doi: 10.11720/wtyht.2024.1526

第48卷第6期

2024年12月

周鑫,王洪华,王欲成,等.基于共偏移距 GPR 信号包络和三维速度谱分析的介质电磁波速度估计方法[J].物探与化探,2024,48(6):1693-1701.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1526

Zhou X, Wang H H, Wang Y C, et al. A method for estimating electromagnetic wave velocities in subsurface media based on common-offset GPR signal envelope and 3D velocity spectrum analysis [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6):1693-1701.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024. 1526

基于共偏移距 GPR 信号包络和三维速度 谱分析的介质电磁波速度估计方法

周鑫,王洪华,王欲成,吴祺铭,王浩林,刘洪瑞

(桂林理工大学地球科学学院,广西桂林 541004)

摘要:目前广泛应用于探地雷达(ground penetrating radar, GPR)信号的速度谱分析方法大都通过叠加相干信号的 振幅能量来构建速度谱,并估计地下介质电磁波速度;当信号子波出现多个波峰和波谷时,基于振幅的方法所构建 的速度谱会出现多个能量团,不利于后续能量峰值的判别、拾取和速度估计。为此,提出了一种基于共偏移距 GPR 信号包络和三维速度谱分析的地下介质电磁波速度估计方法。该方法通过扫描 GPR 剖面中的双曲线绕射波信号 包络来构建叠加能量随零偏双程走时、试速度以及测点位置变化的三维速度谱,并根据三维速度谱中双曲线顶点 出现位置,提取二维速度谱切片。在此基础上,拾取二维速度谱切片中能量峰值对应的试速度并作为地下介质的 电磁波速度。数值试验结果表明:与基于信号振幅的三维速度谱分析方法相比,基于信号包络的三维速度谱分析 方法计算的速度谱中连续能量团更少、能量更集中、速度估计误差更小,且可更有效地构建逆时偏移的速度模型。 关键词:三维速度谱分析;信号包络;共偏移距探地雷达信号;速度估计

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2024)06-1693-09

0 引言

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)作为 一种高分辨率无损探测方法,在工程检测、水文地 质、考古调查中得到广泛应用^[1-5]。信号处理是利 用 GPR 信号准确分析与解释地下介质结构分布的 作用手段^[6]。其中,地下介质电磁波速度是对 GPR 信号进行时深转换、偏移成像、全波形反演等处理的 关键参数^[7]。常规的介电常数法^[8]、几何刻度 法^[9]、金属板反射法^[10]等需要取心测量介质的相对 介电常数、未考虑电磁波衰减、需要人工拾取信号的 初至,一方面造成电磁波速度估计精度较低,另一方 面存在以"点"盖"面"的局限,限制了其在实际 GPR 信号处理中的应用^[11-12]。理论上,基于反演理论的 GPR 波形反演和层析成像可构建较为精确的速度 模型,但上述两种方法都存在计算效率低,噪声影响 大、且涉及多参数反演等问题,在实际应用中还较为 困难^[13-16]。

速度分析是利用实测数据估计地下介质电磁波 速度的有效方法。常用的速度分析方法主要有:频 率波数域偏移法速度估计^[17]、互相关分析及最小二 乘拟合速度估计^[18]、绕射波孤立和偏移聚焦分析速 度估计^[19]、最小熵法^[16]、K-means 法速度谱估 计^[20]、多偏移距数据速度谱分析^[21]等。其中,应用 最广泛的是多偏移距数据速度谱分析法,其基本原 理是通过叠加相干 GPR 信号的振幅来构建速度谱, 以估计地下介质电磁波速度,通常用于共源观测、共 中心点观测、阵列天线观测方式等采集的多偏移距 GPR 信号处理中。然而,现有的商业 GPR 系统大 都采用剖面法观测,通常采集的是共偏移距 GPR 信 号^[22]。常规基于多偏移距 GPR 信号的速度谱分析

收稿日期: 2024-02-22; 修回日期: 2024-09-26

基金项目: 广西自然科学基金项目(2022GXNSFAA035595,2020GXNSFAA159121)

第一作者:周鑫(1999-),男,硕士研究生,主要从事探地雷达逆时偏移成像方面的研究工作。Email:2807433190@ qq.com

通讯作者:王洪华(1986-),男,博士,副教授,主要从事探地雷达理论方法及应用研究工作。Email:wanghonghua5@glut.edu.cn

方法,通常难以用于共偏移距 GPR 信号的电磁波速 度估计。为此, Dong 等^[23] 根据叠后地震信号构建 速度谱的思想,构建了基于共偏移距 GPR 信号的速 度谱分析方法,并应用于共偏移距探月雷达信号处 理中,较为精确地估计了月壤分层结构的电磁波速 度。随后,该方法被应用于共偏移距管线探测 GPR 信号的电磁波速度估计,准确定位了管线埋深^[24]。 然而,上述速度谱分析方法估计地下介质电磁波速 度时,均以相干信号振幅的叠加为基础,当信号子波 出现多个峰值时,构建的速度谱会出现多个能量团, 不利于后续能量峰值的精确判别和拾取,从而导致 电磁波速度估计精度较差。希尔伯特变换可将信号 转换为其解析信号,获得只含有一个正峰值的包络 信号,对信号包络进行速度谱分析,可避免原信号子 波中的多个正峰值和负峰值共同作用对速度谱产生 多个连续能量团问题,更有利于后续能量峰值的精 确判别和拾取。目前该方法被应用于共源道集[25] 和共中心点道集^[26]信号的地下介质电磁波速度估 计,并取得了较好的效果。

为此,本文将信号包络思想引入到共偏移距 GPR 信号的速度谱分析中,以解决常规基于信号振 幅的速度谱分析方法构建的速度谱中连续能量团较 多,能量峰值难以准确拾取的问题,为从共偏移距 GPR 信号中准确估计介质电磁波速度提供一种可 行有效的方法。

1 共偏移距 GPR 信号包络的速度谱构建方法

1.1 信号包络的提取

根据希尔伯特变换,一个随时间 t 变化的解析

信号 $\hat{y}(t)$ 可由实信号y(t)及其对应的希尔伯特变 换 $y_{H}(t)$ 组成,可表示为^[27]:

$$\widetilde{y}(t) = y(t) + iy_H(t) \quad , \tag{1}$$

 $y_{H}(t)$ 的表达式为:

$$y_H(t) = H\{y(t)\} = -\frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau$$
, (2)

式中:P代表柯西主值。此外,解析信号 $\hat{y}(t)$ 也可以通过瞬时振幅E(t)和瞬时相位 $\Phi(t)$ 来表示:

$$\widetilde{y}(t) = E(t)e^{i\Phi(t)} , \qquad (3)$$

$$E(t) \prod \equiv \overline{z} \cdot \overline{z} \cdot$$

其中,瞬时振幅 E(t) 可表示为:

 $E(t) = | \tilde{y}(t) | = \sqrt{y^2(t) + y_H^2(t)}$, (4) 式(4)称为实信号 y(t)的包络。可见, GPR 信号的 包络可通过求取解析信号的振幅获得。 图 1 展示了时间域 Ricker 子波波形及其包络, 与原始信号振幅中出现 2 个波峰和 1 个波谷相比, 原信号包络均为正振幅值,只出现 1 个波峰,更有利 于后续构建速度谱过程中信号能量的相干叠加。



Fig.1 Ricker wavelet and its envelope

1.2 共偏移距信号包络的三维速度谱构建

共偏移距三维速度谱分析方法是 GPR 信号处 理中常用的电磁波速度估计方法,其基本原理 是^[28]:假定一系列可能的试速度,根据不同的零偏 双程走时、试速度以及测点位置计算得到不同双曲 线轨迹上各个点的双程走时,从而确定一系列双曲 线。在此基础上,通过计算双曲线轨迹上不同测点 位置的信号包络能量相干性,然后叠加相干度并构 建信号能量随测点位置、试速度和零偏移距双程走 时变化的三维速度谱。

图 2 展示了共偏移距 GPR 信号的三维速度谱 分析示意。根据图 2a 所示的共偏移距测量示意,可 采集到如图 2b 所示的共偏移 GPR 剖面。由图 2b 可知:根据零偏双程走时 t_i、试速度 v_k 以及第 j 个测 点位置与双曲线顶点位置之间的水平距离 x_j,可得 到双曲线第 j 个点的双程走时 t_{i,i,k}为:

$$t_{i,j,k} = \sqrt{t_i^2 + 4x_j^2/v_k^2} \quad (5)$$

根据式(5)可生成一系列双曲线,随后在采集的共偏移 GPR 剖面图 2b 中,叠加双曲线位置处所 有道的信号包络,可获得叠加能量,其表达式为^[29]:

$$S(t_{i}, x_{j}, v_{k}) = \sum_{i=1}^{N_{i}} E(t_{i,j,k}, x_{j}) \quad (6)$$

式中: $i=1,2,\dots,n_i$; $j=1,2,\dots,n_x$; $k=1,2,\dots,n_v$;E表示共偏移距 GPR 信号包络。 N_i 为第i 次计算时 沿测点排列方向的水平窗口长度, n_i, n_x, n_v 分别为 每道的采样点数、道数和试速度数。 $S(t_i, x_j, v_k)$ 为 叠加能量随测点位置 x_j 、试速度 v_k 和零偏双程走时 t_i 变化的三维速度谱,若试速度非常接近真实速度, 则双曲线能量相干叠加后会在三维速度谱中出现一 个能量团,如图 2c 所示。 6期



a—共偏移距测量示意;b—共偏移距 GPR 剖面;c—三维速度谱示意 a—diagram of common offset measurement;b—profile of common offset GPR;c—diagram of three dimensional velocity spectrum 图 2 共偏移距 GPR 信号的三维速度谱分析示意

Fig.2 Diagram of three dimensional velocity spectrum analysis of common offset GPR signal

然而,受地表杂波干扰,以及背景介质速度不均 匀的影响,实测信号中双曲线绕射波形态会出现诸 如不完整、歪曲、交错或振幅不均匀等现象,导致计 算得到的叠加振幅效果较差。为此,对式(6)计算 的叠加能量进行归一化处理^[24,30]:

$$C(t_i, x_j, v_k) = \frac{1}{N_i L} \sum_{j=1}^{L+i-1} \frac{S_{i,j,k}^2}{\sum_{j=1}^{N} E^2(t_{i,j,k}, x_j)} , \quad (7)$$

式中:L为计算时的时间窗口长度。由于剖面中的 双曲线绕射波在时间方向上具有一定宽度,利用时 间窗口长度L对叠加能量进行归一化,来保证计算 结果 C(t_i,x_j,v_k)不受信号包络变化的影响。重要 的是,在式中增加 1/N_i,以补偿沿测点零偏双程走 时方向使用不同水平窗口 N_i 所引起的能量差 异^[24]。C(t_i,x_j,v_k)是一个三维数据体,由于其能量 最大值所对应的三维坐标可以确定双曲线绕射波顶 点的双程走时、沿测点排列方向的位置以及电磁波 在地下介质中的传播速度,因而可从三维速度谱试 速度轴方向上的所有速度谱切片中,找到能量峰值, 并提取该位置相应的二维速度谱切片,二维速度谱 切片中能量峰值对应的试速度值即为电磁波在地下 介质中的传播速度。

然而,由于干扰信号的存在,速度谱仍会受到其 影响,从而影响峰值的拾取。因此,为了压制三维速 度谱中的干扰响应,本文采用如式(8)所示的软阈 值函数^[24]:

$$C_{i,j,k} = \begin{cases} C_{i,j,k} - a, & C_{i,j,k} - a > a \\ 0, & C_{i,j,k} - a \le a \end{cases}$$
(8)

式中:a 值通常为 0.5~0.95, 可以根据情况自行调节。

计算速度谱的参数包括水平窗口长度 N_i ,时窗 长度 L,试速度步长 Δv_k ,可以根据实际共偏移距剖 面的特征进行合理地选择。水平窗口长度 N_i 可以 根据双曲线绕射波沿零偏双程走时的长度进行设 定;时窗长度 L_i 根据双曲线绕射波的持续时间进行 设定,时窗的起点应该在直达波初至时间之下,以减 小直达波的影响;试速度步长 Δv_k 应该根据数据大 小、所要估计的速度精度以及计算时间综合考虑进 行选择。

2 数值模拟实验

为验证基于共偏移距 GPR 信号包络和三维速 度谱分析的地下介质电磁波速度估计方法的正确性 和有效性,采用时域有限差分法对图 3a 所示的空洞 模型进行模拟计算。空洞模型的大小为 3.5 m×2.2 m,模型正中心(1.75 m,1.10 m)处埋有一个直径为 0.1 m,埋深为 1.05 m 的空洞。背景介质的相对介 电常数为 9.0,电导率为 0.001 s/m。模拟计算时的 网格大小为 0.005 m,激励源是中心频率为 500 MHz 的 Ricker 子波,时间长度为 40 ns,收发天线间距为 0.01 m,天线步长为 0.05 m。

图 3b 为图 3a 所示的空洞模型的共偏移距 GPR 模拟剖面,空洞产生的双曲线绕射波在约 21 ns 开 始出现,且清晰可见。去除图 3b 中的直达波后,分 别利用基于信号振幅和包络的三维速度谱分析方法 对其进行速度分析,获得的三维速度谱如图 4a、c 所 示。从图 4a、c 试速度轴方向上的所有速度谱切片 中,找到能量的最大值处,即为双曲线绕射波顶点出 现位置,并分别提取出该位置处速度谱切片,获得的 结果如图 4b、d。由图可见:与图 4a 和图 4b 中出现 4个明显的能量团相比,图 4c 和图 4d 中能量分别 更集中,只有一个能量团,更易于速度值的拾取。根 据双曲线绕射波出现时间和能量峰值(黑色十字标 注),从图 4b、d 估计的电磁波速度分别为 0.096 m/ ns、0.098 m/ns, 与真实速度 0.1 m/ns 相比, 误差分 别为4.0%、2.0%。由此可见,与基于信号振幅的三 维速度谱分析结果相比,基于信号包络的三维速度 谱分析方法不仅更易于根据能量峰值拾取速度,而 且速度估计精度更高。



a一基于振幅的三维速度谱;b一基于振幅的速度谱切片;c一基于包络的三维速度谱;d一基于包络的速度谱切片

a-three dimensional velocity spectrum based on amplitude; b-velocity spectrum slice based on amplitude; c-three dimensional velocity spectrum based on envelope;d-velocity spectrum slice based on envelope

图 4 图 3b 去直达波后的 GPR 信号构建的三维速度谱

Fig.4 Three dimensional velocity spectrum constructed by the GPR signal in figure 3b after removing the direct wave

实测信号测试 3

为验证基于共偏移距 GPR 信号包络和三维速 度谱分析方法在实测信号中的应用效果,将其应用 于实测信号中并与基于信号振幅的三维速度谱分析 结果进行对比,以分析其优势。

图 5a 为利用 GSSI-SIR-4000 型 GPR 系统对某 地下管道进行探测获得的原始 GPR 剖面一,主要采 集参数如下:天线中心频率为1600 MHz、叠加次数

为50、点距为0.01 m,时间间隔为0.013 4 ns,时窗 为8.66 ns。对其进行零时校正、背景去除、道间均 衡、增益处理等常规处理后的 GPR 剖面如图 5b 所 示。需要注意的是,零时校正导致剖面中双曲线位 置发生了较为明显的上移。分别利用基于信号振幅 和信号包络的三维速度谱分析方法对图 5b 中的 GPR 信号进行处理,获得的结果如图 6 所示。根据 双曲线绕射波顶点出现位置,从图 6a、c 中分别提取 出该位置处速度谱切片,获得的结果如图 6b、d 所 示。

6期



图 5 实测原始 GPR 剖面一(a) 及常规处理后的 GPR 剖面(b)







a-three dimensional velocity spectrum based on amplitude; b-velocity spectrum slice based on amplitude; c-three dimensional velocity spectrum based on envelope; d-velocity spectrum slice based on envelope



Fig.6 Three dimensional velocity spectrum constructed by the GPR signal in figure 5b

由图可见: 与图 6a 和图 6b 中出现 2 个明显的 能量团相比, 图 6c 和图 6d 中能量分别更集中, 只有 一个能量团, 更易于速度值的拾取。根据双曲线绕 射波顶点出现时间和能量峰值(黑色"十字"标注), 从图 6b 和图 6d 估计的电磁波速度分别为 0.153 m/ ns、0.163 m/ns。根据图 6b 和图 6d 中能量峰值, 提 取到对应的零偏双程走时分别为 4.64 ns、4.70 ns, 利用式(9)计算的地下管道埋深分别为 0.355 m、0. 383 m, 与真实埋深 0.370 m 相比, 误差分别约为 4. 1% 3.5% .

$$h = \frac{vt}{2} \quad , \tag{9}$$

式中:v、t、h 分别代表所估计的电磁波速度、双曲线 绕射波顶点所对应时间以及所估计的埋深。实测结 果表明,与基于信号振幅的三维速度谱分析方法结 果相比,基于信号包络的三维速度谱分析方法不仅 更易于根据能量峰值拾取速度,而且速度估计精度 更高。 · 1698 ·

利用 GSSI-SIR-4000 型 GPR 系统对某地进行探 测获得的 GPR 剖面二经常规处理后如图 7 所示。 主要采集参数如下:天线中心频率为 200 MHz、叠加 次数为70、点距为0.05 m,时间间隔为0.046 9 ns, 时窗为45.25 ns。对该 GPR 剖面中所含有的其中 10条双曲线绕射波利用红色数字进行标记。10条

双曲线的顶点出现时间和水平位置等信息如表1第 2列和第3列所示。将基于信号振幅和信号包络的 三维速度谱算法分别应用于图 7 中白色虚线所划分 的7个子 GPR 数据,获得的速度谱切片如图 8 和图 9 所示。由于第1、2 条双曲线绕射波的水平位置相 同,其速度谱分析结果出现在一张速度谱切片中,如



物 探

与 化 探





a-hyperbola 1 and 2;b-hyperbola 3;c-hyperbola 4,5 and 6;d-hyperbola 7;e-hyperbola 8;f-hyperbola 9;g-hyperbola 10 图 7 中 GPR 信号所构建的基于包络的速度谱切片 图 9

The envelope-based velocity spectrum slice constructed by the GPR signal in figure 7 Fig.9

图 8a 和 9a 所示。同理,第 4、5、6 条双曲线绕射波的计算结果也出现在一张速度谱切片中,如图 8c 和 9c 所示。

由图8可见,速度谱切片普遍出现多个连续能 量团如图 8a、c、e、f、g,能量团周围存在微弱信号的 干扰如图 8b、c、d、e、g,不利于速度的拾取。个别速 度谱切片估计的速度值不在合理速度分布范围内如 图 8b、g。由图 9 可见,能量聚焦较好,能量团清晰 可见,无多个连续能量团出现。对比可知:基于信号 包络的三维速度谱分析方法相比基于信号振幅更容 易拾取速度,且拾取的速度值更合理。分别提取图 9能量峰值(黑色"十"字所示)对应的速度,如表1 第4列所示,地下介质电磁波速度分布在0.068~ 0.091 m/ns 之间,根据式(9)计算的双曲线顶点深 度如表1第5列所示。在此基础上,利用表1中估 计的速度和顶点深度值,并结合高斯圆滑,构建的二 维电磁波速度模型如图 10 所示。由图可见:地下介 质电磁波速度大致呈层状分布,埋深1.0 m 以内的 介质电磁速度约为 0.086 m/ns; 埋深 1.0~1.5 m 之 间的介质电磁波速度约为0.076 m/ns;埋深1.5~2.0 m之间的介质电磁波速度约为 0.071 m/ns,水平位置 4~10 m 出现局部低速异常。利用图 10a 所示的二维速度模型作为偏移速度模型,对图 7 中的实测GPR 数据进行逆时偏移成像,获得结果如图 10b 所示。由图可见,双曲线绕射波能量收敛较好,成像结果有利于后续定位地下目标体位置。实测信号测试结果表明基于信号包络的三维速度谱方法可为后续的逆时偏移提供更为有效的速度模型。

表 1 估计的速度值 Table 1 The estimated velocity value

双曲线 序号	顶点出现 时间/ns	顶点水平 位置/m	估计的速 $\underline{\mathbf{m}}_{(\mathbf{m} \cdot \mathbf{n}_{\mathbf{n}}^{-1})}$	估计的 深度/m	
71 -5	H11-1/113	ридли	ję/(m·ns)	1/k/)2/ III	
1	4.64	0.8	0.091	0.21	
2	11.58	0.8	0.085	0.49	
3	34.69	2.9	0.075	1.30	
4	16.92	6.4	0.080	0.67	
5	23.72	6.6	0.082	0.97	
6	38.30	6.5	0.072	1.37	
7	32.91	8.2	0.068	1.12	
8	28.55	10.7	0.072	1.03	
9	19.17	12.7	0.088	0.84	
10	22.36	14.1	0.085	0.95	





集中,估计的速度更合理、精确,可为逆时偏移提供 更为有效的速度模型。

4 结论

1)针对基于共偏移距 GPR 信号振幅的三维速 度谱分析方法所构建的速度谱出现多个能量团,不 利于后续能量峰值的准确拾取以及速度的准确估计 问题,本文提出了一种基于共偏移距 GPR 信号包络 和三维速度谱分析的地下介质电磁波速度估计方 法。

2)数值测试结果表明:与基于信号振幅的三维 速度谱分析方法相比,基于信号包络的三维速度谱 分析方法计算的速度谱中连续能量团更少、能量更

参考文献(References):

- [1] 韩佳明,仲鑫,景帅,等.探地雷达在黄土地区城市地质管线探测中的应用[J].物探与化探,2020,44(6):1476-1481.
 Han J M,Zhong X,Jing S, et al. The application of geological radar to urban geological pipeline detection in the loess area[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(6):1476-1481.
- [2] 戴前伟,宁晓斌,张彬.基于共中心点道集约束的探地雷达波阻抗反演[J].煤田地质与勘探,2020,48(3):211-218.
 Dai Q W,Ning X B,Zhang B.Common midpoint gather constraint-based impedance inversion of ground penetrating radar[J].Coal Geology & Exploration,2020,48(3):211-218.

- [3] 宗鑫,王心源,刘传胜,等.探地雷达在地下考古遗存探测中的 实验与应用[J].地球信息科学学报,2016,18(2):272-281.
 Zong X, Wang X Y, Liu C S, et al. Experiments and applications of ground penetrating radar in the investigation of subsurface archaeological interest [J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18 (2):272-281.
- [4] Lyu Y Z, Wang H H, Gong J B. Application of GPR reverse time migration in tunnel lining cavity imaging[J]. Applied Geophysics, 2020,17(2):277-284.
- [5] 江玉乐,黄鑫,张楠.探地雷达在公路隧道衬砌检测中的应用
 [J].煤田地质与勘探,2008,36(2):76-78.
 Jiang Y L, Huang X, Zhang N. Application of ground penetrating radar in the inspection of highroad tunnel lining[J].Coal Geology & Exploration,2008,36(2):76-78.
- [6] 冯德山,戴前伟,余凯.基于经验模态分解的低信噪比探地雷达数据处理[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(2):596-604.

Feng D S, Dai Q W, Yu K.GPR signal processing under low SNR based on empirical mode decomposition [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2012, 43(2): 596–604.

- [7] 王敏玲,梁值欢,王洪华,等.探地雷达逆时偏移成像方法研究现状及进展[J].地球物理学进展,2019,34(5):2087-2096.
 Wang M L,Liang Z H,Wang H H,et al.Review of reverse time migration in ground penetrating radar [J]. Progress in Geophysics, 2019,34(5):2087-2096.
- [8] 王新静,赵艳玲,胡振琪,等.不同水分条件下探地雷达电磁波 波速估算方法与对比分析[J].煤炭学报,2013,38(S1):174-179.

Wang X J, Zhao Y L, Hu Z Q, et al. Estimation method and comparative analysis of electromagnetic wave velocity of ground penetrating radar under different moisture conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 174–179.

[9] 牛富俊,陈银城.广州地区城市道路病害探测图谱与优化方法
 [J].应用科技,2022,49(2):133-139.
 Niu F J, Chen Y C. The atlas and optimization method of urban road

disease detection in Guangzhou area [J]. Applied Science and Technology, 2022, 49(2):133–139.

- [10] 孔令讲,周正欧.浅地层探地雷达波速测量方法的研究[J].电 子学报,2002,30(9):1330-1332.
 Kong L J,Zhou Z O.Research on measurement of wave speed for sub-surface penetrating radar[J].Acta Electronica Sinica,2002,30 (9):1330-1332.
- [11] Leng Z, Al-Qadi I L.An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two aircoupled GPR systems[J].NDT & E International, 2014, 66:90-98.
- [12] 李廷军,周正欧.探地雷达中双曲线的提取及在波速估计中的应用[J].电波科学学报,2008,23(1):124-128.
 Li T J, Zhou Z O.Extraction of hyperbolic signatures and application for propagation velocity estimation in GPR[J].Chinese Journal of Radio Science,2008,23(1):124-128.
- [13] Guo X B, Liu H, Shi Y, et al. Improving waveform inversion using

modified interferometric imaging condition [J]. Acta Geophysica, 2018,66(1):71-80.

- [14] Seol S J, Kim J H, Cho S J, et al. A radar survey at a granite quarry to delineate fractures and estimate fracture density [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2004,9(2):53-62.
- [15] Wang H H, Xi Y H, Lyu Y Z, et al. Attenuation-compensated reverse time migration of GPR data constrained by resistivity[J].Applied Geophysics, 2022, 19(4):563-571.
- [16] 席宇何,王洪华,王欲成,等.基于速度移动窗的最小熵法在 GPR 逆时偏移中的应用[J].物探与化探,2023,47(5):1250-1260.

Xi Y H, Wang H H, Wang Y C, et al. Application of the minimum entropy method based on a velocity-controlled moving window to the reverse time migration of ground-penetrating radars [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(5):1250-1260.

- [17] 张安学,蒋延生,汪文秉.探地雷达频率波数域速度估计和成像 方法的实验研究[J].电子学报,2001,29(3):315-317.
 Zhang A X, Jiang Y S, Wang W B.Experimental studies on GPR velocity estimation and imaging method using migration in frequency wavenumber domain[J].Acta Electronica Sinica,2001,29(3): 315-317.
- [18] 崔凡,李思远,王丽冰.基于互相关分析及最小二乘拟合的 GPR 偏移速度估计[J].地球物理学进展,2018,33(1):353-361.

Cui F, Li S Y, Wang L B. Migration velocity estimation of GPR based on cross-correlation and least square fitting [J].Progress in Geophysics, 2018, 33(1):353-361.

- [19] 吕文敏,张金海.基于绕射波孤立和偏移聚焦分析的探地雷达 速度建模[M].北京:北京伯通电子出版社,2021.
 Lyu W M,Zhang J H.Velocity modeling of ground-penetrating radar based on the analysis of isolated and offset focusing of wraparound waves[M].Beijing: Beijing Botong Electronic Publishing House, 2021.
- [20] 王天琪,李静,白利舸,等.基于速度分析的探地雷达阻抗介电 常数反演[J].吉林大学学报:地球科学版,2021,51(2):561-570.

Wang T Q, Li J, Bai L G, et al.GPR impedance inversion of permittivity based on velocity analysis [J].Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2021, 51(2):561-570.

- [21] Wang H H, Liu H, Cui J, et al. Velocity analysis of CMP gathers acquired by an array GPR system 'Yakumo': Results from field application to tsunami deposits [J]. Exploration Geophysics, 2018, 49 (5):669-674.
- [22] 刘钰.探地雷达数据波阻抗反演方法及其应用研究[D].杭州: 浙江大学,2018.

Liu Y.The study of ground penetrating radar impedance inversion method and its application [D].Hangzhou; Zhejiang University, 2018.

- [23] Dong Z J, Feng X, Zhou H Q, et al. Properties analysis of lunar regolith at Chang'E-4 landing site based on 3D velocity spectrum of lunar penetrating radar[J].Remote Sensing, 2020, 12(4):629.
- [24] 彭建,杨泽帆,白洁,等.基于探地雷达的地下管线埋深估计方 法[J].雷达科学与技术,2022,20(1):79-86.

6期

Peng J, Yang Z F, Bai J, et al. Depth estimation of underground pipeline using ground penetrating radar [J]. Radar Science and Technology, 2022, 20(1):79-86.

- [25] Liu H, Sato M.In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array [J].NDT & E International, 2014, 64:65–71.
- [26] Liu H, Xie X Y, Cui J, et al. Groundwater level monitoring for hydraulic characterization of an unconfined aquifer by common midpoint measurements using GPR[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2014, 19(4):259-268.
- [27] 程乾生.信号数字处理的数学原理[M].北京:石油工业出版 社,1979.
 Cheng Q S.Mathematical principle of signal digital processing[M].

Beijing: Petroleum Industry Press, 1979.

- [28] Liu H, Takahashi K, Sato M. Measurement of dielectric permittivity and thickness of snow and ice on a brackish lagoon using GPR[J].
 IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(3):820-827.
- [29] 陆基孟,王永刚.地震勘探原理(3版)[M].东营:中国石油大 学出版社,2009.

Lu J M, Wang Y G. Principle of seismic exploration (3rd edition) [M].Dongying: China University of Petroleum Press, 2009.

[30] 龚俊波.三维多偏移距探地雷达数据的逆时偏移成像方法研究
 [D].桂林:桂林理工大学,2021.
 Gong J B.Research on inverse time migration imaging method of 3D multi-offset ground penetrating radar data[D].Guilin:Guilin University of Technology,2021.

A method for estimating electromagnetic wave velocities in subsurface media based on common-offset GPR signal envelope and 3D velocity spectrum analysis

ZHOU Xin, WANG Hong-Hua, WANG Yu-Cheng, WU Qi-Ming, WANG Hao-Lin, LIU Hong-Rui (School of Geosciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Currently, velocity spectrum analysis methods widely used for ground-penetrating radar(GPR) signals mostly construct velocity spectra by superposing the amplitude energy of coherent signals to estimate electromagnetic wave velocities in subsurface media. In the case of multiple peaks and troughs in signal wavelets, velocity spectra constructed using these amplitude-based methods display multiple energy clusters, adversely affecting the identification, picking, and velocity estimation of subsequent energy peaks. Hence, this study proposed a method for estimating electromagnetic wave velocities in subsurface media based on common-offset GPR signal envelope and 3D velocity spectrum analysis. By scanning the signal envelope of hyperbolic diffracted waves in the GPR profile, the proposed method constructed the 3D velocity spectra of superimposed energy varying with zero-offset two-way travel time, test velocity, and measuring point position. Moreover, it extracted the slices of 2D velocity spectra according to the positions of hyperbolic vertices in the 3D velocity spectra. On this basis, the test velocities corresponding to the energy peaks in the slices of 2D velocity spectra were picked as the electromagnetic wave velocities in subsurface media. The numerical test results show that compared to the amplitude-based methods, the signal envelope-based 3D velocity spectrum analysis method obtained velocity spectra characterized by fewer continuous energy clusters, more concentrated energy, and minor velocity estimation errors, thus more effectively constructing the velocity model with inverse-time migration.

Key words: three dimensional velocity spectrum analysis; signal envelope; common offset ground penetrating radar signal; velocity estimation

(本文编辑:叶佩)