

2DGPR_FDTD V1.0

探地雷达二维正演软件

用户操作手册

冯德山,

Email: fengdeshan@126.com

中南大学

2020.2

第1页 共 18 页

目录

1 概述	3
2 软件运行环境	4
2.1 硬件环境	4
2.2 操作系统	4
2.3 语言环境	4
3 软件操作	5
3.1 软件使用	5
3.2 文件创建与读取	6
3.2.1 文件创建.....	6
3.2.2 文件读取.....	6
3.3 模型建立	9
3.3.1 背景介质.....	9
3.3.2 矩形模型.....	10
3.3.3 椭圆模型.....	11
3.3.4 多边形模型.....	12
3.4 探地雷达二维正演	14
3.4.1 启动正演.....	14
3.4.2 正演剖面.....	14
3.4.3 色标.....	15
3.5 文件保存	16
3.5.1 文件保存.....	16
3.5.2 文件另存为.....	16
参考文献	17

1 概述

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)以介电常数、电导率等参数为物性基础,是一种对地下异常体的结构、特性或物性内部不可见目标体进行定位的电磁无损探测技术。GPR 抗干扰能力强、适应性强、分辨率高、操作简单、成果直观可见且为无损探测,被广泛地应用于工程勘察及地质调查中^[1-2]。尤其是近几年来,探地雷达的应用领域进一步扩大,几乎涵盖了整个浅层勘探领域,包括:水利工程勘察、地下水污染调查、水文地质调查、管线探测、铁路和公路质量检测、浅层矿产资源勘探、岩土勘查、无损检测、工程建筑物结构调查、刑事侦破、考古研究、军事等众多领域^[3-12],解决了很多工程实际问题。随着探地雷达软硬件技术不断发展,理论研究的不断深入,探地雷达正逐步走向成熟与完善。

目前 GPR 数据解释技术与工程勘探所需的高精度与高分辨率的客观要求还存在一定的距离。若仅依靠剖面数据尚不能直接给出诸如目标位置、目标性质及目标规模等工程中最关心的数量指标,需要深入展开正反演算法的研究。而反演计算量巨大,无法应用到工程实际中,资料解释仍主要由人工判断与经验解译的定性解释为主,易产生虚警及误解释的弊端。为了提高解释精度,需要开展 GPR 正演模拟,了解复杂地质体的雷达图像回波特征,对提高数据解释水平具有重要的意义。

探地雷达数值模拟方法很多,包括时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)^[13-15]、有限单元法^[16-17]、时域伪谱法^[18]、辛分块龙格库塔法^[19]、时域间断有限元^[20]、样条小波有限元^[21]等算法,这些算法各有特色。其中 FDTD 具有直接时域计算、编程容易、节约存储空间和计算时间等优点而备受青睐^[22-23]。因此,本软件拟采用 FDTD 法,实现高精度、计算快速的二维 GPR 正演模拟。

2 软件运行环境

2.1 硬件环境

本程序对硬件无特殊要求。

2.2 操作系统

适用操作系统：Windows 8,10；Ubuntu 18。

2.3 语言环境

采用的主要编程语为 Python3.8。

3 软件操作

3.1 软件使用

Ubuntu 操作系统下，打开./Modelling_2D 文件中 MainWindow_Modelling.py 文件，在 Spyder 中运行，即出现以下窗口：



图 1 2DGPR_FDTD V1.0 主界面

Windows 操作系统下，Win 键+R 键，进入运行，使用 cmd 命令，在命令行中输入 python，确认是否已添加 Python 环境变量。打开...\Modelling_2D 文件夹，输入命令：python MainWindow_Modelling.py，即打开 2DGPR_FDTD V1.0。

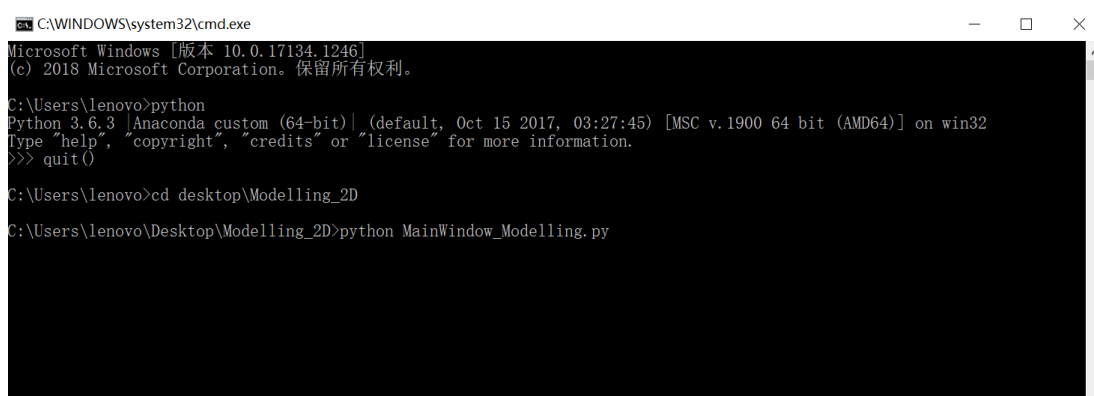


图 2 使用 cmd 打开 2DGPR_FDTD V1.0

3.2 文件创建与读取

3.2.1 文件创建

2DGPR_FDTD V1.0 主界面中，选中 New File 图标，即可创建新文件。

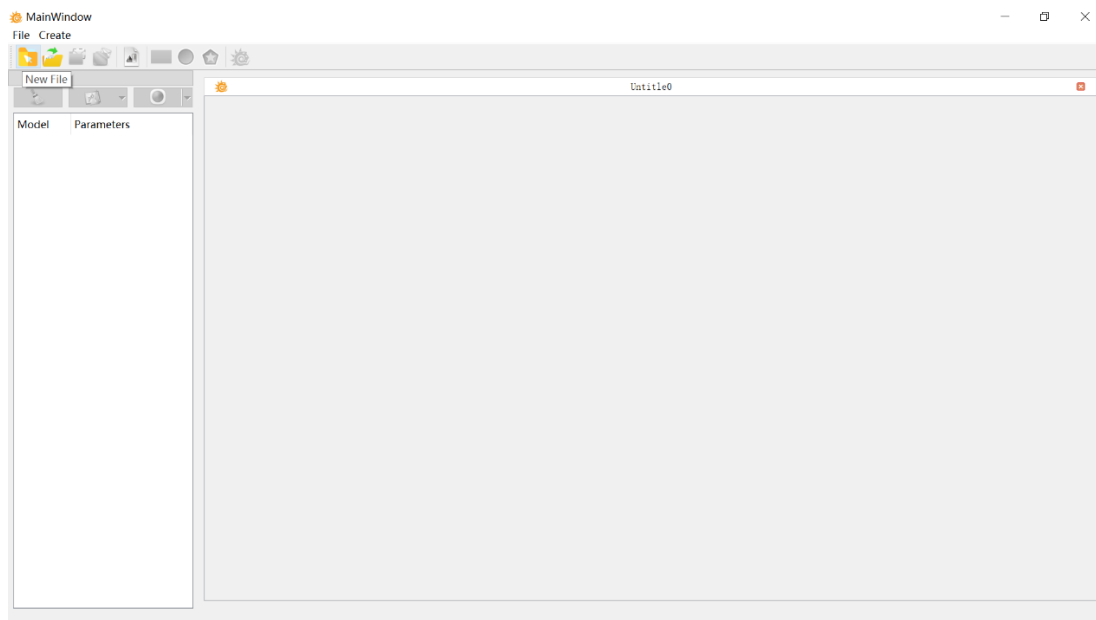


图 3 2DGPR_FDTD V1.0 中文件的创建

3.2.2 文件读取

若已有正演模型，可使用 Open File 模块。该模块可读取两类数据。

(1) .csu 格式

.csu 格式用于读取 2DGPR_FDTD V1.0 软件仿真探地雷达模型生成的数据，其中包含#NewModel、#AddRectangle、#AddEllipse、#AddPolygon 等信息。以图 4 所示文件读取格式为例，.csu 文件存储模型的以下参数：

#NewModel 有且只有一个，包含背景介质的参数信息——

X_Range、Z_Range：研究区域大小(/m)；

dx、dz：空间步长(/m)；

dt、SimulationTime、Frequence：时间步长(/s)、模拟时间(/s)与主频(/Hz)；

SourceStart、ReceiverStart、Step、Scan：激励源起始位置、接收器起始位置、道间距(/m)与总道数；

Conductivity、DielectriConstrant、MagneticPermeability：背景介质的电导率($/S \cdot m^{-1}$)、介电常数($/F \cdot m^{-1}$)与磁导率($/H \cdot m^{-1}$)。

#AddRectangle、#AddEllipse、#AddPolygon 分别代表矩形模型、椭圆形模型及多边形模型，可选择创建或者不创建具体模型，但需要注意的是，当存在多个模型时，各模型之间需空一行。

.csu 格式中，不同参数间分号分隔，矩阵间逗号分隔，所有数值默认小数点后保留六位。

```
1 #NewModel:
2 X_Range:1.000000;Z_Range:1.000000
3 dx:0.005000;dz:0.005000
4 dt:1.000000e-11;SimulationTime:1.000000e-08;Frequency:9.000000e+08
5 SourceStart:(0.000000,0.000000);ReceierStart:(0.000000,0.000000);Step:0.005000;Scan:199
6 Conductivity:1.000000e-05;DielectricConstant:4.000000;MagneticPermeability:1.000000
7
8 #AddRectangle:
9 Left:0.100000;Bottom:0.500000;Width:0.100000;High:0.200000
10 Conductivity:1.000000e+05;DielectricConstant:7.000000;MagneticPermeability:1.000000
11
12 #AddEllipse:
13 Center:(0.500000,0.500000);LongAxis:0.200000;ShortAxis:0.100000
14 Conductivity:1.000000e-05;DielectricConstant:30.000000;MagneticPermeability:1.000000
15
16 #AddPolygon:
17 xc:(0.500000,0.800000,0.600000);zc:(0.100000,0.200000,0.400000)
18 Conductivity:1.000000e-05;DielectricConstant:10.000000;MagneticPermeability:1.000000
```

图 4 2DGPR_FDTD V1.0 文件读取格式

(2) .in 格式

为了更好地与其他常用软件兼容，2DGPR_FDTD V1.0 软件支持读取 GPRMax 软件的格式数据(.in)。以图 5 所示文件读取格式为例，.in 文件存储模型的以下参数：

#title 为模型的名称；

#domain 为模型的范围，数值分别代表 x、y、z 轴上的量度大小(/m)；

#dx_dy_dz 分别表示 x、y、z 坐标轴上的偏移量(/m)；

#time_window 用于指定所需的总模拟时间(/t)；

#material 为材料的本构参数，包括介电常数、电导率、磁导率和介质类型；

#waveform:str1 f1 f2 str2 代表源波形，str1 为波形标示符，f1 和 f2 分别是源波形的幅度和频率，str2 为源标示符；

#hertzian_dipole:c1 f1 f2 f3 str2 为简单激励，c1 代表极化方向，f1、f2、f3 代表源在平面的位置坐标，str2 为源标示符；

#rx 输出接收器坐标信息；

#box 代表有限维的箱状模型；

#cylinder 代表有限维的三维圆柱模型；

#geometry_view 为导入快照模型。

```
1 #title: A-scan from a metal cylinder buried in a dielectric half-space
2 #domain: 0.240 0.210 0.002
3 #dx_dy_dz: 0.002 0.002 0.002
4 #time_window: 3e-9
5
6 #material: 6 0 1 0 half_space
7
8 #waveform: ricker 1 1.5e9 my_ricker
9 #hertzian_dipole: z 0.100 0.170 0 my_ricker
10 #rx: 0.140 0.170 0
11
12 #box: 0 0 0 0.240 0.170 0.002 half_space
13 #cylinder: 0.120 0.080 0 0.120 0.080 0.002 0.010 pec
14
15 #geometry_view: 0 0 0 0.240 0.210 0.002 0.002 0.002 0.002 cylinder_half_space n
```

图 5 GPRMax .in 文件读取格式

3.3 模型建立

2DGPR_FDTD V1.0 在背景介质建立的基础上，同时支持矩形、椭圆形及多边形模型的建立。分别介绍如下：

3.3.1 背景介质

选择 Create-New Model 模块，出现关于背景介质参数的设置窗口，在该设置窗口中，依次输入几何参数、背景介质参数信息。几何参数包括模型区域大小 x 轴、z 轴，空间步长 dx、dz，时间步长 dt，模拟时长，激励源起始位置，接收器起始位置，道间距及总道数。背景介质参数信息包括电导率、介电常数、磁导率及激励源频率。

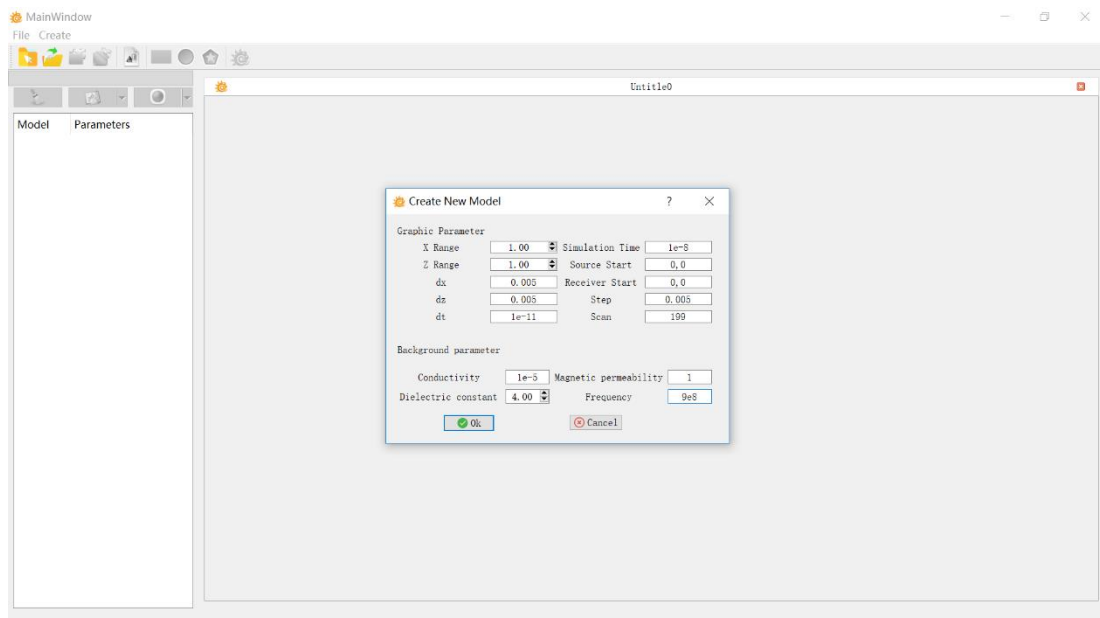


图 6 2DGPR_FDTD V1.0 中背景介质的参数设置

输入图 6 所示参数，在窗口中可以显示所建模型的电导率、介电常数及磁导率的参数分布图，实现二维模型的可视化。图 7 为图 6 参数对应的介电常数分布图。此时，窗口左侧显示所建模型的基本参数。

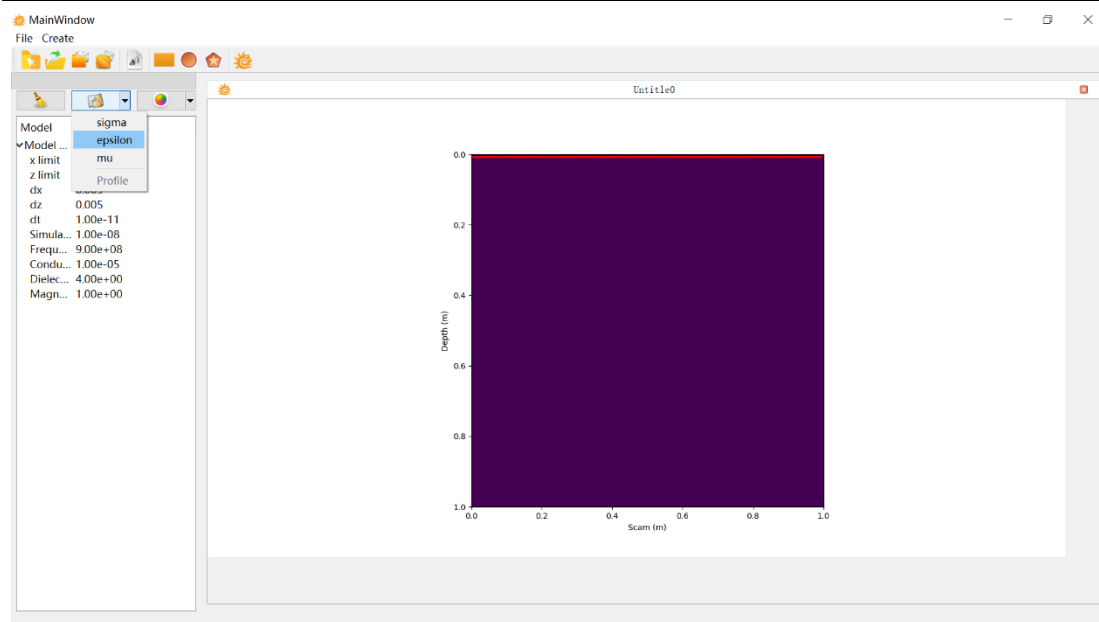


图 7 2DGPR_FDTD V1.0 中背景介质介电常数分布图

3.3.2 矩形模型

选择 **Rectangle** 模块，出现矩形模型设置窗口。在设置窗口中，依次输入矩形模型的左端点坐标、底端点坐标、模型宽度、模型高度，以及矩形模型的电导率、介电常数及磁导率参数信息。

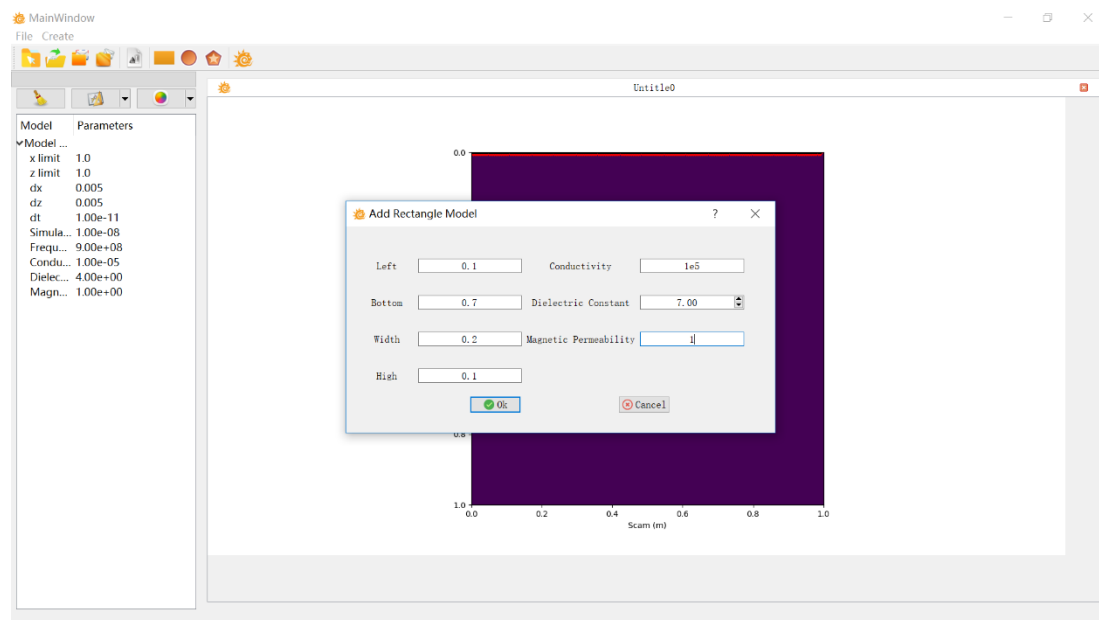


图 8 2DGPR_FDTD V1.0 中矩形模型的参数设置

输入图 8 所示参数，在窗口中显示的介电常数分布图如图 9 所示。

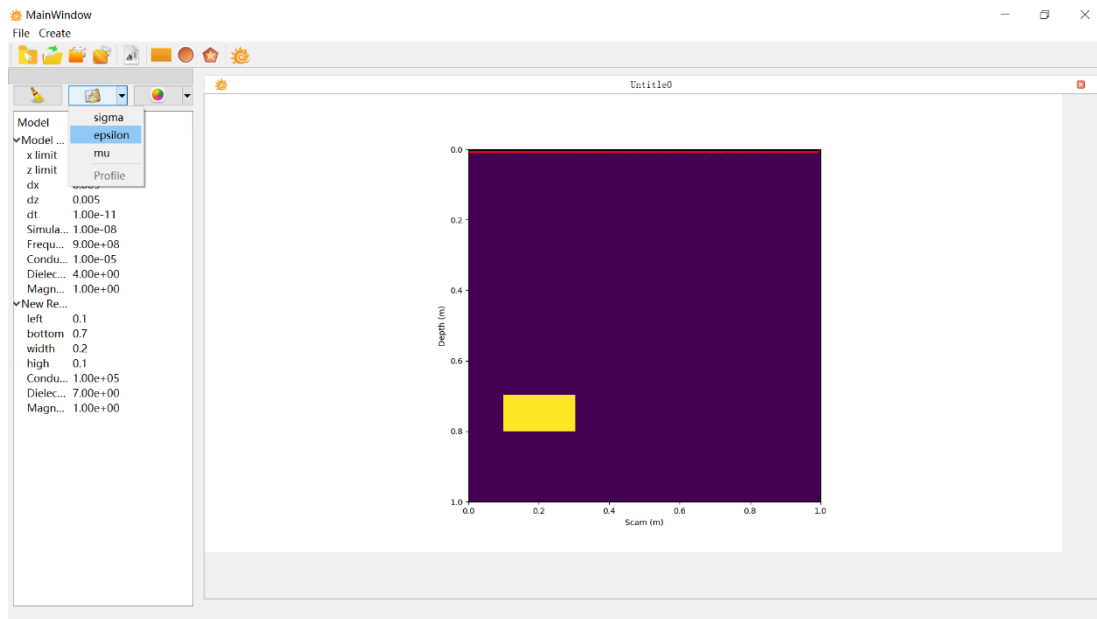


图 9 2DGPR_FDTD V1.0 中矩形模型介电常数分布图

3.3.3 椭圆模型

选择 Ellipse 模块，出现椭圆模型设置窗口。在设置窗口中，依次输入椭圆模型的长轴(z 方向)、短轴(x 方向)、圆心坐标，以及椭圆模型的电导率、介电常数及磁导率参数信息。

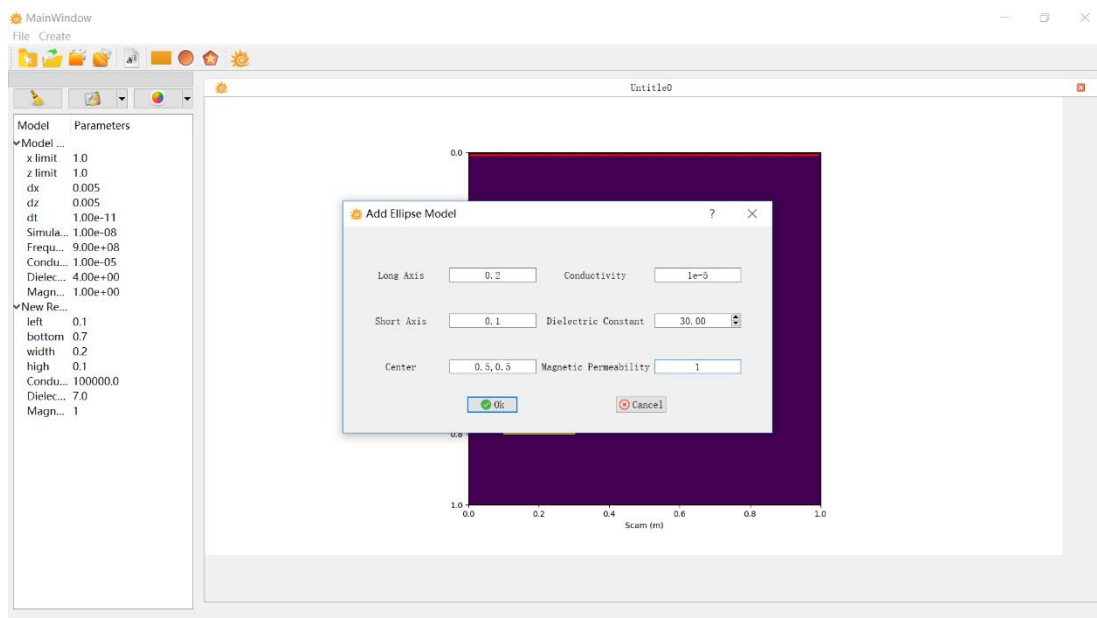


图 10 2DGPR_FDTD V1.0 中椭圆模型的参数设置

输入图 10 所示参数，在窗口中显示的介电常数分布图如图 11 所示。

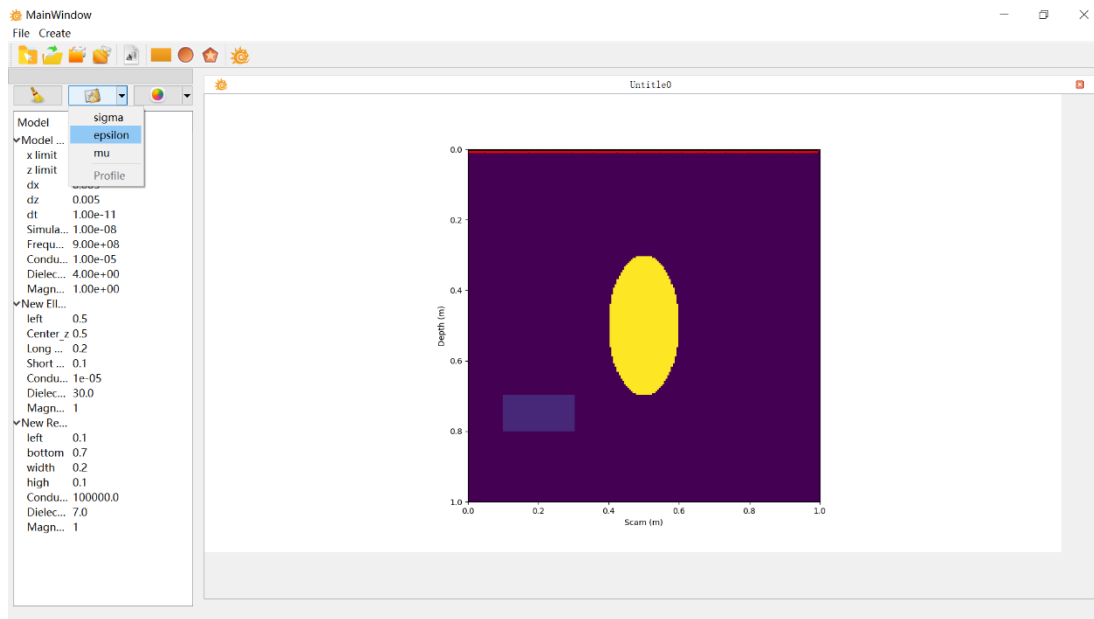


图 11 2DGPR_FDTD V1.0 中椭圆模型介电常数分布图

3.3.4 多边形模型

选择 Polygon 模块，出现多边形模型设置窗口。在设置窗口中，依次输入多边形模型各点的 x 轴坐标、z 轴坐标，以及多边形模型的电导率、介电常数及磁导率参数信息。

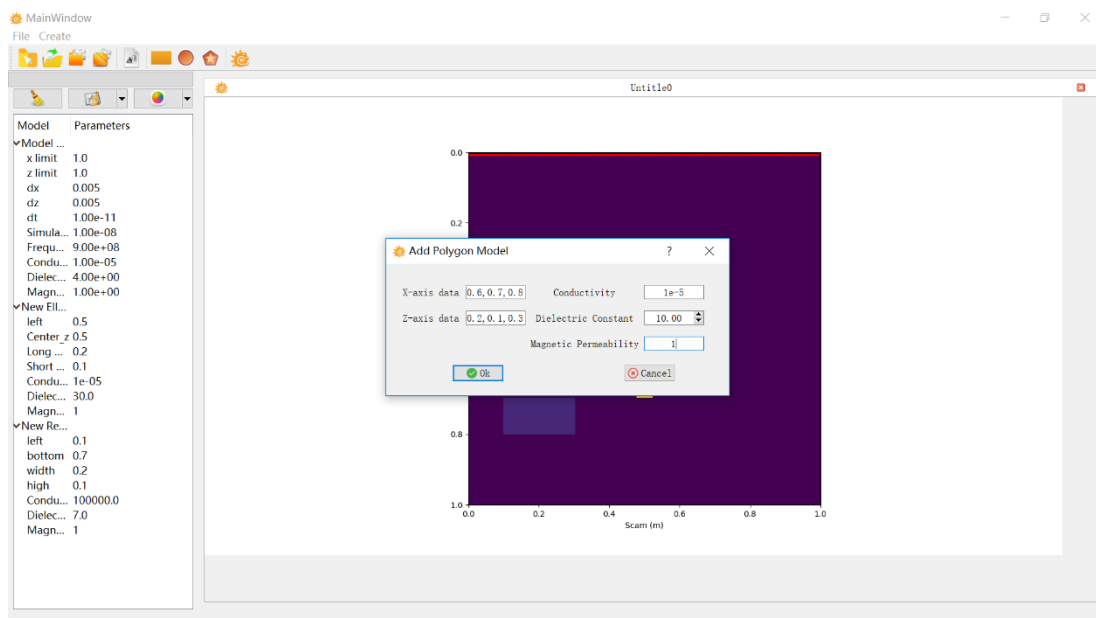


图 12 2DGPR_FDTD V1.0 中多边形模型的参数设置

输入图 12 所示参数，在窗口中显示的介电常数分布图如图 13 所示。

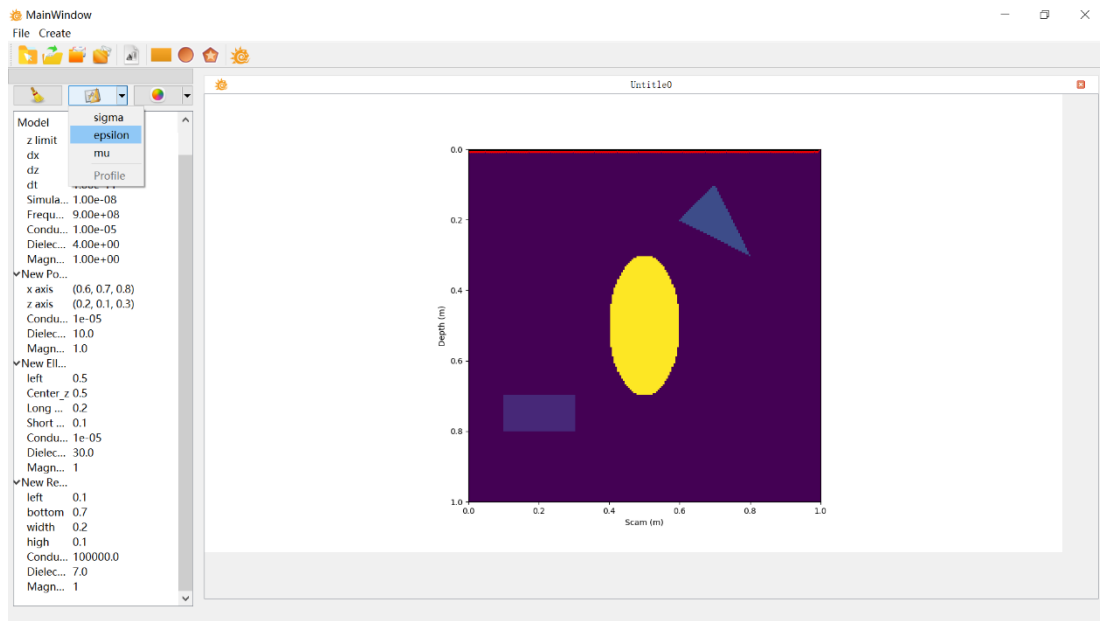


图 13 2DGPR_FDTD V1.0 中多边形模型介电常数分布图

3.4 探地雷达二维正演

下面介绍 2DGPR_FDTD V1.0 的二维正演模块。

从二维 GPR 波满足的 Maxwell 方程出发，截断边界处采用复频移完全匹配层(Complex-frequency shifted perfectly matched layer, CFS-PML)，选用基于 Yee 式网格的 FDTD 法，基于 CPU 并行加速，最终在普通微机上实现 GPR 时间域二维快速正演。

3.4.1 启动正演

在菜单栏的 Modelling 模块中，可进行二维模型的正演模拟。

以图 13 所示二维模型为例，点击 Modelling，启动二维 GPR 正演模拟。

图 14 中所示进度条代表正演正在计算中，正演模拟结束时，进度条将自动关闭。

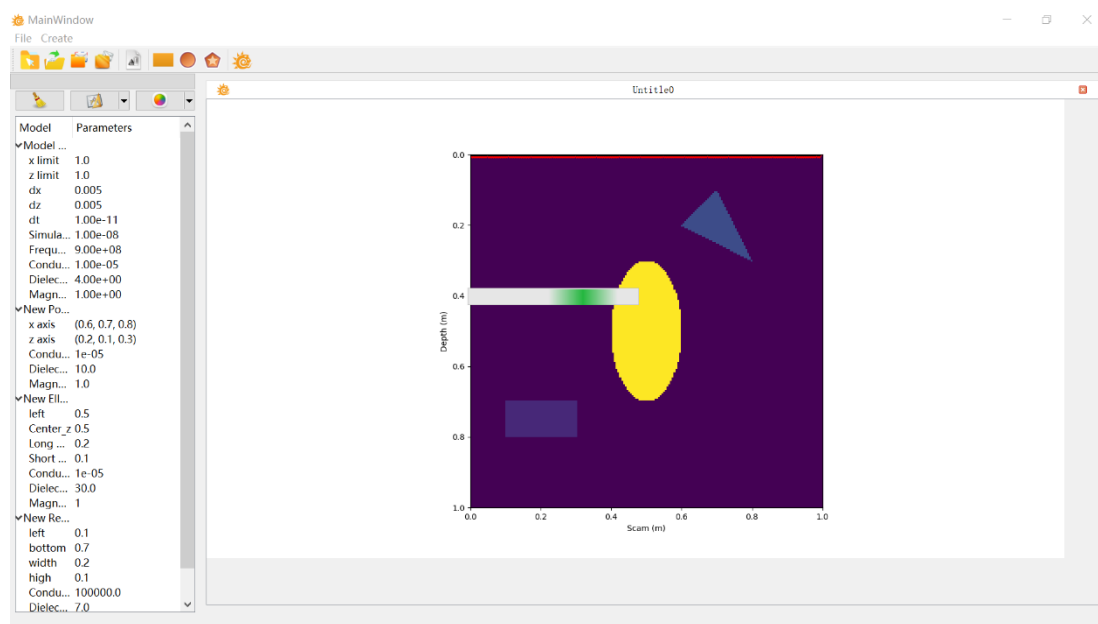


图 14 2DGPR_FDTD V1.0 中二维模型正演模拟启动

3.4.2 正演剖面

当二维模型 GPR 正演模拟结束时，在 Profile 模块中，可以查看正演模拟所获得的剖面信息。

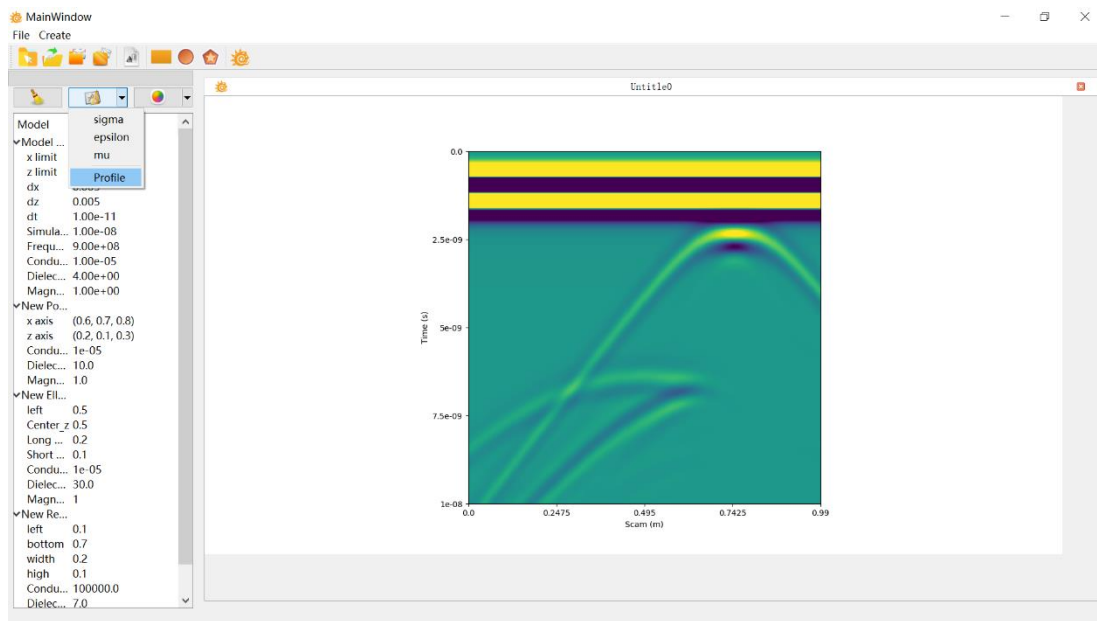


图 15 2DGPR_FDTD V1.0 中二维模型正演模拟剖面示意图

3.4.3 色标

Color Map 模块中可以对当前模型的色标进行修改，2DGPR_FDTD V1.0 共提供 84 种色标，默认色标为 viridis。

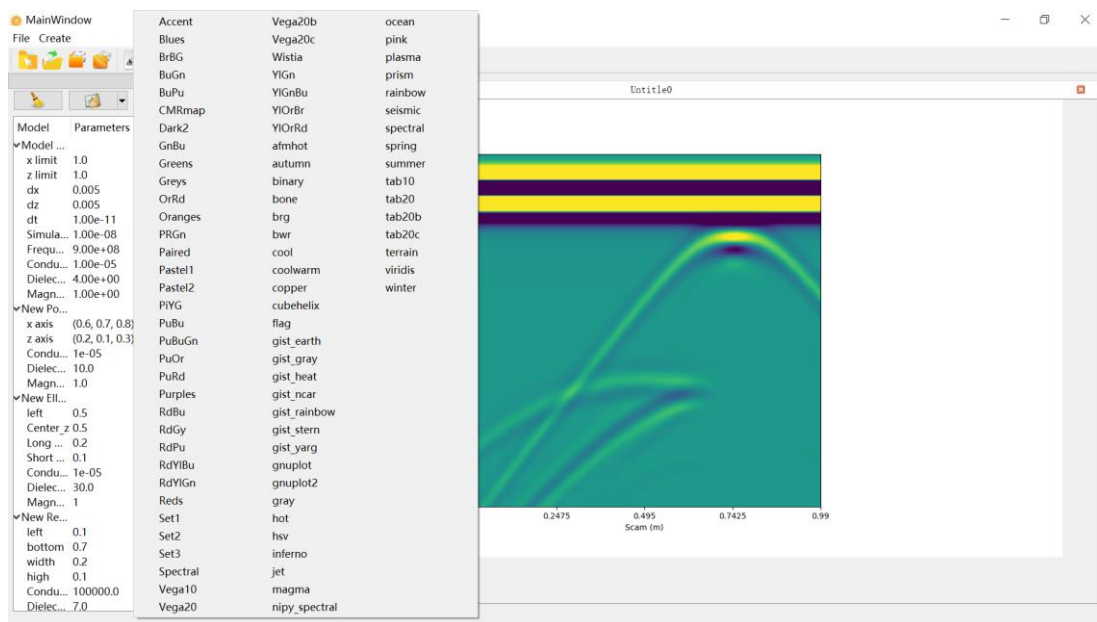


图 16 2DGPR_FDTD V1.0 中提供的色标

3.5 文件保存

下面介绍 2DGPR_FDTD V1.0 的文件保存模块。

3.5.1 文件保存

选择 Save 模块，出现文件保存窗口。

选择文件保存路径，并命名该文件，完成.csu 格式文件保存。

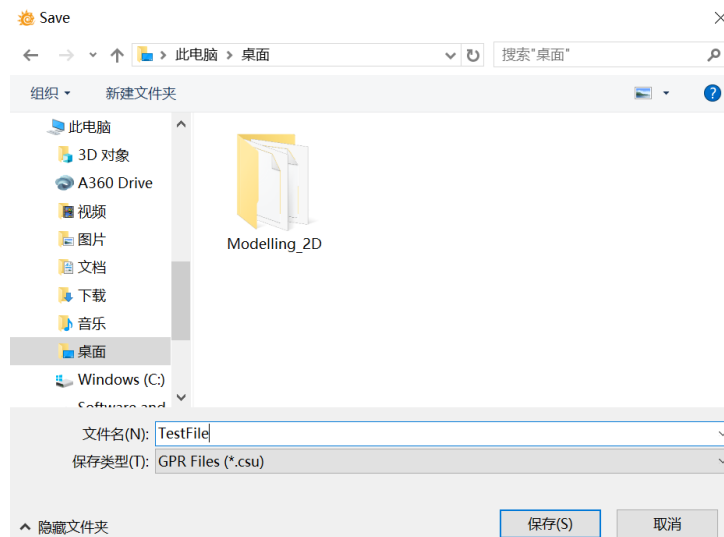


图 17 2DGPR_FDTD V1.0 文件保存模块

3.5.2 文件另存为

选择 Save as 模块，出现文件另存为窗口。

选择文件保存路径，并命名该文件，完成.csu 格式文件保存。

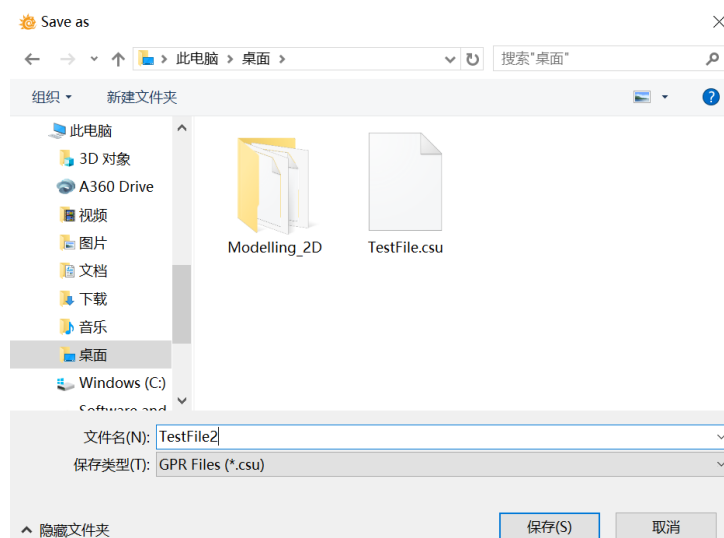


图 18 2DGPR_FDTD V1.0 文件另存为模块

参考文献

- [1] 朱建群, 关辉辉, 周勇, 等. 探地雷达在黔东浅变质岩区隧道地质预报中的应用[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版, 2011, 25(4): 59-62.
- [2] 戴前伟, 余凯, 冯德山, 等. 探地雷达及 EH4 对钼矿采空区的综合探测[J]. 地球物理学进展, 2010, 36(5): 1763-1768.
- [3] 赵忠海. 探地雷达在地质灾害调查方面的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 100-102.
- [4] 张伟, 李姝昱, 张诗悦, 等. 探地雷达在水利工程隐患探测中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(1): 34-38.
- [5] 陆礼训, 邓世坤, 冉弥. 探地雷达在隧道施工超前探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(2): 201-206.
- [6] 曾昭发, 刘四新, 刘少华. 环境与工程地球物理学的新进展[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 486-491.
- [7] Sambuelli L, Leggieri S, Calzoni C, et al.. Study of riverine deposits using electromagnetic methods at a low induction number[J]. Geophysics, 2007, 72(5): B113-B120.
- [8] 高立兵, 王赞, 夏明军. GPR 技术在考古勘探中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(1): 61-69.
- [9] Martino L, Bonomo N, Lascano E, et al.. Electrical and GPR prospecting at Palo Blanco archaeological site, northwestern Argentina[J]. Geophysics, 2006, 71(6): B193-B199.
- [10] 郭山红, 孙锦涛, 谢仁宏, 等. 穿墙生命探测技术研究[J]. 南京理工大学学报, 2005, 29(2): 186-192.
- [11] 赵永辉, 谢雄耀, 王承. 地下管线雷达探测图像处理及解释系统[J]. 同济大学学报, 2008, 33(9): 1253-1258.
- [12] 郭高轩, 吴吉春. 应用 GPR 获取水文地质参数研究初探[J]. 水文地质工程地质, 2005, (1): 89-93.
- [13] Zhang W Y, Hao T, Chang Y, et al. Time-frequency analysis of enhanced GPR detection of RF tagged buried plastic pipes [J]. NDT&E International, 2017, 92(6): 88-96.
- [14] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 14(3): 302-307.
- [15] Chen H W, Huang T M. Finite-difference time-domain simulation of GPR data [J]. Journal of Applied Geophysics. 1998, 40(1-3): 139-163.
- [16] 冯德山, 陈承申, 王洪华. 基于混合边界条件的有限单元法 GPR 正演模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3774-3785.
- [17] 冯德山, 王珣. 基于卷积完全匹配层的非规则网格时域有限元探地雷达数值模拟[J]. 地球物理学报, 2017, 60(01): 413-423.
- [18] Liu Q H, Fan G-X. Simulations of GPR in dispersive media using a frequency-dependent PSTD algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2317-2324.
- [19] Fang H Y, Lin G. Symplectic partitioned Runge-Kutta methods for two-dimensional

- numerical model of ground penetrating radar [J]. Computers & Geosciences, 2012, 49: 323-329.
- [20] Lu T, Cai W, Zhang P W. Discontinuous Galerkin Time-Domain Method for GPR Simulation in Dispersive Media [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(1): 72-80.
- [21] 冯德山, 王珣. 区间 B 样条小波有限元 GPR 模拟双相随机混凝土介质[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 3098-3109.
- [22] Irving J, Knight R.. Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(9): 1247-1258.
- [23] Cassidy N J, Millington T M. The application of finite-difference time-domain modelling for the assessment of GPR in magnetically lossy materials [J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 67(4): 296-308.