

探地雷达频率波数域速度估计和成像方法的实验研究

张安学, 蒋延生, 汪文秉

(西安交通大学微波工程与光通信研究所, 西安 710049)

摘要: 探地雷达的分辨率和地下电磁波的速度估计是探地雷达应用中两个重要研究课题, 类似地震信号处理中的频率波数域偏移处理, 本文提出将频率波数域偏移方法应用到探地雷达的成像和速度估计中来, 并用实验数据验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 探地雷达; 偏移; 速度估计; 速度谱

中图分类号: TN959.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 03-0315-03

Experimental Studies on GPR Velocity Estimation and Imaging Method Using Migration in Frequency-Wavenumber Domain

ZHANG An-xue, JIANG Yan-sheng, WANG Wen-bing

(Institute of Microwave Engineering and Optical Communication Techniques of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Similar to the migration in domain of seismic techniques, this paper presents an approach to focus on the ground-penetrating radar (GPR) data and estimate the electromagnetic wave velocity underground. To demonstrate the validity and feasibility of this approach, experimental GPR data are obtained with object buried in two different kinds of media. It is found that in homogeneous medium, this approach can be used to estimate the electromagnetic wave velocity underground and improve the imaging resolution.

Key words: ground-penetrating radar; migration; velocity estimation; velocity spectrum

1 引言

无载频脉冲探地雷达是一种利用超宽带电磁脉冲进行地下浅层目标探测的设备, 由于具有高分辨率、实施方便和非破坏性等优点, 其应用领域已经遍及城市建设、交通、考古、军事等部门^[1-5]。在探地雷达的应用过程中, 提高探地雷达的分辨率和准确估计探地雷达脉冲电磁波在地下媒质中的传播速度以精确确定目标的埋深是两个重要的研究课题, 对于进一步开发、利用这种设备具有重要意义。

频率波数域偏移处理方法广泛用于地震信号处理, 可以提高地下探测的横向分辨率^[6]; 1991年, C. Caffaro 又将其应用于合成孔径雷达(SAR)聚焦处理中, 得到了较好效果^[7]。对于探地雷达来说, 其数据采集方式和合成孔径雷达雷同, 而和地震勘探方法相比, 在信号形式上二者相似, 从90年代开始, 已经逐渐有人将地震信号处理中的一些方法直接应用到探地雷达探测中来^[8,9]。在本文中, 作者利用频率波数域偏移处理方法对探地雷达地下电磁波的传播速度进行估计和成像, 收到了良好效果。

2 理论分析

2.1 频率波数域偏移原理

根据惠更斯原理, 在探地雷达测量中, 地下界面的每一反射点都可以看成一个子波源, 这些子波源产生的电磁波都可以到达地面为探地雷达接收天线所接收。对于目标空间 (x, z) 的某一点目标来说, 在像空间 (x, t) (即记录剖面)上对应的为一双曲线^[6]。类似于地震信号的偏移处理过程, 在探地雷达数据处理中, 由记录剖面 $e(x, z=0, t)$ 延拓到偏移剖面 $e(x, z, t=0)$ 的过程, 称之为探地雷达的偏移成像。

下面结合探地雷达本身的特点, 来介绍一下探地雷达频率波数域偏移原理。

设 $e(x, z=0, t)$ 的二维傅立叶变换为 $E(k_x, z=0, \omega)$:

$$E(k_x, z=0, \omega) = \iint e(x, z=0, t) e^{-j(k_x x + \omega t)} dx dt \quad (1)$$

则在频率波数域内, 深度 z 处的波场可表示为:

$$E(k_x, z, \omega) = E(k_x, z=0, \omega) e^{jk_z z} \quad (2)$$

考虑到探地雷达电磁波在地下媒质中的传播时间为双程时间, 电波传播速度采用实际传播速度 v 的一半。于是, k_x, k_z 的关系可表示为:

$$(\omega/(v/2))^2 = k^2 = k_x^2 + k_z^2$$

$$\text{即: } k_z = (v/2) \sqrt{k_x^2 + k^2} \quad (3)$$

其中 v 在均匀媒质中为常数。

$e(x, z, t)$ 是 $E(k_x, z, t)$ 关于 k_x 的二维傅立叶反变换, 则

$$e(x, z, t) = (1/(2\pi)^2) \cdot \iint E(k_x, z, t) e^{j(k_x x + t)} dk_x dt \quad (4)$$

令 $t=0$, 再将式(2)代入, 得:

$$e(x, z, t=0) = (1/(2\pi)^2) \cdot \iint E(k_x, z=0, t) e^{j k_x x} dk_x dt \quad (5)$$

再由式(3)可得:

$$e(x, z, t=0) = (1/(2\pi)^2) \cdot \iint E(k_x, z=0, (V/2) \sqrt{k_x^2 + k_z^2}) \cdot (V/(2 \cdot \sqrt{1 + k_x^2/k_z^2})) e^{j k_x x} dk_x dk_z \quad (6)$$

$$\text{设 } A(k_x, k_z) = E(k_x, z=0, \frac{V}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2}) \cdot (V/(2 \cdot \sqrt{1 + k_x^2/k_z^2})) \quad (7)$$

用记录剖面 $e(x, z=0, t)$ 的傅立叶变换 $E(k_x, z=0, t)$ 求出偏移剖面 $e(x, z, t=0)$ 的傅立叶变换 $A(k_x, k_z)$.

于是频率波数域偏移处理可用下面的过程来描述:

$$e(x, z=0, t) \rightarrow E(k_x, z=0, t) \rightarrow A(k_x, k_z) \rightarrow e(x, z, t=0)$$

其中的傅立叶变换和反变换可用快速算法 FFT 来计算. 这样, 通过上述过程, 就可以由像空间的记录剖面得到目标空间的偏移剖面.

2.2 利用频率波数域偏移方法进行速度估计的判别准则

对于点目标来说, 如果探地雷达共用收发天线, 探地雷达的记录剖面 and 地震测量的共反射点道集记录剖面类似. 所以, 我们可以类似地震信号处理中的速度谱^[10]来对探地雷达电磁波在地下媒质中的传播速度进行估计. 频率波数域偏移法速度估计就是采用速度扫描技术, 对于给定的一系列速度值, 分别用频率波数域偏移法对探地雷达记录剖面的数据进行偏移处理, 然后根据偏移结果来确定最佳速度. 利用最小二乘法可以得出如下的速度估计判别准则^[10]:

当扫描速度为最佳速度时, 利用此速度值进行偏移处理, 偏移后的各道数据的叠加平均振幅能量最大. 平均振幅能量的表达式为:

$$A = \sum_{j=0}^M \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{i, j+r_0} \right]^2 \quad (8)$$

其中, N 为偏移剖面内的数据道数, M 为叠加窗的长度, r_0 为叠加窗的起始点, $f_{i, j+r_0}$ 为偏移剖面内第 i 道上第 $j+r_0$ 个采样点的幅值.

上述判据准则也可以这样理解: 在偏移处理过程中, 若使用正确的速度值, 点目标偏移剖面内的各道数据同相轴应呈水平状态, 叠加平均振幅能量最大; 否则, 同相轴会呈现弯曲现象, 叠加振幅能量较小.

在下面的实验中, 将利用频率波数域偏移方法对电磁波在地下媒质中的传播速度进行估计, 并利用此速度值对几种地下目标分布进行了偏移处理, 得到了较好的结果.

3 实验描述

实验场地为两个长方形水泥池, 分别称 A 号坑和 B 号坑, A 内填的是均匀细沙, B 号坑内填的是自然粘土, 自然粘土的表面和内部分布有较多的粘土块(最大的约有乒乓球大小). 水泥池的尺寸为 $L \times W \times H = 150 \times 100 \times 50\text{cm}$ (L 、 W 、 H 分别表示长度、宽度和深度). 测试设备采用中国电波传播研

究所研制的 1GHz 的探地雷达, 其天线为收发一体的加载平面天线, 天线背面加了屏蔽. 天线沿水平直线进行扫描, 测量道之间的距离为 1cm, 扫描道数为 70 道, 采样时窗为 20ns, 每道采样点数为 512.

分别对单根金属管和双金属管进行测量; 同时为了验证速度估计的准确性, 还在 A 号坑内对深度已知的金属平行板进行测量, 根据测量的波达时刻, 由公式:

$$V = h/(2 \cdot t) \quad (9)$$

就可算出媒质中电磁波的实际传播速度.

4 实验结果与讨论

图 1 为 A 号坑内埋金属平行板时, 探地雷达天线沿测线扫描所得到的垂直截面图, 平行板深度为 22.5cm. 由式(9)得出沙土内电磁波传播的实际速度为 9.7cm/ns.

图 2(a) 为是细沙中单金属铝管的原始灰色电平图像, 金属铝管直径为 8cm, 长 30.5cm, 目标与水平扫描线垂直, 埋深为 10.0cm.

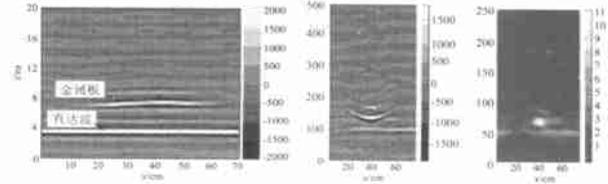


图 1 平行金属板的图像 图 2 (a) 细沙中单金属铝管的原始图像; (b) 细沙中单金属铝管偏移后图像 ($V = 10.3\text{cm/ns}$)

图 3 为利用频率波数域偏移方法对图 2(a) 所示记录剖面进行速度扫描的曲线, 纵坐标为平均振幅能量, 横坐标为扫描速度, 最小扫描速度为 1.0cm/ns, 最大扫描速度为 15.0cm/ns, 扫描速度间隔为 0.1cm/ns. 根据原始图像选择叠加时窗从第 60 个采样点开始, 时窗长度为 30. 从速度扫描曲线可以看出, 当扫描速度为 10.3cm/ns 时, 各道叠加平均振幅能量最大, 估计出的最佳速度与实际速度 (9.7cm/ns) 的相对误差为 6%. 同时, 从图 2b 可以看出, 使用扫描叠加速度对单目标的记录剖面进行频率波数域偏移处理后, 能量已基本聚到一点.

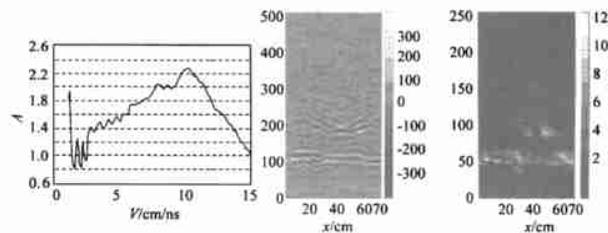


图 3 细沙中速度扫描曲线 (估计速度值为 10.3cm/ns) 图 4 (a) 双目标原始图像; (b) 偏移处理后的图像 ($V = 10.3\text{cm/ns}$)

图 4(a) 为两根金属管的原始数据去掉直达波的灰色电平图像, 左边目标为一螺纹钢, 直径为 1.2cm, 埋深为 21.0cm, 右边目标为一金属铸铁管, 直径为 2.8cm, 埋深为 21.5cm, 两根目标相距 10.0cm. 由于两根单目标的双曲线在中

间相交,很难从原始图上分辨出两根目标来.图 4(b)是图 4(a)经过频率波数域偏移处理后得到的图像,可以看出,两根目标已经清晰地分离开来.所以,通过此实验,验证了频率波数域偏移处理不仅可以对目标进行聚焦,同时可以提高探地雷达回波信号的信噪比,从而提高探地雷达的分辨率.

图 5(a)为是自然粘土中单金属铝管(同图 2(a))的原始灰色电平图像,埋深为 15.5cm,目标上部覆盖有较多的粘土块.图 6 是图 5(a)的速度扫描曲线,最小扫描速度为 1.0cm/ns,最大扫描速度为 13.0cm/ns,扫描速度间隔为 0.1cm/ns,选择的叠加时窗从第 70 个采样点开始,时窗长度为 40 个采样点.从速度扫描曲线可以看出,估计出的速度为 4.4cm/ns.图 5(b)为使用该速度值对图 5(a)进行频率波数域偏移处理后的灰色电平图.可以看出,经过偏移处理后,虽然能量也得到了聚焦,但聚焦效果较差,这主要是由于粘土的不均匀性而引起速度估计产生了较大的误差.

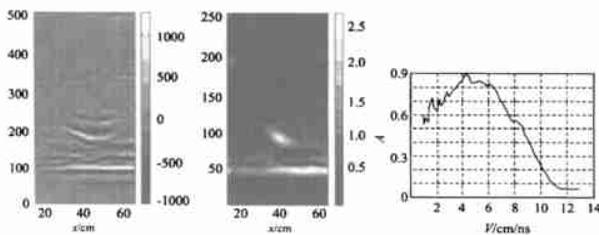


图 5 (a) 粘土中单金属铝管的原始图像; (b) 粘土中单金属铝管偏移后图像

图 6 粘土中速度扫描曲线(估计速度值为 4.4cm/ns)

5 结论

通过上述讨论和所作的工作,得出如下总结:

(1) 通过本文实验处理结果可以看出,频率波数域波动偏移处理,不仅可以提高图像的分辨率,而且还可以用来作速度估计.

(2) 频率波数域偏移过程中,可以利用 FFT 来提高处理速度,但由 $E(k_x, z=0) \rightarrow A(k_x, k_z)$ 变换时,需要合理选择插值方法,本文采用的是 FFT 插值法,也可以用 Stolt 插值法.

(3) 速度扫描过程中,叠加振幅能量的时窗应根据原始图像合理选择,选择时窗的起始点应在直达波波达时刻以下,以减小直达波的影响.

(4) 本文所介绍的频率波数域偏移成像和速度估计法只适合于媒质比较均匀的情况,对于不均匀媒质还有待于进一步研究.

致谢 实验所用的设备和场地全部由中国电波传播研究所青岛分部提供,在实验过程中,该部的方广有高级工程师、

王春和等同志还给予了大力支持和协助,作者在此表示感谢.

参考文献:

- [1] D.L. Moffat and R.J. Puskas. A subsurface electromagnetic pulse radar [J]. Geophysics, 1976, 41(3): 506 - 518.
- [2] G.S. Smith and W.R. Scott Jr. A scale model for studying ground penetrating radar [J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(4): 358 - 363.
- [3] C. Liu and C. Shen. Numerical simulation of subsurface radar for detecting buried pipes [J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(5): 795 - 798.
- [4] Stanislav Vitebskiy and Keith Sturgess. Short-pulse plane-wave scattering from buried perfectly conducting bodies of revolution [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1996, 44(2): 143 - 151.
- [5] Hakan Brunzell. Detection of shallowly buried objects Using Impulse radar [J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2): 875 - 886.
- [6] Jeno Gazdag and Piero Sguazzero. Migration of Seismic Data [C]. PIEEE, 1984, 72(10): 1302 - 1315.
- [7] C. Cafforio, C. Prati and E. Rocca. SAR data focusing using seismic migration techniques [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic System, 1991, 27(2): 194 - 206.
- [8] Yu Haizhong and Ying Xiaojian. Derivative Seismic Processing Method for GPR Data [C]. ICGARSS '97, 1997, 145 - 147.
- [9] Robert J. Greaves and David P. Lesmes. Velocity variations and water content estimated from multi-off set, ground-penetrating radar [J]. Geophysics, 1996, 61(3): 683 - 695.
- [10] 何樵登. 地震勘探原理和方法 [M]. 地质出版社, 1986, 225 - 235.

作者简介:



张安学 1996年毕业于河南师大电子工程系,1999年3月在西安交通大学获硕士学位,现为西安交通大学在读博士.主要从事脉冲雷达信号处理和成像方法的研究.

蒋延生 1982年2月毕业于西安交通大学无线电技术专业,1989年3月研究生毕业,获电磁场与微波技术专业硕士学位,现为西安交通大学副教授.主要从事天线和瞬态电磁场理论及其应用的研究,在国内外刊物上发表论文多篇.