

文章编号: 1005-0523(2007)04-0056-03

# 去除探地雷达信号中不相关噪声的方法

廖立坚, 杨新安, 黄小平

(同济大学 城市轨道交通与铁道工程系, 上海 200092)

**摘要:**根据有效信号在相邻道之间在波形和能量上有相关性这一特点, 作者改进了常规 KL 变换只能提取水平相关信号的不足, 使用小波域上的 KL 变换对探地雷达剖面进行滤波, 不仅使倾斜轴和弯曲轴的到了加强, 而且在低信噪比时, 有效地区分出有效信号和干扰信号, 提高了雷达剖面的分辨率. 本文运用铁路沪宁线路基检测的数据, 使用该方法滤波, 其处理后的剖面更能有效地反映出路基病害的信息.

**关键词:**KL 变换; 滤波; 探地雷达; 小波

**中图分类号:**TU45

**文献标识码:**A

## 1 引言

探地雷达勘探中, 用数字仪记录雷达波时, 为了保持更多的波的特征, 通常采用宽频带进行记录, 因此, 在宽频带范围内记录了各种反射波的同时, 也记录了各种干扰波(噪声). 根据相邻道反射波的有效成分(去除噪声的有用信号)在波形及能量上具有较强的相关性, 使用 KL 变换可以保留某一方向(如水平方向)的相关信号, 从而压制不相关噪声和其他波<sup>[1]</sup>. 但是在信噪比较低时, 完全从时域的角度来考虑信号的能量相关性就存在一定的缺陷, 因此, 作者把具有很强时频分析能力的小波变换与 KL 变换结合起来, 对探地雷达信号去噪. 这种方法既能很好地保持波的动力学特征, 又能适用于低信噪比的雷达资料去噪.

## 2 去噪原理及实现方法

### 2.1 常规 KL 变换的原理

设给定的探地雷达数据  $X$  为  $m \times n$  的矩阵, 第  $i$  行表示第道数据, 第  $j$  列表示第  $j$  个时刻的采样值. 为了最大限度地解释变量变化的原因, 在数学上就是求  $L$ , 使得  $L^T X$  的协方差阵最大, 记  $L^T X$  的协

方差阵为  $Cov(L^T X)$ , 有:

$$\begin{aligned} Cov(L^T X) &= E(L^T X - E(L^T X))(L^T X - E(L^T X))^T \\ &= L^T E(X - E(X))(X - E(X))^T L \\ &= L^T \sigma L \end{aligned} \quad (1)$$

实际计算协方差阵时  $\sigma$  可用  $XX^T$  代替. 当  $L$  为  $\sigma$  的特征向量矩阵  $U$  时(1)式取最大值:

$$\Psi = U^T X \quad (2)$$

(2)式是  $X \rightarrow \Psi$  的变换式, 这就是通常所说的 KL 变换. 重建信号能量的大小由特征值的大小决定, 用  $\sigma$  的较大的几个特征值对应的特征向量组成的矩阵  $U^T$  重构原始信号  $X$ , 写成矩阵形式为:

$$X = U\Psi \quad (3)$$

### 2.2 倾斜 KL 变换的步骤

使用常规 KL 变换去噪声时要求剖面中同相轴接近水平, 否则不仅去噪效果较差, 同相轴也会遭到破坏. 这里我们将常规的 KL 变换改进为倾斜 KL 变换, 它是设置一定大小的道间窗口, 在窗口中将倾斜轴和弯曲轴逼近水平轴再进行 KL 变换, 其具体步骤如下<sup>[2]</sup>:

对雷达数据剖面划分道时窗(如取道宽为 21 道), 逐道滑动道时窗. 对每个道取出前 10 道数据和后 10 道数据构成时窗(前面不足 10 道从后面取, 后面不足 10 道从前面取, 取够 21 道数据为止)做如下

处理:

1) 根据雷达剖面同相轴倾斜情况选取一组倾角  $d_k (k=1, 2, \dots, L)$ , 若同相轴向下倾斜, 则倾角取正值; 反之, 则倾角取负值. 所取倾角值以采样点/道为单位, 表示同相轴在两道上相差几个采样点.

2) 用一个倾角  $d = d_k$  对雷达数据道  $X_i = (x_{i-10}, x_{i-9}, \dots, x_i, \dots, x_{i+9}, x_{i+10})$  进行线性时差校正以拉平同相轴, 得到  $X_i^{(1)}$ , 即:  $X_{ij}^{(1)} = X_{i(j+d)}$

3) 对经过线性时差校正后的  $X_i^{(1)}$ , 计算  $X_i^{(1)} (X_i^{(1)})^T$  的全部特征值和特征向量, 得到变换矩阵  $U$ , 用(2)式进行 KL 变换, 再用(3)式得到 KL 重建记录  $X_i^{(2)}$ .

4) 对雷达数据  $X_i^{(2)}$  做反线性时差校正进行恢复得到  $X_i^{(3)}$ , 即:  $X_{ij}^{(3)} = X_{i(j-d)}^{(2)}$

5) 用其余倾角重复进行上述 2)、3)、4) 步, 然后将所有处理结果叠加起来取平均值作为最终处理后雷达剖面, 即:  $x_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L x_{ij}^{(3)}$

### 2.3 小波域上的 KL 变换去噪的实现方法

设  $X = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_i, \dots, \hat{x}_m)^T$ ,  $\hat{x}_i$  表示第  $i$  道的数据, 对其进行  $n$  层小波分解, 如图 1. 令:

$$y_i = \hat{x}_i, A_n, \hat{x}_i, D_n, \hat{x}_i, D_{n-1}, \dots, \hat{x}_i, D_2, \hat{x}_i, D_1$$

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m)^T$$

把雷达数据看成是  $Y$ , 进行上述倾斜 KL 变换, 再把结果做  $n$  层小波重构, 就得到了滤波后的雷达数据.

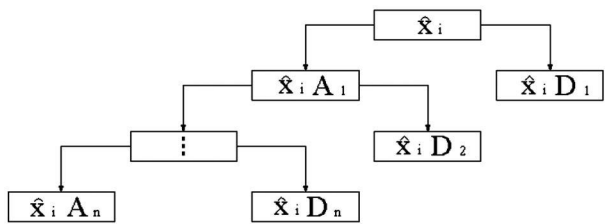


图 1 信号的  $n$  层小波分解

## 3 工程应用

### 3.1 各种 KL 变换效果的比较

图 2(a) 为采用美国生产的 SIR 型探地雷达对下水道探测的结果, 从图中我们可以看到由于管线对电磁波的绕射作用形成很多弯曲同相轴. 图 2(b) 为经过常规 KL 变换滤波后的结果, 可以看到常规 KL 变换虽然增强了水平同相轴, 但是弯曲轴和倾斜轴都遭到严重破坏. 图 2(c) 为经过倾斜 KL 变换滤波后的结果, 弯曲轴和倾斜轴得到较好的保留. 图 2(d) 为经过小波域 KL 变换滤波后的结果, 不仅弯曲

轴和倾斜轴保留得很好, 而且在深部信噪比较低的情况下, 依然能够较好地增强有效信号.

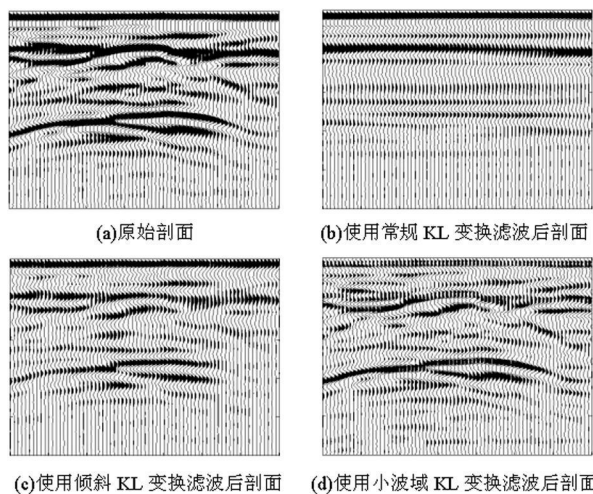


图 2 三种滤波结果对比图

### 3.2 沪宁线上路基的检测

以下为采用瑞典生产的探地雷达 REMAC 对铁路沪宁线进行探测, 中心频率选择 500 MHz, 采样点数为 480 个, 道间距 1 米. 图 3(a) 是对一段正常线路检测的剖面图, 图 3(b) 是对一段存在翻浆冒泥病害线路进行检测的剖面. 我们可以看到有三层界面, 分别在道碴表面层以下 0.35 m, 0.50 m 和 1.00 m, 后经开挖得出 0.00~0.50 m 左右是道碴层, 0.50~1.00 m 为基床表层填土, 1.00 m 为基床底层粘土顶层. 而 0.35 m 处存在一个很薄的砂垫层, 由于厚度很薄只有 0.1 m 左右, 所以雷达图像表现为只有一个连体的雷达反射波.

取道时窗为 21, 重建能量为 60%, 分别对图 3 的两个剖面做倾斜 KL 变换去噪, 得到图 4, (a)、(b) 分别与图 3 对应.

选择著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的 db4 小波(因为它具有近似对称性, 正则性好, 能准确地表达信号在时域的局部特征和快速计算)分别对图 3 的两个剖面做小波域上的 KL 变换去噪, 分解层数选择三层, 处理后的剖面如图 5, (a)、(b) 分别与图 3 对应.

从图 3 中, 我们很难区分该路基是否发生病害. 经过倾斜 KL 变换后, 从图 4(b) 看到砂垫层(3.50 m)上面存在着波形紊乱现象. 经过小波域的 KL 变换后, 从图 5(b) 看到砂垫层(3.50 m)上面波形紊乱非常明显, 可以确定为翻浆冒泥现象. 随着深度的加深, 反射波振幅急剧衰减, 信号比降低, 但图 5 中深部界面比以前更加清楚. 可见在信噪比较低时, 从时频上对信号做的 KL 变换(小波域上的 KL 变换)比

只从时域上考虑的 KL 变换(倾斜 KL 变换)更有利于去噪.

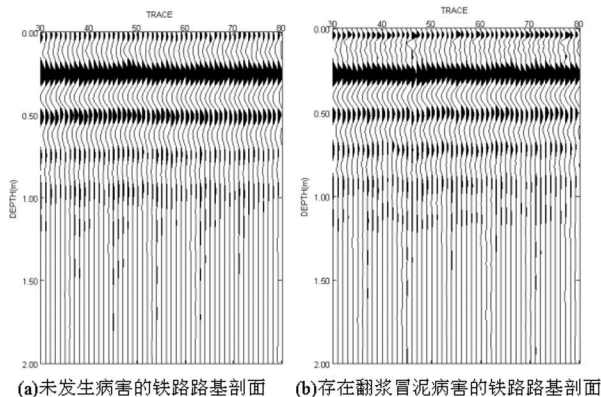


图3 探地雷达原始剖面

## 4 结论

小波域上的 KL 变换不仅改进了常规 KL 变换仅加强水平同相轴的缺陷,使倾斜轴和弯曲轴也能

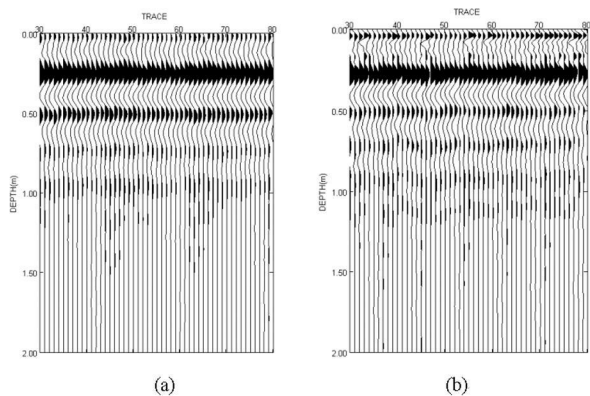


图4 经过倾斜 KL 变换去噪后的剖面

得到加强.而且在低信噪比时,较倾斜 KL 变换更有利于对噪声的去除,提高了探地雷达剖面的分辨率.

对于不同信噪比和不同倾斜界面的雷达剖面,通过调整 KL 变换的倾角个数、重建能量和小波变换的分解层数对其进行处理,可以达到满意的滤波效果.

这种方法对于去除不相关噪声效果较好.结合时频分析方法去除相关噪声还有待于进一步研究.

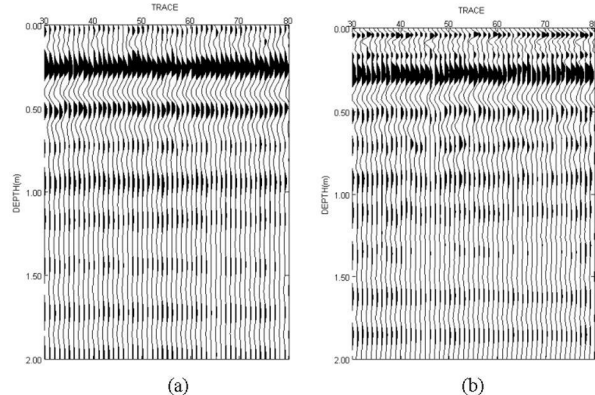


图5 经过小波域的 KL 变换去噪后的剖面

### 参考文献:

- [1] 岳承祺,唐权钧.用 KL 变换提高多道地震记录的信噪比[J].石油地球物理勘探,1988,23(5):560—568.
- [2] 吴剑华,刘贵忠.基于小波变换域上的 KL 变换的地震信号去噪方法[J].信号处理,1997,13(4).
- [3] 杨新安,高艳灵,刘征.论铁路既有线路基检测[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增):2363—2366.
- [4] 杨新安.云台山隧道与两端线路路基病害的探地雷达检测[J].地质科技情报,2002,21(4):86—88.
- [5] 杨新安,高艳灵.沪宁铁路翻浆冒泥病害的地质雷达检测[J].岩石力学与工程学报,2004,23(1):116—119.

## Method of De-Noising Irrelevant Noise of GPR

LIAO Li-jian, YANG Xin-an, HUANG Xiao-ping

(Department of Urban Track and Railway Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on characteristic of relevance of wave form and energy of effective signal among neighbouring traces, the author fills up the deficiency in extraction of horizontal coherent signal with traditional KL transform and uses KL transform in wavelet domain to filter GPR data. Not only are axis of tilt and bending axis intensified, but also signal is effectively distinguished from interference signal when signal-to-noise ratio is low. So the resolution of GPR plot is improved. After the GPR data from exploration of Shanghai-Nanjing railway subgrade is filtered with the method mentioned above, it is easier for the GPR plot based on it to reflect the subgrade problems.

**Key words:** KL transform; filtering; GPR; wavelet KL