

# 2023 年地球物理实习电磁报告

赖海斌

12211612

**摘要：**南方科技大学地球与空间科学系于 2023 年 8 月 1 日至 2023 年 8 月 10 日在云南昆明、大理、丽江等地开展了地球物理野外实习课程，并在丽江进行大地电磁野外实测，主动源地震、人工源电磁野外实测。在野外电磁实测中收集了多份重要数据，并就此进行数据分析，最终以报告形式汇报本次实习实验结果。

**关键词：**地球物理；大地电磁方法；探地雷达；南方科技大学；

# 目录

1. 大地电磁 (MT) 野外实测.....	3
1.1 大地电磁方法基本原理.....	3
1.2 大地电磁观测基本情况.....	5
1.3 测得时间序列后的数据处理.....	7
1.4 阻抗张量数据处理.....	7
1.5 大地电磁实习工作总结.....	11
2. 探地雷达 (GPR) 野外实测.....	12
2.1 GPR 方法基本原理.....	12
2.2 GPR 观测基本情况.....	13
2.3 野外实测基本情况.....	13
2.4 软件数据处理.....	14
2.5 原始雷达图像分析.....	15
2.6 探地雷达实习工作总结.....	18
3. 总结. ....	19
参考文献. ....	20

2023 年 8 月 1 日至 2023 年 8 月 10 日期间, 南方科技大学地球与空间科学系于在云南昆明、大理、丽江等地开展了地球物理野外实习, 在丽江进行大地电磁野外实测, 主动源地震、人工源电磁野外实测。在本次野外实测中, 实习队伍收集了多份电磁数据。本文就收集的电磁实验数据并就此进行数据分析, 运用地球物理实验中经典的分析方法得出结论, 完成电磁实验报告。

## 1. 大地电磁 (MT) 野外实测

### 1.1 大地电磁方法基本原理

#### 1.1.1 大地电磁法介绍

大地电磁法(简称 MT 法), 是将测量地球磁场的地磁法(Geomagnetic Method), 与用以测量地球电场的地电流法 (Telluric Current Method) 合并组成, 可以直接测量大地电阻率<sup>[1]</sup>。

MT 法的波源主要包括: 1、频率大于 1Hz 的远区雷电放电所产生的电磁场, 其在地球表面和电离层(高导电性)之间的波导中传播。它们的场以平面波的形式传播很远的距离<sup>[3]</sup>; 2、频率小于 1Hz 的太阳风带电粒子与地球磁场作用所产生的电磁场, 在电离层与地表间重复反射后, 以平面波形式入射进入地球内部<sup>[4]</sup>。此两种自然作用所产生的天然电磁场, 频率范围广且低频部分能量大, 可穿透很深的地层, 当地层的导电性质有差异时, 便会引发不同程度的次生电磁场讯号。透过在地表测量大地电场与磁场, 可据以分析不同频率(深度)地层的导电性质, 得到电性地层构造<sup>[1]</sup>。

#### 1.1.2 一维 MT 基本假设

在一维 MT 方法中, 我们根据卡格尼阿德提出的关于大地电磁场是由高空向地下垂直投射的平面电磁波的假说, 以此作为大地电磁法的理论基础。在本次实际地球物理勘探工作中, 我们可以把地球作为平面问题看待, 将其作为一维 MT 的基本假设。<sup>[3]</sup>

#### 1.1.3 一维 MT 物理模型与大地电磁法观测装置

在大地电磁法的物理模型中, 大地电磁场以平面波的形式传播, 在地球表面, 磁场垂直传输到地下, 产生垂直传播的平面波, 产生薄片状电流, 如图 1.1 所示<sup>[4]</sup>。通过收集薄片状电流的大小等数据, 我们可以将其进行非线性反演, 逆推出大地电磁的基本数据<sup>[6]</sup>。

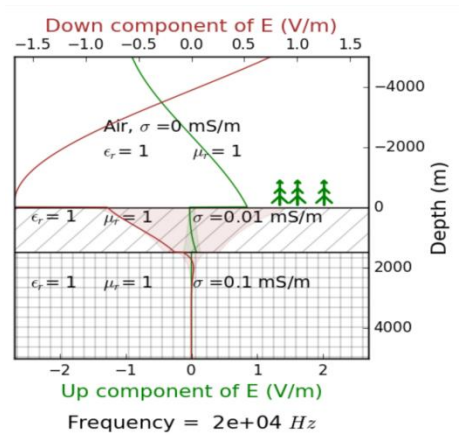


图 1.1 产生薄片状电流的源场

大地电磁法的主要观测装置如图 1.2，大地电磁探测方法收取两个正交方向的电场 $E_x$ 及  $E_y$ (通常野外定义 $E_x$ 为南北方向； $E_y$ 为东西方向)及三个正交方向的磁场 $H_x$ 、 $H_y$  以及 $H_z$ (通常野外定义 $H_x$ 为南北方向； $H_y$ 为东西方向； $H_z$ 为垂直向下入地表)，由电场及磁场的宽频资料可推算出视电阻率，而宽频视电阻率可逆推出地下电阻率构造。

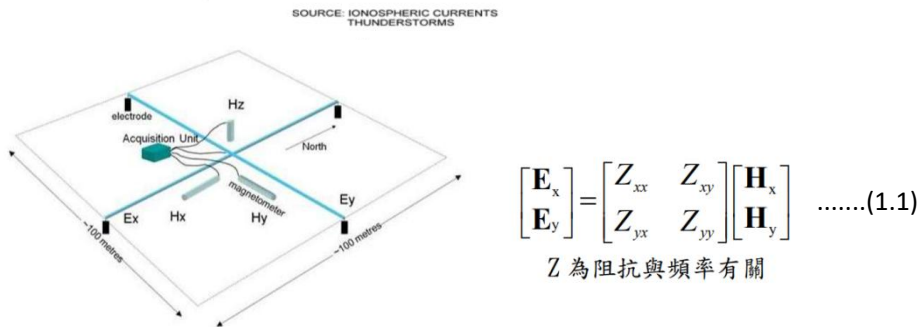


图 1.2 大地电磁法观测基本装置和电磁场与阻抗计算公式

对于均匀的地球，测量的表面阻抗与地球的真实电阻率有关。对于一维问题，其计算公式为：

$$Z_{xy}(\omega) = -\frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} = \sqrt{i\omega\mu\rho} \quad \text{.....(1.2)}$$

由麦克斯韦电磁理论可知，当平面波垂直入射均匀各向同性大地时，测量相互正交的地表电场和磁场水平分量，可计算出大地的电阻率值，其计算公式为<sup>[5]</sup>：

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \text{.....(1.3)}$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad \text{.....(1.4)}$$

### 1.1.4 阻抗数据获得和数据定性分析方法

在本次实际观测中，我们收取了南北方向及东西方向上电场的数据，收集了南北方向和东西方向上磁场的数据，利用公式（1.2）（1.3）（1.4），在计算机数据分析软件 **MATLAB** 上计算出该时间域内的阻抗及大地电阻率值，从而运用阻抗值与视电阻率值对观测大地进行分析。

## 1.2 大地电磁观测基本情况

### 1.2.1 MT 观测所用仪器

在本次野外实习观测中，我们采用的 MT 观测所用仪器大地电磁仪，包括了主机（大地电磁采集系统）、磁棒、不极化电极、电线、监测电脑、万用表、米尺、水平仪等设备。

图 1.3，图 1.4，图 1.5，图 1.6 展示的是实验中使用的不极化电极（同款）、磁棒、监测电脑及数据采集主机。



图 1.3 不极化电极



图 1.4 磁棒

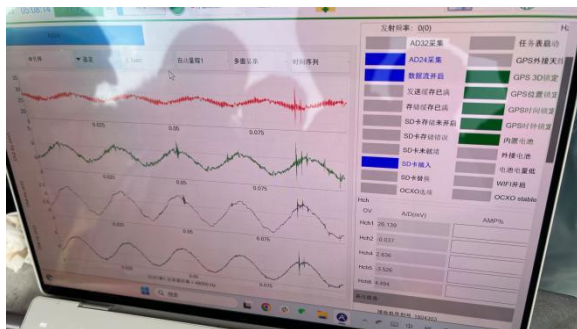


图 1.5 监测电脑



图 1.6 Aether 大地电磁采集系统

## 1.2.2 野外工作方法

在本次野外工作中，我们将四根电极布置在东西南北四个方向上，南北方向上的两个电极测量地球 $E_x$ 方向上的电场，东西方向上的两个电极测量地球 $E_y$ 方向上的电场。在布设电极时，我们运用手机指南针及罗盘，将东西及南北朝向的电极基本平行于要测量的磁场方向，确保在布设时米尺不偏差，测量尽量精准。之后，我们布设四根电缆将电极与主机连接。随后我们对电极进行土壤掩埋，确保仪器与大地进行拟合。

我们将两根磁棒按照南北和东西两个方向进行布设，运用手机指南针或罗盘进行方向校准，运用水平仪等设备将磁棒较为水平地放置在土壤中，随后运用缆线将磁棒与主机连接。随后我们对磁棒进行土壤掩埋，确保仪器与大地进行拟合。

在本次野外工作中，我们对磁棒和电极都进行了挖坑掩埋处理，确保了仪器与大地进行充分拟合，改善仪器的接地条件，增大仪器与土壤的接触面积，使得测量出的磁场电场更靠近地球电磁场真实值。同时，挖坑也减少了外界非自然噪声对仪器产生的干扰，使得电磁采集的精准性提升。

在本次野外工作中，我们对磁棒和电极附近加入了盐水。加入盐水可以提升测量仪器附近土壤的电导率，改善仪器的接地条件，增大导电性，降低接地电阻，从而更精准地测量出大地电磁场。

在本次野外工作中，我们将 Aether 大地电磁采集系统的采样率设置为 48kHz，测量时间为当日北京时间 12:53 至 14:03，收集了 4 个通道的原始时间序列。图 1.7 为现场收集观测数据，图 1.8 为当地现场周围情况。

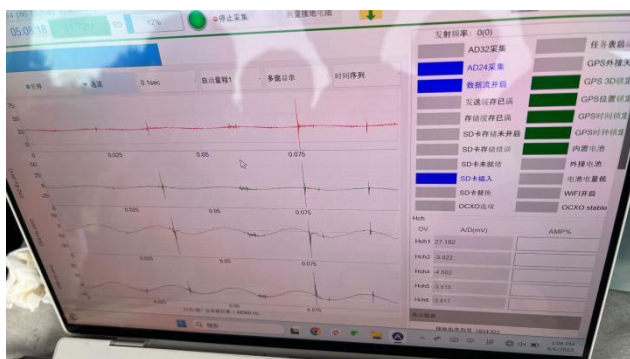


图 1.7 收集观测数据



图 1.8 现场周围情况

## 1.3 测得时间序列后的数据处理

### 1.3.1 导入原始文件

如图 1.9，将大地电磁采集系统中的原始文件导入至电脑（文件大小大约为 32M），确认 48khz 采样率、采集时间正确，测得的时间、方向方位角、探头编号与实际野外工作一致，与 4 个通道的原始时间序列相关联。

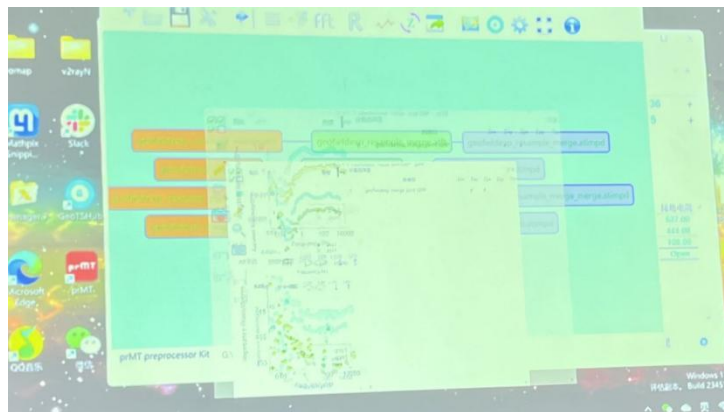


图 1.9 导入原始文件

### 1.3.2 滤波及阻抗获取

由于采集的大地电磁数据受 50Hz 市电影响，我们将原始数据进行时间序列处理，去除 50Hz 市电信号的影响，去除不必要的噪声。

随后，我们通过快速傅里叶变换把时间域的时间序列变成频率域（复数域），分解电磁数据中的叠加的不同信号，运用公式（1.1）解出阻抗，得到了 csv 文件，其包含有不同时间下的阻抗张量。

## 1.4 阻抗张量数据处理

### 1.4.1 测探点基本信息

- 点位：100.17E,26.97N，文海旁地质监测站
- 地质条件：土层较为深厚，有硬质岩层
- 周边环境：附近多山地地形，周围有几个村庄和露营基地，有少量往来车辆
- 潜在噪声源：村庄及露营点噪声，车辆行驶噪声，测量同学所使用的手机产生的噪声。
- 观测时间：北京时间 2023 年 8 月 6 日 12:53 至 14:03

### 1.4.2 测探点视电阻率与阻抗相位计算



我们将不同时间下的阻抗张量导入至数值计算软件 MATLAB，对其进行数据处理。

在本次实验中，我们将绘制的最低频率取 1Hz，在原本的数据中取第 1-44 个频率-阻抗数据点进行计算。随后，我们利用频率计算角速度，具体计算公式如下：

$$\omega = 2\pi f \quad \dots\dots(1.5)$$

将相位合成后，利用公式（1.3）（1.4）计算视电阻率。之后将阻抗张量转换为相位角。从而做出频率-视电阻率曲线图（图 1.10）和频率-相位曲线图（图 1.11）。

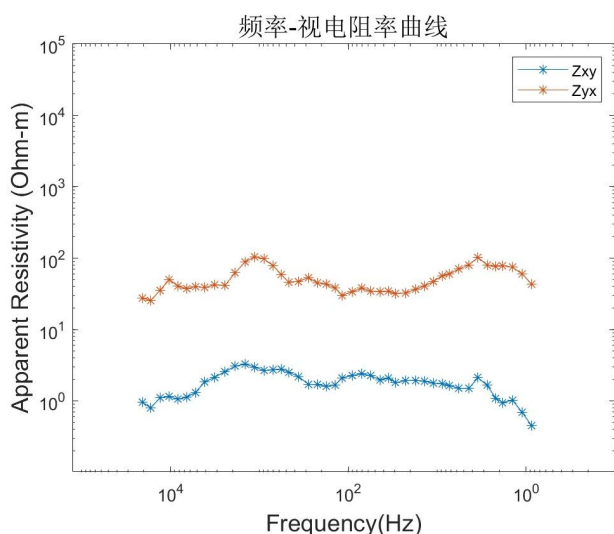


图 1.10 频率-视电阻率曲线图

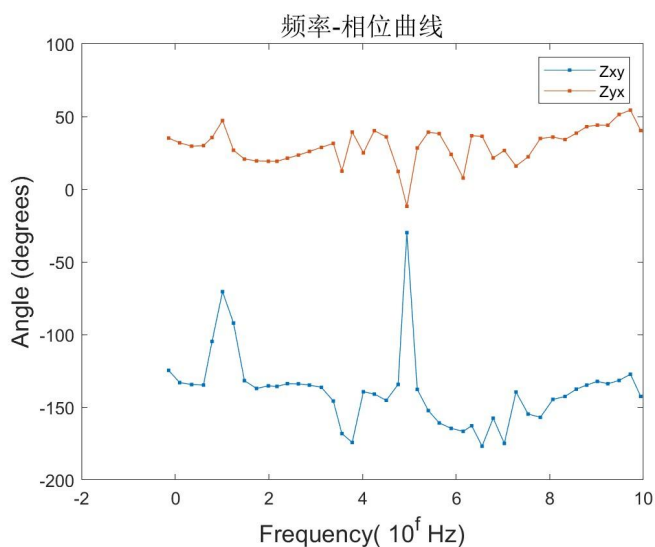


图 1.11 频率-相位曲线图



### 1.4.3 数据质量评估

根据图 1.10，本次频率-视电阻率数据两条曲线随频率变化的幅度基本吻合，我们可以认为本次视电阻率数据质量较好，可信度高。根据图 1.11，本次频率-相位数据两条曲线变化幅度整体大致吻合，在个别数据点有缺失，本次的相位数据整体质量相对较高。

根据曲线连续性，图 1.10 的阻抗元素基本没有受到干扰，数据均可使用。但图 1.11 中，第 21 个数据点两条曲线变化不一，且该数据点距离曲线内其他数据点距离过远。在 Python 中运用 Topsis 分析法，我们发现第 21 数据点偏移程度大，整体可信性得分低。同时，我们将两组曲线相同频率下的相位做差，并求出平均差值，之后绘制出相位差残差图（图 1.12）。

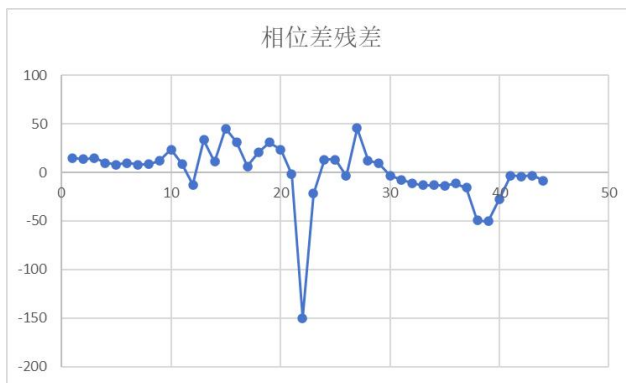


图 1.12 相位差残差图

可以看出，第 21 数据点与平均值差距过远，偏离相位曲线过远，应当在分析时排除该数据点。

根据图 1.10，不难发现， $Z_{xy}$ 和 $Z_{yx}$ 的视电阻率曲线幅度差异较大。这里我们给出几点解释。

1、根据公式(1.1)， $Z_{xy}$ 和 $Z_{yx}$ 分别由 $E_x$ 、 $E_y$ 决定，测量当地的地球大地 $E_x$ 、 $E_y$ 数量级不同，造成 $Z_{xy}$ 和 $Z_{yx}$ 视电阻率曲线幅度有较大差异。

2、测量当地地下空间的不均匀性造成了差异。测量的地下物体有方向性，导致 $E_x$ 方向电场跟 $E_y$ 方向电场不一样。

3、在测量时，XY 方向的测量可能受到了一定量的干扰，当地的市电使用及无线电波和手机的使用，使得测量出的曲线有差异。

4、受制造工艺影响，实验使用的电极有极差，制造工艺问题造成了曲线幅度差异。

#### 1.4.4 本次试验的浅层分辨尺度和最大探测深度估算

MT 使用频率测深原理获得深度分辨力，高频反映浅部，低频反映深部。我们常用趋肤深度公式大致估算分辨尺度和探测深度，其经验公式为：

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (\text{m}) \dots\dots (1.6)$$

上式中的 $\rho$ 为地下空间平均电阻率（单位：欧姆米）， $f$ 为频率（单位：赫兹）。运用公式（1.6）和视电阻率曲线信息，我们近似估算本次试验的浅层分辨尺度和最大探测深度。我们将第 1 个和第 43 个数据点带入公式，得到本次试验的浅层分辨尺度 $\delta_1$ 和最大探测深度 $\delta_2$ ：

$$\delta_1 = 18.3775 \text{ m}$$

$$\delta_2 = 3706.49 \text{ m}$$

另外，根据经验公式，我们如果把 44 个数据点均带入公式（1.6），可以得到电阻率随深度变化曲线图 1.13（注意，这里的趋肤深度公式在中间频率不一定完全拟合，图 1.13 目的仅为大致定性分析电阻率随深度变化）。我们可以大致定性分析出测点下方的电阻率随深度的增大，在浅层底层电阻率先增大后减小，在深层底层电阻率先增大后减小。

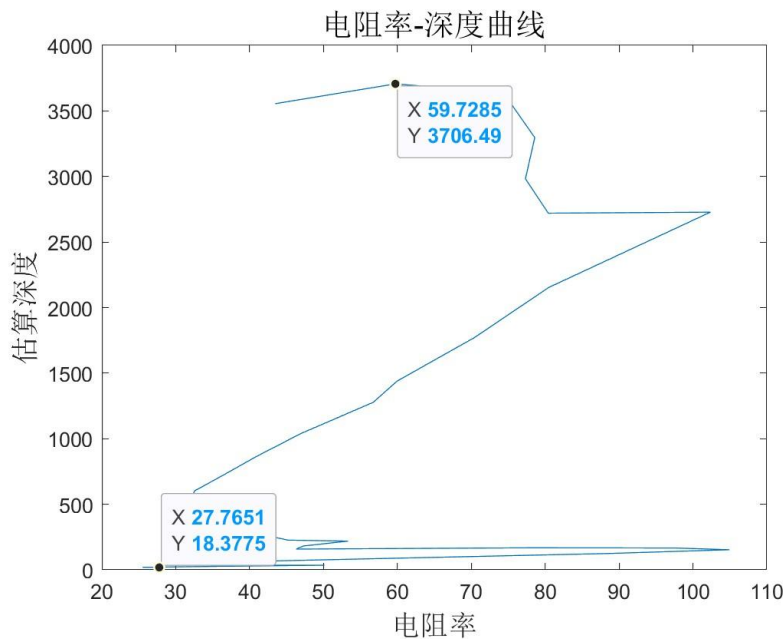


图 1.13 电阻率随深度变化曲线图

在浅层底层中，随着深度增加，由地表水带来的岩石水份含量减小，岩石导电性下降，电阻率增加。深度继续增加，地下水带来的岩石水份含量增大，岩石导电性上升，电阻率下降。在深层底层中，岩石的电阻率受岩石岩性等多方面影响，电阻率先增大后减小。整体而言，电阻率随深度的变化情况基本与测点处的地质情况符合。

## 1.5 MT 实习工作总结

在这次的云南丽江进行的大地电磁法测量实验实习中，我积极参与了 MT 实验数据采集、数据处理和结果分析等工作，并且通过与老师和同学的合作和指导，取得了有意义的成果。

首先，通过这次实习，我深刻认识到大地电磁法作为一种非破坏性的地球物理勘探方法，在资源勘探、环境监测和灾害预警等领域具有广泛的应用前景。我学到了 MT 测量的基本原理和仪器操作技巧，以及如何正确地布置测量点位，保证数据质量的重要性。

其次，这次实习中我学到了许多数据处理和解释的方法。从原始观测数据到作图成像，需要进行多个步骤的处理和分析。我掌握了一些常用的数据处理软件和编程工具，如 MATLAB 和 Python，我在 MATLAB 中学习了数据处理与作图的基本知识，在 Python 中进行了 Excel 数据处理与 topsis 分析法。我在实践中运用这些工具解决了实际问题，提取出了地下结构的信息。

我也深深体会到了团队合作的重要性。在实习期间，我与一起实习的老师和同学紧密合作，互帮互助，一起挖地、埋设备、搬设备，共同攻克了难题。团队合作不仅提高了工作效率，也促进了我个人沟通能力、团队合作能力的提升。

这次实习中，我印象最深刻的是实地操作时肚子一直在叫，问题一直在冒出来。在户外的多个小时让我亲身感受到了户外工作的艰辛和复杂性，并且需要根据现场情况，解决现场问题。虽然实地测量比较辛苦，但是我在这一过程中也收获了友谊与吃苦耐劳的精神，收获的数据更是让我感受到科研的快乐，这些经历让我更加坚定了追求科研事业的决心。

基于我所学和实习工作的经验，我得出了一些基本结论。大地电磁法测量是一项重要且具有挑战性的工作，要求我们具备较强的理论基础和实际操作能力。同时，数据处理和解释也是非常关键的环节，需要不断学习和掌握更多的方法和工具。在未来的实习中，我建议将更多的时间投入到数据处理和解释方面的学习，以提升自己的在这一领域的水平。就探测数据而言，我了解了测量点当地的视电阻率变化曲线，了解了仪器的浅层分辨尺度和最大探测深度的估算，运用自身所学的知识对收集的数据进行了合理的解释。

在未来的实习中，我希望自己能秉持吃苦耐劳和团队协作的精神完成下一个挑战。同时，我希望下一次实习能备足必要的食物，做好面对下雨等事件的应急预案。

综上所述，通过参与云南丽江的大地电磁法测量实习，我获得了宝贵的实践经验和专业知识。我学到了大地电磁法的原理和实际应用，掌握了数据处理和解释的方法，同时也深刻体会到了团队合作的力量。这次实习让我更加坚定了自己科研的决心，并为未来的实习工作提供了一些宝贵的指导。

## 2. 探地雷达（GPR）野外实测

### 2.1 GPR 方法基本原理

探地雷达（GPR）是一种用于近地表勘探的电磁方法，它有时被称为回声探测。GPR 利用电磁特性的对比来定义浅层结构（自然和人造）的物理边界。对 GPR 重要的物理特性包括：介电常数，电导率和磁导率。探地雷达用于生产生活中的各种应用。其中包括：

- 调查混凝土结构和道路
- 绘制泥炭沼泽和其他沉积层的厚度
- 获取地下水或永久冻土的深度
- 定位地下基础设施，如灌溉管道、隧道和电线
- 寻找地雷和未爆弹药

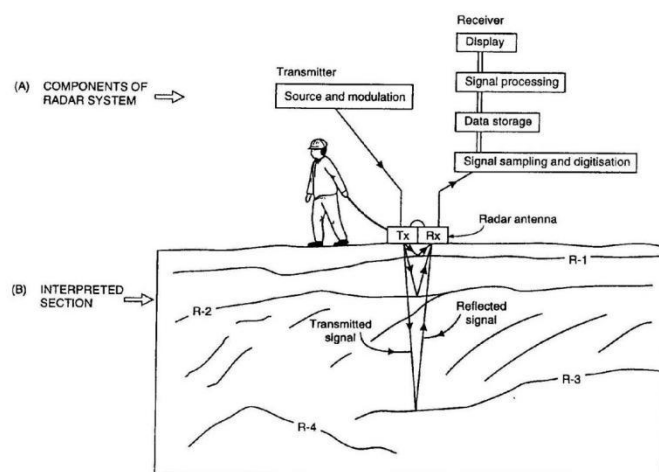


图 2.1 探地雷达 GPR 设置示意图

开启 GPR 后，雷达将高频电磁波（无线电波）脉冲发送到地面。当无线电波在地下传播时，由于在地球底层内部存在分层，不同岩层的电磁特性不同，使得无线电波在穿透岩层时发生扭曲。在地下电磁特性突然变化的边界处，无线电波信号可能会发生传输、反射或折射。正因如此，对地震方法的大部分理解可以应用于探地雷达<sup>[7]</sup>。

我们通过收集反射的雷达电磁信号，运用回声定位的方法，通过信号测量某一深度下的埋藏的物体，从而对地下的地层进行分析。

### 2.2 GPR 观测基本情况

#### 2.2.1 GPR 观测所用仪器

在本次 GPR 野外实习观测中，我们使用了主机、100MHz 频率天线（含测距轮）、数据线、绳子等工具仪器进行探地雷达实验。

图 2.2 展示的便是实际观测中的主机（下方黑蓝色仪器）及 100MHz 频率天线（上方红色设备）。



图 2.2 探地雷达 GPR 观测仪器示意图

### 2.2.2 GPR 观测野外工作方法

在本次 GPR 野外实习观测中，我们第二小组首先根据米尺测量的一定长度的行进道路，将 100MHz 天线布设在实验道路起点，调整好主机，2 人拉动天线，1 人手持数据线路，1 人操作主机，1 人指挥天线前进。在前期准备工作期间，我们标定了测距轮，确认了路线的起点和终点，准备开始工作。

在主机上按下“START”启动数据收集按钮后，开始拉动天线收集数据。在拉动过程中，牵引绳尽量与地面保持水平，防止天线底盘离开地面，同时全组成员按照既定线路将天线拉至终点。在到达终点后，按下“STOP”保存数据，从而完成本组的 GPR 野外观测工作。

在本次野外观测中，小组共进行了 3 次观测，获得了 2 段天线数据，方向分别为从路的下（西）方往上（东）方拉动和从路的上（东）方往下（西）方拉动。

### 2.3 测线基本信息

- 测线位置：100.17E,26.97N，文海旁地质监测站
- 地质条件：测量线路位于水泥路之上，路旁有些许野草野花。
- 周边环境：路旁有地震实验用的探头，水泥路附近有建筑物。实验场附近多山地地形，周围有几个村庄和露营基地，有少量往来车辆。
- 潜在噪声源：村庄及露营点噪声，车辆行驶噪声，同学的手机产生的噪声。
- 观测日期时间：2023 年 8 月 6 日 17:48（第一段） 2023 年 8 月 6 日 18:15

（第二段）

- 数据采集过程：在主机上按下“START”启动数据收集按钮后，拉动天线收集数据。在到达终点后，按下“STOP”保存数据，从而完成本组的 GPR 野外观测工作。

## 2.4 软件数据处理

我们利用 GSSI 雷达数据处理软件 RADAN，导入我们小组采集的雷达数据 003.DZT 与 007.DZT 文件（图 2.3，图 2.4）。由于在采集 003.DZT 时雷达受外界扰动较大，我们在接下来的数据处理中统一使用 007.DZT 文件。

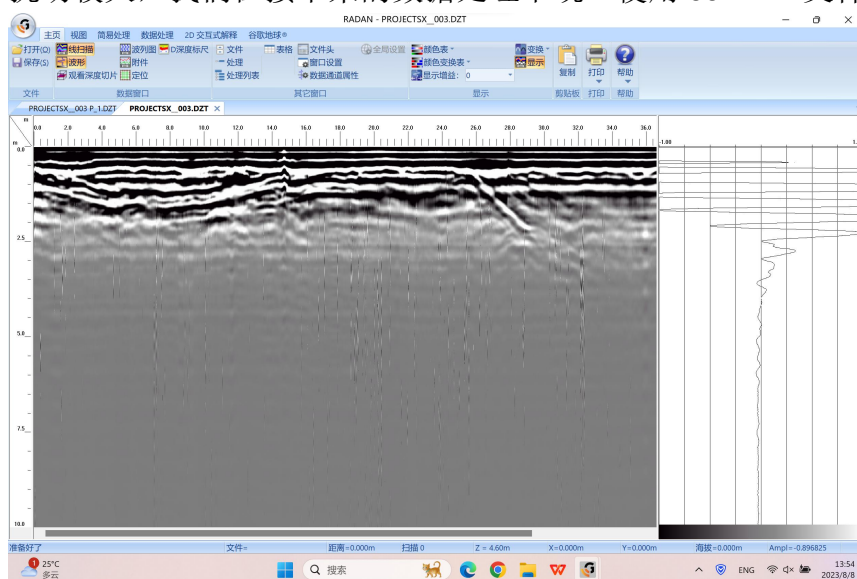


图 2.3 雷达数据 003. DZT 文件

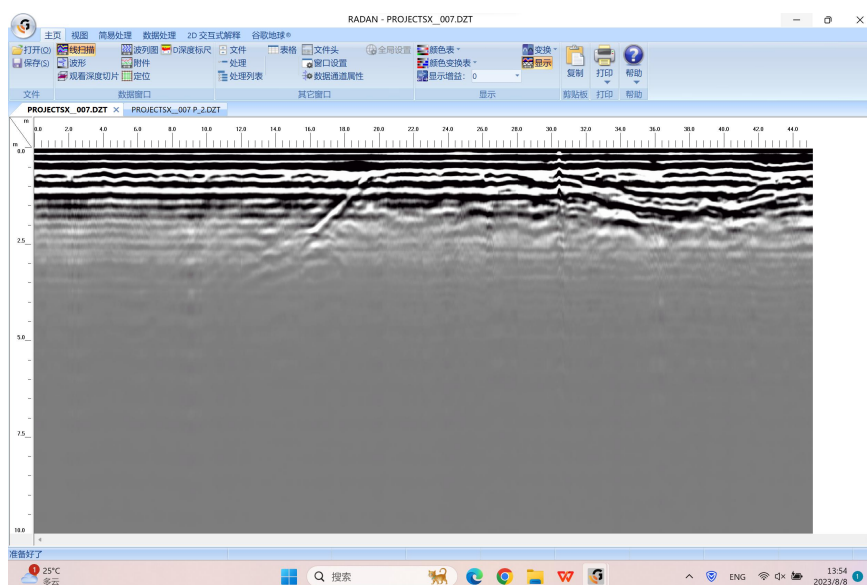


图 2.4 雷达数据 007. DZT 文件



## 2.5 原始雷达图像分析

### 2.5.1 深度估测修正

我们在 RADAN 软件中绘制了原始雷达图像。雷达设备仅记录电磁脉冲的发射和到达时间（双程旅行时），如果需要估算地下目标的深度，需要知道电磁波速度。

电磁波在地下传播的速度主要受到介电常数的影响，介电常数越高速度越慢，水的相对介电常数为 81，空气为 1，本次试验选择 25（湿土）进行时深转换。

在实验测试当天，当场下大雨或地下含水超过预期，雷达剖面上地层或异常体的显示深度比实际深度更深。

这是因为在湿润的地下环境中，地下含水量增加会导致介电常数增加，从而导致电磁波在地下传播时的速度变慢。而雷达设备记录的是电磁脉冲的发射和到达时间，若我们假设雷达所测得的时间为实际深度的双程旅行时间，并使用固定的速度来估算深度，即假设地下介质为干燥土壤（介电常数较低），则估算所得的深度会更深，而实际深度就没有显示深度那么深。

因此，当地下含水增多时，雷达剖面上地层或异常体的显示深度会比实际深度深，实际的深度会比显示深度浅。

### 2.5.2 截取合适探测深度图像

可以注意到雷达剖面上的信号向下逐渐衰减。根据趋肤效应原理，地下介质的电导率越高，电磁波衰减越显著，探测深度越浅。

在图像中，我们选择 4m 作为我们探地雷达合适的探测深度，并以该深度以上的图像（图 2.5）作为数据分析图像。

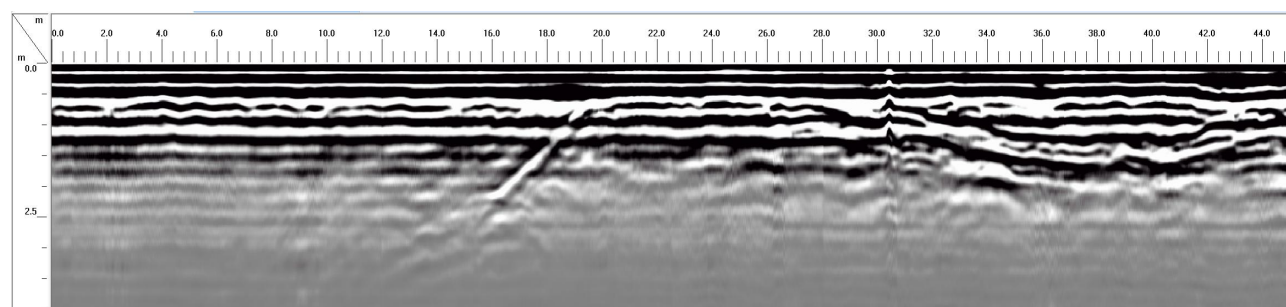


图 2.5 4m 以上雷达探测图像

### 2.5.3 标注坡顶坡底

根据分组信息和现场记录，剖面上开始端为坡顶，结束端为坡底，具体标注如图 2.6。



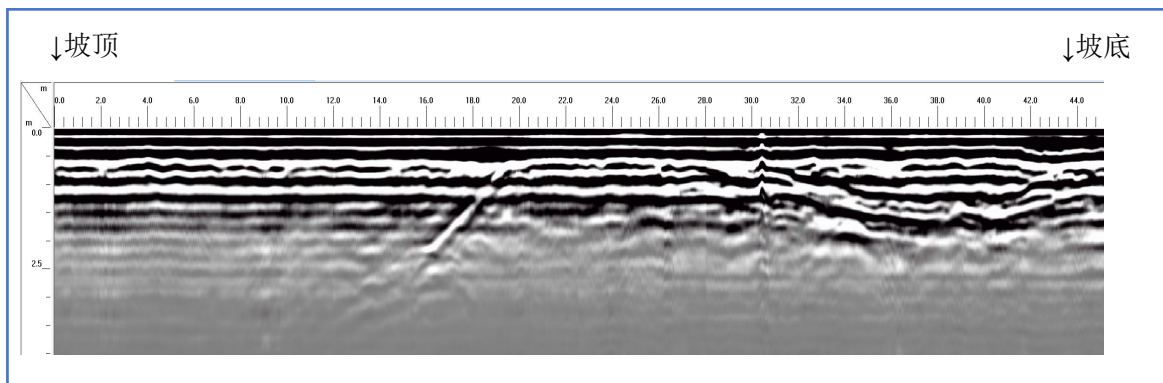


图 2.6 4m 以上雷达探测图像（带坡顶坡底标注）

#### 2.5.4 雷达剖面反射记录分析

从图 2.6 雷达剖面上反射记录看，雷达剖面数据连续性较好，基本层次结构清晰。主要可能的地下结构可分为 2 层。

第一层深度在 0-50cm 左右，由三条黑线构成。其主要由施工均匀的混凝土路面构成，推测该混凝土路面在土层做平后直接进行平铺，形成了数据面的第一层。

第二层深度在 50cm 以下，在深度 50cm-200cm 左右由多条黑线构成，随着电磁波信号衰减，地下仍有多条浅色线分布在 200cm 以下。该层次推测为土层，由分布较为均匀的同质化土壤构成。该土壤部分测量长度区间存在扰动现象，如 16-20cm 区间及 32-42cm 区间土层的连续性受到了一定程度的干扰。

#### 2.5.5 雷达剖面异常体分析

图 2.6 雷达剖面上遇到了至少 4 个不均匀体或异常体（如图 2.7 红色区域）。其分别是：

- 1、长度区间 2-10m，深度 50cm-100cm 的土层异常扰动；
- 2、长度区间 16-20m，深度 50cm-250cm 的土层异常体；
- 3、长度区间 30-31m，深度 50cm-250cm 的土层异常突起；
- 4、长度区间 32-42m，深度 50cm-200cm 的土层异常体；

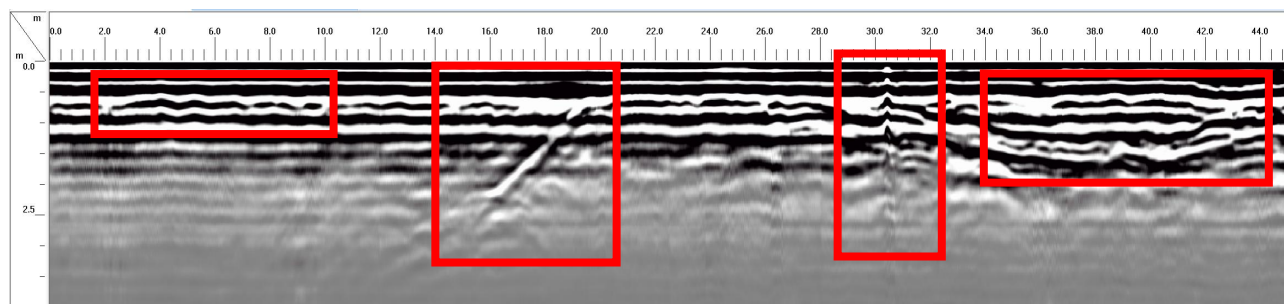


图 2.7 雷达剖面异常体

我们就现场场地环境等先验信息给出可能的解释。

区间 1 的土层异常扰动主要表现为 50cm-100cm 的浅层土壤层波动。我们推测这可能是在铺设水泥路时工程队将土层挖开施工，使得土层表面凹凸不平产生波动。事实上，整个 50cm 左右的表层土壤层均存在波动，这可能就是施工时在简单铺平土壤层后直接铺设水泥路的结果。

区间 2 的土层异常体主要表现为有一长度约为 3m 的棒状物直接俯冲进入土层中。这可能是施工时为了路基稳定埋设的钢筋混凝土。考虑到剖面上开始端为坡顶，结束端为坡底，这也可能是插入土层的与路面方向共面的管道。

区间 3 的土层异常突起主要表现为同一长度区间剖面上的土层发生凸起，这可能是由于在这里埋设了一根管道，该管道降低了附近的介电常数，使得测得的土层深度相比真实深度较浅。根据 25cm 左右的空腔，我们猜测其管道埋设深度在 20-30cm 左右。根据其空腔大小，我们可以大致计算其直径，进而通过凸起的幅度确定改变的介电常数大小，最终确定该管道的材质。

区间 4 的土层发生了下凹构造，我们猜测可能产生了路面拖空。在路基面建设完毕后，随着时间流逝，下方土壤坍塌/冲刷，上方混凝土仍在，产生了一个大约 50cm 空腔，长 10m，位于深度 50-200cm。我们可以依据此进行进一步的路面检测，对空腔区进行注浆，从而实现路面维护。

## 2.5.6 天线频率对雷达记录的影响分析

本次试验使用了中心频率为 100MHz 的天线（橙色箱子）。天线中心频率选择需要兼顾探测深度、分辨率和天线尺寸是否符合实际需要。中心频率越高，介质内的电磁波波长越短，探测分辨率则越高，但其探测深度则越浅，反之则相反。因此，在满足分辨率且场地条件又许可时，应该尽量降低天线中心频率，以便最大限度的加大检测深度<sup>[10]</sup>。如果使用 200MHz 天线，则介质内的电磁波波长变短，探测分辨率变高，探测深度变浅。具体还会产生以下结果：

1、天线增益增加；天线的孔径大小和增益都会受到波长的制约。如图 2.8，G 表示天线增益， $A_e$  表示天线有效孔径。从图 2.8 公式可直观看出，在天线有效孔径大小相同的情况下，频率越高，波长越短，可以获得较大的天线增益。

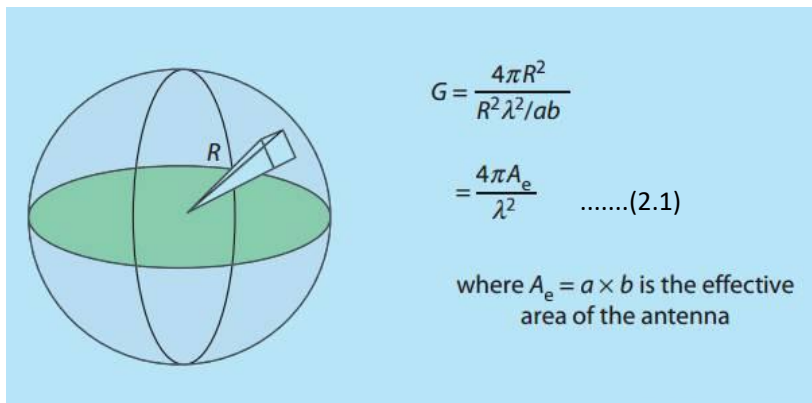


图 2.8 雷达天线增益与波长和有效孔径的关系

2、环境噪声下降；如图 2.9，随着雷达频率增加，雷达外部噪声下降，测得的数据信噪比更优<sup>[11]</sup>。

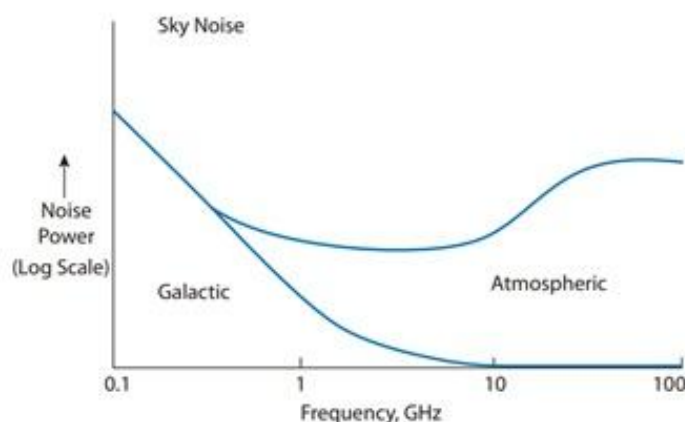


Figure 7-7. Ambient noise reaches a minimum between 0.3 GHz and 10 GHz, depending on the level of galactic noise, which varies with solar conditions.

图 2.9 雷达外部噪声主要来源

2、探测功率提升；探地雷达天线接收到的异常体的功率为：

$$W_r = P_r A_r G_r \eta_r \quad \text{.....(2.2)}$$

$$P_r = P_s \sigma_s G_s \frac{1}{4\pi r^2} e^{-2\beta r} \quad \text{.....(2.3)}$$

$$P_s = W_t \eta_t G_t \frac{1}{4\pi r^2} e^{-2\beta r} \quad \text{.....(2.4)}$$

探地雷达的频率升高，探测功率上升，探测到异常体的功率增加，探测的有效功率提升。

公式中字母含义为：Wr 为探地雷达异常体所接收到的功率，Pr 为反射波到达接收天线的功率密度，Ps 为入射波到异常体的功率密度，Ar = λ<sup>2</sup>/4π 为接收天线的有效接收面积，Wt 为系统的发射功率，ηt 为发射天线的效率，ηr 为接收天线的效率，Gt 为入射波由于球面扩散效应在发射天线方向的增益，Gr 为反射波在接收天线方向的增益，Gs 为异常体的散射增益，r 为异常体的深度，β 为介质的吸收系数，σs 为异常体的接收截面积<sup>[9]</sup>。

4、有效探测深度变浅；随着雷达发射波频率增加，电磁波穿透底层的能力下降，探地雷达能勘探的有效土层深度变浅，有效探测深度变浅。

## 2.6 探地雷达实习工作总结

在云南的这次探地雷达测量给我带来了宝贵的体验。我们组一共拉了 3 次探地雷达，跟这个橙色大家伙算是感情深厚的一组了。

首先在老师的教导下，我首先学习了 GPR 工作原理，掌握了探地雷达设

备的操作和数据采集的技巧。在实地测量过程中，我了解到 GPR 技术在地下勘探中的广泛应用，包括地质构造勘探、隐患检测和土壤特性分析等方面。

通过数据处理的解释，我学到了如何提取地下介质的信息并对其进行识别和分析。利用 GPR 采集的雷达记录图像，我学会了识别地下的反射界面、异常体和地层变化等特征。同时，我了解了在处理雷达数据时使用滤波和剖面切割等技术。

在我的实习过程中，有几个方面给我留下了深刻的印象。首先是 GPR 技术的非侵入性和高效性。GPR 能够直接在地表进行探测，大大提高了工作效率和安全性。其次，GPR 在地下检测土层和土壤特性方面的应用非常强大。通过分析和识别地下的异常体，我们可以及早发现地下的隐患，提前采取预防措施。

GPR 技术是一种有强大的勘探技术，可以在勘探中发挥重要作用。数据处理的解释是 GPR 实习工作中不可缺少的环节，对收集的数据进行合理解释，实验才能告一段落。

在之后，我希望自己能很好的从这次实验中吸取经验和教训，在掌握 GPR 的基础上，面对未来的各种仪器操作和数据分析，能够把今天使用的各种能力应用在未来的 project 中。同时，我希望自己要提升操作能力，不要因为各种低级失误再拉三次雷达。

我们组的 GPR 探测给我们一个宝贵的体验。我相信，通过不断的学习和实践，我将能够在实验测量、数据处理上有更大的进步。

### 3. 总结

在这次地磁实习中，我学习了两种经典的地磁方法：大地测量法和探地雷达法。通过实地操作和数据处理，我深入了解了地磁勘探技术的原理和应用。

大地测量法这种方法利用地磁场的变化来推断地下物体的性质和分布。在实际操作中，我学会了使用磁棒和电极的埋设与连接，通过采集一系列测量点的磁场数据，我得到了相位频率以及视电阻率图像。通过分析这些图像，我能够推断出地下物体的存在和性质，例如地质构造、矿体及其他地下特征。

其次，我学习了探地雷达法，这种方法利用电磁波在地下介质中的传播和反射来探测地下物体。在实习中，我熟悉了 GPR 设备的使用和数据采集过程。我了解了 GPR 设备路面上的应用效果。我还学习了如何处理和解释 GPR 数据来识别地下的目标和结构。

通过这次地磁实习，我还深入了解了地磁勘探的应用领域。地磁勘探技术在各个领域具有广泛的应用，包括地质勘探、资源勘察、环境研究和隐患检测等。我认识到不同场景和介质对地磁勘探的影响，例如地下物体的深度、大小和磁性等因素，都会对数据解释和结果分析产生影响。

总结而言，这次地磁实习为我提供了一个宝贵的学习机会，让我深入了解了常见的地磁勘探方法。通过实地操作和数据处理，我掌握了基本的测量和分析技巧，深入地了解了地下物体的探测原理和方法。这次实习为我打开了地球物理勘探领域的大门，并为未来的实习和研究提供了坚实的基础。我相信通过不断的学习和实践，我将能够在地球物理领域取得更大的进步。

## 参考文献

- [1] Practical Training for Magnetotelluric Surveys [4MT.pdf \(sinica.edu.tw\)](#)
- [2] 中华人民共和国自然资源部.DZ/T 0173-2022 大地电磁测深法技术规程
- [3] 陈德志.大地电磁法简介[J].物探与化探,1979(04):62-67.
- [4] Magnetotellurics [Magnetotellurics — Electromagnetic Geophysics \(geosci.xyz\)](#)
- [5] Tutorial - 1D Forward Modelling (Magnetotelluric) [Digital Earth Lab - Tutorial - 1D Forward Modelling \(Magnetotelluric\)](#)
- [6] Exploring nonlinear inversions: A 1D magnetotelluric example [Exploring nonlinear inversions: A 1D magnetotelluric example - SEG Wiki](#)
- [7] Ground Penetrating Radar [Ground Penetrating Radar — GPG 0.0.1 documentation \(geosci.xyz\)](#)
- [8] 什么是探地雷达（GPR）？ [什么是 GPR? 探地雷达 | 地雷雷达 \(sensoft.ca\)](#)
- [9] 赵倩倩,雷宛,邓艳等.探地雷达在工程勘察中天线频率的选择[J].勘察科学技术,2013(02):61-64.
- [10] 吕小武. 探地雷达在路面基层检测中的应用研究[D].长沙理工大学,2008.
- [11] Fundamental of Radar [faculty.nps.edu](#)