

文章编号:1005-6122(2022)04-0076-06

DOI:10.14183/j.cnki.1005-6122.202204016

基于整体编码遗传算法的探地雷达全波形反演*

王浩宇¹ 刘宏立¹ 马子骥¹ 杜平²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,长沙 410082; 2. 中国铁建重工集团股份有限公司,长沙 410100)

摘要: 探地雷达(GPR)的全波形反演(FWI)能精确刻画出地下介电常数模型,得到了广泛研究。但全波形反演受初始模型、反演算法的影响,容易使结果陷入局部最优解,难以准确地反演出地下真实情况。为反演隧道衬砌空洞的病害情况,文中提出了一种基于整体编码遗传算法(OCGA)的全波形反演方法。该方法在遗传算法的基础上改进了编码策略,对个体的整体特征进行编码。实验表明,对于预设的圆形空洞(或钢筋)物理模型,整体编码策略能使结果更接近真实解。该算法能在不依赖初始模型的前提下大大改善结果收敛于局部最优解的问题,并进一步量化反演结果空洞的位置与大小。

关键词: 探地雷达,全波形反演,遗传算法,适应度函数,介电常数

GPR Full Waveform Inversion Based on Overall Coding Genetic Algorithm

WANG Hao-yu¹, LIU Hong-li¹, MA Zi-ji¹, DU Ping²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. China Railway Construction Heavy Industry Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: The full waveform inversion (FWI) of the ground penetrating radar (GPR) can accurately depict the underground dielectric constant model and has been widely studied. However, due to the influence of initial model and inversion algorithm, the result of full waveform inversion is easy to fall into local optimal solution, and it is difficult to accurately reflect the real underground situation. A full waveform inversion method based on overall coding genetic algorithm (OCGA) is proposed to solve the problem of tunnel lining cavity disease inversion. In this method, the coding strategy is improved based on the genetic algorithm to encode the overall characteristics of individuals. Experimental results show that the overall coding strategy can make the result closer to the real solution for the preset circular void (or rebar) physical model. The algorithm can greatly improve the convergence of results to the local optimal solutions without relying on the initial model, and further quantify the location and size of the inversion results.

Key words: ground penetrating radar (GPR), full waveform inversion (FWI), genetic algorithm, fitness function, dielectric constant

引言

近年来,我国轨道交通发展由建设为主阶段步入建设维护并重阶段,检测隧道内部空洞等病害的需求日益增多。目前,地质雷达(GPR)检测是应用最广泛的隧道衬砌内部无损检测手段。为了精确刻画出隧道内部的病害情况,通常采用反演探地雷达数据的方法。

传统的反演方法基于射线偏移速度分析和走时

层析反演理论。然而,这一方法仅仅用到了雷达数据的少部分信息,只能得到宏观的速度场,反演结果与原始模型存在一定差距。全波形反演(FWI)利用了探地雷达数据的全部信息,可以精确绘制出介电常数和电导率模型,成为探地雷达领域的研究热点。全波形反演的理论最早由 Tarantola 于 1982 年在广义最小二乘理论的基础上提出,之后 1988 年 Tarantola 将波场残差作为目标函数,利用梯度法进行优化更新以获得反演结果,在时间域上完善了全波形

* 收稿日期:2021-06-15;修回日期:2021-09-21

基金项目:国家自然科学基金(61771191,61971182);湖南省自然科学基金(2020JJ4213);长沙市科技计划(CSKJ2019-08,2020 CSKJ2020-12)

反演的理论框架。在进一步的研究中,人们提出并逐渐完善了基于频域^[1]、时频域^[2]、Laplace 域^[3]、混合域^[4]以及 Laplace-Fourier 域^[5]的全波形反演方法。其中,Laplace 域比起频域上的反演,目标函数具有更少的局部极小值。改进的 Laplace-Fourier 域波形反演比起 Laplace 域反演不仅产生了更精细的速度模型,而且还提高了反演的穿透深度。为了解决全波形反演存在的周波跳跃等问题并提高反演精度和稳定性,研究者们做出了巨大努力。基于多尺度分解的多重网格方法^[6]能有效克服目标函数存在多个局部极小值的问题。层析全波形反演^[7]用扩展速度模型提高了反演精度。全波数反演^[8]将数据域转化到模型域,并在反演的不同阶段引入模型的波数,有效避免了周波跳跃问题。此外,联合全波形反演、包络全波形反演^[9]、早至波波反演^[10]等方法都取得了良好的反演效果。人们还研究了全波形反演的寻优算法,包括梯度类的局部搜索算法和全局搜索算法^[11]。局部搜索算法中,Gauss-Newton 和全 Newton 法以及共轭梯度法^[12]在时频域反演中得到了很好的应用。全局搜索算法相比局部搜索算法不易陷入局部极小值,有更大的优势。模拟退火法^[13]、遗传算法及其改进算法^[14-16]被广泛用于全波形反演,这种最优化方法被证明要优于随机搜索。

反演问题具有很强的非线性特征,因而全波形反演十分依赖初始模型。尽管全局搜索算法能在一定程度上避免这一状况,初始模型的准确性仍然会影响反演结果。若初始模型与实际结果相差太大,存在反演结果陷入局部最优解的情况。此外,全波形反演通常会利用基于射线的层析成像等方法获取初始模型,然后进一步实现全波形反演。然而,现阶段大部分全波形反演对象为层状介质,缺少对特定目标物的反演。因此无法满足隧道内部空洞、局部脱空、裂缝、渗水等特定目标物的反演需求。本文基于遗传算法,针对混凝土内部圆形目标物,例如空洞、渗水空洞和钢筋等,提出两种基于整体编码遗传算法(OCGA)的全波形反演策略。通过优化编码方式和适应度函数,以及相应的选择、交叉、变异过程,使得整个反演算法不依赖于精确的初始模型也能反演出目标物的位置和尺寸信息。

1 基于遗传算法的全波形反演

1.1 遗传算法描述

遗传算法(GA)是一种通过模拟自然进化过程

搜索最优解的方法。它初始化一个可能的目标解集,根据目标函数进行“优胜劣汰”,在全局范围内搜索问题的最优解。整个遗传算法的步骤包括初始化种群、个体编码、适应度函数构建、选择、交叉、变异等。遗传算法搜索结果的正确性受编码方式、适应度函数以及交叉、变异算子的影响;同时,搜索范围越大、种群的多样性越丰富,算法的收敛速度也会在一定程度上有所降低。因此,遗传算法的设计对于问题的解决十分关键。

1.2 地质雷达正演算法

本文通过时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法求解地震波场的正演过程。FDTD 利用差分原理把 Maxwell 旋度方程转化为差分方程进行求解。具体求解方式为在时间和空间上交替抽样,对电磁场进行网格剖分,构建 Yee 网格时空模型,并随着离散时间逐步求解出整个空间区域内电磁场分布。对于横电磁(Transverse Magnetic-wave, TM)波,将 Maxwell 旋度方程转化为差分形式如式(1)、式(2)、式(3)所示:

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) = CP(m) \cdot H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - CQ(m) \cdot \frac{E_z^n(i, j + 1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y} \quad (1)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) = CP(m) \cdot H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) + CQ(m) \cdot \frac{E_z^n(i + 1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x} \quad (2)$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = CA(m) \cdot E_z^n(i, j) + CB(m) \cdot \left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j\right)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j - \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right] \quad (3)$$

式中, H_x 、 H_y 分别是磁场强度在 x 轴、 y 轴的分量, E_z 是电场强度在 z 轴的分量, $CP(m)$ 、 $CQ(m)$ 、 $CA(m)$ 、 $CB(m)$ 的含义如下:

$$CP(m) = \frac{2\mu(m) - \sigma_m(m) \Delta t}{2\mu(m) + \sigma_m(m) \Delta t} \quad (4)$$

$$CQ(m) = \frac{2\Delta t}{2\mu(m) + \sigma_m(m) \Delta t} \quad (5)$$

$$CA(m) = \frac{2\varepsilon(m) - \sigma(m) \Delta t}{2\varepsilon(m) + \sigma(m) \Delta t} \quad (6)$$

$$CB(m) = \frac{2\Delta t}{2\varepsilon(m) + \sigma(m)\Delta t} \quad (7)$$

其中, $\varepsilon(m)$ 、 $\sigma(m)$ 、 $\mu(m)$ 、 $\sigma_m(m)$ 分别为 m 点的相对介电常数、电导率、磁导率和磁损耗。

1.3 全波形反演的目标函数

全波形反演通过地质雷达正演算法求取理论波场与观测波场的数据残差,在一次次迭代中不断优化地球物理模型参数,使实际波场值趋于观测波场值,达到反演的目的。本文采用相对介电常数反演,其目标函数为

$$E(m) = \frac{1}{2}[(b(m) - f_{\text{obs}})^T][b(m) - f_{\text{obs}}] \quad (8)$$

式中, $E(m)$ 为目标函数值, m 为地球物理模型的相对介电常数, $b(m)$ 为理论波场数据, f_{obs} 为观测波场数据。

1.4 反演步骤

对二维混凝土区域进行全波形反演,反演步骤如下:

(1) 首先需要初始化种群,产生一系列介电常数矩阵的个体;

(2) 接着通过 FDTD 对每个个体进行正演计算,得到个体的理论波场;

(3) 对个体进行编码,将介电常数矩阵的每个元素(即每个点上的相对介电常数)作为编码基因,组合成一个基因向量,即染色体;

(4) 以全波形反演的目标函数为基础设计适应度函数,并计算出个体的适应度,用选择算子淘汰掉部分个体;

(5) 使用交叉算子将保留下来的个体的染色体进行交叉,产生出部分新个体。

(6) 根据变异算子,这部分新个体的基因以一定的概率发生变异;

(7) 重复步骤(2)至(6)直到结果最优。

2 基于整体编码遗传算法(OCGA)的全波形反演

考虑到求解问题的实际情况,地球物理参数往往具有连续性,不是随机离散的。因此在初始化个体时不用将所有的物理参数全部随机化,那样既不贴合实际情况,又会使反演陷入局部最优解,难以达到反演效果;而是将个体初始化为混凝土区域内含有一个大小随机、位置随机的圆形空洞(或者钢筋)的物理参数模型。

2.1 整体编码方式

初始化个体代表物理参数连续性,基于这一前提,对个体进行编码无需像传统方式那样逐个编码,而是将个体矩阵看作一个整体,提取其特征进行编码。以本文方式初始化的个体,其特征有三个,分别是随机产生的空洞(或者钢筋)的圆心横坐标、圆心纵坐标以及半径,整体编码方式也就是对这三个特征进行实数编码。这样大大缩短了染色体长度,降低了反演的复杂性,但因此也需要重新设计与之匹配的交叉算子。

2.2 适应度函数的设计

适应度函数基于全波形反演的目标函数设计,核心思路是将波场数据转化为雷达图数据,即 Bscan 数据,并比较理论 Bscan 数据与观测 Bscan 数据的差异,两者越接近则个体的适应度越高。本文设计了以下两种适应度函数:

第一种适应度函数通过计算个体的理论 Bscan 数据与观测 Bscan 数据的均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)来获得个体的适应度:

$$F = C - \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (y_{mn} - \hat{y}_{mn})^2} \quad (9)$$

式中, y_{mn} 和 \hat{y}_{mn} 分别为观测 Bscan 矩阵和理论 Bscan 波场矩阵的第 m 行 n 列的元素; M 、 N 分别为 Bscan 矩阵的总行数与列数,即时间步数和采集道数; C 和 α 分别为常数,保证适应度始终为正。

第二种适应度函数通过计算理论 Bscan 矩阵和观测 Bscan 矩阵的余弦相似度来度量个体适应度,具体过程为先把两个矩阵打平成向量,再计算两个向量的夹角余弦值:

$$F = \frac{\sum_{n=1}^N y_n \cdot \hat{y}_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N y_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \hat{y}_n^2}} \quad (10)$$

式中, y_n 和 \hat{y}_n 分别是向量元素和单位向量, N 为向量的总长度。

2.3 选择、交叉、变异算子

本文采取锦标赛选择法对个体进行选择。具体步骤为:每次从种群中取出一定数量的个体,然后选择其中适应度最高的个体进入子代种群。重复该操作,直到选出达到选择率要求数量的个体。

经过整体编码的个体其染色体长度很短,为了保证进化过程中种群适应度稳步提升,我们设计了一种基于适应度的交叉算子:

$$g = \frac{f_a}{f_a + f_b} g_a + \frac{f_b}{f_a + f_b} g_b \quad (11)$$

式中, g 为交叉之后子代的基因, g_a 和 g_b 分别为父代和母代的基因, f_a 和 f_b 分别为父代和母代的适应度。

基因变异方式为随机突变, 即目标的圆心横、纵坐标和半径会在一定范围内随机发生改变。

3 基于遗传算法的GPR 反演算例

以空洞、渗水空洞和钢筋三种目标物作为反演算例, 这三种材料及混凝土的电参数如表 1 所示。

表 1 各材料的电参数

材料	ϵ	σ
混凝土	6.0	0.01
空气	1.0	0
水	81	0.05
钢筋	300	10^8

3.1 空洞模型反演

反演的目标区域大小为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, 网格步长为 $0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$, 网格数为 50×50 , 时间步长取为 $\Delta t = 1.67 \times 10^{-11} \text{ s}$, 时窗为 13 ns 。整个目标区域填充混凝土, 再以网格坐标 (16, 22) 为圆心、网格长度 10 为半径设置一个空洞, 填充空气。遗传算法的种群大小设为 60, 选择率为 0.5, 变异率为 0.08, 迭代数为 100。设置的空洞模型和采用两种不同适应度函数的整体编码遗传算法以及全局编码遗传算法的反演结果如图 1 所示, 三种算法的适应度随迭代次数变化曲线如图 2 所示。

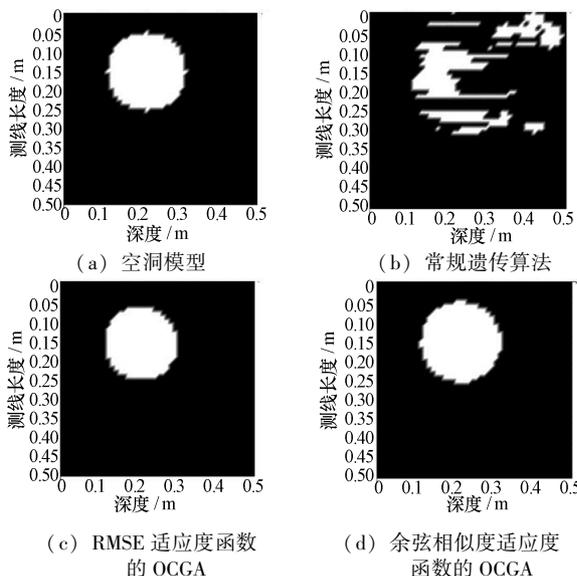


图 1 空洞模型及各种遗传算法的反演结果

可以看出, 整体编码遗传算法在针对空洞的反演问题上比起传统的全局编码遗传算法反演效果更

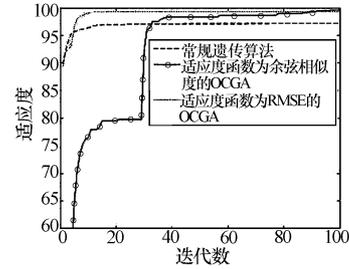


图 2 不同算法种群进化过程中的适应度变化曲线

明显, 而且反演结果可以量化为空洞圆心坐标和半径。这是因为, 常规遗传算法不考虑空洞的整体特征, 将整个介电常数矩阵进行编码, 在全局范围内搜索介电常数矩阵的最优解, 而地质雷达的反演问题具有极大的非线性特征, 因此迭代结果容易陷入一个局部最优解。这个局部最优解既不能保证空洞的完整性, 也不能保证反演结果的准确性。整体编码遗传算法在考虑了空洞的圆心、半径等特征后, 不在全局上对介电常数矩阵的所有元素进行搜索, 而是将特征进行编码去搜索最优解, 很好地避免了常规遗传算法陷入局部最优解的问题。采用两种不同的适应度函数的整体编码遗传算法反演的量化结果如表 2 所示。

表 2 采用两种不同适应度函数的 OCGA 反演的量化结果

	半径	横坐标	纵坐标
目标模型	10	25	22
RMSE	10.3555	24.8369	21.6268
余弦相似度	10.0766	24.9979	21.9019

3.2 渗水空洞模型反演

反演的目标区域及网格不变, 设置渗水空洞模型, 以网格坐标 (25, 22) 为圆心, 半径为 10 设置一个渗水空洞, 填充水介质。考虑到电磁波在水中速度很慢, 会发生多次回波, 因此时窗设置为 25 ns 。遗传算法的参数设置与之前相同, 模型图和各算法反演结果如图 3 所示, 三种算法的适应度随迭代次数变化曲线如图 4 所示。

从适应度曲线可以看出, 全波形反演是一个强非线性问题, 尽管全局编码遗传算法最后收敛的适应度比采用 RMSE 适应度函数的整体编码算法要高, 其结果依旧不如后者。这也印证了全波形反演是一个强非线性问题, 虽然常规遗传算法最后的适应度收敛于一个高值, 它搜索出来的结果仍是局部最优解, 因此反演结果在空洞特征及准确度方面与预设模型存在差异。采用两种不同的适应度函数的整体编码遗传算法反演的量化结果如表 3 所示。

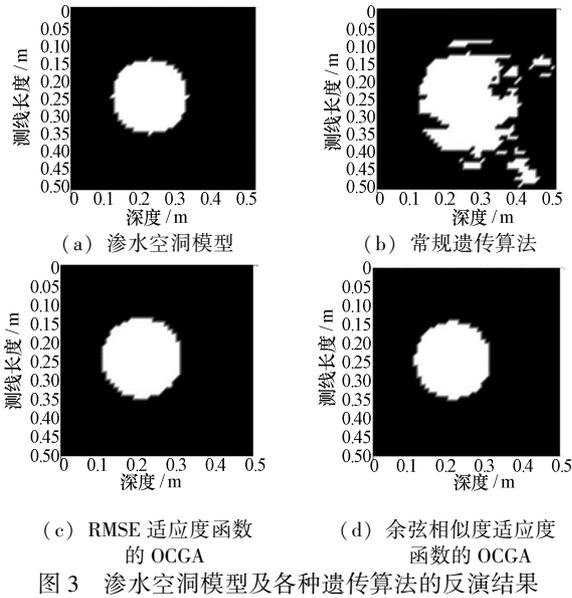


图3 渗水空洞模型及各种遗传算法的反演结果

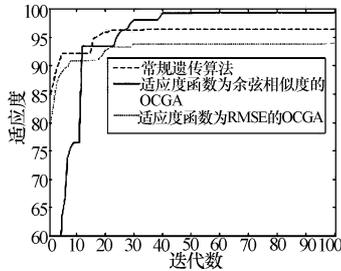


图4 不同算法种群进化过程中的适应度变化曲线

表3 采用两种不同适应度函数的OCGA反演的量化结果

	半径	横坐标	纵坐标
目标模型	10	25	22
RMSE	10.3555	24.8369	21.6268
余弦相似度	10.0766	24.9979	21.9019

3.3 钢筋模型反演

反演的目标区域及网格不变,设置钢筋模型,以网格坐标(25,16)为圆心,半径为3设置一根圆形钢筋。其它参数设置与空洞反演相同,模型图和各算法反演结果如图5所示,三种算法的适应度随迭代次数变化曲线如图6所示。

采用两种不同适应度函数的整体编码遗传算法反演的量化结果如表4所示。

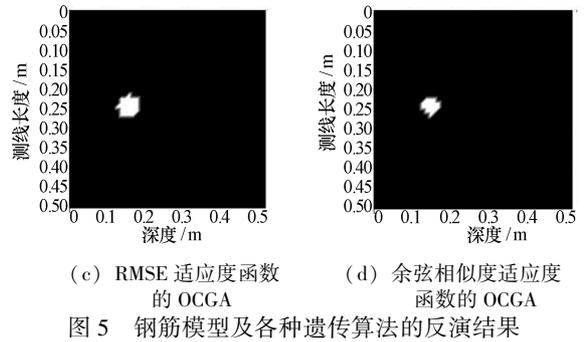
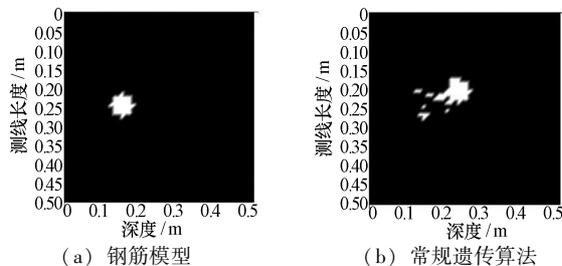


图5 钢筋模型及各种遗传算法的反演结果

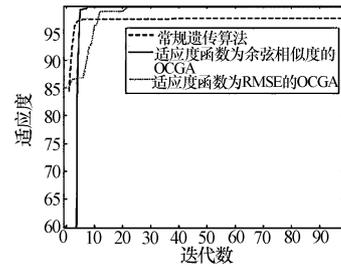


图6 不同算法种群进化过程中的适应度变化曲线

表4 采用两种不同的适应度函数的OCGA反演的量化结果

	半径	横坐标	纵坐标
目标模型	3	25	16
RMSE	2.9149	24.8652	15.8508
余弦相似度	2.2748	24.7959	15.0186

3.4 两种适应度函数的选择

由三种不同材料的反演算例可以得出,整体编码遗传算法的效果要优于常规遗传算法,但是适应度函数的选择由材料的电参数决定。本文的反演算法是基于介电常数反演的,因此可以设计算例进一步探究介电常数是如何影响适应度函数选择的。

以3.2节中渗水空洞反演算例为对照,在相同位置设置同样大小的目标介质,其中介质的介电常数为300,电导率与水一致,为0.05。采用两种不同的适应度函数的整体编码遗传算法的反演情况如图7所示,反演的量化结果与3.2节中的结果对比如表5所示。

表5 对不同介电常数的目标介质采用两种不同的适应度函数的OCGA反演的量化结果

	半径	横坐标	纵坐标
目标模型	10	25	22
RMSE($\epsilon=81$)	10.3555	24.8369	21.6268
余弦相似度($\epsilon=81$)	10.0766	24.9979	21.901
RMSE($\epsilon=300$)	8.8933	24.1754	20.8759
余弦相似度($\epsilon=300$)	8.4148	23.7395	20.3857

由反演结果可得,当介电常数增大时,两种适应度函数的OCGA的反演准确性都会有所降低,因此

OCCA 针对空洞和渗水空洞的反演效果更佳。当目标介质的介电常数较小时, 选取余弦相似度作适应度函数其反演结果要优于 RMSE; 而当介电常数较大时, 例如对钢筋进行反演, 选取 RMSE 作适应度函数其反演结果更佳。

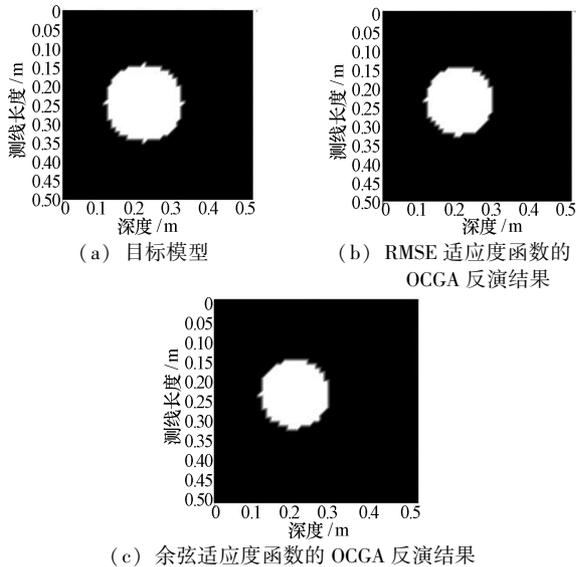


图 7 介电常数为 300, 电导率为 0.05 的目标模型及不同适应度函数 OCGA 反演结果

4 结论

为了反演隧道内部空洞的病害情况, 本文针对圆形空洞, 基于探地雷达在模拟仿真层面提出了一种整体编码遗传算法, 并提出了两种不同的适应度函数的选择。比起传统的全局编码遗传算法, 本文提出的整体编码遗传算法在解决圆形空洞反演问题上有更好的效果, 能够十分准确地还原出空洞的具体位置与大小, 并提供了反演结果的几个量化值, 即空洞的半径以及圆心的具体位置。在适应度函数的选择上, 当要反演的目标为空洞或渗水空洞时, 采用余弦相似度的适应度函数准确度更高; 当要反演的目标为钢筋时, 采用 RMSE 适应度函数的准确度更高。在实际工程中, 整体编码遗传算法考虑了介质介电常数变化的连续性, 是为了解决隧道内部连续性介质的反演而设计的, 比起传统遗传算法它更适合于解决诸如空洞、渗水空洞等特定问题。当然, 由于隧道内部空洞发生情况十分复杂, 单纯对圆形空洞进行反演还无法涵盖更多的实际情况。但是, 本文提出的整体编码思路不失为解决这一类空洞反演问题的有益参考。

参考文献

[1] Pratt G, Shin C, Hicks G J. Gauss-Newton and full New-

- ton methods in frequency-space seismic waveform inversion[J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 133(2): 341-362
- [2] Fichtner A, Kennett B L N, Igel H, et al. Theoretical background for continental and global-scale full-waveform inversion in the time-frequency domain[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 175(2): 665-685
- [3] Shin C, Ha W. A comparison between the behavior of objective functions for waveform inversion in the frequency and Laplace domains[J]. *Geophysics*, 2008, 73(5): VE119-VE133
- [4] Choi Y, Min D J, Shin C. Two-dimensional waveform inversion of multi-component data in acoustic-elastic coupled media[J]. *Geophysical Prospecting*, 2008, 56(6): 863-881
- [5] Shin C, Cha Y H. Waveform inversion in the Laplace-Fourier domain[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 177(3): 1067-1079
- [6] Bunks C, Saleck F M, Zaleski S, et al. Multiscale seismic waveform inversion[J]. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1457-1473
- [7] Biondi B, Almomin A. Tomographic full-waveform inversion (TFWI) by combining FWI and wave-equation migration velocity analysis[J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(9): 1074-1080
- [8] Alkhalifah T A. Full model wavenumber inversion petroleum keynote paper[J]. *ASEG Extended Abstracts*, 2015(1): 1
- [9] Wu R S, Luo J R, Wu B Y. Seismic envelope inversion and modulation signal model[J]. *Geophysics*, 2014, 79(3): WA13-WA24
- [10] 胡光辉, 王立歆, 王杰, 等. 基于早至波的特征波形反演建模方法[J]. *石油物探*, 2015, 54(1): 71-76
Hu G H, Wang L X, Wang J, et al. Characteristics waveform inversion based on early arrival waves[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(1): 71-76
- [11] 张文生, 罗嘉, 滕吉文. 频率多尺度全波形速度反演[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(1): 216-228
Zhang W S, Luo J, Teng J W. Frequency multiscale full-waveform velocity inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(1): 216-228
- [12] 俞海龙. 基于修正 PRP 共轭梯度法的探地雷达时间域全波形反演[D]. 长春: 吉林大学, 2019
Yu H L. A time domain full waveform inversion of GPR based on modified PRP conjugate gradient method[D]. Chang Chun: Jilin University, 2019

(下转第 94 页)

- tional Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology[C], Kairo, Egypt, 2019
- [5] Ahmad A, Chul Roh J, Wang D, et al. Vital signs monitoring of multiple people using a FMCW millimeter-wave sensor[A]. IEEE Radar Conference[C], Oklahoma City, USA, 2018
- [6] 屈乐乐, 连申晓. 基于CCBP算法的多普勒雷达生命信号检测[J]. 微波学报, 2018, 34(3): 69-73
Qu L L, Lian S X. Doppler radar life signal detection based on CCBP algorithm[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(3): 69-73
- [7] 高树国, 岳国良, 周聪, 等. 应用改进 Hilbert-Huang 变换下的 Volterra 模型诊断 OLTC 机械故障[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 173-180
Gao S G, Yue G L, Zhou C, et al. Application of Volterra model based on improved Hilbert-Huang transform to diagnose OLTC mechanical faults[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 173-180
- [8] 韩庆阳, 孙强, 王晓东, 等. CEEMDAN 去噪在拉曼光谱中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 274-280
Han Q Y, Sun Q, Wang X D, et al. Application of CEEMDAN denoising in Raman spectroscopy[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2015, 52(11): 274-280
- [9] Yang Z S, Kong C Z, Wang Y H, et al. Fault diagnosis of mine asynchronous motor based on MEEMD energy entropy and ANN[J]. Computers and Electrical Engineering, 2021, 92(4): 107070
- [10] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544
- [11] 潘水洋, 吴晶, 李焱. 冲激超宽带雷达生命信号提取的新方法[J]. 微波学报, 2010, 26(6): 36-41
Pan S Y, Wu J, Li Y. A new method for extracting vital signals from impulse ultra-wideband radar[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(6): 36-41
- [12] Izzo A, Ausiello L, Clemente C, et al. Loudspeaker analysis: a radar based approach[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(3): 1223-1237
- [13] Lee H, Kim B H, Yook J G. Path loss compensation method for multiple target vital sign detection with 24 GHz FMCW radar[A]. 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP) [C], Auckland, New Zealand, 2018
- [14] Mostafa A, Ahmed F M, Moustafa K H, et al. A new CFAR processor based on guard cells information[A]. International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology[C], Atlanta, USA, 2011
- [15] 刘通, 徐政五, 吴元杰, 等. 太赫兹频段下基于 EMD 的人体生命特征检测[J]. 信号处理, 2013, 29(12): 1650-1659
Liu T, Xu Z W, Wu Y J, et al. Detection of human vital signs based on EMD in terahertz frequency band[J]. Signal Processing, 2013, 29(12): 1650-1659
- 邵鑫** 男, 1995年生, 硕士生。主要研究方向: 雷达信号处理, 图形图像处理与机器视觉。
- 黄晓红(通信作者)** 女, 1973年生, 博士, 教授。主要研究方向: 信号与信息处理。
E-mail: tshxh@163.com
-
- (上接第 81 页)
- [13] Sen M K, Stoffa P L. Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing[J]. Geophysics, 1991, 56(10): 1624-1638
- [14] 潘冬雪, 张盼, 韩立国. 基于混合自适应遗传算法的稳健全波形反演[J]. 地球物理学进展, 2020(1): 1-11
Pan D X, Zhang P, Han L G. Robust full waveform inversion based on hybrid adaptive genetic algorithm[J]. Progress in Geophysics, 2020(1): 1-11
- [15] 刘仁杰, 兰天, 杨小鹏, 等. 基于遗传算法的探地雷达层状介质参数反演算法[J]. 信号处理, 2021(1): 1-11
Liu R J, Lan T, Yang X P, et al. Inversion algorithm for parameters of layered media with ground penetrating radar based on genetic algorithm[J]. Journal of Signal Processing, 2021(1): 1-11
- [16] Hamamoto M, Rahim MD Arshad A, Prasad Ghosh D. Full waveform inversion based on genetic local search algorithm with hybrid-grid scheme[A]. IEEE 9th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE) [C], Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, 2019. 1-5
- 王浩宇** 男, 1997年生, 硕士生。主要研究方向: 探地雷达数据处理和目标检测。
- 刘宏立** 男, 1963年生, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 智能信息处理与传输技术。
- 马子骥(通信作者)** 男, 1978年生, 副教授, 博士生导师。主要研究方向: 数字信号处理, 检测与传感器技术, 无线通信技术。
E-mail: zijima@hnu.edu.cn
- 杜平** 男, 1980年生, 硕士, 工程师。主要研究方向: 探地雷达无损检测。