

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212036

# 基于改进 Radon 域多次波抑制的强弱目标分离\*

辛文凯<sup>1,2</sup> 闫坤<sup>1,2</sup> 甘海铭<sup>1,2</sup> 刘宗辉<sup>3</sup>

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心 桂林 541004; 3. 广西大学土木建筑工程学院 南宁 530004)

**摘要:** 在探地雷达野外应用中,多次波是一种常见的干扰波,会影响雷达数据的真实性及可靠性,给目标解释工作带来困难。Radon 变换在地震处理领域中广泛应用于多次波抑制,但在探地雷达领域对此进行研究运用的仍不多。针对双曲线探地雷达反射波,对 Radon 变换理论进行分析阐述,在弱目标回波与强目标的多次波位置高度重叠,并且多次波强度接近弱目标回波强度的实例中,通过分析 Radon 域中弱目标与多次波位置与能量强度的差异,通过选择过滤窗并且在 Radon 域中对其进行多项式拟合恢复多次波能量,然后经过 Radon 正演在时空域中恢复多次波数据,再从原始雷达数据中减去多次波,实现对多次波的抑制,获得了无假象干扰的雷达数据。实验结果表明,在保留弱目标回波强度的同时取得了较好的多次波抑制效果。

**关键词:** 探地雷达; radon 变换; 弱目标; 多次波抑制; 多项式拟合

**中图分类号:** P315.63 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Separation of strong and weak targets based on improved multiple suppression in radon domain

Xin Wenkai<sup>1,2</sup> Yan Kun<sup>1,2</sup> Gan Haiming<sup>1,2</sup> Liu Zonghui<sup>3</sup>

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;  
2. National and Local Joint Engineering Research Center for Satellite Navigation, Positioning and Location Services, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;  
3. School of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In the field application of ground penetrating radar, multiple waves are a common interference wave, which will affect the authenticity and reliability of radar data and bring difficulties to target interpretation. The Radon transform is widely used in the field of seismic processing for multiple suppression, but it is still not much studied and applied in the field of ground penetrating radar. This paper analyzes and expounds the Radon transform theory for the reflected wave of hyperbolic ground penetrating radar. In the case where the position of the weak target echo and the multiple wave of the strong target are highly overlapping, and the multiple wave intensity is close to the strength of the weak target echo, analyze the difference between the position and energy intensity of weak targets and multiples in the Radon domain, recover the multiple energy by selecting the filter window and performing polynomial fitting on it in the Radon domain, and then recover multiple times in the space-time domain through Radon forward modeling. Then, the multiple waves are subtracted from the original radar data to suppress the multiple waves, and the radar data without false interference is obtained. The experimental results show that a better multiple suppression effect is achieved while retaining the echo strength of weak targets.

**Keywords:** ground penetrating radar; radon transform; weak target; multiple suppression; polynomial fitting

## 0 引言

探地雷达(GPR)是一种广泛使用的无损探测地质结构

和目标的技术,但地质结构条件往往复杂多样,不良地质现象会导致地质异常相互干扰<sup>[1-2]</sup>。应用 GPR 进行反射测量时,如果地质结构中存在强反射界面,则会使一次反射波重

收稿日期:2022-11-10

\* 基金项目:国家自然科学基金(62101147,51708136)、广西自然科学基金(桂科 2020GXNSFAA159146)、桂林电子科技大学研究生创新项目(2021YCXSO32)资助

新折回,接收天线接收到多次波并记录在雷达数据中。多次波的存在会对 GPR 的目标解释造成假象干扰,使得有效目标的反射波形态发生畸变,降低数据信噪比。如果多次波与一次有效波高度重叠,抑制不完全就会损伤探测目标有效信息,造成地质解释陷阱<sup>[3]</sup>。因此对于 GPR 多次波抑制方法的研究具有重要现实意义。

目前 GPR 数据采集常用的是剖面法,可以精准的表现测线下方地质结构中各反射界面的形态。用该方法获得的零偏移距雷达时间剖面与反射地震勘探法里的叠后剖面类似,横坐标表示雷达天线位置,纵坐标表示反射波双程走时,故可参考地震处理中的多次波识别及抑制方法开展研究。如 Zhou 等<sup>[4]</sup>利用一次波和多次波在视速度上的差别,采用 f-k 变换在波数域中抑制线性干扰;张力文等<sup>[5]</sup>根据线性干扰的频谱特征,提出了一种基于 f-k 滤波的抑制方法。但 f-k 滤波方式受限于采样点的地理分布和采样间隔,滤波效果往往不理想。王玉洁<sup>[6]</sup>提出了一种自适应预测反褶积方法来抑制多次波,根据一次波和多次波的周期性和特征相似性设置预测步长等参数实现抑制多次波,但其参数设置繁琐,算法复杂度高,并且当地质结构复杂时多次波和一次波的特征差异会变大,导致无法有效的抑制多次波。

Radon 变换是一种将时间-空间域(时空域)的曲线映射到 Radon 域中的点的积分过程,也是压制多次波的一种方法,根据其积分路径可分为线性、抛物线、双曲线等<sup>[7-8]</sup>。已经在地球物理学领域中广泛应用,尤其是在地震处理中已用于各种各样的目的,如消除随机噪声、线性干扰、多次波压制、波场分离及数据重建等。如 Jiang 等<sup>[9]</sup>采用双曲 Radon 变换(HRT)将不同波形映射到 Radon 域的不同区域实现了波场分离;Chen 等<sup>[10]</sup>提出一种高分辨率 HRT 方法,并将其应用在多次波抑制、地震道重建等问题上;Schultz 等<sup>[11]</sup>通过分析 Radon 变换的原理和应用,解决了地幔界面的长周期剪切波反射问题。多次波抑制应用的一般步骤是通过反演来预测多次波,再从原始数据中减去多次波信号。GPR 零偏移距剖面图像中的目标反射波时距曲线表现为双曲线,故本文从 HRT 出发,研究前方不良地质引起的多次反射带来的干扰问题,针对雷达探测深度范围内存在两个孔洞,多次波与弱目标的有效回波高度重叠的场景,通过研究 Radon 变换在 GPR 数据上的应用,将数据切分后反演到 Radon 域,依据多次波与弱目标回波的差异,应用过滤窗及拟合的方式,在较好地去除多次波的同时尽可能保留弱目标的回波强度,保证了对弱目标的识别效果,并与未拟合的 Radon 变换方法和预测反褶积方法进行对比,为实际应用提供一定的参考。

## 1 原理及算法框架

### 1.1 雷达波时距曲线

在 GPR 的野外探测工作中,一般采用剖面法进行反射

测量,雷达的收、发天线距离很近并且沿着测线同步移动,相当于自激自收,发射和接收均为窄脉冲信号,测量得到的零偏移距剖面图像中的目标回波理想情况下表现为上凸双曲线形状<sup>[12]</sup>。同时具有目标离天线越近,反射波能量越强,反之能量则越弱的特点。应用 GPR 探测孔洞时常采用的剖面法如图 1 所示。雷达天线水平位置  $x$  和双程旅行时  $t$  的时距曲线满足式(1)。

$$\frac{t^2}{t_0^2} - \frac{(x - x_0)^2}{v^2 t_0^2} = 1 \quad (1)$$

式中:  $v$  表示雷达波在介质中的传播速度;自激自收时间  $t_0 = 2h_0/v$ ; 对应的深度  $h_0 = vt_0/2$ 。

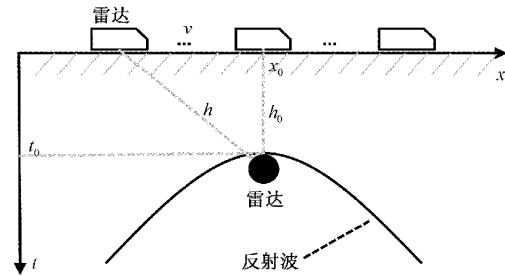


图 1 剖面法示意图

式(1)为双曲线方程,其与地震波的时距曲线形式相同,因此本文将多次波的抑制问题由时空域转到 Radon 域上进行解决。

### 1.2 Radon 变换

为了便于在计算机上进行处理,一般要对数字信号进行离散化,假设给定区域共采集  $N_x$  道雷达信号,采集第  $r$  道雷达信号的位置为  $x_r$ , 则对于时空域的原始 GPR 数据  $d(t, x)$ , HRT 反演的离散形式为:

$$m(\tau, q) = \sum_{r=1}^{N_x} d(t = \sqrt{\tau^2 + qx_r^2}, x_r) \Delta x \quad (2)$$

HRT 正演变换的离散形式为:

$$\hat{d}(t, x) = \sum_{q=1}^{N_q} m(\tau = \sqrt{t^2 - qx^2}, q) \Delta q \quad (3)$$

式中:  $m(\tau, q)$  为 Radon 域数据;  $\tau$  为时间截距;  $\Delta x$  为偏移距;  $\Delta q$  为慢度间隔;  $N_q$  为慢度的采样个数。

在时空域中,对雷达反射波的某点做切线,求得该切线与  $x$  轴的交点代表的截距时间  $\tau$  和切线的斜率  $q$  即可得到该点在 Radon 域中的位置。但由于通常情况下 HRT 的积分路径是时变的,不能将时空域的问题转化到时间-频率域(时频域)中求解,在时空域中直接进行 HRT 会造成巨大的矩阵数据量和计算量。Yilmaz 提出了一种替代的方法,对原始雷达数据在时间轴方向上进行  $t^2$  拉伸,即令  $t' = t^2$ ,  $\tau' = \tau^2$ , 然后可转到频域进行后续处理<sup>[13-14]</sup>。因此式(2)变为:

$$m(\tau', q') = \sum_{r=1}^{N_x} d(t' = \tau' + q'x_r^2, x_r) \Delta x \quad (4)$$

式中:慢度  $q' = 1/v^2$ 。

在  $t^2$  拉伸域中,慢度与截距时间无关。由此可将沿双曲线路径积分累加的过程变为沿抛物线路径的积分累加,积分路径从时变转变为时不变,从计算上看,在时频域中更容易求解 Radon 变换。根据式(4)在时间轴方向应用傅里叶变换,通过 Radon 反演的最小二乘解获得正演变换解。对于每个频率分量(或角频率) $\omega$  都需要求解一组线性方程,用矩阵可表示为:

$$\mathbf{D}(\omega, x) = \mathbf{L} \times \mathbf{M}(\omega, q) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{D}, \mathbf{M}$  为分别对时间  $t$  和  $\tau$  做傅里叶变换后时频域和 Radon 域的向量; $\mathbf{L}$  为伴随矩阵,维度  $N_x \times N_q$ ,矩阵元素  $L_{rs} = \exp(-i\omega x q_r x_r^2)$ 。

式(5)无约束的最小二乘解为:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{L}^H \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^H \mathbf{D} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{L}^H$  为矩阵  $\mathbf{L}$  的复共轭转置矩阵; $(\mathbf{L}^H \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^H$  为矩阵  $\mathbf{L}$  的广义逆矩阵。

通常在  $\mathbf{L}^H \mathbf{L}$  矩阵对角线上添加一个小的正数  $\beta$  作为阻尼因子来避免矩阵的奇异性和数值不稳定性,则逆矩阵变为  $(\mathbf{L}^H \mathbf{L} + \beta \mathbf{I})^{-1} \mathbf{L}^H$ ,其中  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。 $\beta$  一般是  $\omega$  的函数,它的选择取决于数据的噪声含量。求得频域 Radon 反演解后执行傅里叶逆变换即可得到时域反演解<sup>[15]</sup>。

### 1.3 参数选择

离散化参数的选择对于限制乃至避免 Radon 域中的混叠问题至关重要, Radon 域中的采样  $\tau$  一般与时空域中的  $t$  相同,但偏移距、曲率采样率的选择非常重要<sup>[16-17]</sup>。对于最大频率为  $f_{\max}$  的带限信号,假设偏移距  $x$  的取值范围是  $0 \sim x_{\max}$ ,采样间隔  $\Delta x$  应满足:

$$\Delta x \leq \frac{1}{2f_{\max} |x|_{\max} q_{\max}} \quad (7)$$

假设慢度  $q$  的取值范围是  $0 \sim q_{\max}$ ,采样间隔为  $\Delta q$ ,则慢度的参数选择应满足:

$$\left. \begin{aligned} \Delta q &\leq 1/(x_{\max}^2 f_{\max}) \\ q_{\max} &\leq 1/(2x_{\max} \Delta x f_{\max}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对于  $t^2$  拉伸的方式,需要以恒定的采样间隔  $\Delta t'$  对  $t^2$  时间轴重新采样,通常取  $\Delta t' = t_{\max}^2/n$ ,其中  $n$  为沿  $t$  轴的时间样本数。根据以上约束,本文在 Radon 变换前先对每道数据分别进行傅里叶变换,同时根据目标深度、大小和探测范围设定  $x_{\max}, q_{\max}$  等参数。

### 1.4 算法框架

本文设计了一种针对 GPR 多次波识别和抑制的程序。通过拆分雷达数据矩阵分别进行 Radon 反演,设计算法保留多次波能量,正演后在时空域重建多次波并将其从原始数据减掉,有效解决了 GPR 中的多次波抑制与弱目标识别问题。Radon 变换抑制多次波的算法框架如图 2 所示。

对于去除零偏移距 GPR 时间剖面中的双曲线形态干扰,特别是抑制多次波的问题,则应将雷达沿着测线方向且相对于反射波顶点位置的横坐标表示为偏移距。然后可直接扩展应用地球物理学中的 Radon 变换。与最常见的地

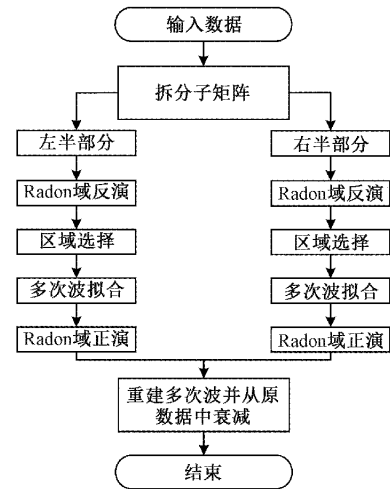


图 2 Radon 变换抑制多次波的算法框架

震处理情况不同,GPR 剖面上通常会出现一条完整的双曲线,而非半双曲线,这是由于地震波一般是单侧接收,而雷达波是双侧接收,并且离散抛物 Radon 中的函数是偶数函数,因此直接进行 Radon 变换会使双曲线的两侧会混叠在一起,无法区分。因此为了正确处理问题,本文将 GPR 数据矩阵从双曲线顶点位置拆分为两个子矩阵分别处理,并经  $t^2$  拉伸后应用频域 Radon 变换。在 Radon 域中根据有效波与多次波的能量差异,分别选择滤波窗并进行拟合,恢复多次波能量,然后在时空域中重建多次波,最后将其从原始雷达数据中减掉就得到无多次波干扰的结果。由于多次波在 Radon 域中所在的区域与目标信号常有混叠现象,直接通过区域选择获取多次波在 Radon 域的完整表现难度较大。因此本文设计了一种新颖的 Radon 域多次波提取方法。具体步骤包括:

1) 选定多次波在 Radon 域的影响区域。设 Radon 域中存在有多个区域受多次波影响,记为  $\mathbf{R}_\ell, \ell = 1, 2, \dots, G$ ,  $G$  为区域个数。

$$\mathbf{R}_\ell = \{(\tau_\ell, q_\ell) \mid \tau_\ell^{\min} \leq \tau_\ell \leq \tau_\ell^{\max}, q_\ell^{\min} \leq q_\ell \leq q_\ell^{\max}\} \quad (9)$$

其中,  $\tau_\ell^{\min}, \tau_\ell^{\max}, q_\ell^{\min}, q_\ell^{\max}$  分别表示  $\mathbf{R}_\ell$  中第  $\ell$  个区域在  $\tau, q$  上的最小最大值。

2) 选定多次波在  $\mathbf{R}_\ell$  中峰值所在区域,记为  $\mathbf{H}_\ell$  (假定一个区域  $\mathbf{R}_\ell$  中对应多次波中的一个双曲线)。

$$\mathbf{H}_\ell = \{(\tau'_\ell, q'_\ell) \mid \bar{\tau}_\ell^{\min} \leq \tau'_\ell \leq \bar{\tau}_\ell^{\max}, \bar{q}_\ell^{\min} \leq q'_\ell \leq \bar{q}_\ell^{\max}\} \quad (10)$$

其中,  $\bar{\tau}_\ell^{\min}, \bar{\tau}_\ell^{\max}, \bar{q}_\ell^{\min}, \bar{q}_\ell^{\max}$  分别表示  $\mathbf{H}_\ell$  中第  $\ell$  个区域在  $\tau', q'$  上的最小最大值。

3) 拟合估计  $\mathbf{R}_\ell$  中的多次波。由于多次波在 Radon 域中的聚集程度受计算精确性影响,在工程实现时 Radon 域的多次波常表现为平滑凸起的峰。本文利用这点设计拟合算法估计 Radon 域中的多次波去除干扰影响。给定区域  $\mathbf{H}_\ell$ , 假设  $\mathbf{H}_\ell$  中的 Radon 数据为  $m_\ell(\tau'_\ell, q'_\ell)$ , 取其中的第

$\tau'_l = \tau_0$  行, 则有  $m_\ell(\tau_0, q'_l), \bar{q}_l^{\min} \leq q'_l \leq \bar{q}_l^{\max}$ , 然后采用多项式拟合。

$$\min_{a_k} [f_{\tau_0}(q'_l) - m_\ell(\tau_0, q'_l)]^2$$

$$\text{s. t. } f_{\tau_0}(q'_l) = 1 + a_1(q'_l) + a_2(q'_l)^2 + \dots + a_k(q'_l)^k \quad (11)$$

4) 利用  $f(q'_l)$  估算  $R_\ell$  中第  $\tau_0$  行的数据。

$$m'(\tau_0, q'_l) \doteq f_{\tau_0}(q'_l) \quad (12)$$

逐行重复以上步骤可获取  $R_\ell$  中多次波估计, 记为  $m'(\tau_\ell, q'_l)$ 。

## 2 探地雷达应用实例

### 2.1 实验模型

针对探测深度范围内存在两个孔洞的实际情况进行实验模拟, 当前方孔洞中充水, 雷达波会在孔洞内部来回震荡, 形成的多次反射波与后方孔洞的有效反射波重叠。

实验对象选用的是一块石灰岩, 长为 88 cm、宽 67 cm、高 50 cm。测线放置于岩石侧面, 测线方向与岩石的长边平行, 雷达波传播方向与宽边平行。用于实验的仪器为意大利 IDS 公司研发的 K2 型探地雷达, 天线频率 600 MHz, 时窗 20 ns, 道间距为 0.4 cm, 单个测线的实际长度为 70 cm, 时间采样点数 1 024 个。反射测量方式为剖面法, 采集道数共 170 道, 模型如图 3(a) 所示。沿垂直方向在石灰岩中钻孔, 1# 孔的直径约 4 cm, 设定 2# 孔的位置为 1# 孔充水时多次反射波的位置, 平面图如图 3(b) 所示。

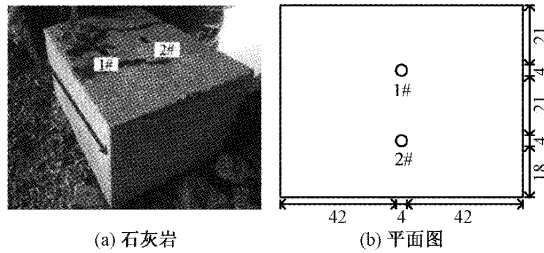


图 3 实验模型图

图 4 为通过设置实验工况得到的原始雷达数据, 在图 4(a) 中, 当 1# 孔空腔, 2# 孔充水时, 两个孔的双曲反射波波形分明, 互不干扰, 且由于 2# 孔的埋深深度较大, 其反射波强度弱于 1# 孔, 倾角大于 1# 孔。如图 4(b) 所示, 当 1# 孔充水, 2# 孔为空腔时, 2# 孔有效反射波和 1# 孔多次波位置相互重叠, 两信号的回波强度接近, 难以区分, 见图 4(b) 的虚线处, 此时 2# 孔弱目标的解释受到严重影响。

### 2.2 处理结果

由上述结果可知, 当前方地质中存在异常目标时, 其多次反射信号会对后方目标对象的识别造成干扰, 并且当多次波的信号强度、位置接近后方目标一次有效反射波时干扰最为强烈, 此时后方目标难以辨识。接下来从不同的视图分析多次波及弱目标反射波的形态特点。图 5 为从雷达

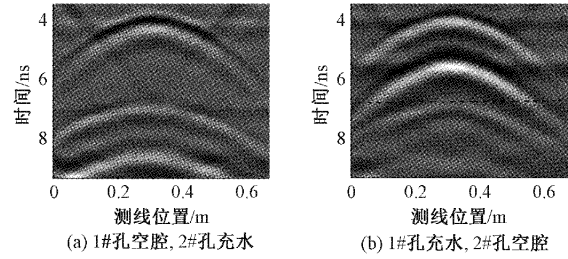


图 4 双孔模型的 GPR 反射波

数据中截取的 1# 孔多次波与 2# 孔弱目标一次有效反射波部分三维视图。在箭头所指的位置附近, 多次波与弱目标有效反射波的位置有较大差异, 并且两者强度较为接近。而在中间区域两者的反射波位置高度重合。

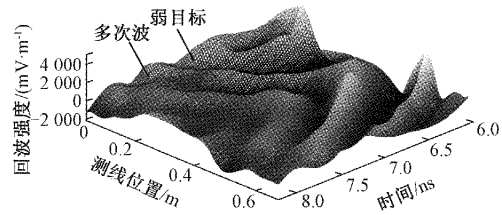


图 5 1# 孔多次波与 2# 孔弱目标有效反射波三维视图

接着分别提取雷达数据中第 15 道与第 70 道的单道波二维数据, 矩形框中包含了多次波和弱目标有效反射波, 如图 6 所示。图 6(a) 中第 15 道波包含有两个脉冲峰值, 说明该位置处多次波与弱目标有效反射波没有完全重叠, 而图 6(b) 中第 70 道波只包含有一个脉冲峰值, 说明此处两者位置已经完全重叠。

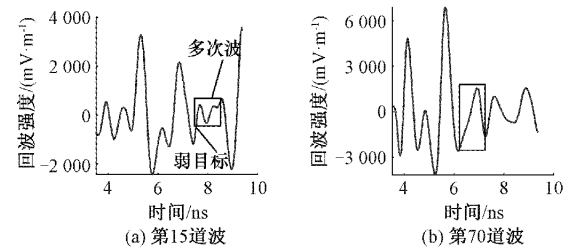


图 6 1# 孔多次波与 2# 孔弱目标有效反射波二维视图

在进行多次波抑制处理之前, 从原始雷达数据中先分别提取一道多次波, 作为处理前后对比的基础, 第 15 道波形如图 7(a) 所示, 原始雷达数据如图 7(b) 所示, 第 161 道波形如图 7(c) 所示。图 7(b, c) 中的两个矩形框都包含有弱目标与多次波, 然后从雷达反射波顶点位置将数据切分为左右两部分。

图 8 为基于 HRT 并应用  $t^2$  拉伸后雷达数据在 Radon 域中的反演结果。虽然在反演到 Radon 域时双曲线没有映射到点状区域, 但形状相似的雷达波形在 Radon 域中的结果也相似。1# 孔的多次波与其有效反射波形状相似, 与 2# 孔弱目标有效反射波不同。从图 8 的矩形框中可以看到有微弱的分叉。分叉下方对应的就是多次波, 其余的位



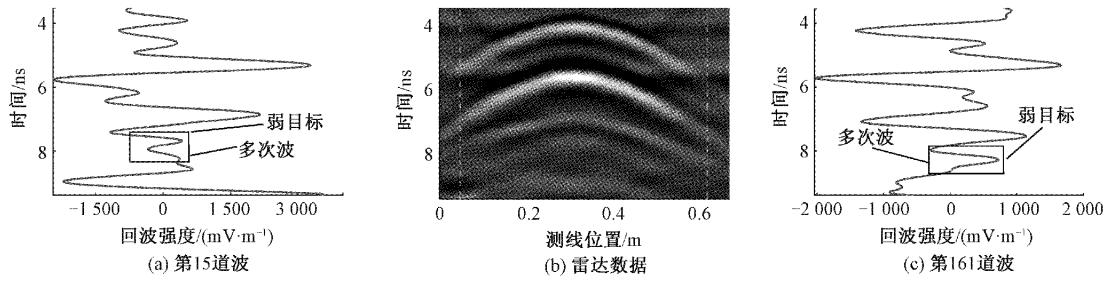


图 7 从左右两部分分别提取一道含有多次波的数据

置因为幅度不明显,混叠和拖影严重,很难区分。由于多次波与弱目标有效波混叠在一起,直接应用过滤窗只能得到多次波一部分能量,故本文采用多项式拟合的方式来恢复 Radon 域中的多次波能量。

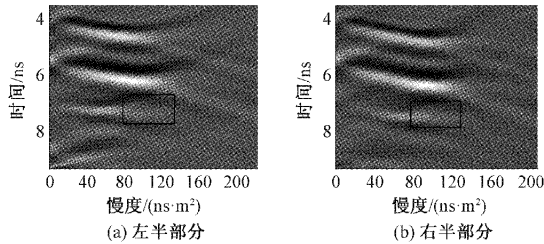


图 8 GPR 数据的 Radon 反演

在 Radon 域中选择过滤窗并进行多次波拟合的实验结果如图 9、10 所示。图 9(a)~(d),10(a)~(d)从左到右分别为尺寸逐渐增大的过滤窗,图 9(e)~(h),10(e)~(h)

为对应的过滤窗拟合得到的结果区域。图 9(i)~(l),10(i)~(l)分别为采用拟合和未拟合方法抑制多次波后的第 15、161 道波形,从中可以看到,随着过滤窗尺寸的增大,多次波对应的拟合及未拟合曲线波谷值不断减小,并且拟合得到的抑制效果要比未拟合的效果好一些,拟合对应的黑色线总在未拟合对应的灰色线下面,小标题括号里的数字表示的是采用拟合方式抑制之后的多次波波谷值。若过滤窗尺寸较小(如图 9(a)),则多次波的波峰仍较明显,抑制的效果差(如图 9(i))。而当过滤窗尺寸选择过大覆盖了弱目标的能量(如图 9(d)),此时得到的抑制结果就会把弱目标的有效反射波同时抑制掉(如图 9(l))。因此在选择过滤窗时要避免选择到弱目标的能量,类似图 9(c)的过滤窗选择得到的抑制效果会较好。如图 10 所示的 Radon 域右半部分得到的实验结论与左半部分类似,也应当选择如图 10(c)所示的过滤窗来进行多次波抑制。

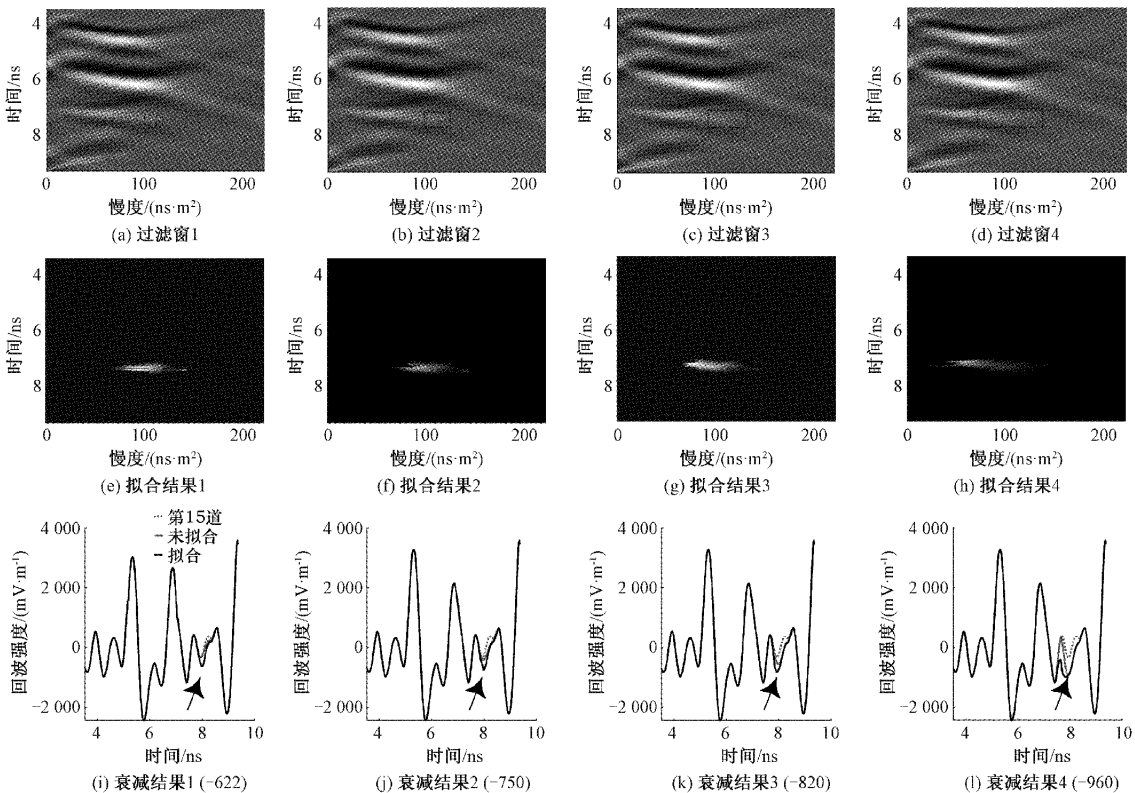


图 9 左半部分过滤窗选择及拟合结果图

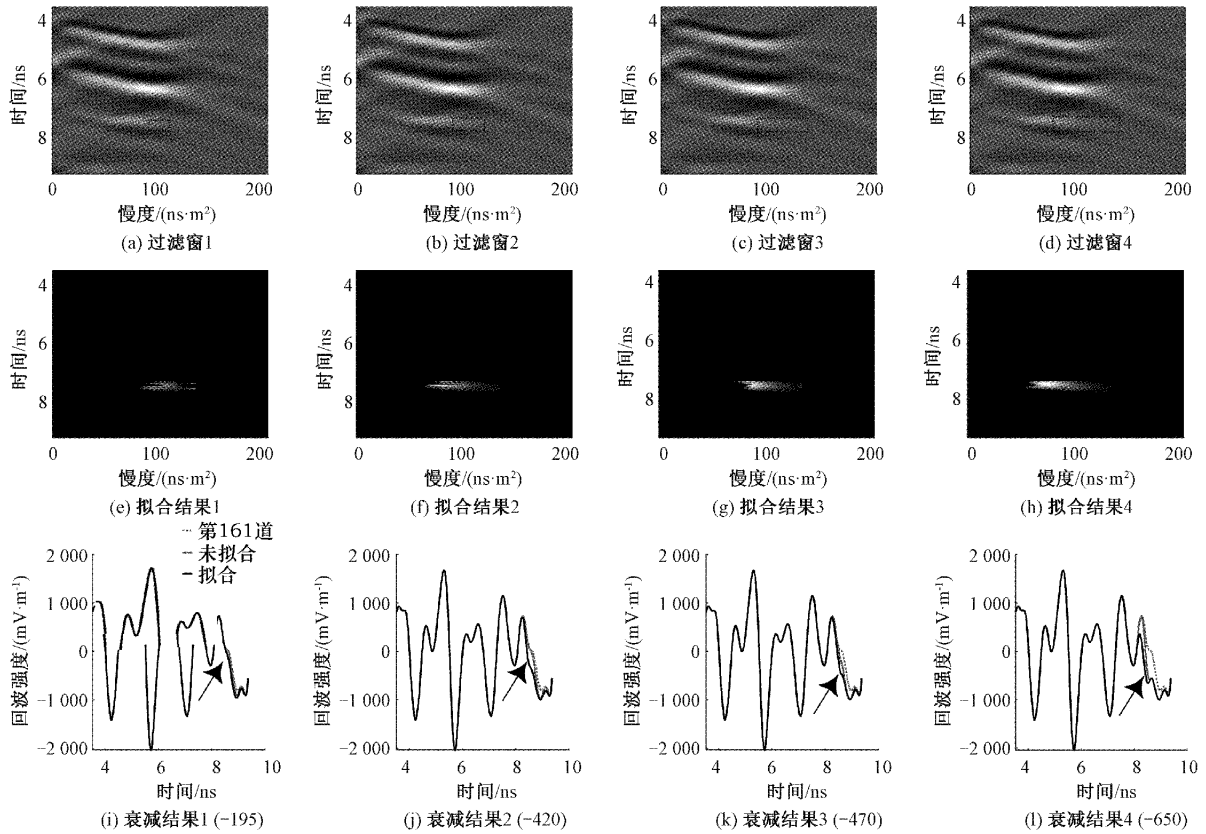


图 10 右半部分过滤窗选择及拟合结果图

根据图 9、10 的实验结果对 Radon 域中左右两部分的多次波数据子矩阵分别选择合适的过滤窗并进行多项式拟合,再对拟合后的子矩阵进行 Radon 正演和矩阵重组,得到时空域的多次波重建结果如图 11(a)所示,从图中的中间部分可以看出尽管在两个子矩阵的接合处存在较小的边缘效应,并且在距离顶点较远的地方存在一些微弱的伪影,但已基本重建了 1# 孔的多次波曲线。图 11(b)为采用同样处理方式进行多项式拟合和正演得到的 2# 孔弱目标的一次有效反射波,对比两图可以发现多次波与 2# 孔有效反射波的特征有明显的不同,1# 孔的多次波与其有效反射波的形状大体上相似,而 2# 孔的有效反射波倾角要比 1# 孔的大一些。然后从原始数据中减去多次波即可得到抑制后的 GPR 数据。

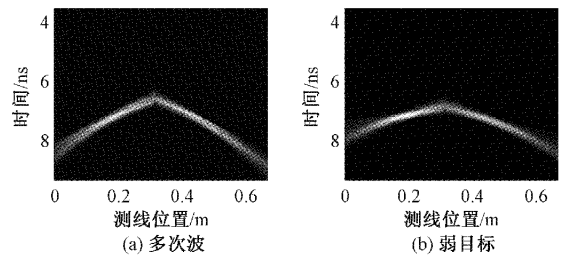


图 11 重建结果

采用 Radon 域的多项式拟合算法去除多次波的结果如图 12 所示,图 12(a)为处理后的第 15 道波形,图 12(b)为抑制多次波后时空域的 GPR 数据,从中可以看到 2# 孔弱目标的有效反射波强度被较好保留,并且不会再影响到

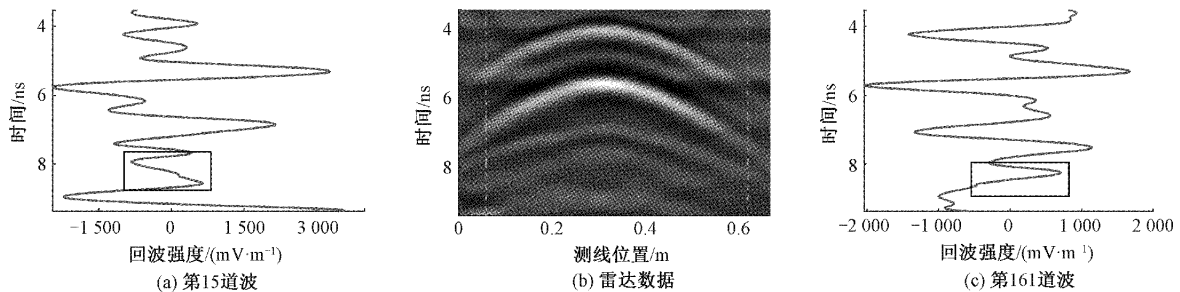


图 12 Radon 变换的多次波抑制结果

对其的区分识别。图 12(c) 为处理后的第 161 道波形。对比图 7(a)、(c) 与图 12(a)、(c), 可以看到两个矩形框中只有一个明显的峰值, 说明此时多次波的峰值基本已经被抑制。最后根据多次波在时间上的规律性, 采用预测反褶积方法进行对比, 得到的抑制结果

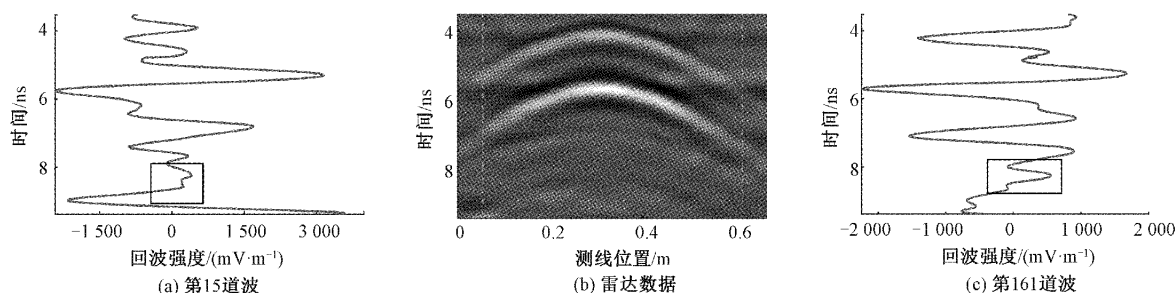


图 13 预测反褶积的多次波抑制结果

### 3 结 论

本文从 GPR 反射波特征入手, 研究了地球物理学领域中 Radon 变换的原理, 针对前方目标多次波与后方目标有效波位置高度重叠, 并且回波强度相近的场景进行了模型试验, 并对获得的 GPR 模型数据, 采用了基于 HRT 的  $t^2$  拉伸方式, 将数据切分为左右两部分后分别应用频域 Radon 变换, 在 Radon 域中应用过滤窗并进行多项式拟合恢复多次波能量, 经过处理后能有效抑制前方强目标的多次干扰波, 同时很好的保留后方弱目标的一次有效反射波强度, 在消除干扰信号影响的同时提高了雷达数据的信噪比, 能够为接下来的地质结构及目标解释研究提供帮助。

#### 参考文献

- [1] 郑俊, 刘婉萍, 马念茹, 等. 探地雷达信号杂波抑制[J]. 电子测量技术, 2018, 41(21): 63-66.
- [2] 申家全, 闫怀志, 胡昌振. 探地雷达目标检测中的离散余弦变换方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1298-1303.
- [3] 刘语, 刘建红, 刘国峰, 等. 陆上地震资料多次波识别与压制技术[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(s1): 24-28, 8.
- [4] ZHOU H, WAN X, LI W, et al. Combining fk filter with minimum entropy stolt migration algorithm for subsurface object imaging and background permittivity estimation[J]. Procedia Engineering, 2011, 23: 636-641, DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2558.
- [5] 张力文, 聂俊丽. 利用改进的 f-k 滤波方法压制探地雷达中的线性干扰[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1444-1450.
- [6] 王玉洁. 探地雷达多次波识别及压制方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [7] 余锦, 石晓虎, 刘宏扬, 等. Radon 变换在多次波压制中的研究及应用[J]. 科技经济导刊, 2021, 29(12): 86-87.
- [8] 毕博文, 王维红, 包培楠, 等. 基于波动理论和抛物 Radon 变换的表面多次波压制技术[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(2): 35-40, 7.
- [9] JIANG X, ZHENG F, JIA H, et al. Time-domain hyperbolic radon transform for separation of pp and p-sv wavefields[J]. Studia Geophysica et Geodaetica, 2016, 60(1): 91-111.

如图 13 所示。对比图 12 和 13, 图 13 中的预测反褶积方法由于依赖预测步长和滤波因子的选取<sup>[18]</sup>, 抑制多次波时往往会将弱目标的有效反射波抑制掉, 并且不能很好的去除位于两侧的多波, 而 Radon 变换的抑制效果明显优于前者。

- [10] CHEN W, YANG L, WANG H, et al. Fast high-resolution hyperbolic radon transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-10.
- [11] SCHULTZ R, GU Y J. Flexible, inversion-based matlab implementation of the radon transform [J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 437-442.
- [12] 王建, 袁宵, 李禹, 等. 利用互相关和 Hough 变换快速检测探地雷达目标[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1156-1162.
- [13] 毕博文. 基于 Radon 变换的多次波压制方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [14] GONG X, WANG S, ZHANG T. Velocity analysis using high-resolution semblance based on sparse hyperbolic Radon transform [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 134: 146-152.
- [15] PUTRA A S, SISMANTO N, WARDHANI D P, et al. Multichannel seismic reflection data processing: multiple attenuation of line 250 at the coast of southern california using hyperbolic radon transform [J]. Journal of physics: Conference Series, 2021, 1949(1): 012020.
- [16] ABBAD B, URSIN B, PORSANI M J. A fast, modified parabolic radon transform [J]. Geophysics, 2011, 76(1): 11-24.
- [17] 邱新明, 汪超, 苑益军, 等. Radon 变换及其在震震矢量数据处理中的应用研究现状 [J]. 石油物探, 2017, 56(6): 905-914.
- [18] 张晴, 郭平, 高源, 等. 利用变步长预测反褶积方法压制沙丘鸣震 [J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(S1): 51-55.

#### 作者简介

辛文凯, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、探地雷达信号处理。

E-mail: 20022201049@mails.guet.edu.cn

闫坤 (通信作者), 博士, 教授, 研究生导师, 主要研究方向为自适应信号处理、机器学习、图像处理等。

E-mail: Kyan5702@gmail.com

甘海铭, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、探地雷达信号处理。

E-mail: ganhaiming@mails.guet.edu.cn

刘宗辉, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为隧道地质工程、探地雷达信号处理等。

E-mail: lzh8@gxu.edu