

基于二维滤波的探地雷达数据去噪研究

翟 波¹, 杨 峰², 孙水明², 张跃军²

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083 2 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

[摘要] 探地雷达是近几年迅速发展起来的一种高分辨率、无损的地球物理探测技术, 通过天线向地下发射高频电磁脉冲波, 根据介质的电性差异探测地下结构。由于雷达波在地下的传播过程十分复杂, 各种噪声和杂波干扰非常严重。在详细研究了二维滤波原理基础上, 根据雷达数据中有效波和干扰波的视速度差异, 利用频率-波数域二维滤波技术, 采用在时间域和频率域两种实现方式去除噪声, 对实际的雷达数据进行处理, 结果表明频率-波数域二维滤波能有效地去除干扰, 效果明显。

[关键词] 探地雷达, 二维滤波, 视速度, 频率-波数

[中图分类号] P631 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2007)03-0079-05

Research of GPR Signal De-noising Based on 2-Dimensional Filtering

Zhai Bo¹, Yang Feng², Sun Shuiming², Zhang Yuejun²

(1. School of Resources and Safety Engineering China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract Ground Penetrating Radar (GPR) is a high-resolution, non-destructive geophysical survey technology developing rapidly in recent years. According to the different dielectric properties of earth materials, the GPR surveys the underground structure by transmitting the high-frequency electromagnetic pulse wave from the antenna. Since the transmission process of the radar wave in the underground is very complex, the interference of all kinds of noise and clutter is very strong. Through the analysis of the apparent velocity difference between effective wave and interference wave in the GPR and based on the study on the principle of 2-dimensional filtering, a 2-dimensional frequency-wave-number filtering is adopted to remove noise in a time and frequency domain way in order to deal with GPR data, and the conclusion shows that the 2-dimensional filtering can effectively remove the interference.

Key words GPR, 2-dimensional filtering, apparent velocity, frequency-wave-number

0 引言

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 又称地质雷达, 是近几年迅速发展起来的一种高分辨高效率的无损探测技术。探地雷达通过天线向地下发射高频电磁脉冲波, 电磁波在地下介质传播过程中, 当遇到存在电性差异的地下目标体, 如空洞、分界面时, 电磁波便会发生反射, 返回到地面时由接收天线所接收。在对接收到的雷达波信号处理和分析的基础上, 根据信号的波形、振幅、双程走时等参数便可推断地下目标体的空间位置、结构、电性及几何形态, 从而达到对地下隐蔽目标体的探测目的^[1, 2]。

雷达波在地下的传播过程十分复杂, 各种噪声和杂波的干扰非常严重, 探地雷达在探测过程中, 为了保持更多的反射波特征, 通常采用宽频带进行记录, 于是在记录各种有效波的同时, 也记录了各种干扰波。探地雷达数据处理的目的就是要去除噪声, 压制干扰, 以最大限度的分辨率在雷达图像剖面上显示反射波, 提取有效信息, 以便对探地雷达剖面进行准确合理的地质解释^[3, 4]。雷达信号处理的方法类型很多, 如滤波、反褶积^[5]、多次叠加^[6]、道均衡处理、速度分析、振幅处理技术^[7]、复信号处理等^[8]。其中, 滤波是最

收稿日期: 2007-06-20

基金项目: 国家基础研究发展计划“973”(2006CB202209)资助项目。

作者简介: 翟 波 (1972-), 女, 博士研究生, 主要从事地球探测与信息技术的学习与研究。E-mail: zbdj668@126.com

通讯联系人: 杨 峰 (1968-), 博士, 副教授, 主要从事地质雷达仪器与软件开发。E-mail: yg@cumt.gr.cn

常用的主要处理手段,目的就是利用频谱特征的不同来压制干扰波.但是当有效波和干扰波的频谱成分十分接近时,使用传统的一维频率滤波无法用来压制干扰,但如果有效波和干扰波存在视速度差异时,则可根据视速度的差异进行滤波,这种滤波本身是一种空间域的二维滤波.因此,本文从二维滤波的基本原理出发,给出了这种二维滤波的具体实现方式,并结合实例说明了二维滤波在探地雷达资料处理中的应用,分析了这种方法去除干扰的效果.

1 二维滤波的基本原理

1.1 视速度基本概念

电磁波在空间介质内是沿射线方向以真速度 v 传播的,但探地雷达在实际勘探过程中,因测线的方向与波的射线方向常常不同,因此,沿测线“传播”的速度也就不同于真速度,称为视速度 v^* . 如图 1 所示,电磁波从 A 点传播到 B 点,水平距离为 x . 图中给出两种路径波的传播过程,即直达波和地下物体反射波,它们旅行时间分别为 t_1 和 t_2 . 则直达波的视速度 $v_1 = x/t_1$, 反射波的视速度 $v_2 = x/t_2$. 很明显直达波视速度大于反射波视速度.

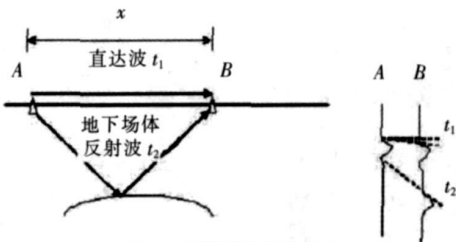


图 1 电磁波旅程示意图

Fig.1 The sketch diagram of electromagnetic wave travel

1.2 二维滤波的基本原理

从图 1 右侧给出的 A 、 B 质点振动波形示意图可以得出: 视速度小, 道间时差小; 视速度大, 道间时差大. 道间时差小, 在质点剖面上表现为道间信号纵向变化小, 即“水平”信号强.

从上面分析可以知道, 相同频谱信号的波, 由于传播路径不同, 在剖面上波组形式也不同. 尽管探地雷达采用等间距的自发自收连续探测, 同样可以假设, 在雷达剖面上道间“水平”信号视速度高. 因此, 可以利用视速度不同, 达到去除道间“水平”和“倾斜”信号的目的.

对一定类型的波和一种特定的介质来说, 速度 v 是常数 (如果不考虑电磁波色散性质). 因此, 频率 f 不同的简谐波, 其相应的简谐波剖面的波数 k_x (单位距离内简谐波的个数) 也是不同的. 一个雷达波振动图形是由许多不同频率成分的简谐波组成, 而任何一个波剖面则可以用无数个波数不同的简谐波剖面之和来表示. 一个雷达脉冲波经频率滤波后, 组成这个脉冲波的简谐波成分发生了变化, 将会使整个雷达波剖面的形状发生变化. 另外, 经波数滤波也会改变振动图的形状, 产生频率畸变, 有效波的有用频谱被压制. 因此, 单独的频率滤波和单独的波数滤波都存在不足之处, 只有根据二者的内在联系, 组成频率 - 波数域空间二维滤波, 才能做到在所希望的频率间隔内, 使视速度为某一范围的有效波得到加强; 同时对这个频带内视速度为另一范围的干扰波进行压制. 视速度、频率和波数具有如下内在关系:

$$k_x = \frac{f}{v^*}.$$

(1)

可见, 波数 k_x 的变化既包含了频率 f , 又包含了视速度 v^* 的变化.

2 二维滤波实现方式

可以采用在时间域和频率域两种方式达到二维滤波目的. 滤波实质就是卷积运算, 在时间域内进行二维滤波, 也就是利用滤波因子进行二维卷积运算, 频率域则利用二维谱信号的正逆变换实现.

对于二维的波动函数 $h(t, x)$ 可以用二维傅里叶变换, 求出其相应的频率 - 波数二维谱 $H(w, k_x)$. 一维滤波应用的是有效波和干扰波的频率成分的不同, 而二维滤波利用的是频率和视速度不同来实现滤波功能, 这可以在 $f - k_x$ 平面上表示出来, 如图 2 所示. 通过原点的几条直线的斜率就是视速度, I 区是高速干扰区, II 区是有效信号区, III 区是低速干扰区, $f_1 \sim f_2$ 表示有效信号的频率范围. 从图中可以看出, 有效信号和干扰信号在

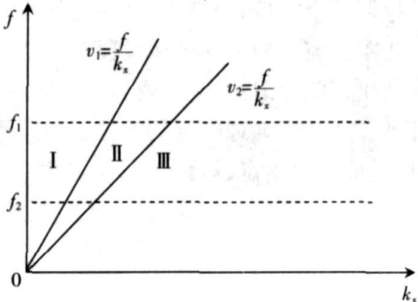


图 2 二维谱平面

Fig.2 2-dimensional spectrum plane

频率和视速度上可以清楚地区分开来. 二维谱正、逆变换为:

$$G(w, k_x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(t, x) e^{-j(\omega t - k_x x)} dt dx \quad (2)$$

$$g(t, x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(w, k_x) e^{j(\omega t - k_x x)} d\omega dk_x \quad (3)$$

2.1 时间域二维滤波运算

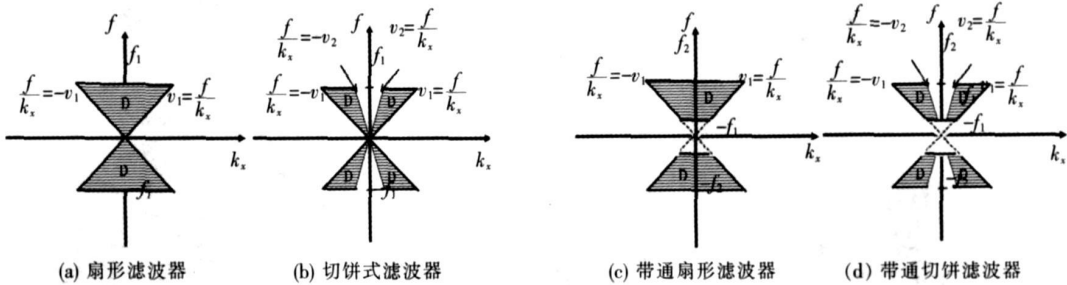


图 3 4 种常用二维滤波器

Fig.3 Four common 2-dimensional filters

二维滤波器的性质由时间-空间特性 $h(t, x)$ 或频率-波数特性 $H(w, k_x)$ 确定. 因此通过设计不同的频率-波数特性, 就可以获得不同形式的二维滤波器. 以下是 4 种常见的滤波器, 如图 3 所示,

- (1) 扇形滤波器: 视速度大于 $|v_1|$, 且频率小于 f_1 的信号通过滤波器, 其它信号均被压制.
- (2) 切饼式滤波器: 视速度大于 $|v_1|$ 和小于 $|v_2|$, 且频率小于 f_1 的信号通过滤波器, 其它信号均被压制.
- (3) 视速度大于 $|v_1|$, 且频率小于 f_2 和大于 f_1 的信号通过滤波器, 其它信号均被压制.
- (4) 视速度大于 $|v_1|$ 和小于 $|v_2|$, 且频率小于 f_2 和大于 f_1 的信号通过滤波器, 其它信号均被压制.

在时间与空间域中, 二维滤波由输入信号 $g(t, x)$ 与滤波算子 $h(t, x)$ 的二维卷积运算实现, 在频率-波数域中, 由输入信号与滤波器的频率-波数特性 $H(w, k_x)$ 的乘积来完成, 如下式所示.

$$y(t, x) = g(t, x) * h(t, x), \quad (4)$$

$$Y(\omega, k_x) = G(\omega, k_x) H(\omega, k_x). \quad (5)$$

由于观测的离散性和排列长度的有限性, 必须用有限的 N 个记录道的求和代替空间坐标的积分:

$$y_m(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{\infty} g_n(\tau) h_{m-n}(t - \tau) d\tau = \sum_{n=0}^{N-1} g_n(t) * h_{m-n}(t). \quad (6)$$

式中, n 为原始道号; m 为结果道号. 显然, 二维卷积运算可归结为对一维卷积的再求和, 即测线上任一点处, 二维滤波的结果可由 N 个探地雷达数据道通过一维滤波结果相加得到.

2.2 频率域实现二维滤波计算

在频率域中实现二维滤波运算经过下面 3 个运算步骤:

- (1) 利用式 (2) 先将探地雷达采集到的时间-空间域剖面信号 $g(t, x)$ 转换为频率-波数域二维谱平面 $G(w, k_x)$, 参见图 2 所示.
- (2) 设置通过视速度区域 $H(w, k_x)$.
- (3) 在二维谱平面中, 将需要压制视速度区域信号进行处理, 保留通过视速度区域信号, 即进行如下运算: $Y(w, k_x) = H(w, k_x) G(w, k_x)$. 再利用式 (3) 将运算结果 $Y(w, k_x)$ 进行反变换, 反变换结果就是经过二维滤波器 $H(w, k_x)$ 的滤波处理.

3 二维滤波处理结果实例分析

3.1 时间域二维滤波处理结果

针对具体的雷达数据剖面图, 利用前面介绍的二维滤波器进行不同频率和视速度信号的压制, 处理结果如图 4 所示.

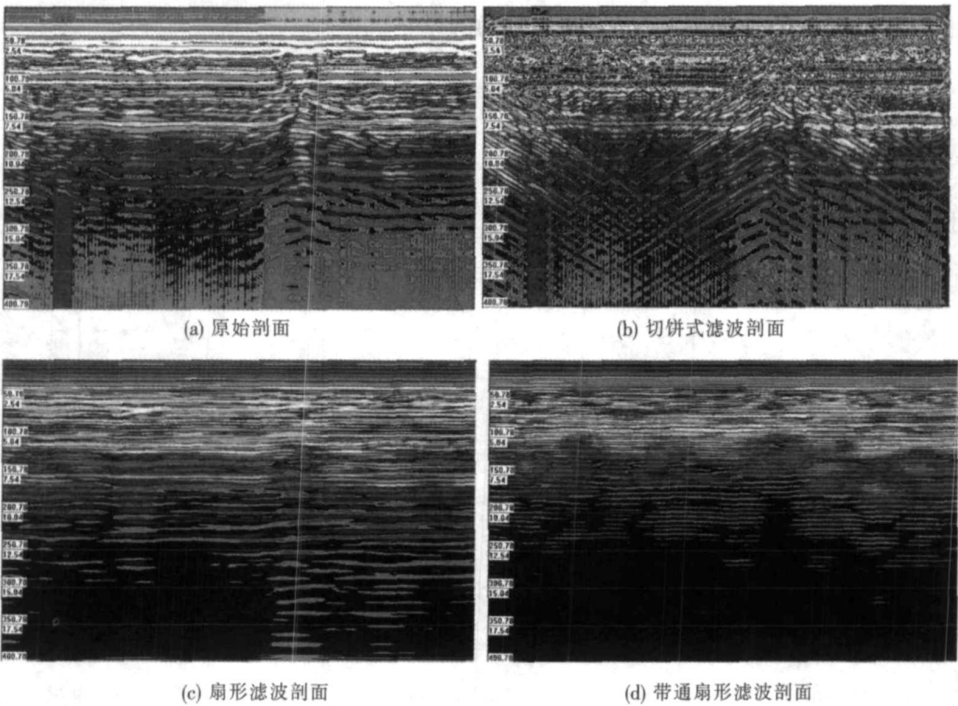


图 4 时间域二维滤波器剖面图比较
Fig.4 Time domain 2-dimensional filter comparison

(a)是利用 400MH z雷达天线在隧道超前预报探测中采集的原始记录剖面,时间窗为 400ns (b)是对原始剖面进行切饼式滤波结果,滤波参数为: $f_1 = 300 \text{ Hz}$ $v_1 = 0$ $v_2 = 80$ 可以看出通过切饼式滤波,压制了道间水平信号,增强视速度小的倾斜信号. (c)是对原始剖面进行扇形滤波结果,滤波参数为: $f_1 = 300 \text{ MHz}$ $v_1 = 80$ 通过扇形滤波,压制了视速度小的倾斜信号,从而增强道间水平信号能量. (d)是对原始剖面进行带通扇形滤波的结果,滤波参数为: $f_1 = 100 \text{ MHz}$ $f_2 = 300 \text{ MHz}$ $v_1 = 80$ 从图中可以看出,信号频率明显高于图 (c)的结果,但是由于频带把主频信号压掉大部分,所以在剖面上出现了一点振荡信号.

从上面的二维滤波结果可以看出,二维滤波可以有效地压制与有效波存在视速度差异或存在频谱差异的干扰波;能压制像电缆等物体产生的干扰,同时能消除记录中的相干干扰波;压制从倾斜界面上产生的多次反射波或侧面波,同时还可以有效压制道间水平干扰信号.

3. 2 频率域二维滤波处理结果

仍然对图 4 (a)原始剖面进行二维频率域滤波分析. 图 5 是图 4 (a)的二维谱平面图,包含 D 的阴影区域为视速度通过区域. (a)为高视速度通过区域, (b)为低视速度通过区域. 图 6 是针对原始剖面进行图 5 所示不同视速度通过区域的二维谱逆变换剖面.

从图 6 的处理结果可以看出,通过频率域逆变换处理同样可以达到二维处理目的. 由于频率域逆变换处理是对整个剖面信号进行二维正、逆变换,由于二维正、逆变换需要大量的计算机内存,且运算速度较慢,因此对短剖面可以采用上面介绍的两种方式进行处理;如果剖面道数超过 2 000 道,最好采用时间域二维卷积运算.

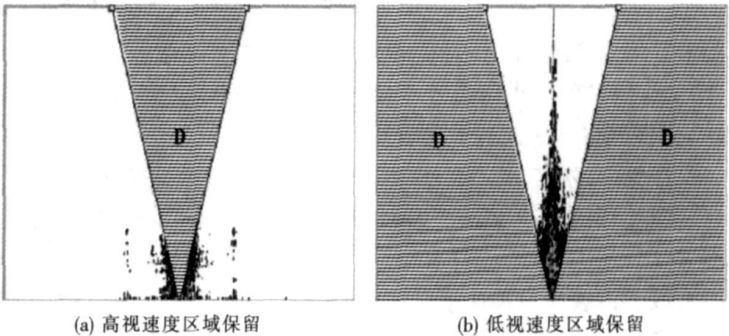
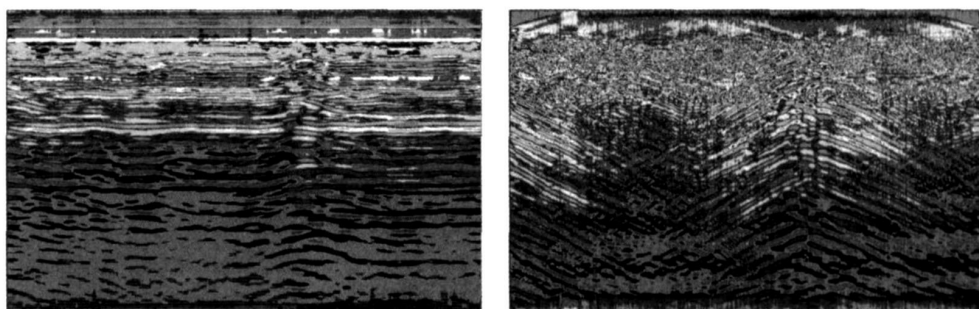


图 5 图 4(a)二维谱平面图
Fig.5 The 2-dimensional spectrum plane of fig.4(a)



(a) 高视速度区域保留处理剖面

(b) 低视速度区域保留处理剖面

图 6 二维谱逆变换剖面

Fig.6 2-dimensional spectrum inverse transformation plane

4 结束语

总之, 二维滤波技术就是根据探地雷达数据中有效信号和干扰波在频率波数谱上的差异来压制干扰, 通过上述的分析和实验结果检验表明, 二维滤波技术对来自于空中绕射、电缆等产生的干扰波以及倾斜界面产生的多次反射波、侧面波均具有良好的滤波效果, 使得有效信号得以突出, 提高了信噪比, 为将来进一步的资料解释提供了可靠数据。

[参考文献] (References)

- [1] David J. Daniels. Ground Penetrating Radar[M]. London: Institution of Electrical Engineers, 2004
- [2] 曾昭发. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006
Zeng Shaofa. Theory and Application of Ground Penetrating Radar[M]. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
- [3] 陈义群, 肖伯勋. 论探地雷达现状与发展[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(2): 149-155
Chen Yiqun, Xiao Boxun. On the status quo and development of ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(2): 149-155 (in Chinese)
- [4] 杨建广, 吕绍林. 地球物理信号处理技术的研究及进展[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 171-175
Yang Jianguang L. Shaolin. The technology of digital signal processing and application in GPR[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(1): 171-175. (in Chinese)
- [5] Greg Turner. Subsurface radar propagation deconvolution[J]. Geophysics, 1994, 59(2): 215-223
- [6] 赵永辉, 吴健生, 万明浩. 多次叠加技术在探地雷达资料处理中的应用[J]. 物探与化探, 2000, 24(3): 215-218
Zhao Yonghui, Wu Jiansheng, Wan Minghao. The application of multiple stacking technique to the data-processing work of ground penetrating radar[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(3): 215-218 (in Chinese)
- [7] 李成方, 王绪本, 王山山. 振幅处理在探地雷达资料处理中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2002, 24(3): 224-227.
Li Chengfang, Wang Xuben, Wang Shanshan. The application of amplitude processing technique to GPR data processing[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 24(3): 224-227. (in Chinese)
- [8] 谢雄耀, 万明浩. 复信号分析技术在地质雷达信号处理中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2005(5): 108-122
Xie Xiongyao, Wan Minghao. The application of complex signal analysis to process ground penetrating radar data[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2005(5): 108-122 (in Chinese)
- [9] 张军华, 吕宁, 田连玉, 等. 地震资料去噪方法、技术综合评述[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1 083-1 091.
Zhang Junhua, L. Ning, Tian Lianyu, et al. An overview of the methods and techniques for seismic data noise attenuation[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(4): 1 083-1 091. (in Chinese)
- [10] 黄伟, 李大心, 唐庆兵. 二维滤波在探地雷达图像处理中的应用研究[J]. 工程勘察, 2002(4): 66-69
Wang Wei, Li Daxin, Tang Qingbing. Application of two-dimensional filtering in the GPR image processing[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002(4): 66-69. (in Chinese)
- [11] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
Zhang Xianda. Modern Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]