

文章编号: 1001-1986(2007)06-0057-04

2D 有限差分偏移技术在探地雷达信号成像中的应用

甄志中¹, 王晋国², 石显新³

(1. 西安文理学院物理系, 陕西 西安 710065; 2. 长安大学物理系, 陕西 西安 710064; 3. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 由于绕射波的存在, 很难准确估计探地雷达剖面中目标的尺寸, 因此, 对目标进行成像研究具有重要意义和应用价值。采用 2D 有限差分偏移技术对典型的合成记录及实测探地雷达剖面进行了成像处理, 结果表明, 偏移可以大大提高探地雷达资料的横向分辨率。在实际资料处理中, 通过对点目标绕射波的准确归位, 可以简单估计地下介质的电磁波速度。讨论了工程处理中速度模型的建立, 实际数据的非零偏等偏移处理中的核心问题。

关键词: 2D 有限差分; 偏移; 探地雷达; 成像

中图分类号: P631.3 **文献标识码:** A

Ground penetrating radar data imaging via the 2D finite-difference migration method

ZHEN Zhi-zhong¹, WANG Jin-guo², SHI Xian-xin³

(1. Department of Physics, Xi'an University of Arts and Science, Xi'an 710065, China;

2. Department of Physics, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

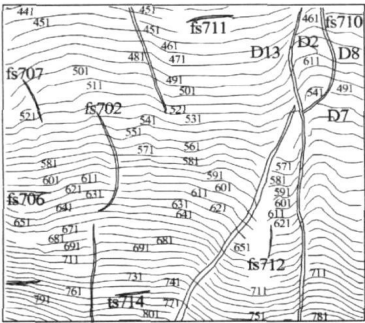
Abstract: Due to the interference of diffraction waves, the position and shape of detects can not be easily interpreted. Therefore migration is very important for ground penetrating radar(GPR) data processing. The synthetic and filed GPR data are processed by the 2D finite-difference migration method. The study results indicated that compared to the GPR data, the spatial resolution is increased obviously using the migration method. When the diffraction energy is efficiently focused on defects, the electromagnetic wave velocity underground can be estimated in filed GPR data. Some factors, such as velocity moded, real offset section which effect the GPR migration results are mentioned.

Key words: 2D finite-difference; migration; GRP; image

收稿日期: 2007-06-05

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAF02A007)

作者简介: 甄志中(1948—), 男, 河南孟县人, 教授, 主要从事理论物理、波在复杂煤质中的传播及成像等研究。



探地雷达是目前广泛应用的浅层勘探方法之一,主要应用于公路、地基、桥梁、工程质量等勘探或检测^[1-3]。与地震勘探类似,探地雷达得到的也是时间信号,因此,无法从原始记录上估计地下目标的具体深度。点目标的特征信号在探地雷达剖面上范围远大于目标的尺寸,所以对目标进行成像非常重要,在地下目标勘探中这项技术称为偏移。偏移用于探地雷达信号处理已有一些文献发表^[4-7],文献[5]从理论上分析了电磁波勘探的成像问题,如媒质色散等条件下方程的建立。文献[4]和文献[6]在 $F-K$ 域对沙坑中的探地雷达信号进行偏移成像处理,并讨论了速度选择问题,信号均为沙坑中较理想的实测数据。本文主要介绍 2D 有限插分偏移的数学原理,并将此方法用于实际工程中的雷达数据成像处理,论述了速度模型的建立及分析等问题。

1 2D 有限差分偏移的数学原理^[8-10]

在均匀媒质中 2D 标量波动方程式为:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] P(x, z, t) = 0 \quad (1)$$

式中 v 为媒质中的波速。

对 $P(x, z, t)$ 中的 x 及 t 作傅氏变换,则

$$P(k_x, z, \omega) =$$

$$\iint P(x, z, t) \exp(ik_x x - i\omega t) dx dt \quad (2a)$$

反变换 $P(x, z, t) =$

$$\iint P(k_x, z, \omega) \exp(-ik_x x + i\omega t) dk_x d\omega \quad (2b)$$

经变换后可写成如下形式:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} P(k_x, z, \omega) + \left[\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \right] P(k_x, z, \omega) = 0 \quad (3)$$

尽管一般情况下 v 随深度 z 而变,假设媒质为均匀介质,速度为常数。方程(3)有两种解,一种是上行波,另一种是下行波。方程的上行波由下式表征:

$$P(k_x, z, \omega) = P(k_x, 0, \omega) \exp \left[-i \left(\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \right)^{1/2} z \right] \quad (4)$$

公式(4)也是单程波波动方程的解:

$$\frac{\partial}{\partial z} P(k, z, \omega) = -i \left(\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \right)^{1/2} P(k, z, \omega) \quad (5)$$

定义垂直波数为:

$$k_z = \frac{\omega}{v} \left[1 - \left(\frac{vk_x}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

方程(5)常被称为单程标量波动方程的波散关系。用此表示,方程(4)简化为:

$$P(k_x, z, \omega) = P(k_x, 0, \omega) \exp(-ik_z z) \quad (7)$$

若已知地表场(可测试获得),则由地表记录波场 $P(x, 0, t)$ 可求出 $p(x, z, 0)$ 。首先对 x 和 t 作 2D 傅氏变换获得 $P(k_x, 0, \omega)$, 然后乘以全通波指数 $\exp(-ik_z z)$ 获得深度 z 的波场 $P(k_x, z, \omega)$ 。对 ω 依次叠加求和,同时在 k_x 方向作反傅氏变换在此深度上求出地场图像 $P(x, z, 0)$ 。对常速情况,利用方程(6)从 (k_x, ω) 转换到 (k_x, k_z) 中,可通过直接成像的方式算出 $P(k_x, k_z, 0)$ 。

现在考虑图 1 中表示出来的其中的一个平面波,设想这个平面波通过 $t=0$ 的 P 点向上传播,在地表 G 的点被接收,时间为 t_0 。为了画出反射面,需要取波前面时间 t 上 G 点的能量,倒退到它的 $t=0$ 的位置,即反射点 P 。也就是说,沿着从 P 点向外扩散的相同射线路程,把能量回归到 P 点。所用的路程相同这一事实,指的是向下延拓并不改变水平波数 k_x , 假设波前面向下移到检波器 G 之下某个深度 $\Delta z = GG'$, 那么波前现在即到了 G' , 如果在 G'' 有一个检波器,那么它在 $t - \Delta t$ 时就已经收到了这个平面波,这里 Δt 是 G'' 到 G 点的旅行时间。

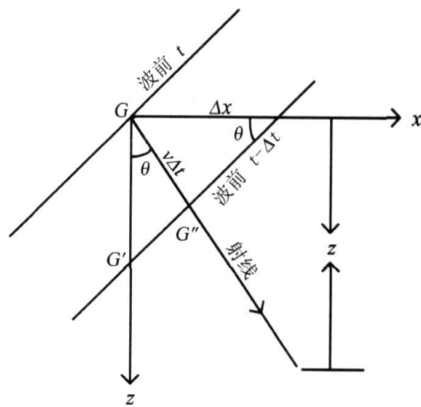


图 1 波场几何外推关系

Fig. 1 Geometry for wave field extrapolation

从图 1 的几何关系,有

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{v} \cos \theta \quad (8)$$

这里 $v/\cos \theta$ 是垂直方向上的相速度,我们知道这个平面波的 k_x 值和 ω 值。假设 G 到 G' 的距离为一个波长 λ , 在时间 $t - \Delta t$, 该波前在离 G 点 λ_x 距离处与 x 轴相交。则:

$$\lambda/\lambda_x = \sin \theta \quad (9)$$

利用定义 $\lambda = 2\pi/(\omega/v)$, $\lambda_x = 2\pi/k_x$ 及(9)式得:

$$\cos \theta = \left[1 - \left(\frac{vk_x}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

把(10)式带入(8)式,得:

$$\Delta t = \frac{1}{v} \left[1 - \left(\frac{vk_x}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \Delta z. \quad (11)$$

当向下移动时,不用改变这个平面波的振幅,由公式(11)给出旅行时间的改变量 $-\Delta t$,相应的相位移则为 $-\omega\Delta t$ 。在每下降一个步长 Δz ,可以使用不同的传播速度 $v(z)$,到达 P 点的波的波形受总的相位移 $-\int \omega dt$ 控制。为了计算 P 点的波场,用公式(11),同时乘以转换地面波场 $P(k_x, 0, \omega)$,得:

$$\exp \left[-i \int_P^G \omega dt \right] = \exp \left[-i \int_0^z \frac{\omega}{v(z)} \sqrt{1 - \left(\frac{v(z)k_x}{\omega} \right)^2} dz \right]. \quad (12)$$

地下介质一般呈层状分布,下面给出层状介质条件下波动方程的解。

对于分层媒质,设层厚为 h_i , ($i=1, 2, 3, \dots, n$, n 为层数),各层中的波速为 v_i 。则各层中有

$$(k_x^i)^2 + (k_z^i)^2 = (k_x^i)^2 = \left(\frac{\omega}{v_i} \right)^2, \text{ 而有:}$$

$$P(k_x^i, z, \omega) = P(k_x^i, h_{i-1}, \omega) \cdot \exp \left[-i \left[\left(\frac{\omega}{v_i} \right)^2 - (k_x^i)^2 \right]^{1/2} z \right] \quad (h_{i-1} < z < h_i). \quad (13)$$

若忽略反射引起的振幅变化,或 $h_i \rightarrow 0$, $v_i \rightarrow v(z)$,且为连续可导函数,则空间的场可表示为:

$$P(k_x, (z), z, \omega) = P(k_x, (z), 0, \omega) \exp \left[\int_0^z k_x(z) dz \right]. \quad (14)$$

至此,可以看到,一个2D波场可以通过垂直速度介质(方程(14))外推波场,目标成像要等到向下延拓过程中引入一个终结条件才能完成,过程的终止是由旅行钟读数为零来表示的,它由 $t - \int dt$ 量出。

因为探地雷达信号目前多为单发单收剖面,相当于地震勘探中的自激自收剖面。直接给出零偏移距垂直波数,文献[8]有详细的推导,

$$k_z = \frac{2\omega}{v} (1 - Y^2)^{1/2}, \quad (15)$$

其中 $Y = vk_y / 2\omega$ 。

不断展开(15)式中的根式,可得到单程波动方程波散关系的更高级近似解^[10],如 45° 、 65° 、 80° 等偏移。

2 模型算例

使用一个典型的地震模拟数据对该方法进行测试,以检验程序的可靠性。其中合成记录用 Kirch-

hoff 方法完成。

图2a为地质模型,速度单位为m/s,道间隔为10m,350道,时间采样间隔为4ms,500个样点,20Hz Ricker子波。图2b为合成地震记录(自激自收),由于第一各界面非常复杂,所以直接用合成记录无法解释地下地质结构。图2c为偏移后的剖面。与图2a相比,可以看出各断点绕射波归位良好,倾斜地层倾角归位正确。与地震资料相比,在处理探地雷达资料时仅仅需要注意速度及时间的单位。

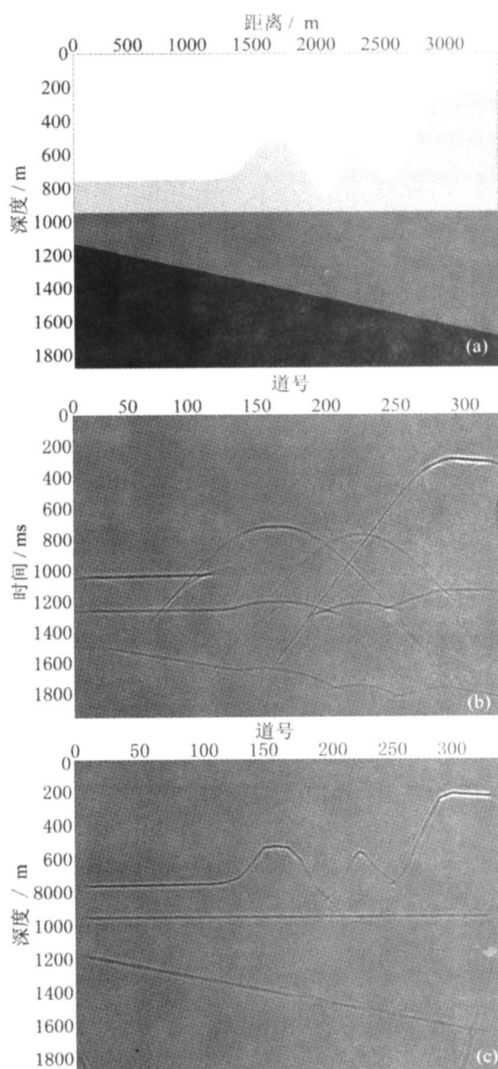


图2 模型试验

Fig.2 Result of synthetic seismic data

a——地质模型,b——合成地震记录,c——偏移剖面

3 实测工程勘探资料处理

图3a为贵州遵义鸭溪电厂工程地基石灰岩岩溶分布范围探测实测探地雷达资料。其中仪器采用瑞典地质公司(SGAB)的探地雷达系统,选用50MHz的天线,每个剖面均为512道,道间隔为0.2m,每道

485 个样点,时间采样间隔约为 0.919 ns。在石灰岩地区地基勘测中,主要的任务是为地下的溶洞或岩石裂缝的探测。地下溶洞和岩石裂缝中一般充填了水、泥质或其它介质,而不是空气。通过偏移可以使溶洞的绕射波归位,从而较准确的确定溶洞的空间展布范围,包括深度信息,为后续地基处理方案提供依据。图 3b 显示出多个小的溶洞反射,如图中圆圈所示。与图 3a 比较可以看出,与溶洞相关的绕射波得到了良好归位,与岩层断面的接触关系清晰,且符合地质规律。

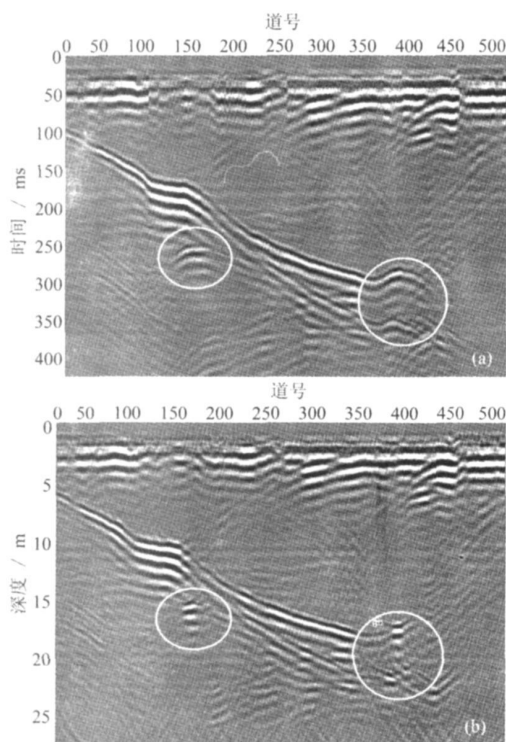


图 3 工程勘探资料

Fig. 3 Result of field GPR data

a——原始探地雷达资料,b——偏移处理后的探地雷达资料

实际资料处理中,通过点目标(如小溶洞)绕射

波的准确归位,可估计地下介质的电磁波速度,使原来的双程时间剖面变为深度剖面。为提高计算效率对于同一地区的探地雷达工程资料处理,一般只选取小段探地雷达剖面估计电磁波速度。本文实际数据处理中速度模型采用均匀媒质,大小为 12 cm/ns。

4 讨论

通过对模型及实际工程资料的处理可以看出,偏移能大大提高资料的横向分辨能力。对于地层相对简单的情况,一般采用均匀介质即可满足工程需要。另外,以点目标绕射波较好归位为条件,可简单估计介质的电磁波速度。探地雷达勘探中,对于一般的双天线系统,即同时存在收、发天线,信号不满足自激自收的叠后偏移条件。实际应用中,收、发天线之间距离对浅层目标深度的估计影响较大,必须进行校正。

参考文献

- [1] BRUNZELL H. Detection of shallowly buried objects using impose radar[J]. IEEE Trans. GRS, 1999, 37 (2): 875—886.
- [2] SAARENKETO T, SCULLION T. Road evaluation with ground penetrating radar[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43: 119—138.
- [3] HUGENSCHMIDT J. Railway track inspection using GPR[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43: 147—155.
- [4] LEUSCHEN C, PLUMB R. A matched-filter approach to wave migration[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43: 271—280.
- [5] 底青云,许琨,王妙月. 衰减雷达波有限元偏移[J]. 地球物理学报,2000, 43(3): 257—263.
- [6] 张安学,蒋延生,汪文秉. 探地雷达频率波数域速度估计和成像方法的实验研究[J]. 电子学报,2001, 29(3): 315—317.
- [7] FISHER E. Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating[J]. Geophysics, 1992, 57(3): 495—504.
- [8] 渥·伊尔马滋. 地震信号处理[M]. 黄绪德,译. 北京:石油工业出版社,1994.
- [9] 黄德济,贺振华,包吉山. 地震勘探资料数字处理[M]. 北京:地震工业出版社,1990.
- [10] 马在田. 地震成像技术[M]. 北京:石油工业出版社,1989.

《鄂尔多斯盆地东缘煤层气田开发利用规划》编制完成

2007 年 9 月,由煤炭科学研究总院西安研究院承担的《鄂尔多斯盆地东缘煤层气田开发利用规划》(以下简称《规划》)编制完成,并通过了国家发改委主持的评审。该《规划》认真贯彻落实《国家发展改革委关于印发煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十一五”规划的通知》精神,以科学发展观为指导,内容涵盖了煤层气勘探、开发、管输、利用等上、中、下游产业各个方面,框架合理、依据充分、重点突出,文本规范,达到了国家发改委对《规划》编制的要求。在我国当前重视煤矿安全生产、煤层气产业呈现快速发展的新形势下,以及煤层气(煤矿瓦斯)产业发展中出现了一系列矛盾和问题背景下,国家决定组织编制该《规划》,对建设煤层气产业化示范基地、指导煤层气产业健康有序发展具有十分重要的意义。作为区域性的煤层气开发和产业发展开展规划编制工作,在国内尚属首次。《规划》的编制对今后国家和地方政府、企业开展此类工作具有重要的示范作用。

(煤炭科学研究总院西安研究院 员争荣)