

# 探地雷达横向等效变波速SAR成像算法研究

李廷军, 孔令讲, 周正欧

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**探地雷达应用中, 由于土壤介质的影响, 不同位置目标回波延时常常存在波动, 传统的恒定波速成像算法不能修正这种波动, 难以使成像性能达到最优。该文提出一种根据目标回波的曲线特征, 快速估计横向等效波速, 采用变波速F-K偏移进行合成孔径精确成像的新方法。实测数据处理结果显示该方法性能优于恒定波速成像。

**关键词** 探地雷达; 横向变波速; 合成孔径成像; 波速估计

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.004

## Lateral Variable Equivalent Velocity SAR Imaging Algorithm for GPR

LI Ting-jun, KONG Ling-jiang, and ZHOU Zheng-ou

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The object's echo time delay often fluctuates in ground-penetrating radar (GPR) application due to the effect of soil. Such fluctuation can hardly be amended using the traditional algorithm with constant velocity to get the optimum image. A new method for precise SAR imaging is proposed by using the lateral variable velocity F-K migration in this paper. The equivalent lateral velocity can be fast estimated by the hyperbolic signatures of the echo. Experimental results show that the proposed method is more effective than the constant velocity migration.

**Key words** ground penetrating radar; lateral variable velocity; synthetic aperture imaging; velocity estimation

探地雷达已广泛应用于城市建设、考古、交通、军事、地质探测等应用, 是目前研究得最多的隐蔽目标非破坏性检测仪器<sup>[1-4]</sup>。

波速估计和合成孔径成像是探地雷达应用的关键技术。合成孔径成像可以提高探地雷达的方位分辨率和信噪比, 改善成像质量。而波速估计是探地雷达合成孔径成像的基础, 准确地波速估计才能对采集数据中同一目标的回波信号进行相干积累, 从而达到最佳成像效果。由于波速估计与成像质量有较强相关性, 所以常用扫描试探法同时进行波速估计和合成孔径成像。由于成像算法一般计算量较大, 所以该类方法效率较低, 估计精度依赖于扫描步长。文献[5-7]针对下视探测应用进行波速估计和成像。文献[8-10]以两层介质模型分别采用折射、色散校正、等效波场、非平稳滤波等方法对前视探地应用进行波速估计和成像。这些方法只进行恒定波速或分层恒定波速扫描成像, 而探地雷达应用环境非常复杂, 测量过程中雷达天线离地较高、地面起伏、

地下介质非均匀和各向异性等都会引起目标回波信号偏离标准的双曲线信号, 使用恒定波速成像效果难以达到最优。

实际上, 地震勘探中, 针对地下介质的变化提出了大量变波速偏移成像方法<sup>[11-13]</sup>。文献[14]分析了探地雷达与地震勘探方法的特点以及地面起伏引起的回波畸变, 提出横向变波速成像算法, 取得了较好效果。但该方法基于熵准则进行横向波速扫描时, 对初始波速的估计存在较强依赖性, 仍然存在计算量较大、估计精度依赖于扫描步长的缺点。

本文不进行波速扫描试探, 提出一种根据目标回波的曲线特征, 快速估计横向等效波速, 采用变波速F-K偏移进行合成孔径精确成像的新方法。

## 1 理论分析

### 1.1 横向等效波速起伏及估计

在雷达回波数据二维记录B-scan中, 点目标回波将形成双曲线, 如图1所示。

收稿日期: 2008-07-08; 修回日期: 2008-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(60472014); 国家“十一五”预研项目

作者简介: 李廷军(1975-), 男, 博士生, 主要从事探地雷达和穿墙雷达信号处理等方面的研究。

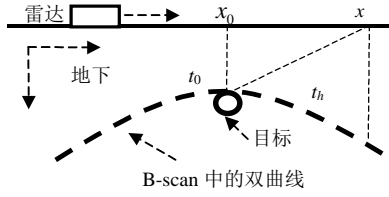


图1 B-scan中的目标回波

设目标在雷达扫描线上的投影  $x_0$  处对应的回波延时为  $t_0$ ,  $x$  处目标回波延时为  $t$ , 地下的电磁波传播速度为  $v$ 。可得双曲线关系式为:

$$(x - x_0)^2 = (vt/2)^2 - (vt_0/2)^2 \quad (1)$$

合成孔径成像的目的就是使反映地下目标的双曲线聚焦到顶点  $(x_0, t_0)$  处。常见的合成孔径成像都利用式(1)进行延时、移相或插值等操作。

由式(1)可估计波速为:

$$v(x) = 2|x - x_0| / \sqrt{t^2 - t_0^2} \quad (2)$$

式(2)利用天线与目标间的直线距离和目标回波延时进行波速估计, 且估计值与水平位置有关, 所以称之为横向等效波速。

对于图1中的理想情况, 式(2)估计的波速在不同位置都将趋于地下介质波速, 这也是恒定波速成像的基础。但式(2)估计出的波速在不同位置将可能不同, 使用恒定波速成像效果难以达到最优。

下面以雷达天线离地较高时为例, 讨论用式(2)估计的等效波速起伏情况。

设雷达离地高为  $H$ , 目标深为  $h$ , 地下介质中波速为  $v_g$ , 空气中波速为  $v_c$ , 如图2所示。

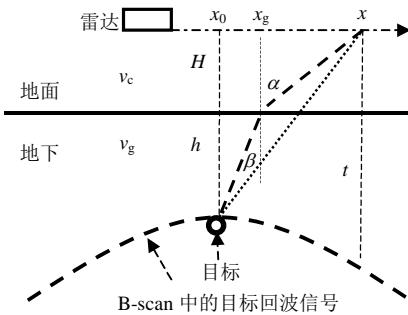


图2 雷达天线离地的工作示意图

目标回波满足斯耐尔折射定律:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{(x - x_g) \sqrt{h^2 + (x_g - x_0)^2}}{(x_g - x_0) \sqrt{H^2 + (x - x_g)^2}} = \frac{v_c}{v_g} \quad (3)$$

式中  $x_g$  为折射点的水平坐标。文献[15]给出了  $x_g$  的计算方法。

$x$  处目标回波的延时为:

$$t = \frac{2\sqrt{H^2 + (x - x_g)^2}}{v_c} + \frac{2\sqrt{h^2 + (x_g - x_0)^2}}{v_g} \quad (4)$$

式中 等式右边第一项和第二项分别为空气和地下的延时。

目标顶点的延时为:

$$t_0 = 2H/v_c + 2h/v_g \quad (5)$$

图3为在给出  $h = 0.1 \text{ m}$ ,  $v_c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $v_g = 1 \times 10^8 \text{ m/s}$  情况下,  $H$  分别为0.05、0.1、0.2 m 时, 用式(2)估计的等效波速  $v(x)$  曲线。

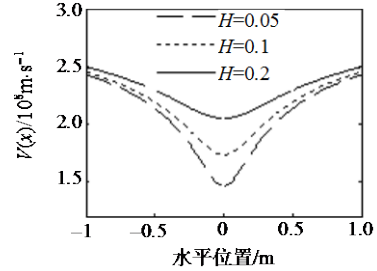


图3 不同雷达高度时的等效波速曲线

从图3可见, 雷达高度变化, 不同水平位置目标回波的等效波速都不同, 随着雷达天线横向偏离目标越远, 等效波速越大。产生这种现象的原因是电磁波信号通过雷达天线与目标间的空气和土壤双层介质时存在折射现象。随着雷达天线横向偏离目标越远, 电磁波在空气中传播的路径占的比重越大, 因此平均等效波速越大。此时使用恒定波速成像不能使全部目标回波能量相干积累, 成像性能不能达到最优。但是只要能从数据中跟踪到目标回波的同相点就可以估计出相应的横向等效波速分布, 利用变波速进行目标回波延时的修正。目标回波同相点的跟踪可以通过提取目标回波曲线信号实现, 文献[16]针对该问题提出了有效方法。目标曲线提取后, 用式(2)计算横向等效波速。回波延时参考点选取不同, 估计的等效波速也不同。合成孔径成像时, 只对延时参考点之后的数据进行处理。因此, 如果没有找准延时参考, 即使对标准双曲线回波信号采用真实的恒定波速成像, 也不能使成像性能达到最优。而采用等效波速成像时, 对时间参考点的选取并不苛刻, 因为等效波速已修正了该因素。对于贴地或离地较低的下视探地应用, 一般选取最强的地面回波为延时参考, 可以较准确对地下目标定位。对于雷达离地较高的探地应用, 可不以最强回波为延时参考, 此时最强回波不一定是地回波, 有可能是收发天线的直耦信号。

另外, 用式(2)估计波速时, 在曲线顶点附近, 由于数字采样的量化作用会引起估计波速的奇异。

离目标较远的区域, 已不在雷达有效合成孔径范围内, 这些区域的波速可用插值和外推方式补足。

考虑到相邻的横向等效波速变化不会太大, 用FIR滤波器抑制干扰, 等效波速为:

$$V(x) = \sum_{k=0}^{K-1} v(x-k)h(k) \quad (6)$$

式中  $K$  为FIR滤波器的阶数;  $h(k)$  为滤波器系数。滤波器输出  $V(x)$  一般有固定延迟, 应予以校正。

## 1.2 横向等效变波速偏移实现合成孔径成像

设探地雷达二维电磁场为  $u(x, z, t)$ ,  $x$  是水平位置坐标,  $z$  是深度方向坐标,  $t$  是时间,  $v$  是电磁波在介质中的波速, 则满足标量波方程<sup>[14,17]</sup>:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] u(x, z, t) = 0 \quad (7)$$

对式(7)进行傅里叶变换可得其频率-波数域描述为:

$$(k_x^2 + k_z^2 - \omega^2 / v^2) U(k_x, k_z, \omega) = 0 \quad (8)$$

式中  $\omega$  是频率;  $k_x$  和  $k_z$  分别是  $x$  和  $z$  方向的波数。由式(8)可得关系式:

$$k_x^2 + k_z^2 = \omega^2 / v^2 \quad (9)$$

考虑到探测过程中目标回波的双程及其延时的波动, 本文使用等效波速  $V(x)$  代入式(9)作为插值的关系式:

$$k_x^2 + k_z^2 = 4\omega^2 / V(x)^2 \quad (10)$$

探地雷达图像的频率-波数域重建就是由记录剖面  $u(x, 0, t)$  延拓到偏移剖面  $u(x, z, 0)$  的过程。首先对探地雷达接收数据作二维傅里叶变换:

$$U(k_x, 0, \omega) = \iint u(x, 0, t) e^{-j(k_x x + \omega t)} dx dt \quad (11)$$

再作深度方向的扩展:

$$U(k_x, z, \omega) = U(k_x, z=0, \omega) e^{jk_z z} \quad (12)$$

结合式(10)可得图像重建公式为:

$$u(x, z, 0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint A(k_x, k_z) e^{j(k_z z + k_x x)} dk_x dk_z \quad (13)$$

式中

$$A(k_x, k_z) = \frac{V(x)k_z}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} U\left(k_z, 0, \frac{V(x)\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}{2}\right) \quad (14)$$

式(13)和式(14)即为横向等效变波速偏移实现探地雷达合成孔径成像的公式, 可用二维快速傅里叶逆变换直接运算, 因而实现速度快。

## 2 实测数据处理

第一组数据来自国际人道主义反雷技术研究中心, 为下视探测的数据, 相关参数为: 冲击雷达脉宽为1 ns, 采样频率为40 GHz, B-scan包括98个512点的A-scan, 空间采样间隔为1 cm。目标为PMN-2地雷, 直径12 cm, 高度5.3 cm, 埋深大约10 cm。

第二组数据是本文采集的前视探地雷缩比模型数据, 相关参数为: 冲击雷达脉宽为2 ns, 采样频率为8 GHz, 空间采样间隔为0.95 cm, 雷达离地66 cm。目标为塑料反坦克地雷, 埋深大约10 cm, 目标离雷达的水平距离为70 cm。

本文用文献[15]中定义的类似熵的准则来对比雷达图像处理前后的差别。定义熵为:

$$R = \frac{\left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N u^2(m, n) \right]^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N u^4(m, n)} \quad (15)$$

式中  $M$ 、 $N$  分别为数据的行和列数。 $R$  越小, 说明数据中能量越集中, 合成孔径成像效果越好。

图4为第一组数据的处理结果, 数据为下视探地雷的实测数据。

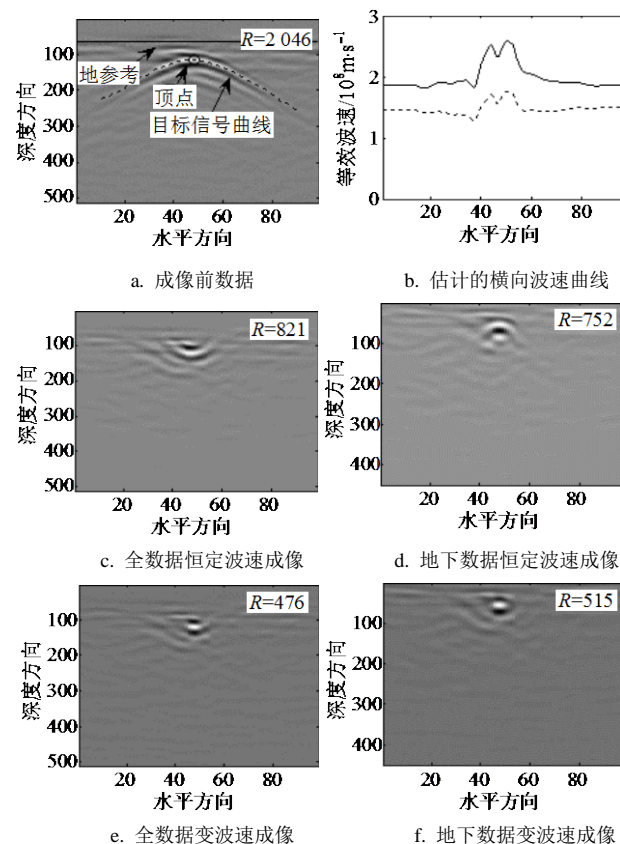


图4 第一组数据处理结果

图4a为去均值预处理后的数据。图上标出了用文献[16]的方法提取的目标信号曲线及顶点,图中还标出了回波最强的地面参考。

图4b为用提取的目标曲线估计的横向波速。虚线为以记录起点为延时参考的波速曲线;实线为以地参考为延时参考的波速曲线。曲线两边估计的等效波速基本相同,趋于同一常数,但仍有细微波动。可以看出,延时参考选取不同,波速估计值也不同。

图4c和图4d分别是以恒定波速偏移对全数据和地下数据成像的结果,图像熵估计分别为821和752。恒定波速为16 cm/ns(文献[6]估计的波速)。图4e和图4f分别是以图3b所示的等效波速用变波速偏移对全数据和地下数据成像的结果,图像熵估计分别为476和515。

结果显示两种延时参考下变波速成像后的熵指标都比对应的恒定波速成像的低,说明本文方法成像性能比传统恒定波速成像好,方位分辨率更优。传统的恒定波速成像对波速估计时延时参考的选取非常敏感,而本文成像方法对此不敏感,能自动修正其变化。

图5为第二组数据的处理结果,数据为前视探地雷达的实测数据。

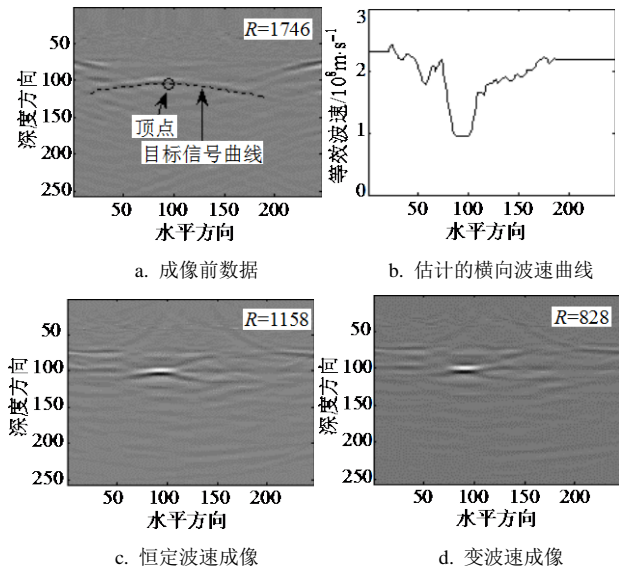


图5 第二组数据处理结果

图5a为去均值预处理后的数据。图5b为用图5a所示提取的曲线估计的横向波速曲线。图中显示等效波速波动较大,而且离顶点越远等效波速越大,这是前视探测数据的特点,与1.1节分析一致。

图5c是以平均等效波速进行恒定波速偏移成像的结果,图像熵估计为1 158。图5d是横向等效变波

速偏移成像的结果,图像熵估计为828。

处理结果表明,本文方法成像分辨率比传统恒定波速成像的高,说明该方法能自动修正前视探地应用中由于折射引起的目标回波延起伏,能较好地应用于前视探地雷达的合成孔径成像。

### 3 结 论

通过分析及实测数据处理结果可见,本文的探地雷达横向等效变波速成像方法与传统恒定波速成像方法相比有以下优点:

- (1) 不用作繁杂的波速扫描运算,计算效率更高;
- (2) 成像的方位分辨率更优;
- (3) 能自动修正地面起伏、地下介质非均匀等引起的回波延时的起伏;
- (4) 对波速估计的延时参考不敏感,能自动修正延时参考不同引起的变化;
- (5) 既能适用于离地下视探地,也能适用于前视探地应用。

### 参 考 文 献

[1] DANIELS D J. Ground penetrating radar[M]. 2nd ed. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 2004.

[2] LANGLEY K, HAMRANET S E. Use of C-band ground penetrating radar to determine backscatter sources within glaciers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1236-1246.

[3] FANG Guang-you. The research activities of ultrawide-band (UWB) radar in China [C]//ICUWB 2007, [S.l.]: [s.n], 2007.

[4] 咎月稳, 章锡元, 张安学. 铁路路基检查车的研究[J]. 铁道工程学报, 2007, 108(9): 17-21.

ZAN Yue-wen, ZHANG Xi-yuan, ZHANG An-xue. Research on railway subgrade inspection car[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 108(9): 17-21.

[5] 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.

ZHANG An-xue, JIANG Yan-sheng, WANG Wen-bing. Experimental studies on GPR velocity estimation and imaging method using migration in frequency-wavenumber domain[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 315-317.

[6] 胡进峰, 周正欧. 浅地层探地雷达波速估计和成像方法的研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(11): 2004-2006.

HU Jin-feng, ZHOU Zheng-ou. Research on wave velocity estimation for ground penetrating radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(11): 2004-2006.

- [7] 修志杰, 陈洁, 方广有, 等. 基于F-K偏移及最小熵技术的探地雷达成像法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 827-830.  
XIU Zhi-jie, CHEN Jie, FANG Guang-you, et al. Ground penetrating radar imaging based on F-K migration and minimum entropy method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(4): 827-830.
- [8] 金添, 周智敏. 车载前视地表穿透SAR多视处理中的关键技术研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 30(4): 925-928.  
JIN Tian, ZHOU Zhi-min. Study of key techniques in multi-look processing for vehicle-borne forward-looking ground penetrating SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(4): 925-928.
- [9] 胡进峰, 周正欧. 一种前视探地雷达波速估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1113-1117.  
HU Jin-feng, ZHOU Zheng-ou. Research on forward-looking ground penetrating radar velocity estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1113-1117.
- [10] FAN Yong, ZHOU Zheng-ou. SAR imaging algorithm based on nonstationary filter for FLGPR[J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 17(1): 173-177.
- [11] BEVC D, BLACK J L, PALACHARLA G. Plumes: Response of time migration to lateral velocity variation[J]. Geophysics, 1995, 60(4): 1118-1127.
- [12] BEHZAD A. An integrated procedure for migration velocity analysis in complex structures of thrust belts[J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 59(2): 89-105.
- [13] FEI Wei-hong, MCMECHAN G A. CRP-based seismic migration velocity analysis[J]. Geophysics, 2006, 71(3): U21-U28.
- [14] XU Xiao-yin, MILLER E L. Minimum entropy regularization in frequency-wavenumber migration to localize subsurface objects[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(8): 1804-1812.
- [15] ZHAO Tai-yin, ZHOU Zheng-ou. Railroad tracks verification using a forward-Looking SAR GPR[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5(2): 167-171.
- [16] 李廷军, 周正欧. 探地雷达中双曲线的提取及在波速估计中的应用[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 124-128.  
LI Ting-jun, ZHOU Zheng-ou. Extraction of hyperbolic signatures and application for propagation velocity estimation in GPR[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(1): 124-128.
- [17] ROBINSON E A. Migration of seismic data by the WKB method[C]//Proceedings of the IEEE. [S.l.]: IEEE, 1986, 74(3): 428-439.

编辑 税红

· 我校科研成果介绍 ·

## 8 mm LFM CW雷达实验系统

利用毫米波频段和极大时宽带宽积线性调频连续波(LFM CW)信号的优良LPI性能, 完成了8 mm LFM CW雷达实验系统的研制。实验系统采用了一系列高速度、大规模、可编程新型器件, 信号处理速度快、工作稳定、调试修改方便。在实验系统上完成了极大时带积LFM CW信号的产生与处理实验。其线性度校正技术已得到实际应用, 取得了良好的效果。

实验系统采用了数字式实时闭环高环高线性度校正、频域动态压缩、距离分段处理技术, 提高了信号的线性度, 改善了距离分辨力, 解决了作用范围与距离分辨力之间的矛盾。

主要技术指标:

发射信号功率: 100 mW

信号带宽: 200 MHz

信号时宽: 可变

距离分辨率: 1.5 m

线性度: 优于1/10 000

作用距离: 1~2 km