

# 探地雷达信号处理

冯 晷 曾昭发 刘四新 编著  
刘 财 梁文婧 鹿 琪



科学出版社

# 探地雷达信号处理

冯 晷 曾昭发 刘四新 编著  
刘 财 梁文婧 鹿 琪

科学出版社  
北京

TN 959.1  
09

## 内 容 简 介

近年来,探地雷达在技术上有了较大的发展,在工程、环境和资源等浅部地球物理探测领域都有较好的应用,信号处理技术的进步在其中起到了重要的作用。本书共分六章,分别总结了近年来探地雷达在数值与物理模拟、信号处理和数据解释方面的科研成果,详细阐述了它们的原理、方法、技术和科研实例。

本书注重理论的系统性,详细论述了模拟、处理和解释的技术内容,可作为应用地球物理等专业的研究生教材,也可供工程、环境和浅部资源勘探等领域的科研和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

探地雷达信号处理 / 冯昭等编著. —北京:科学出版社,2014. 11

ISBN 978-7-03-042418-1

I. ①探… II. ①冯… III. ①探地雷达—雷达信号处理 IV. ①TN959.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第260479号

责任编辑:张井飞 韩 鹏 李 娟 / 责任校对:李 影

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:华路天然

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京康诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年11月第一次印刷 印张:11 1/8 彩插:6

字数:265 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 又称透地雷达, 地质雷达, 是用高频电磁波来确定地下介质分布的一种无损探测方法。探地雷达的探测方法是通过发射天线向地下发射高频电磁波, 通过接收天线接收反射回地面的电磁波, 电磁波在地下介质中传播时遇到存在电性差异的分界面时发生反射, 根据接收到的电磁波的波形、振幅强度和时间的变化等特征推断地下介质的空间位置、结构、形态和埋藏深度。

随着计算机技术的飞速发展, 探地雷达从探测技术到信号处理及资料解释都有了极大的进展。探地雷达探测和信号处理、数据解释精度逐步提高, 探地雷达的应用范围也越来越广泛, 其作用也日益显著。但到目前为止, 探地雷达的资料处理及解释的方法大都是借鉴地震波的处理解释方法。虽然高频脉冲电磁波在介质中的运动学规律与地震波具有相似性, 且都是通过记录地下介质交界面的反射波或透射波来探测地下介质的分布情况, 但其传播机制仍具有较大的区别。雷达波具有高频特征, 波长较短, 介质吸收强烈, 加之受地面干扰大, 使得探测剖面较为复杂, 由此, 研究应用于探地雷达的信号处理及资料解释方法具有重要的意义。

探地雷达将野外采集得到的原始数据, 经过数据处理, 得到有助于解释的数据或图像。原始资料中既包含有用信息, 也包含各种噪声, 有些情况下有用信息可能被噪声掩盖, 数据处理的目的是压制噪声, 增强信号, 提高资料信噪比, 以便从数据中提取速度、振幅、频率、相位等特征信息, 帮助解释人员对资料进行地质解释。同时, 探地雷达的数据处理及解释是分析探测问题、研究电磁波在介质中传播规律的重要步骤, 从而解决诸如公路路面层和基底结构、高层建筑基底形态、近地表土壤层结构、地下水水位面和岩石分层、地下水污染评价等问题, 而这些问题大都可以归结为地下三维曲面的探测问题。而地下洞穴的探测、钢筋混凝土中缺陷的探测、埋藏物的探测可以归结为三维形体的探测问题。研究雷达波在这些介质中的传播, 对提高探测的效果和解释的准确性具有重要的意义。

介绍探地雷达的数据处理和资料解释方面的文献非常多, 而且常伴随着探地雷达广泛的应用领域。探地雷达资料解释是确定数据中有意义的介质内部结构、介质特征和分布规律等地质信息, 是探地雷达的主要探测目标的体现。而为了获得更为准确的资料解释结果, 探地雷达的野外测量设计、数据采集、数据处理和成像等技术都在不断提高, 均围绕确定目标参数及地质意义这一目标进行。

本书详细论述了有关探地雷达基本理论、信号处理方法和资料解释等典型应用。全书共分六章, 主要包括探地雷达的数值及物理模拟、数据整理与滤波、探地雷达速度模型与射线追踪、探地雷达的校正与叠加、偏移和探地雷达资料解释。本书的取材大多出

自科研与实验室实践，在内容安排上注重理论的系统性和自包容性，同时也兼顾实际应用中的各类技术问题。本书是在充分吸收国内外研究成果的基础上编写而成，目的是为在校大学生和从事探地雷达研究与应用的技术人员提供参考，也可供雷达系统、遥感、地球物理、市政工程等领域的科研和工程技术人员参考。

本书得到了高等学校博士学科点专项科研基金（20130061110061）、国家自然科学基金（41240030）、油页岩勘探开发利用产学研用合作创新研究项目（OSP-02、OSR-02）、863 计划项目（2012AA052801）、973 计划项目（2013CB429805）和吉林大学国家杰出青年基金后备人选培育计划的联合资助。在作者进行探地雷达的研究和本书撰写的过程中，许多本领域的专家学者给予了诸多的帮助和指导，提出了宝贵的修改意见和建议，给予了极大的帮助，在此我们表示衷心感谢！书中还有许多不足之处，敬请各位读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 探地雷达的数值及物理模拟 .....	1
1.1 射线追踪法 .....	1
1.1.1 方法原理 .....	2
1.1.2 收敛性问题 .....	5
1.1.3 雷达波的衰减问题 .....	5
1.1.4 数值模拟计算 .....	5
1.1.5 应用实例 .....	6
1.2 有限元法 .....	7
1.2.1 雷达波和地震波之间运动学规律的对比 .....	8
1.2.2 雷达波有限元正演模拟的实施 .....	9
1.2.3 数值模拟 .....	11
1.3 时间域有限差分 (FDTD) 法 .....	13
1.3.1 FDTD 基本原理 .....	13
1.3.2 解的稳定性及数值色散 .....	19
1.3.3 吸收边界条件 .....	24
1.3.4 FDTD 中常用激励源 .....	26
1.3.5 计算实例 .....	33
1.4 物理模拟 .....	36
1.4.1 实验一: 直达波测量研究 .....	37
1.4.2 实验二: 金属管探测 .....	37
1.4.3 实验三: 单层塑料板探测 .....	39
1.4.4 实验四: 多层塑料板探测 .....	39
1.4.5 实验五: 水池中小球模型探测实验 .....	41
1.4.6 实验六: 复杂结构的石蜡模型探测 .....	41
1.5 极化探地雷达正演模拟 .....	44
1.5.1 极化探地雷达三维模拟 .....	44
1.5.2 典型目标体的极化响应模拟 .....	49
参考文献 .....	60
第 2 章 数据整理与滤波 .....	63
2.1 数据编辑 .....	63

2.1.1	资料整理、数据处理技术要求 .....	63
2.1.2	数据编辑 .....	65
2.2	道均衡 .....	66
2.2.1	振幅恢复 .....	66
2.2.2	道内均衡 .....	66
2.2.3	道间均衡 .....	67
2.3	滤波 .....	67
2.3.1	理想低通滤波 .....	68
2.3.2	理想高通滤波 .....	68
2.3.3	理想带通滤波 .....	68
2.3.4	时变滤波 .....	69
2.3.5	时变谱白化 .....	70
2.3.6	中值滤波 .....	70
2.4	反滤波(反褶积) .....	71
2.4.1	基本原理 .....	71
2.4.2	子波的提取 .....	71
2.4.3	最小平方反滤波 .....	73
2.4.4	预测反褶积方法原理 .....	75
2.4.5	最小熵反褶积 .....	77
	参考文献 .....	81
<b>第3章</b>	<b>探地雷达速度模型与射线追踪 .....</b>	<b>82</b>
3.1	速度分析 .....	82
3.1.1	速度信息和判别标准 .....	82
3.1.2	速度谱 .....	84
3.2	地表地形估计 .....	87
3.2.1	从探地雷达剖面确定地表地形 .....	87
3.2.2	粗糙地形表面的确定 .....	88
3.3	射线追踪 .....	93
3.3.1	单个倾斜反射界面 .....	93
3.3.2	两个倾斜反射界面 .....	96
3.4	计算实例 .....	100
	参考文献 .....	102
<b>第4章</b>	<b>探地雷达的校正与叠加 .....</b>	<b>104</b>
4.1	极化校正 .....	104
4.1.1	极化雷达系统校准 .....	104
4.1.2	雷达目标 .....	105
4.1.3	雷达散射截面(RCS) .....	105
4.1.4	极化校准的原理 .....	108

4.1.5 极化校准测试与实验结果 .....	113
4.2 地表地形校正 .....	116
4.2.1 离地探地雷达的地形校正方法 .....	116
4.2.2 实验数据的应用 .....	119
4.3 动校正与叠加 .....	122
4.3.1 共中心点阵列天线探地雷达系统 .....	123
4.3.2 动校正与叠加 .....	123
4.3.3 实验数据的应用 .....	125
参考文献 .....	128
<b>第5章 偏移</b> .....	<b>130</b>
5.1 绕射扫描叠加 .....	130
5.2 相移偏移方法 .....	131
5.2.1 方法原理 .....	131
5.2.2 相移偏移方法过程 .....	134
5.3 克希霍夫积分偏移方法原理 .....	134
5.4 叠前偏移 .....	136
5.4.1 方法原理 .....	136
5.4.2 实验数据的应用 .....	137
5.5 不规则数据偏移 .....	141
5.5.1 方法原理 .....	142
5.5.2 野外实验数据的应用 .....	143
参考文献 .....	146
<b>第6章 探地雷达数据解释</b> .....	<b>148</b>
6.1 探地雷达数据解释基础、流程和波型识别 .....	148
6.2 典型形体的探地雷达探测异常特征 .....	149
6.3 时间剖面的解释方法 .....	155
6.3.1 反射层的拾取 .....	155
6.3.2 时间剖面的解释 .....	155
6.4 属性解释 .....	157
6.5 频散介质一维反演 .....	159
6.5.1 最小二乘反演方法基本原理 .....	159
6.5.2 反演算例 .....	161
6.6 极化属性解释 .....	163
6.6.1 振幅比模板 .....	163
6.6.2 裂隙方位角识别 .....	165
参考文献 .....	169



# 第 1 章 探地雷达的数值及物理模拟

随着计算机技术的飞速发展，探地雷达从探测技术到数字处理及资料解释都有了极大的进展。探地雷达探测和解释精度逐步提高，应用领域越来越广，作用日益显著。但到目前为止，探地雷达资料处理解释的方法大都是借鉴地震波的处理解释方法。虽然高频脉冲电磁波在介质中的运动学规律与地震波具有相似性，但其传播机制具有较大的区别。雷达波具有高频特征，波长较短，介质吸收强烈，加之受地面干扰大，使得探测剖面较为复杂，由此利用数值模型或物理模型来模拟复杂形体存在时的雷达波场特征，对认识实际的雷达记录，识别目的体有着重要的意义。

探地雷达的数值及物理模拟是分析探测问题、研究电磁波在介质中传播规律的有效手段，能够解决诸如公路路面层和基底结构、高层建筑基底形态、近地表土壤层结构、地下水水面和岩石分层、地下水污染评价等问题，而这些问题大都可以归结为地下三维曲面的探测问题。而地下洞穴的探测、钢筋混凝土中缺陷的探测、埋藏物的探测可以归结为三维形体的探测问题。研究雷达波在这些介质中的传播，对提高探测的效果和解释的准确性具有重要意义。对于三维介质中雷达波的传播问题研究方法很多，每种方法都有它的优缺点。本章将介绍数值模拟的射线追踪法、有限元和时间域有限差分（FDTD）方法以及物理模型实验的方法。

## 1.1 射线追踪法

射线追踪方法已广泛应用于波传播问题（正演问题）研究。射线追踪方法以计算速度快、结果直观，在层析成像技术、偏移、反演及模型试算中都占有很重要的地位。射线追踪方法在地震勘探和研究中发展很快，并取得了实际的进展（Chander, 1977; Sambridge *et al.*, 1990; 马争鸣和李衍达, 1991; 黄联捷等, 1992; Farra, 1992; 杨长春和冷传波, 1997）。由于探地雷达理论和地震勘探理论的相似性，近年也有学者将射线追踪方法应用于探地雷达波的传播和正演研究，如 Cai 和 McMechan (1995) 应用射线追踪方法进行了二维介质中雷达波的传播与模拟研究。在此基础上，进行了二维剖面反演研究（Cai and McMechan, 1999）。但三维介质中的雷达波正反演研究还是一个重要的研究方向。近年来，发展探地雷达的多道测量仪器技术和三维测量技术，进行三维介质的快速拟合计算和反演已成为迫切需要。到目前为止，尚没有看到雷达波在三维地质介质中快速而准确的传播和正演模拟研究成果。

借鉴地震波的三维逐段迭代射线追踪算法，考虑雷达波的动力学特征，实现了探地

雷达波在三维介质中的正演模拟；获得了三维逐段迭代射线追踪算法的计算格式；并进行了雷达波在三维介质中的射线追踪计算结果。模型计算结果表明：该方法计算速度相当快，且其计算精度可以根据需要达到任意要求。在此基础上，根据雷达波传播规律，考虑每一段和界面附近的能量损失；根据探地雷达的发射子波，获得三维介质中雷达波传播和接收记录；开发了可视化计算软件，并在资料解释中进行应用，取得了很好的效果。

### 1.1.1 方法原理

探地雷达方法是地球物理方法中的一种高分辨率、高效率、实时的探测方法。探地雷达方法的基本原理是利用高频电磁波（1MHz ~ 1GHz），以脉冲形式通过发射天线被定向地送入地下。雷达波在地下介质中传播时，当遇到存在电性差异的地下地层或目标体时，电磁波便发生反射，返回地面后由接收天线所接收。在对接收天线所接收到的雷达波进行处理和分析的基础上，根据接收到的雷达波波形、强度、时间等推断地下介质的空间位置、结构、电性质及几何形态，从而达到对地下地层或目标体的探测。可见，雷达波在介质中传播的运动学特征类似于地震勘探理论中的地震波。

根据射线追踪理论，同一条射线路径上满足相同射线参数，实际隐含着任意连续三点满足此参数，而三点间的具体形式遵循 Snell 定律。这样，我们可以从射线的任一端出发，依据 Snell 定律，求出中间点，然后以一点移动为步长，顺次进行下去，直到另一端点。当整条路径上的总校正量满足精度要求时，认为最后一次的追踪结果即为射线路径。如图 1.1 (a) 和图 1.1 (b) 所示。图中  $v$  和  $l$  分别为雷达波传播的速度和传播的路径。

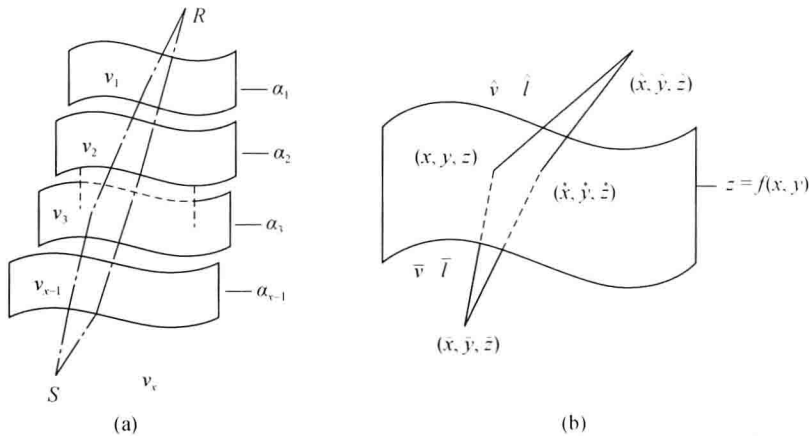


图 1.1 雷达波在三维介质中透射示意图

#### 1) 一阶近似公式的推导

以透射波为例，对于反射波情况，原理相同。如图 1.1 (b) 所示。

$$t = \frac{\hat{l}}{\hat{v}} + \frac{\bar{l}}{\bar{v}} = \frac{\sqrt{(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2 + (\hat{z} - z)^2}}{\hat{v}} + \frac{\sqrt{(\bar{x} - x)^2 + (\bar{y} - y)^2 + (\bar{z} - z)^2}}{\bar{v}} \quad (1.1)$$

对上式求导, 根据 Fermat 原理可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{(x - \hat{x}) + (z - \hat{z})z'_x}{\hat{v}\hat{l}} + \frac{(x - \bar{x}) + (z - \bar{z})z'_y}{\bar{v}\bar{l}} &= 0 \\ \frac{(y - \hat{y}) + (z - \hat{z})z'_y}{\hat{v}\hat{l}} + \frac{(y - \bar{y}) + (z - \bar{z})z'_y}{\bar{v}\bar{l}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

对式 (1.2) 在初始路径点  $(x^*, y^*, z^*)$  进行一阶 Taylor 展开, 令

$$x^* - \hat{x} = a, \quad y^* - \hat{y} = b, \quad z^* - \hat{z} = c$$

$$x^* - \bar{x} = \mu, \quad y^* - \bar{y} = v, \quad z^* - \bar{z} = \omega$$

$$p = \frac{a + cz'_x}{\hat{l}}, \quad q = \frac{b + cz'_y}{\hat{l}}$$

$$s = \frac{\mu + \omega z'_x}{\bar{l}}, \quad t = \frac{v + \omega z'_y}{\bar{l}}$$

$$\theta_1 = 1 + cz''_x + z'^2_x, \quad \psi_1 = 1 + \omega z''_x + z'^2_x$$

$$\theta_2 = 1 + cz''_y + z'^2_y, \quad \psi_2 = 1 + \omega z''_y + z'^2_y$$

$$\theta_3 = cz''_{xy} + z'_x z'_y, \quad \psi_3 = \omega z''_{xy} + z'_x z'_y$$

可推得

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B} \quad (1.3)$$

这里  $\mathbf{A}$  为  $2 \times 2$  矩阵,  $\mathbf{X}$  为校正量向量,  $\mathbf{B}$  为一与初始路径有关的向量, 其具体形式为

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= ps\bar{v}\hat{l} + \bar{v}\bar{l}\theta_1 + ps\hat{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l}\psi_1 \\ A_{12} &= pt\bar{v}\hat{l} + \bar{v}\bar{l}\theta_3 + qs\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l}\psi_3 \\ A_{21} &= qs\bar{v}\hat{l} + \bar{v}\bar{l}\theta_3 + pt\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l}\psi_3 \\ A_{22} &= qt\bar{v}\hat{l} + \bar{v}\bar{l}\theta_2 + qt\hat{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l}\psi_2 \\ B_1 &= -(p\bar{v} + s\hat{v})\hat{l}\bar{l}, \quad B_2 = -(q\bar{v} + t\hat{v})\bar{l}\hat{l} \\ \mathbf{X} &= (\Delta x, \Delta y)^T \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

通过求解式 (1.3), 解得  $\Delta x$  和  $\Delta y$  值后, 利用  $[x^* + \Delta x, y^* + \Delta y, z(x^* + \Delta x, y^* + \Delta y)]$  代替原来的  $(x^*, y^*, z^*)$ , 继续重复上述过程, 直至满足射线追踪精度为止。

上述推导的是对于透射波情况下的结果, 在反射波情况下, 可按上述办法推导出射线路径的矫正公式如下:

$$\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{X} = \tilde{\mathbf{B}} \quad (1.5)$$

这里  $\tilde{\mathbf{A}}$  为  $2 \times 2$  矩阵,  $\mathbf{X}$  为校正量向量,  $\tilde{\mathbf{B}}$  为一与初始路径有关的向量, 其具体形式为

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{A}_{11} &= v(\bar{p}\hat{s}\bar{l} + \bar{l}\hat{\theta}_1 + \bar{p}\hat{s}\bar{l} + \hat{l}\psi_1) \\
 \bar{A}_{12} &= v(\bar{p}\hat{t}\bar{l} + \bar{l}\hat{\theta}_3 + \bar{q}\hat{s}\bar{l} + \hat{l}\psi_3) \\
 \bar{A}_{21} &= v(\bar{q}\hat{s}\bar{l} + \bar{l}\hat{\theta}_3 + \bar{p}\hat{t}\bar{l} + \hat{l}\psi_3) \\
 \bar{A}_{22} &= v(\bar{q}\hat{t}\bar{l} + \bar{l}\hat{\theta}_2 + \bar{q}\hat{t}\bar{l} + \hat{l}\psi_2) \\
 \bar{B}_1 &= -(p+s)v\hat{l}\bar{l}, \quad \bar{B}_2 = -(q+t)v\hat{l}\bar{l} \\
 \mathbf{X} &= (\Delta x, \Delta y)^T
 \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

## 2) 介质特殊分布情况

以上给出的一阶近似公式适用于任意界面情况下, 对于介质特殊分布时, 可进一步简化。

(1) 当介质为水平层状时,  $z'_x = z'_y = 0$ , 假设分界面为  $z = z_0$ , 此时式 (1.4) 可简化为

$$\left. \begin{aligned}
 A_{11} &= a\mu\left(\frac{\bar{v}}{\bar{l}} + \frac{\hat{v}}{\hat{l}}\right) + \bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l} \\
 A_{12} &= av\frac{\bar{v}}{\bar{l}} + b\mu\frac{\hat{v}}{\hat{l}}, \quad A_{21} = b\mu\frac{\bar{v}}{\bar{l}} + av\frac{\hat{v}}{\hat{l}} \\
 A_{22} &= bv\left(\frac{\bar{v}}{\bar{l}} + \frac{\hat{v}}{\hat{l}}\right) + \bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l} \\
 B_1 &= -(a\bar{v}\bar{l} + \mu\hat{v}\hat{l}), \quad B_2 = -(b\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l})
 \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

对于反射波, 只需将式 (1.7) 中的所有  $\bar{v}$  和  $\hat{v}$  替换成  $v$  即可。

(2) 当介质分界面为倾斜层时,  $z'_x = M$ ,  $z'_y = N$ ,  $M$  与  $N$  为常数。此时对于透射波情况, 式 (1.4) 可简化为

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= (a + cM)(\mu + \omega M)\left(\frac{\bar{v}}{\bar{l}} + \frac{\hat{v}}{\hat{l}}\right) + (1 + M^2)(\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l}) \\
 A_{12} &= (a + cM)(\nu + \omega N)\frac{\bar{v}}{\bar{l}} + (b + cN)(\mu + \nu M)\frac{\hat{v}}{\hat{l}} + MN(\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l}) \\
 A_{21} &= (b + cN)(\mu + \omega M)\frac{\bar{v}}{\bar{l}} + (a + cM)(\nu + \omega N)\frac{\hat{v}}{\hat{l}} + MN(\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l}) \\
 A_{22} &= (b + cN)(\nu + \omega N)\left(\frac{\bar{v}}{\bar{l}} + \frac{\hat{v}}{\hat{l}}\right) + (1 + N^2)(\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l}) \\
 B_1 &= -(a + cM)\bar{v}\bar{l} - (\mu + \omega M)\hat{v}\hat{l} \\
 B_2 &= -(b + cN)\bar{v}\bar{l} - (\nu + \omega N)\hat{v}\hat{l}
 \end{aligned}$$

而对于反射波, 同上。

### 1.1.2 收敛性问题

上述公式推导中,曾采用一阶 Taylor 展开方法进行逐段迭代求取射线路径,这种方法对于初始路径状态不太好时,有可能会造成迭代失败,当然,对于地震勘探来说,由于检波点和炮点按照一定规律排列,采用上次射线路径作为下一次初始路径可以克服迭代失败,但就研究方法本身来说,研究稳定算法具有重要意义。

研究中发现,当采用不完全一阶 Taylor 展开时,可获得一正定方程组,其形式与式(1.3)一致,各分量具体形式如下:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= (\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l})(1 + z'_x{}^2) \\ A_{12} &= (\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l})z'_x z'_y \\ A_{21} &= A_{12} \\ A_{22} &= (\bar{v}\bar{l} + \hat{v}\hat{l})(1 + z'_y{}^2) \\ B_1 &= -(p\bar{v} + s\hat{v})\hat{l}\bar{l} \\ B_2 &= -(q\bar{v} + t\hat{v})\hat{l}\bar{l} \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

利用式(1.4)各元素进行射线追踪计算时,总能计算出射线路径。

### 1.1.3 雷达波的衰减问题

雷达波在地下介质的传播中,根据雷达波传播的动力学特性,雷达波能量具有较强的衰减。根据雷达波传播的功率原理,雷达波在通过  $j$  层介质时的振幅为

$$A_p = \frac{SD_s D_R R}{G_i G_o} \prod_j T_i e^{-\alpha l_j} \quad (1.9)$$

可见,反射雷达波的振幅(或能量)与如下因素有关:

①雷达波的有效振幅  $S$ ; ②雷达波发射天线的定向因子  $D_s$ ; ③雷达波入射平面的几何扩散因子  $G_i$ ; ④雷达波出射平面的几何扩散因子  $G_o$ ; ⑤雷达波在界面的反射系数  $R$ ; ⑥雷达波在界面的透射系数  $T$ ; ⑦雷达波在介质中的衰减因子  $\alpha$ ; ⑧雷达波接收天线的定向因子  $D_R$ ; ⑨雷达波在介质中传播的距离  $l_j$ 。

其中参数①~③,在分层均匀介质中,当初始条件确定后,均为常数。而雷达波的传播距离  $l_j$  可以按以上射线追踪的方法获得。

### 1.1.4 数值模拟计算

本书在典型数据模型之上利用逐段迭代射线追踪方法进行数字模拟计算,从中可以体会到该方法的计算速度、精度与可行性。

图 1.2 是一个三层任意界面的探地雷达的透射波射线追踪介质模型和波形图,发射

天线位于  $T(200, 200, 0)$ ，接收天线位于  $R(600, 600, 0)$ 。第一层底界的界面函数为  $z_1 = 200 - 30\sin(x/100) + 40\cos(y/200)$ ，速度为  $5\text{cm/ns}$ ；第二层底界的界面函数为  $z_2 = 500 - [(x - 500)/50]^2 + [(y - 400)/50]^2$ ，速度为  $10\text{cm/ns}$ ；第三层底界的界面函数为  $z_3 = 700 - 30\cos(x/100) + 40\sin(y/200)$ ，速度为  $12\text{cm/ns}$ ；下部介质速度为  $15\text{cm/ns}$ 。图 1.2 (a) 为射线和模型图。图 1.2 (b) 为波形图，1 为射线在无耗介质中传播；2 为考虑射线在传播过程中由于电导率的影响而产生电磁波能量的衰减，而模型中介质的电阻率自上而下分别为  $100\Omega \cdot \text{m}$ 、 $200\Omega \cdot \text{m}$ 、 $500\Omega \cdot \text{m}$ 、 $1000\Omega \cdot \text{m}$ 。

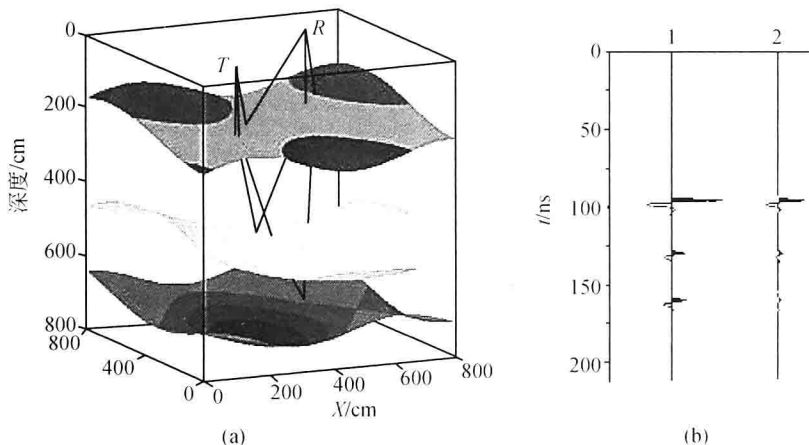


图 1.2 三层三维任意界面介质模型  
(a) 透射波射线追踪；(b) 波形图

### 1.1.5 应用实例

我们利用探地雷达对吉林省长春市某大厦建筑场地进行探测，目的是查明该场地的基底分布，以便合理地确定桩基础的类型和确定场地 30m 以内物性层的分布，以及是否存在物性层的明显变化，并以此推断断层的存在及其分布规律。测量采用美国 GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.) 公司生产的 SIR-2 型探地雷达。图 1.3 所示为完成了 9 条测线中的南北向分布的 NS2 测线，长度为 120m。图中 ZK2 为钻孔，钻探深度为 30m 左右。进行三维正演模拟的初始资料根据钻孔资料获得。

进行三维正演模拟，首先根据钻孔资料获得了地下各层介质中雷达波的传播速度，以该资料为基础，拟合层面不同部位的深度资料。解释获得六个较清楚的地质层和一个地下水水面。根据探地雷达测量资料和层面分布情况，可以推断该场地不存在大的、延伸较长的断层或破碎带。由于测量过程中仪器的增益系数未知和多次波的干扰，正演拟合中没有获得雷达波传播的真振幅的波形。

模型的数值模拟计算和实际应用表明，适于三维结构下雷达波传播的逐段迭代射线追踪算法，基本思想明确，增量以显式给出，计算速度快，追踪计算的射线精度高，对于给定模型，可以追踪到真实路径的任意精度下的逼近值。研究表明，该射线追踪方法

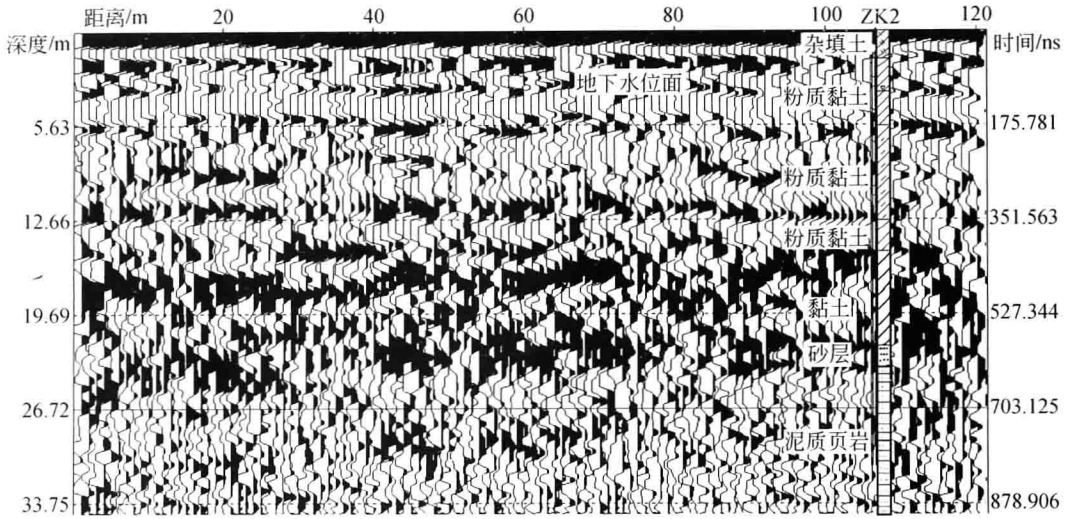


图 1.3 NS2 剖面探地雷达测量结果图 (ZK2 为钻孔)

不仅能模拟三维曲面中雷达波的传播问题，而且为探地雷达资料的三维反演解释提供了基础。由于二维问题为三维问题的一个特例，因而该软件不仅能解释三维资料，也能对探地雷达的二维剖面资料进行解释。该算法可模拟任意探地雷达的天线组合，对探地雷达方法应用的可行性研究和探地雷达数据采集参数的确定具有重要的作用。

这里需要说明的是，当介质分布比较特殊，或两点之间存在多条射线时，利用本方法总可以追踪到初始射线附近的一条射线路径。如果要追踪一条时间最短射线路径，就需要结合其他方法或通过人机对话形式对射线初始路径进行全局搜索。还有，本方法的计算速度主要取决于中间点计算速度的快慢。本书中中间点的求取是通过一阶 Taylor 展开来逐段迭代计算的，其计算速度比用优化等方法求解方程快得多，并且计算精度高。本方法计算速度快的主要原因可能是它仅用加、减、乘、除四则运算来进行射线追踪计算，从而避免了像打靶等方法那样一方面需要反复搜索射线路径与界面的交点，另一方面需要多次计算三角函数值或求解方程组。

## 1.2 有限元法

有限元方法是一种重要的数值模拟方法。其优越性体现在它能模拟较复杂的介质，与有限差分方法相比，具有更好的稳定性。国内外都有大量关于有限元模拟电磁波方面的文章。同时也有许多商业软件能进行电磁波的拟合和仿真等，它们有的需要进行简单的修改、有的可以直接用于探地雷达的天线和探测的模拟。我国的底青云研究员等采用有限元方法研究了 2D 介质中空域内的雷达波传播，其研究成果包括探地雷达工作中经常遇到的基岩起伏弯曲界面、管状体、路面薄层等雷达波波场特征以及有耗介质和复杂频散介质复杂波场模拟。本节内容以他们的研究为基础，介绍探地雷达的有限元模拟方法技术。

### 1.2.1 雷达波和地震波之间运动学规律的对比

#### 1. 地震波动方程

在线性流变体介质中, 胡克定律可写成

$$\sigma_{ij} + \alpha_1 \dot{\sigma}_{ij} = (\alpha_2 \theta + \alpha_3 \dot{\theta}) \delta_{ij} + \alpha_4 e_{ij} + \alpha_5 \dot{e}_{ij} \quad (1.10)$$

式中,  $\sigma_{ij}$  为应力;  $e_{ij}$  为应变;  $\theta$  为体膨胀;  $\delta_{ij}$  为  $\delta$  函数;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  为系数; 符号上的一点表示求导。

对式 (1.10) 求坐标  $x_j$  的偏导数, 并应用运动方程

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho X_i \quad (1.11)$$

以及应变和位移之间的关系式

$$\frac{\partial e_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \Delta u_i + \frac{1}{2} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (1.12)$$

考虑弹性介质, 令  $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \lambda_s, \alpha_3 = \lambda'_s, \alpha_4 = 2\mu_s, \alpha_5 = 2\mu'_s$ , 对于二维情况, 则有

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda_s + \mu_s) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + \mu_s \Delta u_i + (\lambda'_s + \mu'_s) \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial x_i} + \mu'_s \Delta \dot{u}_i + \rho X_i, \quad i = 1, 2 \quad (1.13)$$

式中,  $\rho$  为介质密度;  $u_i$  为运动位移;  $X_i$  为外力;  $\lambda_s, \mu_s$  分别为拉梅常数;  $\lambda'_s, \mu'_s$  为阻尼常数。

式 (1.13) 表明,  $\lambda'_s$  和  $\mu'_s$  两个分量是相互耦合的。在弹性介质中, 即  $\lambda'_s, \mu'_s$  为零时, 式 (1.13) 即转化为弹性波动方程。在黏弹性介质中, 即  $\lambda'_s, \mu'_s$  不为零时,  $(\lambda'_s + \mu'_s) \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial x_i} + \mu'_s \Delta \dot{u}_i$  的作用使波产生频散和被非完全弹性介质吸收。

#### 2. 高频电磁波 (雷达波) 波动方程

高频电磁波的波动方程可表示为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu \varepsilon} \nabla^2 E + \frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\partial E}{\partial t} = S \quad (1.14)$$

或

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu \varepsilon} \nabla^2 H + \frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial t} = S \quad (1.15)$$

式中,  $E$  为电场强度;  $H$  为磁场强度;  $S$  为源函数;  $\varepsilon, \mu$  为介电常数和磁导率, 各向同性时为标量, 各向异性时为张量;  $\sigma$  为电导率。

式 (1.14) 和式 (1.15) 表明, 磁场  $H$  和电场  $E$  及其分量满足相同的微分方程。

对于雷达波, 频率  $\omega$  很高, 当  $\sigma \ll \varepsilon \omega$  时, 扩散项  $\mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} H$  或  $\mu \sigma \frac{\partial}{\partial t} E$  几乎可以忽略, 此时, 式 (1.14) 和式 (1.15) 转化为纯波动方程。但当  $\sigma$  较大时, 即相当于良导体



或接近于良导体, 或浅层含水的地层,  $\sigma \ll \varepsilon\omega$  不成立, 则扩散项  $\mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t}$ 、 $\mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t}$  不能忽略, 此时雷达波和黏弹性介质中的地震波一样发生频散和在传播过程中被介质吸收, 只是雷达波的频散、吸收机制和黏弹性波的不同, 表现在微分方程中制约频散和吸收的项数学形式不一样, 弹性波为  $(\lambda' + \mu') \frac{\partial}{\partial x_i} \dot{\theta} + \mu_i \Delta \dot{U}_i$ , 雷达波为  $\frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial t}$  或  $\frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\partial E}{\partial t}$ 。

式 (1.14) 相应的有限元方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}'\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \dot{\mathbf{F}} \quad (1.16)$$

式中,  $\mathbf{M}$  为质量阵;  $\mathbf{U}$  为位移矢量;  $\dot{\mathbf{U}}$  为  $\mathbf{U}$  的一次时间导数;  $\ddot{\mathbf{U}}$  为二次时间导数;  $\mathbf{K}'$  为阻尼阵;  $\mathbf{K}$  为刚度阵;  $\mathbf{F}$  为力矢量。

对比式 (1.16) 和式 (1.14) [或式 (1.15)], 可以写出时、空域中的 2D 雷达波有限元方程为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{H}} + \mathbf{K}'\dot{\mathbf{H}} + \mathbf{K}\mathbf{H} &= \mathbf{S} \\ \mathbf{M}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}'\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} &= \mathbf{S} \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

式 (1.17) 中雷达波从  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{K}'$ 、 $\mathbf{K}$  的表达式与地震波的具体表达式不同。因此尽管电磁波和地震波频散吸收机制不一样, 但形成有限元方程后的形式相同, 可用和地震波相同的方法解有限元方程。在式 (1.17) 中  $\mathbf{M}$  可表示为对角元素为 1 的对角阵, 而式 (1.16) 中  $\mathbf{M}$  对角阵元素的值可以各不相同。

## 1.2.2 雷达波有限元正演模拟的实施

### 1. 对于 $\sigma \ll \varepsilon\omega$ 时的情况

此时, 假设扩散项可以忽略, 雷达波有限元方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{H}} + \mathbf{K}\mathbf{H} = \mathbf{S}_H \quad (1.18)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} = \mathbf{S}_E \quad (1.19)$$

式中,  $\mathbf{K}'$  的元素全为零;  $\mathbf{S}_H$  为磁场源;  $\mathbf{S}_E$  为电场源。

对于 Pulse Ekko IV 型探地雷达仪, 天线发射脉冲时间函数形式为

$$f(t) = t^2 e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t \quad (1.20)$$

式中,  $\omega_0$  为发射中心频率;  $\alpha$  为衰减系数, 可以取  $\alpha = \omega_0 / \sqrt{3}$ 。

这样对于中心频率 200MHz 的情况波函数如图 1.4 所示。模拟时取前 10 个点, 并假定天线的发、接间距小到可以忽略, 并且只考虑天线发射脉冲的时间性, 忽略天线的方向特性。于是源函数  $\mathbf{S}_H$ 、 $\mathbf{S}_E$  可表示为

$$S(t, x) = f(t) \delta(x - x_0) \quad (1.21)$$

式中,  $x_0$  为发射天线位置的坐标。

将研究区域划分成一系列的有限元单元 (本书采用三角形, 然后由三角形组装成四边形) 求取系数  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{M}$  为对角元素为 1 的对角阵, 则可实现雷达波场的模拟。