

基于初至波走时改进的探地雷达层析成像研究

胡周文

广州市城市规划勘测设计研究院

摘要: 利用探地雷达初至波走时进行速度反演,可以有效无损探测目标体内部异常,其中走时和路径计算精度是影响最终成像质量的关键因素。最短路径法是常用射线追踪技术之一,通常采用Bresenham画图法计算子波源点到各节点走时,但该方法的加权系数未考虑权重与距离的关系。本文提出引入元胞路径加权法计算走时,模型测试表明该方法能提高走时计算精度且稳定有效,基于Tikhonov正则化理论和共轭梯度算法,改进算法能进一步提高反演精度。此外,测试单位矩阵算子、拉普拉斯算子作为数据加权矩阵对反演结果的影响结果表明,使用拉普拉斯算子可以获得更好的反演结果。最后,设计了一个沙槽空盒模型并提取波初至波走时,反演结果准确地估计了空盒速度与形态。

关键词: 探地雷达; 走时精度; Tikhonov正则化; 成像精度

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.13.116

引言

探地雷达因其具有高分辨率、高效、无损等优点而广泛用于各个领域,地表探地雷达方法易受浅表强绕射和强衰减影响,严重影响探测深度和精度,钻孔或井中-地表雷达因较大的探测深度和高分辨率近年来成为研究热点,广泛用于提供地下地层信息,探测矿井中地质异常体和混凝土中缺陷检测。

相比于衰减层析成像和全波形层析成像,走时层析成像所利用的走时信息与辐射模式、天线极化无关及高效率更有利于实际应用。由多种算法可以用于计算初至波走时和射线路径,其中最短路径法具有稳定高效,适用于任何复杂的介质模型,震源到各计算节点的走时和路径可以同时获得等特点而广泛应用于波场追踪问题。采用不同的策略可以提高走时和路径计算精度,如在模型参数化时改变节点分布、细化正演网格及非规则网格剖分,在波前扩展中采用收缩波前点法、动态网络等改进算法。本文基于现有最短路径法研究成果,采用规则网格离散慢度模型,在细化的正演网格中引入元胞路径加权方式计算走时并提高其计算精度,进一步提高探地雷达走时速度成像质量。该层析算法以Tikhonov正则化理论和加阻尼因子的共轭梯度法为基础,具有求解快速、稳定、耗内存少等特点。此外,本文还对比了单位矩阵和拉普拉斯算子作为模型加权因子对反演结果的影响。

通过模型测算,验证了本文层析算法的正确性,且改进后的算法能提高走时计算精度并能进一步提高反演精度,应用拉普拉斯算子光滑约束模型能够获得更为真实反演结果。最后,将研究的层析算法对沙槽空盒物理模型数据进行反演,反演结果准确地估计了空盒的速度与形态及干涉的速度。

一、走时成像理论

在一定条件下,探地雷达电磁波波速可简化为只与介质的相对介电常数有关,基于此,可以获得走时反演的基本方程:

$$t = \int s dl \quad (1)$$

t 为当前射线走时, s 为模型慢度分布, l 为当前射线的路径。求解方程(1)需要将慢度模型进行离散化,此外,由于地球物理问题的病态性,通常采用 l_2 范数定义数据空间和模型空间是“最简单”模型,作Tikhonov正则化处理后,反演问题目标函数 $\Phi(s)$ 表示为:

$$\Phi(s) = \Phi_d(s) + \lambda \Phi_m(s) \quad (2)$$

$$\Phi_d(s) = \| \mathbf{w}_d [d_0 - d(s)] \|^2 \quad (3)$$

$$\Phi_m(s) = \| \mathbf{w}_m [s - s_0] \|^2 \quad (4)$$

其中 $\Phi_d(s)$ 和 $\Phi_m(s)$ 分别为数据空间和模型空间 l_2 范数目标函数, λ 是正则化参数, \mathbf{W}_d 和 \mathbf{W}_m 分别是数据权重矩阵和模型参数权重矩阵, d_0 和 $d(s)$ 分别为观测走时和计算走时矢量, s 和 s_0 分别是未知和初始模型矢量。对 $d(s)$ 在初始模型矢量 s_0 上泰勒级数展开并保留其一阶项,如下表达式:

$$d(s) \approx d(s_0) + \mathbf{J}_{s_0} (s - s_0) \quad (5)$$

上式 $\mathbf{J}_{s_0} = \partial d / \partial s_0$ 为雅可比矩阵,又称路径矩阵,推导出目标函数 $\Phi(s)$ 求解迭代公式:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{J}_k^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J}_k + \lambda \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m + \omega_k) (s_{k+1} - s_k) \\ & = \mathbf{J}_k^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d [d_0 - d(s_k)] \quad (k=0,1,2,3,\dots) \end{aligned} \quad (6)$$

本文选择 \mathbf{W}_d 为单位矩阵算子,表示对走时数据均匀加权。 \mathbf{W}_m 一般为单位矩阵或拉普拉斯算子,用于约束和平滑模型。强稀疏矩阵 \mathbf{J} 采用特殊的方式存储,并结合加阻尼因子的共轭梯度法快速求解方程。其中,阻尼因子 $\omega_k = \alpha \times rhs$, α 是一个经验参数(大约为0.1), rhs 是方程(6)等式右边的均方根误差。

二、提高走时计算精度的射线追踪方法

在求解迭代方程(6)的过程中,通常需要射线追踪技术如最短路径法计算走时矢量 $d(s_k)$ 和雅可比矩阵 \mathbf{J}_k 。本文首先采用规则网格离散化慢度模型,并将慢度值分配至各角点上,该分配方式简易高效,方便引入反射界面,如图1所示。该计算模板通常采用增大计算半径 n 来提高走时和射线路径的计算精度,但同时计算量也以指数形式增长且改进效果不明显。此外,反演迭代中,当前射线追踪模型为上次反演的结果,采用线性插值算法细化正演网格后进行射线追踪,同样可以获取更为精细的射线路径及准确的走时。基于上述研究,本文射线追踪中计算半径 n 取5,每两点之间插入一点进行细

化正演网格。射线追踪过程需要不断计算子波源点与各节点之间走时，最初采用两点慢度均值乘以路径长度计算走时的方式精度不高，之后采用Bresenham画图算法提高走时计算精度。Bresenham画图算法计算模板如图2(a)所示， $\Delta t_{i,j}$ 可以用下式表示：

$$\Delta t_{i,j} = D_{i,j} [(S_i + S_j) / 2 + S_{n_1} + S_{n_2} + \dots + S_{n_k}] / (k+1) \quad (7)$$

其中， i, j 分别表示子波源点和节点，两点的直线距离为 $D_{i,j}$ ， n_1, n_2, \dots, n_k 表示为 k 个Bresenham节点，各节点慢度值为 S_{n_k} ，本质上走时 $\Delta t_{i,j}$ 可以理解对各节点慢度分配权重并求和。其中 i, j 节点的权重为 $D_{i,j} / 2 / (k+1)$ ，Bresenham节点的权重为 $D_{i,j} / (k+1)$ 。实际上，走时是路径长度关于慢度值的积分，故各节点的权重应与射线经过该节点的“元胞路径”有关。基于此，在细化的正演网格基础上，定义直线过各网格单元的路径长度为其左下角节点 nk （或 i ）的“元胞路径”并设为 l_{nk} （或 l_i ），如图2(b)所示。根据局部射线与节点的关系，走时 $\Delta t_{i,j}$ 计算公式改写成(8)式，通过模型测算，该计算方式能够有效提高走时计算精度。

$$\Delta t_{i,j} = \sum_{m=n_1}^{nk} S_m l_m + S_i l_i \quad (8)$$

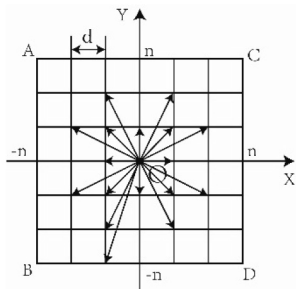


图1 子波源点传播方向

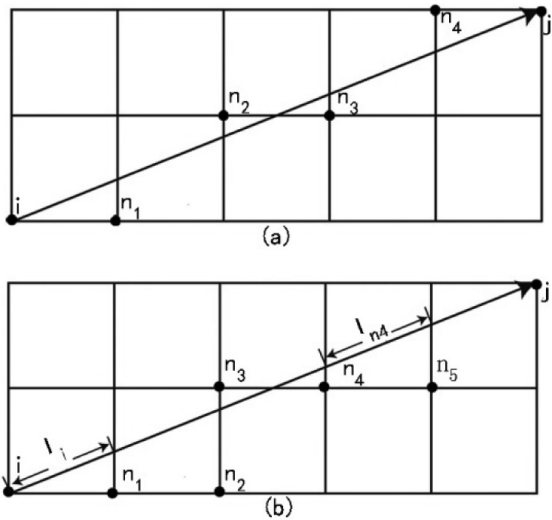


图2 改进前(a)和改进后(b)的走时计算方式

三、数值测算

(一) 不同速度异常体模型测试

本节模型长3.5m、宽2m，中上部为一低速异常体，中下部为高速异常体，具体参数如图3(a)所示。发射和接收天线分别位于模型左右侧，移动深度范围都为0m-3.5m，移动间距都为0.1m，分别有36个发射点和接收点。子波为800MHz雷克子波，每个固定发射天线点对应36个接收点，共获得1296个走时数据，反演网格为 0.1×0.1 m，共计756个未知慢度节点。在反演参数一致情况下，图3中(b)、(c)和(d)分别显示了采用直线射线、改进前和改进后曲线射线追踪并迭代20次的反演结果。图3中A和B分别为两个异常体边界。图3(b)能基本反映异常体位置，但边界刻画模糊，异常体位置不集中；图3(c)对异常体形态描述优于图3(b)，但不如图3(d)对异常体边界刻画清晰，因为图3(d)中异常体形态和数值最为集中。图3(e)为三个反演结果在S1线位置详细数值对比，对比显示基于改进后的算法能够获得更为准确的速度估计，因此，以下研究工作都将基于改进后射线追踪算法开展。

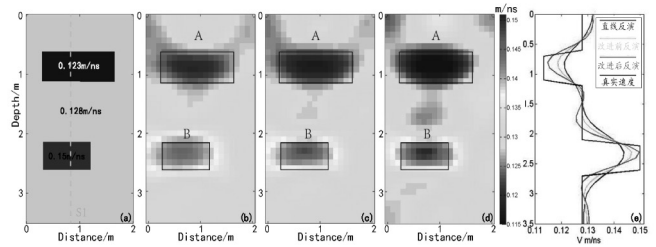


图3 使用不同射线追踪方法的反演结果及数值对比

(a) 真实模型；(b) 直线追踪反演结果；(c) 改进前曲线追踪反演结果；(d) 改进后曲线追踪反演结果；(e) 真实速度与不同反演结果速度对比

(二) 数据加权矩阵测试

正则化处理是反演成像中重要部分，不同的模型约束方法对反演结果的影响不同。本节模型是一个较为复杂的模型，各处速度值如图4(a)所标示，用于测试单位矩阵、拉普拉斯算子作为模型参数加权矩阵对反演的影响，以及本文走时成像算法对小异常体、断层界面和起伏地层的分辨能力。该模型长为4m、宽为2.5m，数据采集的布设方式、天线参数、网格剖分与上节模型相同。两例反演参数一致，反演迭代20次，其中正则化参数 λ 利用L曲线法选取为12，反演结果分别如图4(b)和4(c)所示。两例反演结果都能正确反映异常体位置、形态、边界、速度值，且对小异常体、起伏面和断层界面具有较高分辨率。进一步发现，应用单位矩阵算子的反演结果显示匀速度中含有不真实的条带状异常体(图4(b)中箭头处)，这可能会引起错误解释，而应用拉普拉斯算子不仅能抑制这种局部异常性(图4(c)中箭头处)，且对异常体边界刻画更清晰。因此，采用拉普拉斯算子光滑模型更适合于该模型和本文的反演算法。

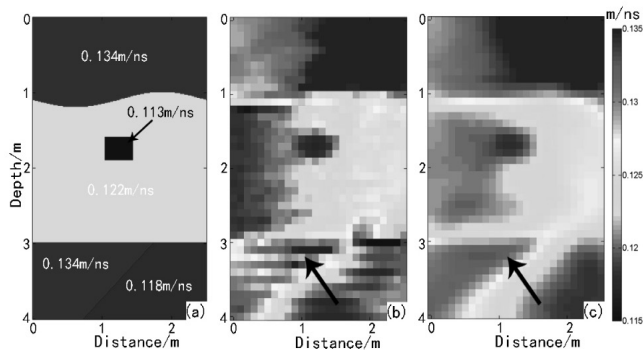


图4 使用不同模型加权算子的反演结果

(a) 真实模型；(b) 单位矩阵算子反演结果；(c) 拉普拉斯算子反演结果

(三) 物理模型数据反演

5 (a) 为物理模型，黑色为塑料箱，内部填充干

沙，中上部放入一空纸盒，作为所研究的高速异常体。数据采集通过GSSI-SIR30E型号探地雷达及两个2G天线完成，发射和接收天线分别置于塑料箱的左右侧，移动步长都为2cm，分别形成23个发射点和23个接收点，采集中共获取529个走时数据。实验布设有效覆盖区域、相对位置、尺寸关系如图5 (b) 所示。反演迭代20次，其中正演基于改进的射线追踪算法，正则化因子为10，采用拉普拉斯算子对模型进行光滑约束，最终结果如图5 (c) 所示。图中空盒的位置、形态都获得较好恢复。根据资料得电磁波在空气和干沙（相对介电常数为2.5）中速度分别为0.3m/ns和0.189m/ns，提取S线位置反演与真实速度值进行对比如图5 (d) 所示，反演结果接近真实结果。但是，异常体存在横向拉长、边界相对模糊，其可能于射线覆盖角度、初至时拾取不准、上下反射波干扰等有关，改善上述条件可能会进一步提高成像质量。

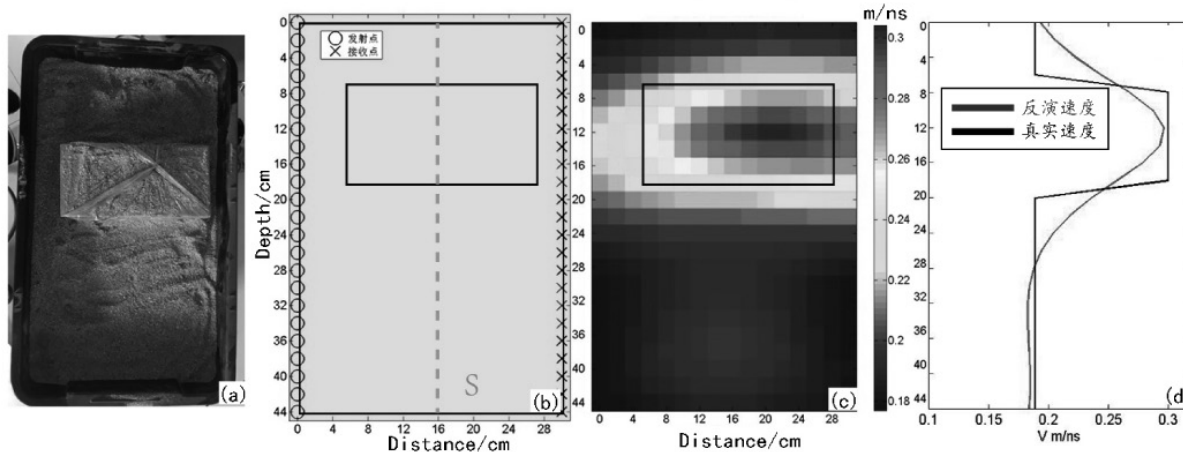


图5 采用改进算法的物理模型反演结果及速度值对比

(a) 物理模型；(b) 数据采集装置；(c) 反演结果；(d) 真实速度和反演速度值对比

四、总结

(1) 本文基于Tikhonov正则化理论、加阻尼因子的共轭梯度法并结合最短路径法射线追踪，利用探地雷达波初至走时进行反演成像，其中通过引入元胞路径加权法改进了常规的Bresenham画图法计算走时的精度，并为相关研究内容奠定了基础。

(2) 模型测算表明当目标体内部电磁波速度相差较大时，应采用曲线射线追踪获取射线路径和走时；改进的最短路径法射线追踪算法能提高走时计算精度，并可能进一步提高反演结果精度；正则化处理中采用拉普拉斯算子对模型的光滑约束优于单位矩阵算子的平整约束。

(3) 多个模型测算和物理实验反演结果验证了本文改进后的层析成像算法的可靠性和实用性。反演结果中异常体显示不同程度的横向拉伸、边界模糊，可能与采集布设、仪器型号、参数选择、初至拾取等实践内容有关。因此，精确稳定的反演结果的获取，不仅要注重算法研究，还需要注重数据采集和走时拾取过程，减少

人为因素对反演结果的干扰。

参考文献

[1] 刘澜波, 钱荣毅. 2015. 探地雷达: 浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报, 58(5): 2606-2617.
 [2] 吴俊军, 刘四新, 李彦鹏, 等. 2014. 跨孔雷达全波形反演成像方法的研究[J]. 地球物理学报, 57(5): 1623-1635.
 [3] 王飞, 刘四新, 曲昕馨, 等. 2013. 基于HAFMM的无射线追踪跨孔雷达走时层析成像[J]. 地球物理学报, 56(11): 296-307.
 [4] 张建中, 陈世军, 徐初伟. 动态网络最短路径射线追踪[J]. 油气地球物理, 2003, 47(4): 13-18.
 [5] 刘洪, 孟凡林. 计算最小走时和射线路径的界面网全局方法[J]. 地球物理学报, 1995, 38(6): 823-832.