已经达到了较高的分辨能力。根据已知煤层地质结构分析,第 1 个振动包络为煤层夹矸产生

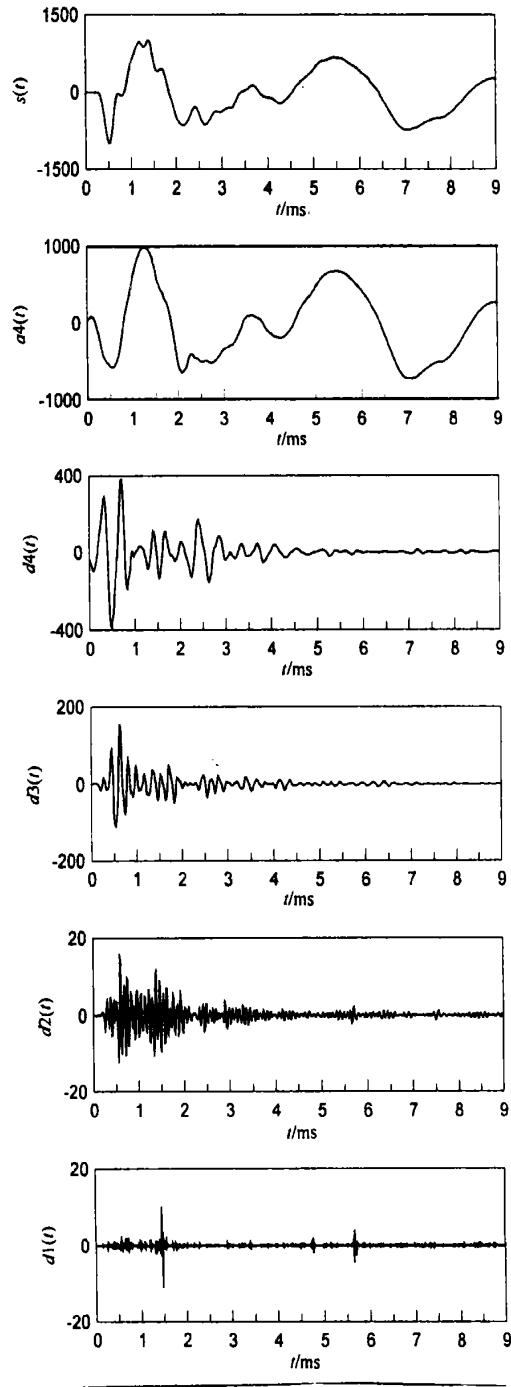


图 1 实测顶煤厚度探测信号小波分解图

Fig.1 The wavelet resolution results on the measured signals of the thickness of the top coal

的反射波,第 2 个振动包络为煤层顶板产生的反射波。 $d^2$ 、 $d^1$  分量主要反映信号的高频成份和高频噪声,已反映不出反射波的整体信息,但对反射波的初至突变点有明显的反映,由此可以确定反射波的初至时刻。通过对小波多尺度各分量的综合分析,可以确定煤层夹矸界面的反射波初至为 4.7 ms,煤层顶板界面的反射波初至为 5.7 ms。

根据事先标定的煤层速度(2 000 m/s),顶煤残

文章编号: 1001-1986(2005)05-0072-04

# 瞬时属性估计器在探地雷达数据处理中的应用

王晋国<sup>[1,2]</sup>, 廖祖文<sup>3</sup>, 魏俊波<sup>2</sup>, 田 丰<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学波动与信息研究所, 陕西 西安 710049; 2. 长安大学应用物理系, 陕西 西安 710064; 3. 中国人民解放军 94402 部队, 山东 济南 250002)

**摘要:** 为了提高浅层埋藏目标识别的瞬时物理属性的精度, 根据极平坦频率特性有限脉冲相应滤波器的思想, 首次提出用它作为微分器和延时器组成解析信号瞬时属性估计器(FIFM), 对探地雷达信号的瞬时属性进行提取。结果表明, 瞬时属性剖面的分辨率得到了明显的提高; 采用瞬时属性估计器进行探地雷达信号瞬时参数的研究是一种非常有效的方法, 可用于公路、桥梁、隧道等结构物的无损检测数据分析。

**关键词:** 瞬时属性估计器; 瞬时频率; 探地雷达; 数据处理

**中图分类号:** P631.325 **文献标识码:** A

## Instantaneous attributes estimator using in ground penetrating radar data

WANG Jin-guo<sup>1,2</sup>, LIAO Zu-wen<sup>3</sup>, WEI Jun-bo<sup>2</sup>, TIAN Feng<sup>2</sup>

(1. Institute of Wave and Information, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. The 94402<sup>nd</sup> Army of The Chinese People's Liberation Army, Jinan 250002, China)

**Abstract:** In order to advance the identifying power of the buried objects and improve the estimate precision of the ground penetrating radar(GPR) data instantaneous attributes. The instantaneous attributes estimator of analytic signal is composed of the differentiator and integrator based on FIR filters having maximally flat frequency response. They first are applied to study the instantaneous attributes in GPR data and compare with the center difference method(CFDM). The results find that the resolving power is advanced using the instantaneous frequency estimator of filter(FIFM) in GRP data. It is proved that the FIFM method is very valid to deal with the GPR data and can be applied identifying the position and shape of the buried objects.

**Key words:** instantaneous attributes estimator; instantaneous frequency; ground penetrating radar; data processing

## 1 引言

如何准确地估计信号的瞬时属性是信号处理领

域一个重要的研究课题。传统的瞬时频率估计方法首先是将实信号经过希尔伯特变换得到它的正交分量; 其次是用原实信号和其正交分量构成解析信号

收稿日期: 2005-01-31

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2004A07)资助; 长安大学校基金项目(04J01)资助

作者简介: 王晋国(1964—), 男, 陕西周至人, 博士, 副教授, 信号处理与信号分析。

余厚度为 5.7 m; 煤层夹矸至观测点为 4.7 m。在测点附近采用钻探法得到的顶煤残余厚度为 5.82 m, 测量结果与实际钻探结果非常接近, 相对误差小于 3 %。

## 4 结论

小波多尺度分析将顶煤厚度实测信号分解到不同尺度的小波空间中, 大尺度表示了信号的低频概貌, 小尺度则表示了信号的细节。通过对信号不同尺度上的分解结果, 可以综合分析判断煤岩界面的反射波信号, 从而较为准确地求得顶煤残余厚度。实测信号处理结果表明: 小波多尺度分析大大改善

了煤岩界面反射波的识别能力, 比较清晰地获得了煤岩界面的反射波信号, 取得了理想的煤厚探测效果。

## 参考文献

- [1] 朱国维, 王怀秀, 刘盛东. 声波探测综放面顶煤厚度的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(12): 17—20.
- [2] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [3] 张贤达, 保 铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition[J]. The wavelet representation. IEEE Pattern Anal. and Machine Intell, 1989, 11(7): 674—693.