

## 相控阵探地雷达数据傅氏有限差分偏移研究

罗红明<sup>1</sup>, 王家映<sup>1</sup>, 朱培民<sup>1</sup>, 肖柏勋<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;

2. 长江工程地球物理勘测研究院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 偏移归位是探地雷达资料处理中的一种重要方法。本文利用傅里叶有限差分法对相控阵探地雷达样机采集的实测数据进行偏移归位。异常点绕射波形得到有效的归位, 异常体空间位置与实际测量的结果基本一致并且处理速度快, 不仅表明了该方法的有效性, 证明相控阵探地雷达技术具有一定研究价值, 也为仪器的进一步完善提供了思路。

**关键词:** 地球物理; 傅氏有限差分偏移; 分辨率; 探测深度; 相控阵探地雷达

中图分类号: P631.3<sup>+</sup>25

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2006)03-0216-05

### Study on Fourier Finite-difference Depth Migration Method in Phased-array Ground-penetrating Radar Data

LUO Hong-ming<sup>1</sup>, WANG Jia-ying<sup>1</sup>, ZHU Pei-min<sup>1</sup>, XIAO Bo-xun<sup>2</sup>

(1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Institute of Changjiang Engineering Geophysical Exploration, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Migration is one of the most significant methods in ground-penetrating radar data processing. In this paper the Fourier finite-difference technique is used for migration of phased-array ground-penetrating radar real PGPR data in 2D media. It shows excellent results to reveal the efficiency of the method, also prove the superior science research value of PGPR and give direction for consummating the apparatus next step.

**Key words:** Geophysics; Fourier finite-difference migration; Resolution; Explorative depth; Phased-array ground-penetrating radar (PGPR)

## 0 引言

探地雷达<sup>[1]</sup> (Ground Penetrating Radar, GPR) 是以地下不同介质的电磁性质的差异为物理前提的一种地球物理高频电磁探测技术, 已经广泛应用在地质、环境、水文、工程和考古等领域<sup>[2-6]</sup>。

在目前的混凝土工程质量检测中, 现行的探地雷达有以下几个问题难以解决: 一是探测深度和分辨率的矛盾, 通常是探测深度较浅; 二是受混凝土几何形态和介质不均匀的影响, 记录干扰太大(规则干扰和散射), 波场现象复杂, 难于解释。因此, 现有的各种类型的探地雷达对于大型工程检测工作而言, 如果不加以改造是难于胜任的。

目前已经在军事雷达上应用十分广泛的相控阵技术具备这方面的优势, 能够很好地解决地质资料的分辨率和探测深度的矛盾, 并且利用叠加的原理压制噪音。另外采用相控阵技术来研制探地雷达可以缩短反应时间、增大有效数据率、提高设备的可靠性, 以及实现多角度扫描功能等。近年来相控阵超声技术已开始应用于无损检测方面<sup>[7-9]</sup>; 并有人开始了光学相控阵的研究<sup>[10]</sup>。2001年武汉大学光电信息工程学院研制的“双频多普勒相控阵地质雷达<sup>[11]</sup> (Phased-array Ground Penetrating Radar (PGPR))”初步成果, 它是用连续扫描技术来探测

收稿日期: 2006-02-09

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001 AA132050-03)

作者简介: 罗红明(1977-), 男(汉族), 湖北黄冈人, 博士研究生, 研究方向为地球物理资料处理与反演等理论与应用的研究。

提防隐患,突破已有探测技术的框架,首次实现了快速、高精度、高分辨,大深度的效果。目前,相控阵探地雷达资料的研究也已经开始<sup>[12-14]</sup>。

但是由于 PGPR 相关理论和仪器还不完善,国内外也没有相关研究资料。本文利用相控阵雷达采集到的丰富数据,采用地震资料处理中的傅氏有限差分偏移对叠加后的数据进行归位,以找到一种适应相控阵探地雷达的处理方法,验证仪器的采集效果,并为仪器的进一步完善提供了思路。

## 1 傅里叶有限差分偏移基本原理

很多现存的偏移算法不能同时处理偏移的两个重要问题:陡倾角成像和各向异性介质中成像。如相移偏移算法几乎可以适用各种倾角,但要求速度变化简单,而有限差分偏移考虑了任意速度变化,但不适用于陡倾角情况。

傅里叶有限差分偏移算法是一种混合算法,它向下连续偏移算子被分为两个部分:一个是背景常速度的相移算子,一个是变化速度的优化有限差分

$$d \approx \left( \frac{\omega}{\nu} - \frac{\omega}{c} \right) + \frac{\omega}{\nu} \left( 1 - \frac{c}{\nu} \right) \left\{ \frac{\frac{\nu^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{a_1 + b_1 \frac{\nu^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} + \frac{\frac{\nu^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{a_2 + b_2 \frac{\nu^2}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} + \dots \right\} \quad (3)$$

这里  $\nu(x, z)$  是真实宏观速度场;  $c$  为背景常速度,且  $c \leq \nu = \nu(x, z)$ ;  $a_1, a_2, b_1, b_2$  是由  $c/\nu$  决定的拟合参数。联立方程(2)和(3)得

$$\sqrt{\frac{\omega^2}{\nu^2(x, z)} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \approx \underbrace{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}}}_I + \underbrace{\left( \frac{\omega}{\nu(x, z)} - \frac{\omega}{c} \right)}_{II} + \underbrace{\frac{\omega}{\nu(x, z)} \left( 1 - \frac{c}{\nu(x, z)} \right) \left\{ \frac{\frac{\nu^2(x, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{a_1 + b_1 \frac{\nu^2(x, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} + \frac{\frac{\nu^2(x, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{a_2 + b_2 \frac{\nu^2(x, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}} + \dots \right\}}_{III} \quad (4)$$

上式可以近似为

$$\sqrt{\frac{\omega^2}{\nu^2(x, z)} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \approx \underbrace{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}}}_I + \underbrace{\left( \frac{\omega}{\nu(x, z)} - \frac{\omega}{c} \right)}_{II} + \underbrace{\frac{\omega}{\nu(x, z)} \left( 1 - \frac{c}{\nu(x, z)} \right) \frac{\frac{\nu^2(x, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}{a + b \frac{\nu^2(x, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}}_{III} \quad (5)$$

这里

$$a = 2, \quad b = \frac{1}{2} \left( \frac{c^2}{\nu^2} + \frac{c}{\nu} + 1 \right) \quad (6)$$

方程(5)右式的近似是本方法的内核。右式被分为三个算子:算子 I 是频率波数域的相移算子;算子 II 是一阶校正部分;算子 III 新的二阶( $b=0$ )或三阶( $b \neq 0$ )校正算子。

从  $z$  到  $z + \Delta z$  的向下连续分两步,第一步是频

算子。如果介质的速度无变化,则仅仅相移算子被应用;如果介质的速度变化很强烈,则相移算子的作用将减小,优化有限差分算子的作用增大。因而倾角的限制要依赖于速度场的变化,反之亦然<sup>[15]</sup>。

在二维情况下,TE 模式的频率空间域电磁波标量方程为

$$\frac{\partial E}{\partial z} = i \sqrt{\frac{\omega^2}{\nu^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} E \quad (1)$$

这里  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\nu = \nu(x, z)$  是速度;  $E = E(x, z, \omega)$  是二维地质模型的压力。根式为波单向传播,可以用 Taylor 级数展开或一个连续分数展开。接着计算由全部速度  $\nu$  得到的算子与由背景常速度  $c$  计算得到的算子之间的误差算子。为简单起见,只考虑相应的平方根的差值:

$$d = \sqrt{\frac{\omega^2}{\nu^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} - \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \quad (2)$$

由 Taylor 展开后合并近似得

率波数域的相移算子;第二步是频率空间域的算子 II 和 III。

在实际处理中,从  $z$  到  $z + \Delta z$  的速度  $\nu(x, z)$  已知。我们假定  $\nu(x)$  在这里只随  $x$  变化,而不随  $z$  变化,则背景常速度由  $c = \min_x \nu(x, z)$  很容易计算得到,因而对所有  $x$  可求比值  $E(x) = c/\nu(x)$ 。若比值等于 1 或近似等于 1,则计算中自动略掉方程(5)的 II 和 III 部分。

## 2 原始模型与探测方法

原始的模型为三峡大坝船闸上已知的三个排水铁管,周围为均匀混泥土。铁管距地面 20 cm,直径 22 cm,三铁管处于同一水平面且等间距,为 165 cm (如图 1 所示)。

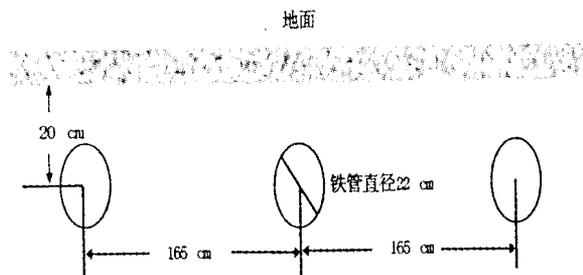


图 1 实际已知地质模型示意图

Fig. 1 Sketch of detection model.

相控阵探地雷达是  $4 \times 4$  天线极子发射,  $4 \times 4$  天线极子接收。发射天线阵列可以等效为一个天线元,它的位置在发射阵列的几何中心。接收天线每个阵元单独获取地下信息(图 2),所以原始数据为 16 个具有不同时间延迟的剖面。本文数据是 900 MHz 频率下采集得到的,数据采集方式为点测,点距 2 cm。天线发射在前,接收在后,间距 1.1 m,并由西向东拖动。

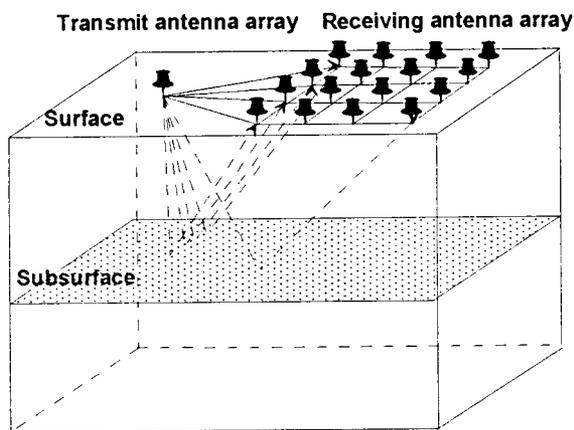


图 2 相控阵探地雷达数据采集示意图

Fig. 2 Sketch of data acquisition by PGPR.

## 3 数据偏移

在对数据进行滤波去噪,叠加处理,以及偏移处理中都要考虑这种装置采集的特殊要求。虽然由于仪器各天线单元的收发效果和一致性不同以及紧密排列后各单元间的相互干扰,使得叠加后的效果不太理想(图 3),但是探测的有效深度达到甚至超过常规单极子探地雷达低频时的探测深度。另外,可

以看到目标区上方也有类似于异常的反射,但振幅弱一些,这主要是由于仪器天线的硬件收发时间延迟不一致和试验样机性能很不稳定造成的,只与仪器性能有关,与几何路径无关。下面也有多次反射出现。

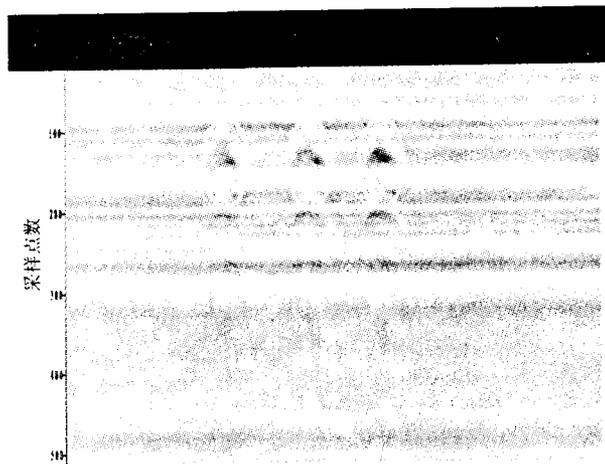


图 3 相控阵探地雷达数据直接叠加剖面

Fig. 3 Profile of PGPR data.

由于背景场不是很复杂,本方法中使用的是常速度偏移,取速度  $v_0 = 1.7 \times 10^7$  m/s, 网格为  $dx = 0.04$  m,  $dz = 0.01$  m, 得到速度剖面。在偏移中网格同样取  $dx = 0.04$  m,  $dz = 0.01$  m, 时间采样长度取  $dt = 1.17 \times 10^{-10}$  s。经过傅氏有限差分偏移后,效果如图 4。虽然上面浅部的假异常依然存在,但三个铁管的绕射波很好地归位。下面的多次波也不是很明显。

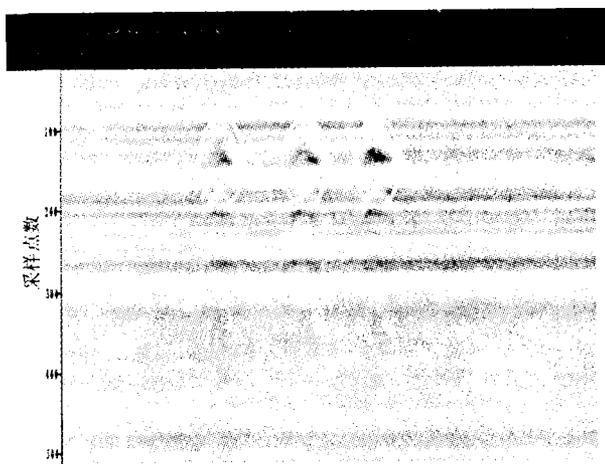


图 4 傅立叶有限差分偏移后的剖面

Fig. 4 Profile after Fourier finite difference migration.

为了更好地对照金属管的实际大小和空间位置,我们对图 4 的偏移结果进行高阶统计量分析(图 5),图中标有蓝色圆圈的位置为三个金属管的位置。图 6 是高级统计量分析结果滤去背景的显示,可以

看到,金属管的大小、空间位置与实际测量的结果基本一致。如前提及,由于仪器各天线单元的收发效

果和一致性不同以及紧密排列后各单元间的相互干扰,造成三个金属管的高阶统计分析结果略有差异。

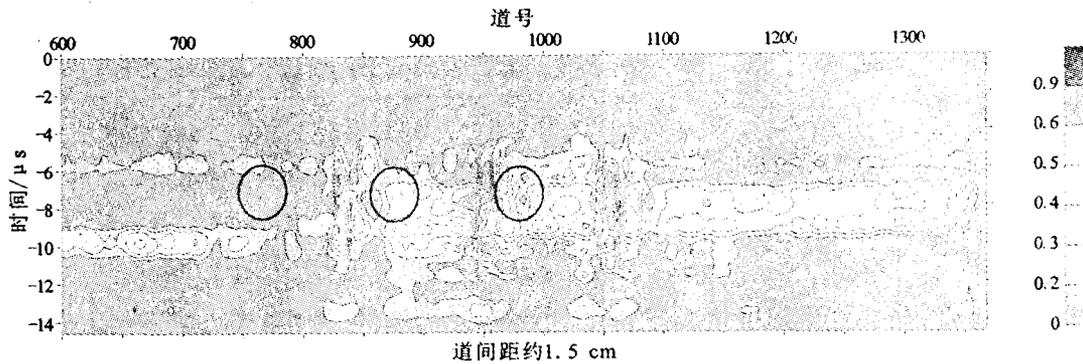


图5 相控阵雷达数据偏移后数据的高阶统计量(Wiger双谱)分析结果

Fig. 5 The Wiger BTFA result of the post-migration PGPR data.

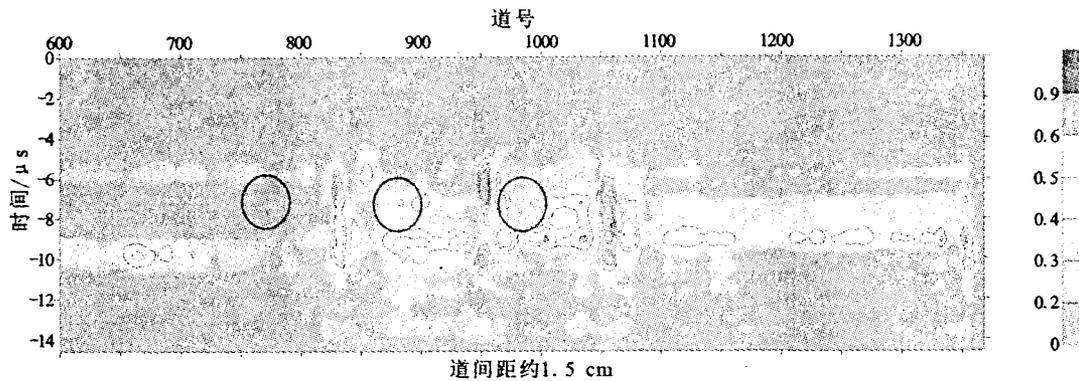


图6 去除背景干扰后的相控阵雷达数据的高阶统计量(Wiger双谱)分析结果

Fig. 6 Wiger BTFA result after wiping off background noise.

## 4 结论

傅立叶有限差分偏移应用于相控阵探地雷达数据试验取得了很好的效果:异常点绕射波得到有效的偏移归位,金属管的大小、空间位置与实际测量的结果基本一致。并对中深部的多次波能有效的压制。鉴于地下情况的复杂性和不确定性,相控阵技术首次应用在探地雷达上,以及由于仪器各天线单元的相互干扰和收发一致性以及其它性能影响,采集的原始数据质量不太好,今后还有很多研究工作需要进一步做。

武汉大学电子信息学院陈淑珍教授等为本文提供了相控阵探地雷达叠加程序,并在本文研究中给予了很多有益的帮助,在此致谢。

### [参考文献]

[1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994.  
[2] Davis J L, Annan A P. Ground Penetrating Radar for High-

resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy[J]. Geophysical Prospecting, 1989, 37: 531-551.  
[3] Arcone S A, Lawson D E, Delaney A J, et al. Ground Penetrating Radar Reflection Profiling of Ground Water and Bedrock in an Area of Discontinuous Permafrost [J]. Geophysics, 1998, 63: 1 573-1 587.  
[4] Beres M Jr, Haeni F P. Application of Ground Penetrating Radar Methods in Hydrogeologic Studies [J]. Ground Water, 1991, 29 : 375-386.  
[5] Liner C L, Liner J L. Application of GPR to a Site Investigation Involving Shallow Faults [J]. Leading Edge, 1997, 16: 1 649-1 651.  
[6] Zhou H, Sato M. Archaeological Application of Ground Penetrating Radar to Sendai Castle[J]. Archaeological Prospection, 2001, 8: 1-11.  
[7] E. A. Ginzel. Report on the Evaluation of a Phased Array System Using the Zonal Discrimination Technique for Pipeline Girth Weld Inspection [R]. The 15th World Conference on Nondestructive Testing, 2000.  
[8] 曹健. 全自动相控阵超声检测技术在环焊缝检测中的应用[J].

- 无损检测, 2003, 25(4): 201-203.
- [9] 周琦, 刘方军, 李志军, 等. 超声相控阵成像技术与应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(3): 34-37.
- [10] 吕秀品, 冯克成, 刘伟奇. 光学相控阵扫描的理论研究[J]. 长春理工大学学报, 2002, 25(2): 47-49.
- [11] 堤坝管涌探测技术获突破——武大研制成双频多普勒相控阵地质雷达[N]. 光明日报, 2001-04-11.
- [12] 施京, 陈淑珍, 邹炼, 等. 时频方法在分析相控阵探地雷达正演数据中的应用[J]. 武汉大学学报(理学版), 2003, 49(5): 645-648.
- [13] 赵云峰, 陈淑珍, 肖柏勋. 相控阵探地雷达数据的叠加速度分析[J]. 武汉大学学报(理学版), 2004, 50(1): 123-126.
- [14] 孙骏, 陈淑珍, 邹炼. Wigner 高阶矩谱在分析相控阵探地雷达数据中的应用[J]. 武汉大学学报(理学版), 2004, 50(5): 637-640.
- [15] Ristow D, Ruhl T. Fourier Finite-difference Migration[J]. Geophysics, 1994, 59(12): 1 882-1 893.

\*\*\*\*\*

(上接 215 页)

### [参考文献]

- [1] 高广运. 非连续屏障地面隔振理论与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- [2] Emad K, Manolis G D. Shallow trenches and propagation of surface waves[J]. J. Eng. Mech., 1985, 111(2): 279-82.
- [3] Beskos D E, Dasgupta B, Vardoulakis I G. Vibration isolation using open or filled trenches[J]. Comput. Mech., 1986, (1): 43-63.
- [4] Banerjee P K, Ahmad S, Chen K. Advanced application of BEM to wave barriers in multi-layered three-dimensional soil media[J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1988, 16: 1041-60.
- [5] Ahmad S, Al-Hussaini T M. Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches[J]. J. Geotech. Engng. Div., ASCE 1991, 117(1): 67-88.
- [6] Leung K L, Beskos D E, Vardoulakis I G. Vibration isolation using open or filled trenches[J]. Comput. Mech., 1990, (7): 137-48.
- [7] Kisin R, Antes H, Le Houe'dec D. Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches[J]. Comput. Struct., 1997, 64: 809-17.
- [8] May T W, Bolt B A. The effectiveness of trenches in reducing seismic motion[J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1982, 10: 195-210.
- [9] Woods R D. Screening of surface waves in soils[J]. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE. 1968, 94(4): 951-79.
- [10] Liao S, Sangrey D A. Use of piles as isolation barriers[J]. J. Geotech. Eng. Div, ASCE 1978; 104(GT9): 1139-52.
- [11] 李伟, 高广运. 二维层状地基空沟主动隔振分析[J]. 地下空间, 2004, 24(3): 391-395.
- [12] 稽醒, 臧跃龙, 程玉民. 边界元法进展及通用程序[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [13] Kausel E, Seal S H. Static loads in layered half-spaces[J]. J. App. Mech., ASME, 1987, 54(2): 403-408.
- [14] Seal S H, Kausel E. Dynamic and static impedances of cross-anisotropic halfspaces[J]. Soil Dyn. Earthquake Eng., 1990, 8(4): .
- [15] Lamb H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid[J]. Phil. Trans. R. Soc. London Ser. A., 1904, 203: 1-42.
- [16] 王贻荪. 地面波动分析若干问题[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(2): 56-67.