

前视探地雷达波速估计及合成孔径成像研究

樊勇¹, 周正欧¹, 徐嘉莉²

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 成都大学电子信息工程系 成都 610106)

【摘要】前视探地雷达的成像处理和地下电磁波的速度估计是前视探地雷达应用中两个重要研究课题。该文利用非平稳滤波矩阵将雷达接收数据经频率域非平稳卷积滤波, 实现了目标图像的重建; 通过波速扫描和合成孔径成像处理, 利用目标图像聚焦的锋利性测度-图像灰度方差估计地下电磁波的速度。对仿真数据和实测数据进行处理, 证明了所提方法的有效性。

关键词 前视探地雷达; 非平稳滤波; 合成孔径成像; 波速估计

中图分类号 TN955.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.010

Research on Velocity Estimation and SAR Imaging in Forward-Looking Ground Penetrating Radar

FAN Yong¹, ZHOU Zheng-ou¹, and XU Jia-li²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Department of Electronic and Information Engineering, Chengdu University Chengdu 610106)

Abstract The velocity estimation and SAR imaging are the two significant topics for the forward-looking ground penetrating radar (FLGPR). This paper presents a fast subsurface SAR imaging algorithm with nonstationary filtering matrix for FLGPR. The target image is reconstructed from FLGPR received data after a nonstationary convolution filtering in the Fourier domain. And the velocity of the electromagnetic wave propagating under ground is estimated by using the image gray variance after synthetic aperture imaging with various velocities. The effectiveness of the approach is demonstrated with simulated data and experimental data set.

Key words forward-looking GPR; nonstationary filter; synthetic aperture imaging; velocity estimation

探地雷达可分为下视探地雷达和前视探地雷达。由于前视探地雷达具有更高的效率、远离危险地及可以对目标进行多视图处理等优点, 因此对前视探地雷达的研究已成为当今探地雷达研究领域的热点^[1-7]。在前视探地雷达中, 机载前视探地雷达用于大面积雷场的快速探测, 车载前视探地雷达用于对单颗地雷的检测和定位。本文主要集中于车载前视探地雷达(简称为前视探地雷达)合成孔径成像处理及估计探地雷达脉冲电磁波在地下媒质中的传播速度的研究。通过合成孔径成像处理可提高目标的方位分辨力, 通过估计探地雷达脉冲电磁波在地下媒质中的传播速度可以实现目标的三维定位, 有助于准确、快速地排除地雷。

目前, 国外对前视探地雷达合成孔径成像的研究已取得了一些成果, 如文献[1]提出了一种近场条件下空间变化匹配滤波前视探地雷达合成孔径成像法; 文献[4]讨论了延迟求和合成孔径成像法; 文献

[5]讨论了对地表目标的相位移偏移法; 文献[6]提出了一种估计目标反射系数的自适应成像算法; 文献[7]提出了一种远场条件下校正波前重建目标的成像方法。在上述前视探地雷达合成孔径成像方法中, 相位移偏移法需要多次迭代重建目标成像, 延迟求和法需要多次计算折射点, 校正波前重建目标法在匹配目标深度的过程中需要多次成像, 这些方法处理起来比较耗时。同时, 由于前视探地雷达是对地表及地下目标进行探测, 斜入射的电磁波从空气进入大地时在地表发生折射, 传播速度发生了变化, 此时基于波速恒定的合成孔径成像方法不再适用。

对探地雷达脉冲电磁波在地下媒质中传播速度估计的研究, 当前主要集中于下视探地雷达的波速估计^[8-10], 这些方法主要针对电磁波在单层介质中传播速度的估计。而对前视探地雷达波速估计研究甚少, 同时由于前视探地雷达电磁波在两层或多层介质中传播, 因此, 下视探地雷达的波速估计方法不

能直接应用于前视探地雷达。

本文根据前视探地雷达目标回波特性,利用非平稳滤波矩阵将雷达接收数据经频率域非平稳卷积滤波,实现了目标图像的重建;分析了电磁波在地下媒质中传播速度对目标定位的影响,通过波速扫描和合成孔径成像处理,利用图像灰度方差估计地下电磁波的速度。

1 前视探地雷达目标回波信号特性

前视探地雷达有多种工作方式^[7],本文前视探地雷达使用收发共置天线,如图1所示。雷达以一固定入射角照射地面,先进行方位扫描。然后将雷达沿 y 轴移动到下一位置再进行方位扫描,这样雷达一边沿 y 轴前进,一边进行方位扫描。

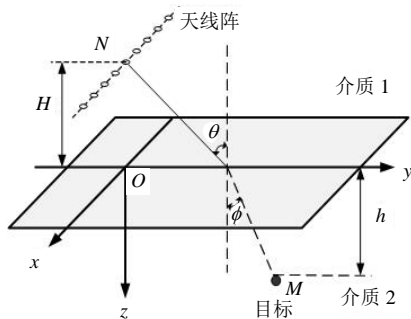


图1 目标和雷达间的几何关系

取图1所示的参考坐标,其中, x 轴为雷达方位扫描方向, y 轴为车前进方向, z 轴为深度方向, H 为雷达离地高度, h 为点目标 M 的埋地深度, θ 、 ϕ 分别表示电磁波照射到目标时的入射角及对应的折射角,介质1为空气,介质2为土壤(相对介电常数 ϵ_2),地表面为 xy 平面。设点散射源坐标为 $M(x_0, H \tan \theta + h \tan \phi, h)$,天线坐标为 $N(x, 0, -H)$ 。利用折射点的近似计算方法^[11],点散射源 M 对雷达的延迟时间 t 可表示为:

$$t = \sqrt{t_{01}^2 + p_1^2(x - x_0)^2} + \sqrt{t_{02}^2 + p_2^2(x - x_0)^2} \quad (1)$$

式中 $t_{01} = 2H \sec \theta / c$; $t_{02} = 2h \sec \phi / v_g$; $p_1 = 2[1 - hv_g / c(H + h)] / c$; $p_2 = 2h / c(H + h)$; $\phi = \arcsin(v_g \sin \theta / c)$; c 为电磁波在自由空间的传播速度; v_g 为电磁波在介质2中的传播速度。

由式(1)可见,当雷达在方位向扫描得到的二维雷达图像中,点散射源回波呈现双曲线形状。

2 利用非平稳滤波的合成孔径成像

通常前视探地雷达是对地表及地下目标进行探测,斜照射到地面的电磁波从空气进入大地时在地

表发生折射,传播速度发生了变化,即波速是时变的。当波速仅在深度方向变化时,根据非平稳滤波理论^[12],可利用非平稳滤波矩阵从接收数据频谱直接重建复杂介质中的波场频谱,因此可利用非平稳滤波法实现前视探地雷达成像。

前视探地雷达接收信号 $u(x, r, t)$ 满足二维标量波动方程^[4]:

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

式中 r 表示在成像平面内的斜距坐标。

定义 $U(k_x, r, \omega)$ 为 $u(x, r, t)$ 对变量 x 、 t 的傅里叶变换,在层速度模型下成像平面内上行波表达式为:

$$U(k_x, r, \omega) = U(k_x, 0, \omega) \exp\left[j \int_0^r \sqrt{(\omega/v)^2 - k_x^2} dr\right] \quad (3)$$

式中 $U(k_x, 0, \omega)$ 为雷达在离地面高度 H 处接收信号的频谱; k_x 为 x 轴方向水平波数; ω 为角频率。

如果将式(3)对 k_x 、 ω 进行傅里叶反变换,取 $t = 0$, 可得到成像平面内目标图像重建,但由于波速是时变的,Stolt快速求解方法不再适用;若采用对 ω 直接求和法实现目标图像重建,需要多次偏移成像处理。将式(3)对 ω 进行傅里叶反变换,取 $t = 0$, 同时定义偏移时间 $\tau = r/v$, 则在时间-频率域目标图像重建公式为:

$$U(k_x, \tau, t = 0) = \frac{1}{2\pi} \int U(k_x, 0, \omega) \alpha(k_x, \tau, \omega) \exp(j\omega\tau) d\omega \quad (4)$$

式中 $\alpha(k_x, \tau, \omega) = \exp\left[j \left(\int_0^\tau \sqrt{\omega^2 - (vk_x)^2} d\tau - \omega\tau \right)\right]$,

称为成像平面内时间-频率域非平稳滤波变换函数。对于离散信号,当 k_x 确定时,由于 v 随偏移时间 τ 变化, $\alpha(k_x, \tau, \omega)$ 是关于 τ 、 ω 的非平稳滤波矩阵。当知道波速时,便可直接构建非平稳滤波变换函数。

根据非平稳滤波理论^[12],式(4)是混合域(时间-频率域)非平稳组合滤波表达式,通过傅里叶变换可将其变为频率域的非平稳卷积滤波。定义 $A(k_x, \eta, \omega)$ 为 $\alpha(k_x, \tau, \omega)$ 对变量 τ 的傅里叶变换,即:

$A(k_x, \eta, \omega) = \int \alpha(k_x, \tau, \omega) \exp(-j\eta \tau) d\tau$, 将式(4)对 τ 进行傅里叶变换,可得频率域重建目标频谱为:

$$U(k_x, \eta) = \frac{1}{2\pi} \int U(k_x, 0, \omega) A(k_x, \eta - \omega, \omega) d\omega \quad (5)$$

由式(5)可知,频率域重建目标频谱就是频率域内卷积运算,雷达接收数据的频谱通过非平稳滤波矩阵实现重建目标频谱。

将式(5)进行傅里叶逆变换, 则利用非平稳滤波的前视探地雷达合成孔径成像为:

$$u(x, \tau, t=0) = \frac{1}{4\pi^2} \iint U(k_x, \eta) \exp[j(\eta\tau - k_x x)] d k_x d \eta \quad (6)$$

由上述分析可以看出, 基于非平稳滤波的前视探地雷达合成孔径成像是通过构建非平稳滤波变换函数, 将雷达接收数据的频谱经频率域非平稳卷积滤波运算, 实现了重建目标频谱, 再将重建目标频谱进行傅里叶反变换; 目标图像的重建只需一次偏移成像, 表现为目标的方位-时间信息, 避免了成像过程中的折射校正。

3 利用图像灰度方差估计波速

3.1 波速估计对目标定位的影响

由式(1)知, 当电磁波在介质2中的传播速度为 v_g 时, 点散射源到雷达的最短延迟时间可表示为:

$$t_0 = \frac{2H \sec \theta}{c} + \frac{2h \sec \phi}{v_g} \quad (7)$$

设估计的电磁波在介质2中的传播速度为 \tilde{v}_g , 此时目标到雷达的最短延迟时间为:

$$t_0 = \frac{2H \sec \theta}{c} + \frac{2h \sec \phi}{\tilde{v}_g} \quad (8)$$

定义归一化波速 r :

$$r = \tilde{v}_g / v_g \quad (9)$$

由式(7)~(9)可得, 由波速估计误差造成的目标深度误差为:

$$h - \tilde{h} = h(1 - r) \quad (10)$$

同理, 由于波速估计误差造成的目标纵向坐标 (y 轴坐标) 误差为:

$$y - \tilde{y} = y(1 - r^2) / [cH \sec \theta / hv_g + 1] \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可知, 在前视探地雷达中, 电磁波在介质2中的传播速度的估计将影响目标的纵向位置坐标和目标的深度。

3.2 前视探地雷达波速估计

由上述分析知, 电磁波在地下媒质中的传播速度是前视探地雷达合成孔径成像和目标定位的基础。但对于前视探地雷达, 通常电磁波在空气中的传输时间大于电磁波在大地中的传输时间, 这使得前视探地雷达目标双曲线比下视探地雷达目标双曲线平坦, 利用叠加振幅法^[9]及图像熵法^[10]估计波速时, 叠加振幅及图像熵随波速的变化不敏感, 很难精确地估计电磁波在地下媒质中的传播速度。本文利用雷达图像的聚焦特性, 通过波速扫描和成像处

理, 当扫描的波速等于电磁波在地下媒质中的实际速度时, 目标图像聚焦的锋利性测度-图像灰度方差^[13]最大, 因此, 可以利用成像后目标区域的图像灰度方差估计地下电磁波的传播速度。

利用图像灰度方差估计地下电磁波的传播速度可概括为:

(1) 提取目标双曲线, 利用式(1)估计地下电磁波的传播速度范围, 记为 $v_g(i)$, $i \in [1, m]$;

(2) 对于给定的一系列速度值, 分别用式(6)对前视探地雷达记录数据进行成像处理, 记为 $u(x, \tau, t=0, v_g(i))$, $i \in [1, m]$;

(3) 对于第 i 幅图像, 选取目标窗口, 用 K 、 L 分别表示在方位轴和时间轴目标窗口的大小, k_0 、 l_0 表示目标窗口的起始位置, 求目标图像窗口内的灰度方差为:

$$s_i^2 = \frac{1}{KL} \sum_{k=k_0}^K \sum_{l=l_0}^L \left[|u(x_k, \tau_l, t=0, v_g(i)) - \bar{u}(i)| \right]^2 \quad (12)$$

式中 $\bar{u}(i) = \frac{1}{KL} \sum_{k=k_0}^K \sum_{l=l_0}^L |u(x_k, \tau_l, t=0, v_g(i))|$;

(4) 估计地下电磁波的传播速度为:

$$\tilde{v}_g = \arg \max_i (s_i^2) \quad (13)$$

4 仿真数据和实测数据处理结果

4.1 仿真数据的处理结果

仿真数据相关参数为: 雷达带宽为500 MHz单脉冲雷达, $H=0.5$ m, $\theta=45^\circ$, $v_g=1 \times 10^8$ m/s, 目标的直角坐标位置为(1.01, 0.55, 0.20)m。图2是对仿真数据的处理结果, 图2a是雷达仿真数据; 利用波速扫描和成像处理, 得到归一化图像灰度方差同扫描波速的曲线如图2b所示, 估计的波速 $\tilde{v}_g=1.06 \times 10^8$ m/s, 估计出的最佳速度与实际速度的相对误差为6%, 利用最大峰值点对目标定位, 可以确定目标坐标为(1.01, 0.55, 0.21)m; 图2c是归一化目标区域平均叠加振幅同扫描波速的曲线, 估计的波速 $\tilde{v}_g=1.09 \times 10^8$ m/s, 估计出的最佳速度与实际速度的相对误差为9%, 此时目标坐标为(1.01, 0.55, 0.22)m; 由图2b和图2c可以看出, 图像灰度方差随波速的变化比目标区域平均叠加振幅随波速的变化灵敏, 在扫描的波速范围内, 归一化图像灰度方差最大值与最小值之差为0.11, 而归一化目标区域平均叠加振幅最大值与最小值之差为0.02; 图2d是用估计的波速对雷达接收数据进行合成孔径成像处理的结果, 由成像结果可见图2a中目标双曲线经合成孔径成像

处理后在目标位置处聚焦，方位分辨率显著提高。

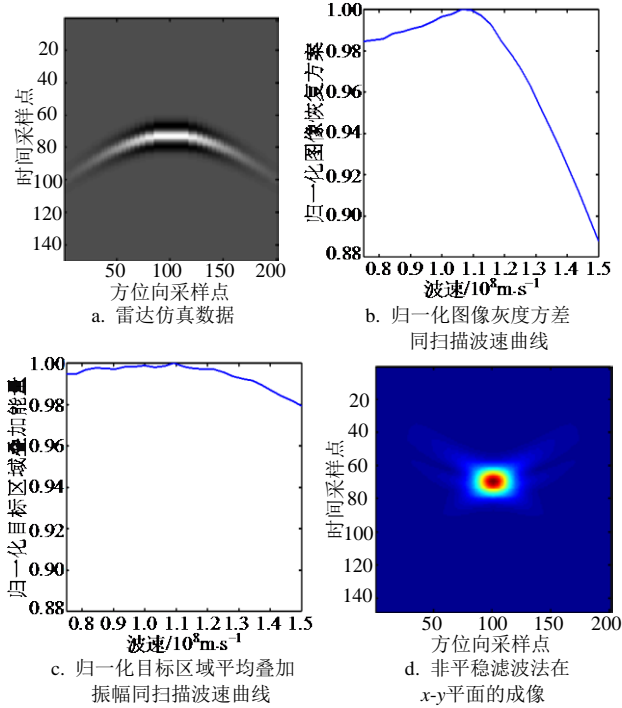


图2 仿真数据结果

4.2 实测数据的处理结果

本文所用实测数据来自所在课题组用RAMAC公司生产的带宽为500 MHz单脉冲雷达在一个长、宽、高分别为5 m×3 m×2 m的沙坑采集的实验数据。数据相关参数为：雷达方位向采样间距为0.009 5 m，每个A扫描等效采样频率为8.099 GHz， $H=0.66$ m，目标为塑料反坦克雷， $\theta=45^\circ$ ，目标的直角坐标位置为(0.91, 0.63, 0.13)m，利用 H 、 h 、 θ 及式(7)得出沙内电磁波传播的实际速度为 1.2×10^8 m/s。图3是对实测数据的处理结果，图3a是经杂波抑制处理后雷达数据；利用波速扫描和成像处理，得到归一化图像灰度方差同扫描波速的曲线如图3b所示，估计的波速 $\tilde{v}_g=1.31\times 10^8$ m/s，估计出的最佳速度与实际速度的相对误差为9%，利用最大峰值点对目标定位，可以确定目标坐标为(0.92, 0.66, 0.14)m；图3c是归一化目标区域平均叠加振幅同扫描波速的曲线，估计的波速 $\tilde{v}_g=1.31\times 10^8$ m/s，估计出的最佳速度与实际速度的相对误差为9%，此时目标坐标为(0.92, 0.66, 0.14)m，由图3b和图3c可以看出图像灰度方差随波速的变化比目标区域平均叠加振幅随波速的变化灵敏，在扫描的波速范围内，归一化图像灰度方差最大值与最小值之差为0.1，而归一化目标区域平均叠加振幅最大值与最小值之差为0.01。图3d是用估计的波速对雷达接收数据进行合成孔径成像处理的结果，由成像结果可见图3a中目标双曲线

经成像处理后在目标位置处聚焦，方位分辨率显著提高。

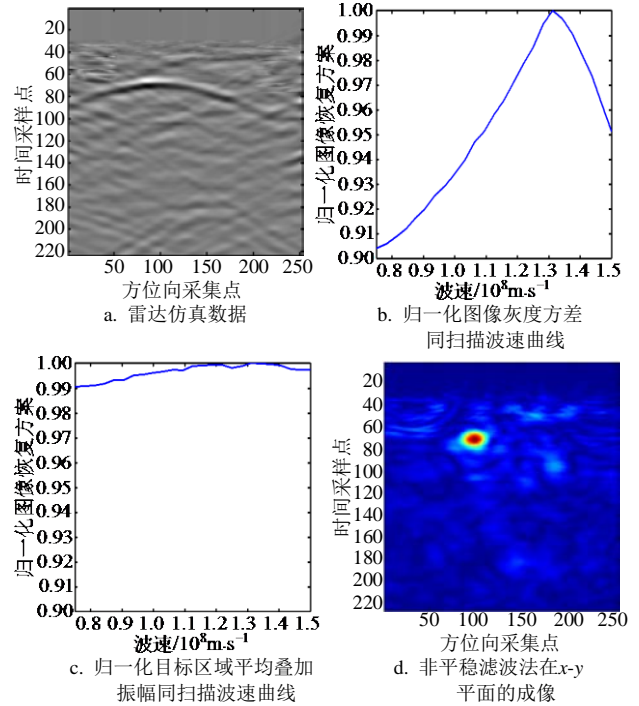


图3 实测数据结果

利用上述仿真数据和实验数据，本文将非平稳偏移滤波法同相位偏移法和延迟求和法进行了比较，结果如表1所示。从表1可以看出，非平稳偏移滤波法比相位偏移法和延迟求和法具有更高的计算效率。

表1 三种成像方法所需时间的比较

参 数	仿真数据成像 所需时间/s	实验数据成像 所需时间/s
非平稳偏移滤波法	17	32
相位偏移法	133	246
延迟求和法	614	1 178

5 结 论

对仿真数据和实测数据进行处理结果证明，非平稳偏移滤波法能实现前视探地雷达电磁波在两层介质中传播时雷达接收数据的合成孔径成像，方位分辨率显著提高；同时图像灰度方差可应用于前视探地雷达来估计地下电磁波的传播速度。

参 考 文 献

[1] JOAQUIM F G. A novel 3-D subsurface radar imaging technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(2): 443-452.
 [2] SUN Y, LI J. Time-frequency analysis for plastic landmine detection via forward-looking ground penetrating radar[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 253-261.

(下转第620页)