小波包特征提取法在探地雷达回波信号分析中的应用

王唯,郑正奇,王晓华,夏薇

(华东师范大学信息学院,上海 200062)

摘要:论述了用三角波雷达探测地下金属目标物的原理,介绍了小波包理论,给出了小波包特征提取的算法。同时利用小波包特征提取算法对雷达回波信号进行数据处理,并给了在实验室条件下探测的结果。 关键词:探地雷达:三角波,小波包变换,信号分析

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 8918(2005)02 - 0149 - 04

探地雷达可以应用在工程质量无损探测、金属 探伤、地下介质的检测等诸多方面。目前国内外使 用脉冲雷达进行地下探测的研究比较多,这种方法 在雷达和目标间距离远的情况下比较适用。在实际 应用中,有许多情况是探测离地面很近的目标,如探 测距离1m以内时,该方法使用起来很困难,而采用 连续三角波调频的方法可以比较好地探测到近距离 的目标。

雷达回波信号非平稳或时变时,用于分类的特 征往往包含在局部的时-频信息中,用一般的变换方 法提取有效的征特比较困难。傅里叶变换(DFT)是 一种纯频率变换,具有最优的频率分辨率,最差的时 间分辨率,不能提供任何局部时间段上的频率信 息,所以用来提取时变信号的特征通常效果不佳。 短时傅里叶变换(STFT)具有时-频分析能力,但时 频单元(窗)是固定的。近年来提出的小波、小波包 理论是非平稳信号分解到不同层次、不同频道的 序列,为非平稳信号特征的提取提供了新的有效的 手段。笔者利用 Haar 小波系对信号进行三层小波 包分解。

1 雷达系统简介

雷达系统主要包括雷达信号的发射和接受装置 及检测设备,包括三角波发生器、压控振荡器、微波 功放、发射接收天线、环行器、滤波器、检波器和数据 采集 A/D 模块。其中,系统的信号发射和正确接收 是整个系统比较关键的部分。发射机产生连续高频 (650 MHz~1.2 GHz)等幅波,其频率在时间上按三 角形规律变化。反射回来的回波信号和发射机耦合 过来的微波信号进行差频。由于发射波传播到地表 及其以下并返回到接收机的这段时间内,发射机频 率较之回波频率已有了变化,因此,在检波器输出端 便出现了差频信号。这个差频信号的频率和幅值上 的变化直接反映了地表以下金属目标物的特征。

2 小波包理论及构造

小波包由 Coifman ,Meyer ,Quaker ,Wickerhauser (CMQW)提出。若 h_{{k}k=z}和 g_{{k}k=z}是一组共轭镜 象滤波器(QMF),即

$$\sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{n-2k} h_{n-2l} = \delta_{kl} , \sum_{n \in \mathbb{Z}} h_n = \sqrt{2} , \quad (1)$$

$$g_k = (-1)^k h_{1-k}, k \in \mathbb{Z}$$
, (2)

则可定义一系列函数 W_n(x) n = 0,12...如下

$$W_{2n} = 2 \sum_{k=0}^{2N-1} h(k) W_n(2x-k) , \qquad (3)$$

$$W_{2n+1} = 2 \sum_{k=0}^{2N-1} g(k) W_n(2x-k)$$
 (4)

对于每一形如 $W_n(2^{-j}x-k)$, $k \in Z$, $n \in N_+(N_+)$ 非负整数集合)的函数称做一个小波包函数, 其全 体叫做一个小波包库, 其中 j 是尺度参数, k 是时间 或位置参数, n n 是振荡参数。其中函数 $W_0(x) = \phi(x)$ 是所谓的尺度函数, $m W_1(x) = \psi(x)$ 是相应 的小波函数。与选择的小波相对应的 2 个长为 2N的滤波器 h(n)和 g(n), 分别是低通分解滤波器和 高通分解滤波器的被 $\sqrt{2}$ 除过之后的重构滤波器。

研究中使用的是 Haar 小波,它是小波分析中最 早用到的一个具有紧支撑的正交的小波函数,同时 也是最简单的一个函数(图1)。

Haar 函数的定义为





$$\psi_{\rm H} = \begin{cases} 1 & 0 \le x \le 1/2 \\ -1 & 1/2 \le x \le 1 \\ 0 & \notin t \end{cases}$$

所以
$$h(0) = h(1) = 1/2$$
, $N = 1$;
 $g(0) = -g(1) = 1/2$, $N =$

티 나

则等式(3),(4)式变成

 $W_{2n}(x) = W_n(2x) + W_n(2x-1)$ $W_{2n+1}(x) = W_n(2x) - W_n(2x-1)$,

N = 1

 $W_0(x) = \phi(x)$ 是 Haar 尺度函数; $W_1(x) = \psi(x)$ 是 Haar 小波函数 2 个函数的支撑长度均在区间[0, 1]上。从上式可以看出,可通过把支撑区间分别在 [0,1]和[1/2,1]内的2个1/2尺度的 W, 加起来获 得 W₂函数。同样,可以通过把支撑区间分别在[0, 1/2]和[1/2,1]内的2个1/2 尺度的 W, 相减获得 W_{2n+1} •

实验步骤及结果 3

本系统适用于路面、桥面参数监测的探地雷达 和桥体参数检测的相干雷达 ,最终是为实现桥下或 地下的管道及其电缆的探测。因此研究的主要目的 是如何辨别地下目标(特别是金属物质)的轮廓及 其材质。

3.1 系统硬件的实现

在本系统中,三角波的调制频率电路选用了 LM566——用于产生三角波的通用型电压控制振荡 器和 LF353 放大器来实现。滤波器电路设计了1个 六阶有源切比雪夫多路反馈高通滤波器。检波器能 够将回波信号和发射机耦合回来的信号进行差频。 A/D 转换使用的是 Analog 公司的 AD9221 并行 12 位模数转换芯片,采样速率可达1.5 MSPS。MCU 选用的是 PHILIPS 公司的 P89C51RC2BP,该芯片具 有 32K 的 FLASH ROM 的 8 位 MCU 将完成 A/D 转 换控制、每1024个数据的存储和与PC机的串行通 信等功能示有整整 串口通信将通过 MSCOMM 控件

灵活控制完成。

3.2 小波包提取特征的步骤

当用一个含有丰富频率成分的信号作为输入对 系统进行激励时,由于目标物对各频率成分的响应 不同 通常它会明显地对某些频率成分起着抑制作 用,而对另外一些频率成分起着增强作用,所以有目 标物和没有目标物相比、不同目标物之间相比,在相 同频带内信号的能量有着较大的差别。在各频率成 分信号的能量中 包含着丰富的目标物信息 某种或 几种频率成分能量的改变就代表了目标物的情况。

我们所用的算法总结如下:

(1) 对采样信号进行小波包分解。首先对接收 到的差频信号的 A/D 采样信号进行 3 层小波包分 解,分别提取第三层从低频到高频8个频率成分的 信号特征,其分解结构见图2。图中,V:表示第 i 层 的第j个低频系数, W_i 表示第i层的第j个高频系 数。如 V_0 为原始信号S。第三层的8个高、低频系 数统一命名为 X_{3k} k 为该系数位于第三层系数中左 数从0起计数的位置,例如 V₃₁位于第三层的第0 个,可命名为*X*₃₀,*W*₃₃为*X*₃₅。



图 2 小波包 3 层分解示意小波包构造

(2) 对小波包分解系数重构 提取各频带范围 的信号。以 *S*₃₀表示 *X*₃₀的重构信号 *,S*₃₁表示 *X*₃₁的 2期

重构信号,其它依次类推。在这里,只对第三层的所 有节点进行分析,则总信号 *S* 可以表示为

 $S = S_{30} + S_{31} + \ldots + S_{36} + S_{37}$

假设原始信号 *S* 中,最低频率成分为 0,最高频率成 分为 1,则提取的 *S*₃(*j* = 0,1,...,7)8 个频率成分所 代表的频率范围见表 1。

表1 小波包分解后的相对频率范围

信号	S ₃₀	S ₃₁	S ₃₂	S ₃₃	
频率范围	0~0.125	0.125~0.250	0.250~0.375	0.375 ~0.500	
信号	S ₃₄	S ₃₅	S ₃₆	S ₃₇	

(3) 求各频带信号的总能量。设 *S*_{3j}对应的能 量为 *E*_{3j} *j* = 0, 1, ... 7, 则有

$$E_{3j} = \int |S_{3j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{jk}^2|$$

其中 x_{ji}(j=0,1,...,7,k=1,2,...,n)表示重构信 号 S₃i的离散点的幅值。

(4)构造特征向量。当系统中有目标物时,会 对各频带内信号的能量有较大的影响,因此,以能量 为元素构造1个特征向量*T*,

 $T = [E_{30} \ E_{31} \ \dots \ E_{36} \ E_{37}]_{0}$

当能量较大时 ,*E*₃(*j* = 0 ,1 ,... ,7)通常是一个较大的数值 ,在数据分析时会带来一些不方便。由此 ,可以对特征向量 *T* 进行改进 ,即对向量进行归一化处理 ,令

$$E = \left(\sum_{j=0}^{7} |E_{3j}|^2\right)^{1/2} ,$$

$$T' = \left[\frac{E_{30}}{E}, \frac{E_{31}}{E}, \dots, \frac{E_{36}}{E}, \frac{E_{37}}{E}\right] ,$$

向量 T'即为归一化后的向量。

3.3 实验结果

我们在有金属目标物和无目标物的情况下各采 用了 30 组数据。滤波可能滤掉部分有用信号的特 征,所以研究所用信号均未经过滤波处理。将它们 第三级小波包分解得到的 8 个频带对应的数量特征 是 8 ×1 的矩阵。小波包分析得到的归一化向量见 表 2(限于篇幅仅举出 4 组数据为例)。

实验中我们改进了硬件的采集速率,也为采集 这种未经过滤波的数据提供了可能性。实际在后期 的信号处理中,用小波包可以把信号分解到想要的 任意细节,很巧妙地将各个频段分离,以便于对信号 进行频谱分析,为更好地进行数据分析提供方便。 这里只用 db1 小波函数分解到第三层就可以很轻松 地识别出目标物,所以利用小波包处理本系统的信 号实际上冗余度很大,但是鉴于算法很简单,运算速

表 2 小波包分析后的特征向量

频带	有金属时				无金属时				
	第14	组	第2组	第3组	第4组	第1组	第2组	第3组	第4组
1	0.999	9	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
2	0.011	6	0.0118	0.0114	0.0120	0.012	0.012	0.012	0.012
3	0.005	58	0.0058	0.0057	0.0059	0.0059	0.0060	0.0060	0.0059
4	0.001	5	0.0016	0.0014	0.0016	0.0012	0.0017	0.0017	0.0016
5	0.003	31	0.0032	0.0031	0.0031	0.0031	0.0032	0.0032	0.0032
6	0.001	1	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	0.0013	0.0013	0.0014
7	0.001	1	0.0011	0.0012	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
8	0.001	0	0.0011	0.0011	0.0011	0.0012	0.0013	0.0012	0.0013



图 3 小波包分解系数

度也很快,识别率高,所以利用此方法完成本系统的 数据处理。各个频段分解的小波包系数见图3所示。 可以看出,有、无金属时,第04550段上,即表1中 的0~0.1250.500~0.6250.625~0.750频段,差别 较明显。

4 结语

应用小波包分析对金属目标的回波信号进行了 处理,由于金属目标反射信号强,直接应用小波包分 析就得到了较为理想的结果,对于反射信号较弱的非 金属目标的分析处理还有待于进一步研究。三角波 探地雷达信号处理是一个尚处在发展中的领域,由于 探测背景复杂,信号频谱宽,携带的信息量大,对这种 信号进行有效处理的理论远没有经典窄带雷达系统 的信号处理理论发展得成熟,还有许多未知等待我们 去探索。小波包分析卓越的时频分辨率,及其自适应 性,在检测浅层反射信号和对信号定位方面有较好的 应用前景。

参考文献:

- [1] 汪源源. 现代信号处理理论和方法[M]. 上海 复旦大学出版社, 2003.
- [2] 王首勇,朱光喜,唐远炎.应用最优小波包变换的特征提取方法[J].电子学报 2003 (7):1305-1308.
- [3] Learned Rachel E ,Willsky Alan S. A Wavelet Packet Approach to Transient Signal Classification [J]. Applied and Computational Har-

monic Analysis ,1995 (2) 265 – 278.

- Won G K M ,Wu J ,Davidson N N ,et al. Wavelet packet division multiplexing and wavelet packet design under timing error effects
 J IEEE Trans Signal Processing 1997 45(12) 2877 - 2890.
- [5] Daubechies I. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis [J]. IEEE Trans on Info Theory ,1990 ,36 (9) 961 - 1005.

THE APPLICATION OF WAVELET PACKET TRANSFORM TO THE ANALYSIS OF RADAR SIGNALS

WANG Wei ZHENG Zheng-qi ,WANG Xiao-hua XIA Wei

(School of Information , East China Normal University , Shanghai , 200062 , China)

Abstract : In this paper, the theory of using triangular radar to detect the metallic target is discussed, and the wavelet packet transform and its algorithm are also described in detail. The method of applying wavelet packet transform to pick up characteristics of radar signals is recounted, and the in-door experimental detection results are given.

Key words :[WT5 "BZ | triangular wave Ground Penetrating Radar ,wavelet packet transform signal analysis

作者简介:王唯(1978 –),女,山东人。华东师范大学2002级硕士研究生,主要研究方向,雷达探测、信号处理。

上接148页

THE AUTOMATIC INTERPRETATION TECHNIQUE OF GROUND-PENETRATING RADAR DATA IN HIGHWAY STRUCTURE INSPECTION

FANG Hui^{1 2} XIAO Du²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: The ground-penetrating technique has been widely used in highway structure inspection. According to the regularities of reflection and refraction of the surface electromagnetic wave that take place at the interface between media with different physical properties, the amplitude and traveltime information of the radar-measured signal was used to realize the rapid automatic interpretation of road layer thickness. The numerical simulation analysis and the measured data were utilized to test the interpretation technique, and the result proves the effectiveness of this technique.

Key words : ground-penetrating radar ; highway inspection ; automatic interpretation

作者简介 : 方慧(1965 –),男,教授级高级工程师,1986 年毕业于长春地质学院,获学士学位,1993 年获中国地质大学(北京) 硕士学位,在读博士。现就职于中国地质科学院物化探所,主要从事电磁法方法技术研究。