

文章编号:1007-6492(2002) 01-0101-03

小波变换在路用雷达信号处理中的应用

邓 华¹, 蔡迎春¹, 张 蓓²

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 重庆大学工程力学系, 重庆 400044)

摘 要: 脉冲探地雷达回波信号是典型的非平稳、非线性信号, 采样信号中不可避免地带有各种噪声, 需进行适当处理. 小波变换时频局域性好, 是分析非平稳信号的有效工具之一. 系统地阐述了小波变换的基本理论, 并采用 Mallat 算法、小波包算法对雷达检测路面厚度的实测信号进行分析处理, 然后进行路面层厚度计算, 最后将计算结果与实际厚度相比较. 对比结果说明了小波分析应用于路用探地雷达回波信号处理的有效性.

关键词: 小波变换; 探地雷达; 信号处理; Mallat 算法; 小波包算法

中图分类号: TB 115 **文献标识码:** A

探地雷达(GPR)用于路面无损检测是近年来发展起来的新技术, 由于其测量精度高, 能满足测量误差要求, 已在国内外得到广泛应用. 路用雷达工作时, 由发射天线向地下介质发射一定中心频率的高频电磁脉冲波, 由于路面各层的介电常数及雷达波的衰减系数有明显的差异, 雷达波在层界面上产生反射, 反射回波被接收天线接收. 通过分析反射波, 可获得路面层的特征信息(如介电常数、层厚以及空洞的存在情况等). 信号处理的目的是消除干扰, 准确提取反射波的各种有用参数, 这是探地雷达检测路面成功的关键. 小波变换是一种新的信号分析方法, 它具有多分辨率分析的特点, 在时频两域都有表征信号局部特征的能力, 已广泛应用于语言识别与合成、图像处理、数据压缩、地震探测、天体识别、机械故障诊断、分形力学、信号处理等^[1], 而且在地球物理^[2]等和探地雷达相似的领域有成功的应用. 本文基于 Mallat 算法和小波包算法, 探讨小波变换用于分析路用探地雷达信号的可行性.

1 小波分析基础

1.1 小波变换基本理论

小波变换的基本思想是用一族函数表示或逼近一信号或函数, 这一族函数称为小波函数系, 它是由小波函数通过平移和伸缩构成的. 小波函数的确切定义为: 设 $\psi(t)$ 为一方可积函数, 也即

$\psi(t) \in L^2(R)$, 若满足条件

$$\int_R \frac{|\psi(t)|^2}{t} dt < \infty, \tag{1}$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波, 并称式(1)为小波函数的可容许性条件. 又设伸缩因子(也称尺度因子)和平移因子分别为 a 和 b , 则得基本小波的平移和尺度伸缩

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

信号 $f(t)$ 的连续小波变换定义为

$$WT_f(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \psi^* \frac{t-b}{a} dt. \tag{3}$$

其含义是把基本小波 $\psi(t)$ 作位移 b 后, 再在不同尺度下与待分析信号 $f(t)$ 作内积(上标 $*$ 代表取共轭). 通过调节尺度参数 a , 可使小波函数具有非均匀的时频分辨率, 即: 高频时, 频窗大时窗小; 低频时, 频窗小时窗大. 小波变换的这些特点使其具有多分辨能力, 适于分析非平稳信号.

1.2 Mallat 算法^[4]

小波变换 Mallat 算法为离散小波变换的一种快速算法, 它将信号分解为频率较低成分和频率较高成分, 之后不再对频率较高成分进行分解, 而只对频率较低成分不断地进行级联分解, 因而对低频部分有较高频率分辨率, 而高频部分的频率分辨率较低.

分解公式

收稿日期:2001-10-16; 修订日期:2001-12-20

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(19625205)

作者简介: 邓 华(1977-), 女, 湖南省祁阳县人, 郑州大学硕士研究生, 主要从事探地雷达信号处理方面的研究.

$$c_k^j = \sum_n h(n-2k) c_k^{j-1},$$

(5)

$$d_k^j = \sum_n g(n-2k) c_k^{j-1};$$

(6)

重构公式

$$c_k^{j-1} = \sum_n h(k-2n) c_k^j + \sum_n g(k-2n) d_k^j.$$

(7)

式中: c_k^j 代表分辨率 j 下的离散“模糊”信号,即该分辨率下对原信号的平滑逼近; d_k^j 代表分辨率 j 下的离散细节信号,即该分辨率下小波变换所得的序列,对应于高频成分; h, g 分别为正交滤波器的低通和高通冲击响应系数.

1.3 小波包算法^{3,4}

小波包算法是对信号的低频和高频成分同时进行多级分解,对低频频段和高频频段都具有相同的时频分辨率.可见,利用小波包变换可以将信号按任意时频分辨率(满足测不准原理)分解,将不同频段的信号正交分解到相应频段内,因而适合于分析位于各种频段的信息.

分解公式

$$x_{2m}^{j-1}(n) = \sum_k h(k-2n) x_m^{j-1}(k),$$

(8)

$$x_{2m+1}^{j-1}(n) = \sum_k g(k-2n) x_m^{j-1}(k);$$

(9)

重构公式

$$x_m^{j-1}(n) = \sum_k \overline{h(n-2k)} x_{2m}^{j-1}(k) + \sum_k \overline{g(n-2k)} x_{2m+1}^{j-1}(k).$$

(10)

式中: $x_m^{j-1}(n)$ 为序列 $f(n)$ 经 j 层小波包分解所得的第 m 个分解序列; $\overline{h}, \overline{g}$ 为 h, g 的对偶算子.

1.4 路用雷达信号特点分析

路用雷达回波信号主要由收发天线间直接耦合波、地面反射波、路面层界面反射波、随机干扰等构成,具有非平稳性、非线性衰减等特点.小波变换时频局域性好,通过尺度的伸缩可实现时频域分辨力的大小变化,适应于非平稳信号的处理,因此可用于分析路用雷达信号.另外,在探地雷达测量中,为了得到更多的反射波特征,通常利用宽频带进行记录,通过对实际信号的频域分析可知,雷达信号主要位于记录频带的低频段.信号的小波变换本质上是 将信号分解为各种不同频率的细节成分,由此可根据对不同频率成分的适当处理而获取所需信息.由前述 Mallat 算法与小波包算法的特点知,两种算法均适用于分析路用雷达信号.

2 实例分析

实验时采用 Pulse Radar 公司生产的路用探地雷达,探测沥青混凝土路面的厚度,测试时所用天

线中心频率为 1 GHz,选用时窗为 18 ns,每次扫描采样点数为 256 个(即采样频率约为 14.2 GHz).信号处理时首先利用小波变换将信号分解到不同频段内,再根据先验频率知识,选取所需频段信息对信号进行重构.在用小波变换进行信号处理时,选取适当的小波函数很重要,应针对不同的目的以及各种信号的具体形式来进行选择.一般的选取原则是尽量使小波波形近似于待测瞬态信号³,由于探地雷达信号具有衰减震荡特征,本文采用 sym5 小波.

例 1 滤波去噪:在路面检测时,探地雷达回波信号不可避免地包含有各种噪声,影响反射波的真实特征,为此需要对其进行一定的处理.图 1 为一实测信号(为了突出处理效果,夸大了白噪声),以及经三层小波变换(采用 Mallat 算法)处理后的波形,比较可见,处理后除了滤去噪声,还会产生一定的边缘效应,但这不影响厚度计算.由处理后的波形进行计算,所得的面层厚度结果与实际厚度吻合较好,结果如表 1 所示.

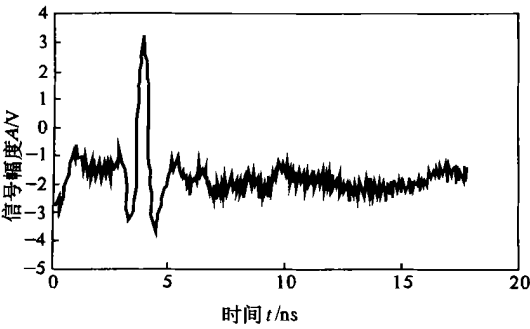
表 1 处理前后计算厚度与实际厚度对照表
Tab. 1 Comparison between actual thickness and calculated thickness

		and calculated thickness		
项目	料质	实际厚度/cm	处理前计算厚度/cm	处理后计算厚度/cm
滤波去噪	沥青	8	9.3	8.4
	混凝土			
薄层识别	沥青	5	8.7	5.3
	混凝土			

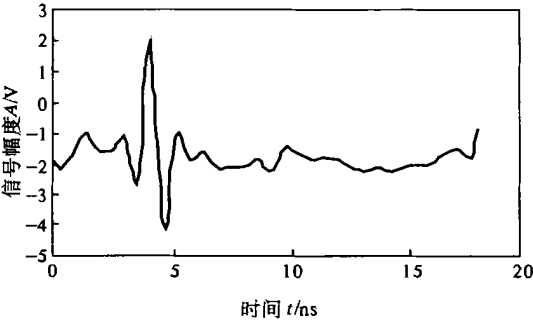
例 2 薄层识别:当路面层厚度较小时,上下两界面反射波发生叠加,会导致一些界面层得不到明显反映,势必影响层厚计算.图 2 为探地雷达检测某一沥青混凝土路面(薄面层)所得的信号,以及经过三层小波包变换处理之后的波形.对图 2(a)中原始信号,由于面层较薄,因此它的下界面反射波与上界面反射波及下一层的上界面反射波发生叠加,在波形上反映出来的为两个界面(即在图中表现为 $c1, c2$ 两个波峰).经过处理后,图 2(b)中的波形明显比原始信号多出一个波峰(即为 $d1, d2, d3$),由此表明小波分析可以识别出薄层.经计算也发现,处理后比处理前所得面层厚度与实际厚度更接近,如表 1 所示.

3 结束语

路用雷达回波信号包含反映路面层特征的信息,但由于各种干扰,一般直接从采样信号中很难准确获取所需信息,这就需要对其进行一定分析



(a) 原始波形



(b) 处理后的波形

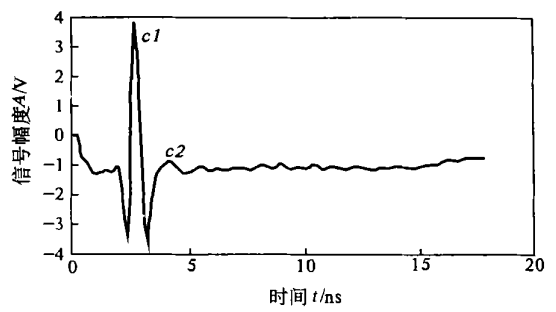
图 1 路面检测原始波形与处理后的波形

Fig. 1 Original signal and procesed wave of pavement detection

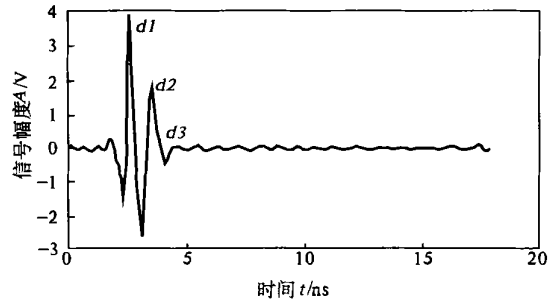
和处理. 本文将 Mallat 算法和小波包算法应用于滤波去噪和薄层识别, 实例表明, 小波变换应用于路用雷达信号处理具有可行性, 但也存在一些问题: 用文中方法进行去噪需对接收信号的频段有先验知识; 目前还未能自行构造一种专门适用于路用雷达信号处理的基本小波.

参考文献:

[1] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.



(a) 原始波形



(b) 处理后的波形

图 2 原始波形与处理后的波形(薄面层)

Fig. 2 Original signal and processed wave (thin surface layer)

[2] KUMAR P, FOUFOULA —GEOGIOU E. Wavelet analysis for geophysical applications[J]. Reviews of Geophysics , 1997, 35(4) : 385 — 412.

[3] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[4] 高金峰, 李祥飞, 王俊鹏, 等. 小波包算法在电力变压器局放信号检测中的应用[J]. 郑州工业大学学报, 1999, 20(2) : 8—11.

[5] 高静怀, 汪文秉, 朱光明, 等. 地震资料处理中小波函数的选取研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3) : 392—400.

The Application of Wavelet Transform to Processing the Signals of Ground Penetrating Radar

DENG Hua¹, CAI Ying —chun¹, ZHANG Bei²

(1. College of Environmental & Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China ; 2. Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract : Signals of a pulse —echo mode ground penetrating radar (GPR) are typically nonstationary and nonlinear . There are inevitably various sorts of noise in the sampling signals , so they must be processed properly . wavelet transform is a good tool to analyze nonstationary signals . In this paper , the basic theory of wavelet transform is described , and Mallat algorithm and wavelet packet are used to analyze the signals that are obtained by measuring some asphalt pavements . After calculating the thickness of pavement layers , the results are compared to the actual values . The results show that the technique can be effectively applied to GPR signal processing .

Key words : wavelet transform ; GPR ; signal processing ; Mallat algorithm ; wavelet packet algorithm