

利用改进的 f - k 滤波方法压制探地雷达中的线性干扰

张力文, 聂俊丽

(贵州大学国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室, 贵州贵阳 550025)

摘要: 由倾斜界面产生的空间干扰在探地雷达剖面中表现为具有一定倾向的线性干扰, 通常采用 f - k 滤波方法来压制线性干扰。然而, 由于常规的 f - k 滤波方法采用FFT变换中的复共轭特征, 对实际数据中存在的负视速度(负波数)信号没有特别关注和处理, 对线性干扰的压制效果不理想, 这对数据的解译有着很大的影响。为此, 本文对 f - k 滤波方法进行改进, 实施过程中对雷达数据经 f - k 变换之后, 在负波数到正波数进行全域分析, 区别压制实际数据中的负波数信号, 而不仅限于压制正波数信号变换之后的对称负波数信号。改进之后的 f - k 滤波方法在模拟数据和实际生产数据中均能有效压制此类线性干扰, 凸显探测目标。

关键词: 探地雷达; f - k 滤波; 空间干扰; 线性干扰

中图分类号: P631.1

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)06-1444-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200986

Suppression of Linear Interference Signal in GPR Profiling by Improved f - k Filtering Approach

ZHANG Li-wen, NIE Jun-li

(Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard, Ministry of Land Resource, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: The space interference generated by the inclined interface is a linear noise with a certain tendency in the GPR profile, and it can be suppressed by f - k filtering approach. Because the conventional f - k filtering method uses the complex conjugate feature of FFT transform, it does not pay special attention to and process the negative apparent velocity (negative wave number) signal in the actual data, and the suppression effect of linear interference wave is not ideal, which has a great impact on the data interpretation. Therefore, this study improves the f - k filtering method. In the process of filtering, this study analyzes the data of positive and negative wave number domain after f - k transformation of actual GPR data, and identifies and suppresses the positive and negative wave number signals in the actual data respectively. The improved f - k filtering method can effectively suppress the linear noise and highlight the detection target in both simulation data and actual production data.

Key words: ground penetrating radar; f - k filtering; space interference; linear noise

1 引言

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)以其快速无损、探测精度高等特点, 被广泛用于工程检测^[1,2]、环境保护^[3,4]、文物考古^[5-7]、地质灾害^[8,9]、反恐安检^[10,11]、水文水利^[12]等领域, 是浅表地球物理探测技术中重要的手段。在探测过程中, 探地雷达会不断接收到周围物体界面反射的电磁波信号, 这些信号不仅包括

天线下方的反射信号, 还包括天线四周的反射信号, 四周的反射信号会对雷达解释造成一定的干扰, 尤其是由墙体、倾斜地层等面状界面产生的空间干扰, 这些干扰在雷达剖面表现为具有一定倾向的线性干扰, 其能量强、范围广。因此, 压制这种线性干扰对探地雷达数据的解释至关重要。

针对数据中的线性信号, 地震数据处理中常采用

收稿日期: 2020-09-06; 修回日期: 2021-04-30; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 贵州大学引进人才科研(贵大人基合字(2014)62号); 陕煤集团重大项目(No.2018SMHKJ-A-J-03); 干旱生态脆弱区煤炭基地生态修复与保护研究项目(No.GJNY2030XDXM-19-03.2)

f - k 变换进行处理。 f - k 变换实质上是一种二维傅里叶变换,主要是利用时间-空间域和频率-波数域 2 个域之间的关系^[13]。如提取频散曲线等面波分析方法依据面波在 f - k 域上振幅能量最大的特点,在对应的 f - v 域中提取与频率对应的相速度值,从而得到面波记录中的频散曲线^[14,15];波场分离方法依据有效波与干扰波的视速度差异,利用 f - k 变换分离不同波组^[16,17]。VSP 数据处理中,Treitel 等采用 f - k 扇形滤波器,保留滤波范围内的信号,区分上行信号和下行信号^[18],但存在混波、振幅畸变等缺陷^[19-21]。对此,朱海龙等人^[22]提出了一种高保真的 VSP 波场分离方法以降低混波、振幅畸变,但需要对实际采集的数据进行偏移、坐标旋转等偏振滤波处理得到虚拟的上行波射线坐标,将复杂波场转换成简单波场。此外,由于 f - k 变换方法属于多道处理的范畴,其处理结果受空间采样点的分布、深度采样间隔等采集参数的影响,使得 f - k 变换方法在使用中有着很大的限制^[23]。

鉴于探地雷达的原理和地震勘探相似,且电磁波类似于弹性波,因此一些学者尝试将 f - k 滤波方法应用于探地雷达数据处理中。Hayashi 等人^[24]利用 f - k 滤波压制数据中的直达波;余海忠等人^[25]利用 f - k 滤波压制地面干扰波;翟波等人^[26]介绍了 f - k 滤波的方法原理与常用的 f - k 滤波器。在实际探测中,探地雷达仍有别于地震勘探,如地震勘探采集方式一般为一发多收的多偏移距方式,探地雷达则采用自发自收的共偏移距方式。采集方式的不同使得探地雷达剖面与地震剖面存在差异,且不具有时-空变特性,因而 f - k 变换方法在探地雷达中的使用限制小。但采用常规 f - k 滤波方法压制线性干扰时,仍会存在滤波效果不理想的问题。

为此,本文提出了一种改进的 f - k 滤波方法压制探地雷达中的线性干扰。本文将通过对模拟数据与实测数据中不同类型的线性干扰在 f - k 域的分布及频谱特征进行分析,针对不同区域内线性干扰的频谱特征分别设计特定的滤波范围进行滤波,达到压制数据中线性干扰的目的,并与常规 f - k 滤波方法进行比较,为工程应用提供一定的参考。

2 基本方法原理

2.1 常规的 f - k 滤波方法

仪器采集的数据是时间和空间的二维函数 $d(t, x)$,通过二维正、反傅里叶变换可得到其频率-波数(f - k)域频谱信息和时-空(t - x)域记录为

$$\begin{cases} D(f, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} d(t, x) e^{-2\pi i(ft + kx)} dt dx \\ d(t, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} D(f, k) e^{2\pi i(ft + kx)} df dk \end{cases} \quad (1)$$

其中, f 表示频率; k 表示波数; $D(f, k)$ 为 $d(t, x)$ 的频率-波

数谱。式(1)表明 $d(t, x)$ 是由不同频率和波数的平面简谐波组成,频率和波数的关系为

$$v = \frac{f}{k} \quad (2)$$

其中,由于仪器总是沿测线进行探测的,故 v 为波的视速度。而在 f - k 域图像中,纵坐标代表频率 f ,横坐标代表波数 k ,斜率代表视速度 v ,故具有一定视速度的波组在 f - k 域频谱特征的表现呈一条谱值射线,并且视速度越大的波组其谱斜率越大。因此根据波组的视速度设计的合适滤波器进行处理可达到压制干扰波的目的。

f - k 滤波器的性质由时间-空间特性 $h(t, x)$ 或频率-波数特性 $H(f, k)$ 所确定。设 $y(t, x)$ 为 $d(t, x)$ 的 f - k 滤波输出结果,时间域中 f - k 滤波结果由输入信号 $d(t, x)$ 与滤波因子 $h(t, x)$ 的二维褶积运算实现;频率域中则由输入信号的频率-波数谱 $D(f, k)$ 与滤波器的频率-波数特性 $H(f, k)$ 相乘完成,即

$$\begin{cases} y(t, x) = d(t, x) \otimes h(t, x) \\ Y(f, k) = D(f, k) \cdot H(f, k) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $Y(f, k)$ 和 $H(f, k)$ 是 $y(t, x)$ 和 $h(t, x)$ 的傅里叶变换结果。

由于仪器采集的数据是时间序列长度有限的 N 道离散记录,故离散化后的 f - k 滤波公式为

$$\begin{aligned} y_m(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{+\infty} d_n(\tau) h_{m-n}(t-\tau) d\tau \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} d_n(t) * h_{m-n}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, n 为原始道号; m 为结果道号。由式(4)可知,测线上任一点处, f - k 滤波的结果可由 N 道探地雷达数据道通过一维滤波结果相加而得。可见, f - k 滤波本身也是一种空间域的二维滤波。

在地震勘探数据处理中,利用实信号傅里叶变换结果具有对称性的性质,即负波数信号是正波数信号的复共轭, f - k 滤波方法只对采集数据的 f - k 域正波数信号进行处理后,再通过对称性即可得到处理后的全频域信号。

2.2 改进的 f - k 滤波方法

实际探测中,探地雷达常用采集方式为自发自收的共偏移距方式,其偏移距可视为零,则反射时距曲线关系式为

$$t = \frac{2H}{V} \quad (5)$$

其中, V 为波速; H 是天线到面状界面的垂直距离。采集过程中,随着天线的移动, H 会发生呈正或负的线性变化,其反射时间 V 也随之呈正或负的线性变化。因此,探地雷达剖面中会出现倾向不同、视速度方向不同的 2 种线性干扰(见图 1),其中向下倾的线性干扰(下行干

扰)具有正视速度,向上倾的线性干扰(上行干扰)具有负视速度,其视速度 v 为

$$v = \frac{l}{\Delta t} \quad (6)$$

其中, l 为天线移动距离; Δt 为相同波组的反射时间变量.联合式(2)可知,探地雷达剖面中具有正、负视速度方向的线性干扰经 f - k 变换后,会位于 f - k 域的不同区域中,且根据其视速度的不同,所代表的 f - k 域频谱特征也不同.

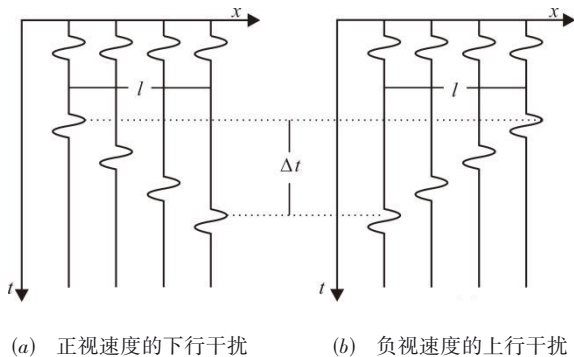


图1 探地雷达剖面中的倾斜线性干扰

常规的 f - k 滤波方法在处理过程中未考虑到探地雷达实际数据中线性干扰具有正、负视速度,且视速度值不同,导致其在 f - k 域分布及频谱上具有差异,在滤波时仅限于处理正波数域内的信号,因而对线性干扰的压制效果不理想.

为此,本文对 f - k 滤波方法进行改进,在滤波过程中对 f - k 域进行全域分析,对实际数据在 f - k 域中正、负波数域内的信号均进行处理,而不仅限于分析处理正波数信号.具体方法步骤如下:

(1)采集探地雷达数据经过傅里叶变换后,得到其 f - k 域频谱;

(2)对 f - k 域全频域内的频谱特征进行分析,根据正、负速度线性干扰的 f - k 频谱特征及分布的差异,在正、负波数域内分别设计不同滤波区域,框选正、负波数域内线性干扰所在的区域;

(3)将选定的滤波区域内谱值置零,得到处理后的 f - k 谱;

(4)将处理后的 f - k 谱通过二维傅里叶反变换转换到时空域输出显示.

3 数值模拟及 f - k 滤波结果对比

本研究建立了如图2所示的数值模型,模型大小为 $1.4 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$,网格大小为 $0.002 \text{ m} \times 0.002 \text{ m} \times 0.002 \text{ m}$.模型分为两层介质:上面是 $1.4 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 的空气层,相对介电常数为1;下面是粘土层,范围 $1.4 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$,相对介电常数为9.在粘土层中部有一埋深为 0.66 m 、半径为

0.04 m 的圆形空洞,其中心位置为 $(0.7 \text{ m}, 0.3 \text{ m})$.模型两端对称放置了两块 $0.2 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 三角金属物体,倾斜面角度约为 78.7° .雷达天线的激励源采用点电偶极子源,激励波形为Ricker子波,频率为 800 MHz ,收发天线相距 0.1 m ,天线的移动步长为 0.002 m .为反映侧面物体在探地雷达剖面中产生的干扰情况,将测线的起点布置于左侧金属物体右侧(如图2所示),与左侧金属物底端相距 0.02 m ,测线终点布置于右侧金属物体左侧,如图2所示,与右侧金属物底端同样相距 0.02 m ,共采集430道数据.模型中雷达测线的正下方只存在圆形空洞这一异常体.

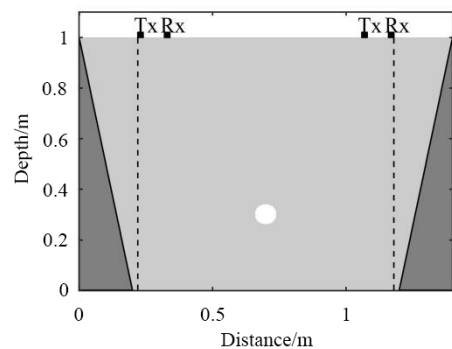


图2 数值模型

将模型的各参数编写入“.in”文件中,采用GprMax3.0软件进行数值模拟计算,得到如图3(a)所示的探地雷达剖面图.在图3(a)中,双曲线信号为圆形空洞在雷达剖面产生的有效信号,与之相交的上、下行干扰则是由两侧金属物体产生的空间干扰波.其中,下行干扰由左侧金属物体产生,上行干扰由右侧金属物体产生,且两者视速度值大小相等,约为 0.05 m/ns ;双曲线信号则不具有固定的视速度,其视速度随曲线切线改变而改变,但总体上视速度值均大于上、下行干扰的视速度值.

图3(b)是对数值模拟数据进行 f - k 变换后得到的 f - k 域频谱特征图,明显可见正、负波数域内频谱特征一致.在图3(b)中,上、下行干扰在 f - k 域中均表现为以坐标原点为起点的谱值射线,其中下行干扰的 f - k 频谱特征位于正波数域内,上位行干扰的 f - k 频谱特征则于负波数域内,两者关于 f 轴对称.同时,根据上、下行干扰的频谱射线得到两者的视速度值均在 0.05 m/ns 左右,这与雷达剖面的视速度值基本一致.而双曲线信号由于视速度不定,且视速度值均大于上、下行干扰,因而 f - k 域中正、负波数域内均有分布,且谱值特征更靠近 f 轴并关于 f 轴对称.

图3(c)是利用常规 f - k 滤波方法进行处理后得到的雷达剖面, f - k 滤波器采用扇形滤波器,选取的滤波参数

为 2 000 MHz 的频率上限和 0.06 m/ns 的视速度下限,主要保留 f - k 域内视速度大于 0.06 m/ns 的信号. 经滤波处理后得到图 3(c) 所示的雷达剖面图, 如图所示, 雷达剖面中的上、下行干扰均得到了有效压制, 双曲线反射虽得到保留, 但曲线两侧形态发生改变且能量有所衰减.

根据模拟数据 f - k 域频谱特征的分析, 将 f - k 域内双曲线信号频谱特征外的上、下行干扰的频谱特征进行框选, 得到了如图 3(b) 虚线区域所示的滤波区域. 由于正、负波数域内的线性干扰频谱特征相同, 因而

该滤波区域关于 f 轴对称, 该滤波区域内视速度上限为 0.65 m/ns.

图 3(d) 是利用改进的 f - k 滤波方法, 采用图 3(b) 所示的滤波区域, 对线性干扰的 f - k 频谱特征进行处理后得到的雷达剖面图. 如图 3(d) 所示, 两侧金属物体产生的线性干扰得到了有效压制, 圆形空洞产生的双曲线仍有清晰的反映. 将图 3(c) 与图 3(d) 进行对比, 发现常规的 f - k 滤波方法和改进的 f - k 滤波方法均能有效压制模拟数据中的倾斜线性干扰, 但改进的 f - k 滤波方法保留有效信号的效果更好.

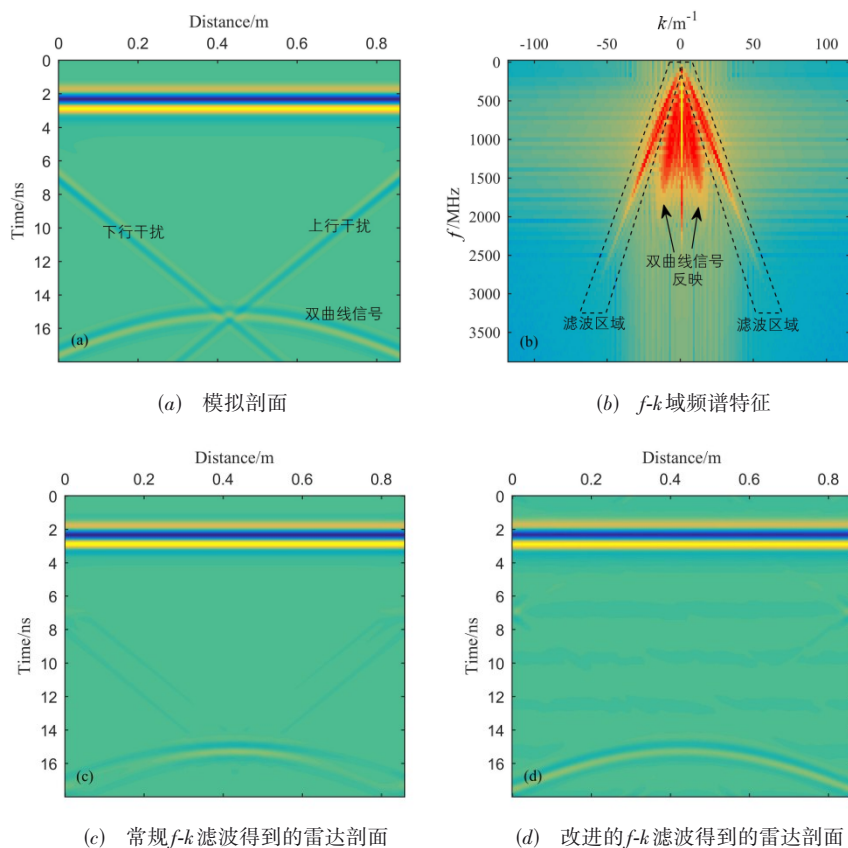


图3 数值模拟结果及 f - k 滤波对比

4 数值模拟及 f - k 滤波结果对比

测区为贵州某小型封闭岩溶洼地(见图4), 洼地地形如“碗”状, 底部呈不规则的圆形, 直径约 46 m, 洼地四周侧壁较陡且倾斜角度不一致, 目测均大于 30° . 洼地内表层为粘土层, 其下为灰岩层. 采用 SIR-20 探地雷达及 100 MHz 天线在洼地内部进行岩溶探测, 在所采集到的东西向与南北向雷达剖面中均出现了由洼地四周侧壁产生的强烈空间干扰. 本文选取了其中沿洼地南北向长测线得到的雷达剖面(见图5)进行研究.

如图 5(a) 所示, 洼地四周侧壁产生的空间干扰在

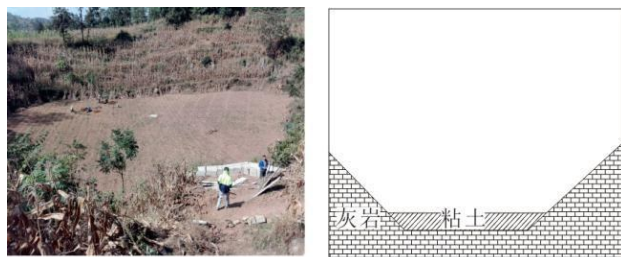
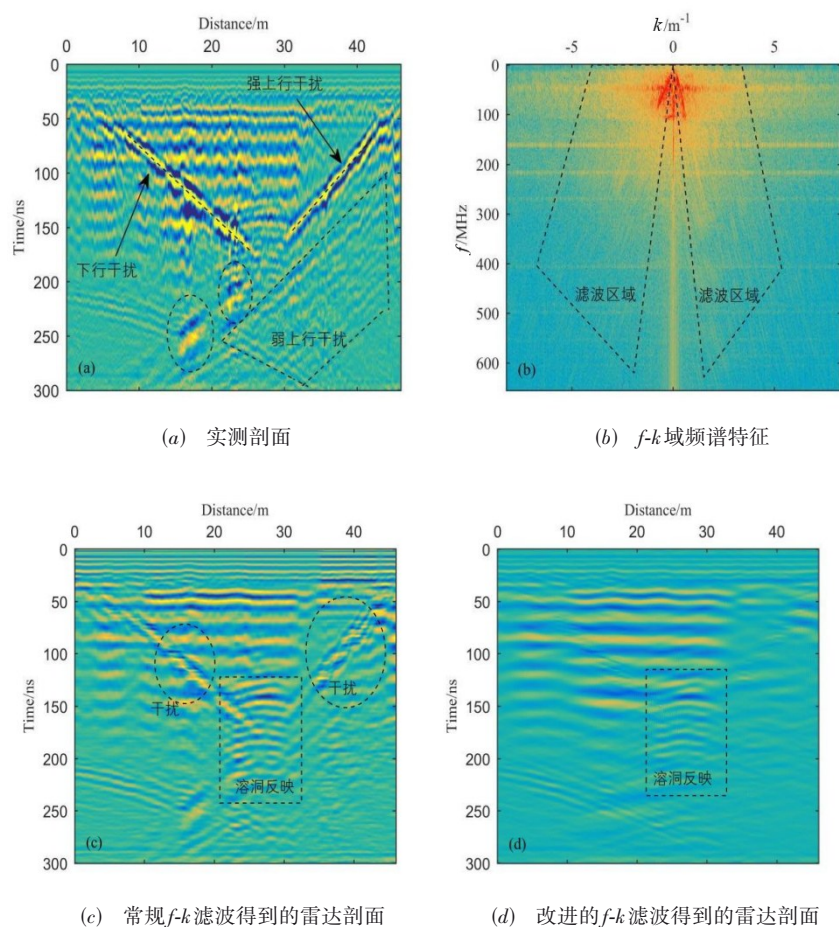


图4 岩溶洼地示意图

雷达剖面表现均为具有不同反射强度、不同倾向、不同视速度的倾斜线性干扰. 在该剖面中, 明显可见一条能

图5 岩溶探测数据及 f - k 滤波对比

量强的下行干扰,大致由雷达剖面(4 m, 45 ns)处起始,到剖面中部(26 m, 174 ns)处截止,视速度约为0.17 m/ns,推测该干扰是由测线起始处、洼地南面的侧壁产生。此外,在图5(a)明显可见多条不同的上行干扰,其中,剖面底部(17 m, 250 ns)和(23 m, 210 ns)处有两条长度短、能量较强的干扰,其视速度相近,约为0.15 m/ns,推测可能是测线17 m、23 m附近两侧洼地侧壁产生的;剖面(30 m, 160 ns)至(41 m, 57 ns)处有一能量强的上行干扰,其视速约为0.11 m/ns,推测可能是由测线终止处、洼地北部侧壁产生;剖面右下部可见能量弱的多条上行干扰,其视速度大体近似,在0.16 m/ns左右,推测可能是由位于洼地南面的测线两侧边坡侧壁产生的。

图5(b)是对实测数据进行 f - k 变换后得到的 f - k 域频谱特征图,明显可见正、负波数域内频谱特征存在差异。在图5(b)中,明显可见两条以原点为起点、谱值较大的谱值射线,其中 f - k 域中正波数域内为下行干扰的反映,负波数域内则为能量强的上行干扰在 f - k 域的反映。同时,由于下行干扰视速度值大于上行干扰的视速度值,因而下行干扰的谱值射线斜率更大,相对上行干

扰的谱值射线斜率更靠近 f 轴。图5(b)中还可可见正、负波数域内还存在一些不以坐标原点为起点、谱值较小的谱值射线,为实测数据中其他能量较弱的上、下行干扰在 f - k 域中的反映。此外,实测数据中地下异常体反射的有效信号受各种噪声的干扰,在 f - k 域中的表现并不明显,而线性干扰的频谱特征相对更突出。在岩溶洼地中,溶洞、破碎带等异常体的反射信号的视速度值通常大于线性干扰的视速度值,因此在 f - k 域中的频谱特征相对线性干扰的频谱特征会更靠近 f 轴。

图5(c)是利用常规 f - k 滤波进行处理后的雷达剖面, f - k 滤波器采用扇形滤波器,滤波参数中频率上限为200 MHz,视速度下限为0.4 m/ns,主要保留 f - k 域内视速度大于0.4 m/ns的信号。经滤波处理后,剖面中线性干扰的能量得到了衰减,可见剖面中部出现溶洞反映,但剖面中的线性干扰仍清晰可见,且在剖面(15 m, 110 ns)和(37 m, 100 ns)范围产生了新的干扰。

根据实测数据 f - k 域频谱特征的分析,在保留 f - k 域中 f 轴附近频谱信号的情况下,对 f - k 域中上、下行干扰代表的频谱特征进行框选,选择了如图5(b)所示的滤

波区域. 由于 f - k 域中正、负波数域内频谱特征不同,故正、负波数域内的滤波区域也有所不同,其中正波数域内滤波区域视速度上限为0.42 m/ns,负波数域内滤波区域视速度上限为0.32 m/ns.

图5(d)是利用改进的 f - k 滤波方法,采用图5(b)所示的滤波区域,对线性干扰的 f - k 频谱特征进行处理后得到的雷达剖面. 如图5(d)所示,经滤波处理后,雷达剖面中的线性干扰得到了有效压制,且未产生其他强烈的干扰,中部的溶洞反映也清晰可见. 将图5(c)与图5(d)对比可看出,相对于常规 f - k 滤波方法,改进的 f - k 滤波方法对线性干扰的压制效果更好.

5 结论

常规的 f - k 滤波方法利用FFT变换的复共轭特征,只对正波数信号进行处理即可得到全频域内的信号,忽视了实际数据中与正波数信号不同的负波数信号,因此虽能有效压制模拟数据中的线性干扰,但对实际数据中线性干扰的压制效果不理想. 对此,本文对 f - k 滤波方法进行改进,提出一种基于 f - k 域全域频谱特征的滤波方法. 在对雷达数据进行 f - k 变换后进行 f - k 全域分析发现,不同倾向线性干扰其视速度不同,因而在 f - k 域的频谱特征及分布区域存在差异. 基于这种差异,在 f - k 域正、负波数域内设计不同的滤波区域框选出线性干扰所在的频谱区域进行滤波,区别压制正、负波数域内线性干扰的频谱,达到压制雷达数据中线性干扰的目的. 通过模拟数据及实测数据的分析处理,与常规 f - k 滤波方法相比,改进的 f - k 滤波方法对线性干扰的压制效果更显著,对探地雷达剖面的处理效果更好.

参考文献

- [1] 朱自强, 李华, 鲁光银, 等. 页岩发育区浅埋隧道超前地质预报方法研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 250-254.
ZHU Z Q, LI H, LU G Y, et al. The research of advanced forecast of geology method in shallow cover up of tunnel of the shale region[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(1): 250-254. (in Chinese)
- [2] KRAVITZ B, MOONEY M, KARLOVSEK J, et al. Void detection in two-component annulus grout behind a pre-cast segmental tunnel liner using Ground Penetrating Radar[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 381-392.
- [3] BERTOLLA L, PORSANI J L, SOLDVIERI F, et al. GPR-4D monitoring a controlled LNAPL spill in a masonry tank at USP, Brazil[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 103: 237-244.
- [4] PLÁSZTÁN J Z, JÁNÓSZKY M, TALLER G, et al. Geomorphology and sedimentology of river berettyó considering environmental protection[J]. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 2018, 13(1): 199-209.
- [5] 刘敦文, 徐国元, 黄仁东. 探地雷达技术在古墓完整性探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 96-101.
LIU D W, XU G Y, HUANG R D. Application of geophysical prospecting radar in prospecting integrity of ancient tombs[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(1): 96-101. (in Chinese)
- [6] 覃谭, 赵永辉, 林国聪, 等. 探地雷达在上林湖越窑遗址水下考古中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 624-630.
QIN T, ZHAO Y H, LIN G C, et al. The application of GPR to underwater archaeological investigation of Shanglinhu Yue kiln relics[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(3): 624-630. (in Chinese)
- [7] PAPADIMITRIOS K S, BANK C G, WALKER S J, et al. Palaeotopography of a Palaeolithic landscape at Bestwood 1, South Africa, from ground-penetrating radar and magnetometry[J]. South African Journal of Science, 2019, 115(1/2): 1-7.
- [8] 王俊茹, 吕继东. 地质雷达在环境地质灾害探测中的应用[J]. 地质与勘探, 2002, 38(3): 70-73.
WANG J R, LU J D. The application of geo - radar technique in environmental geologic calamity survey[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(3): 70-73. (in Chinese)
- [9] 马传浩, 陈剑. 地质雷达技术在泥石流灾害调查中的应用: 以北京房山南安主沟泥石流为例[J]. 地质与勘探, 2019, 55(4): 1066-1072.
MA C H, CHEN J. Application of geological radar technology to investigations of hazardous debris flow: An example from Nan'an, Fangshan District, Beijing[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(4): 1066-1072. (in Chinese)
- [10] 张春城, 周正欧. 基于支持向量机的浅地层探地雷达目标分类识别研究[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1091-1094.
ZHANG C C, ZHOU Z G. Research on ground penetrating radar target identification based on support vector machines in shallow subsurface application[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1091-1094. (in Chinese)
- [11] 方广有, 佐藤源之. 频率步进探地雷达及其在地雷探测中的应用[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 436-439.
FANG G Y, SATO M. Stepped-frequency ground penetrating radar and its application for landmine detection[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 436-439. (in Chinese)
- [12] 何开胜, 王国群. 水库堤坝渗漏的探地雷达探测研究

- [J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(1): 20-24.
- HE K S, WANG G Q. Study of seepage through reservoir dam using ground penetrating radar detection[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(1): 20-24. (in Chinese)
- [13] YILMAZ Ö, DOHERTY S M. Seismic Data Processing [M]. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- [14] 金聪, 杨文海, 罗登贵, 等. 面波频散曲线提取方法对比分析[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2735-2742.
- JIN C, YANG W H, LUO D G, et al. Comparative analysis of extracting methods of surface wave dispersion curves[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2735-2742. (in Chinese)
- [15] 李欣欣, 李庆春. 利用改进的F-K变换法提取瑞雷波的频散曲线[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 191-197.
- LI X X, LI Q C. Rayleigh wave dispersion curve imaging using improved F-K transform approach[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 191-197. (in Chinese)
- [16] 王朝令, 刘争平, 黄云艳, 等. F-K变换在隧道反射地震预报波场分离中的数值模拟研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(4): 71-76, 82.
- WANG Z L, LIU Z P, HUANG Y Y, et al. Modeling research of f-k transform applied in the tunnel earthquake prediction[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(4): 71-76, 82. (in Chinese)
- [17] 曾胜强, 刘争平, 奉建军, 等. 隧道反射地震超前预报波场分离方法的数值模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 817-825.
- ZENG S Q, LIU Z P, FENG J J, et al. Numerical simulation study the wave field separation method of tunnel reflection earthquake advance forecast[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2): 817-825. (in Chinese)
- [18] TREITEL S, SHANKS J L, FRASIER C W. Some aspects of fan filtering[J]. Geophysics, 1967, 32(5): 789-800.
- [19] SEEMAN B, HOROWICZ L. Vertical seismic profiling: Separation of upgoing and downgoing acoustic waves in a stratified medium[J]. Geophysics, 1983, 48(5): 555-568.
- [20] SUPRAJITNO M, GREENHALGH S A. Separation of upgoing and downgoing waves in vertical seismic profiling by contour-slice filtering[J]. Geophysics, 1985, 50(6): 950-962.
- [21] MARCH D W, BAILEY A D. A Review of the Two-dimensional Transform and its use in seismic processing[J]. First Break, 1983, 1(1): 9-21.
- [22] 朱海龙, 张山. 高保真VSP波场分离方法研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1557-1564.
- ZHU H L, ZHANG S. A high fidelity WSP method of wavefield separation[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1557-1564. (in Chinese)
- [23] 张大伟, 孙赞东, 王学军, 等. VSP处理中标量波场分离方法比较分析[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(S1): 27-33, 163, 167.
- ZHANG D W, SUN Z D, WANG X J, et al. Comparison and analysis of scalar wavefield separation in VSP processing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(S1): 27-33, 163, 167. (in Chinese)
- [24] HAYASHI N, SATO M. $F-k$ filter designs to suppress direct waves for bistatic ground penetrating radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1433-1444.
- [25] 余海忠, 欧阳宇峰, 陈鸿, 等. 探地雷达地面干扰波二维滤波处理方法研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1738-1742.
- YU H Z, OUYANG Y F, CHEN H, et al. The Study of the 2D filtering method to remove the back reflector in GPR profile[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1738-1742. (in Chinese)
- [26] 翟波, 杨峰, 孙水明, 等. 基于二维滤波的探地雷达数据去噪研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2007, 7(3): 79-83.
- ZHAI B, YANG F, SUN S M, et al. Research of GPR signal de-noising based on 2-dimensional filtering[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2007, 7(3): 79-83. (in Chinese)

作者简介



张力文 男, 1998年出生于贵州省纳雍县. 现为贵州大学国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室硕士研究生. 主要研究方向为地球物理探测技术.

E-mail: 995927008@qq.com



聂俊丽(通讯作者) 女, 1976年出生于山西省原平市. 现为贵州大学国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为地球物理探测技术和环境问题.

E-mail: junlinenie@163.com