

前视探地雷达三维合成孔径成像及多视处理

樊勇^{1,3}, 徐嘉莉², 周正欧¹

(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;
3. 中国民航总局第二研究所空中交通管制新技术应用实验室 成都 610041)

【摘要】提出了一种变波速条件下前视探地雷达三维合成孔径成像及多视处理方法。该方法利用非平稳卷积滤波处理在频率域重构目标图像频谱,经傅里叶反变换后实现前视探地雷达三维合成孔径成像;利用估计的目标入射角实现折射校正及前视探地雷达多视处理。对实测数据进行处理,结果证明了该方法的有效性。

关键词 前视探地雷达; 目标入射角; 多视处理; 非平稳滤波

中图分类号 TN955.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.002

3D SAR Imaging and Multi-Look Processing in Forward-Looking Ground Penetrating Radar

FAN Yong^{1,3}, XU Jia-li², and ZHOU Zheng-ou¹

(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;
3. The Lab of ATM New Technology Application of CAAC Chengdu 610041)

Abstract This paper presents a 3D SAR imaging and multi-look processing algorithm in the variation of the velocity for the forward-looking ground penetrating radar (FLGPR). By using nonstationary convolution filter, the spectrum of the refocused image can be reconstructed directly from the spectrum of backscattered signal from the target area and the 3D target image is reconstructed after the inverse Fourier transform. By estimating the incidence angle of target, the refraction correction and the multi-look processing are accomplished. The effectiveness of the approach is demonstrated with experimental data set.

Key words forward-looking GPR; incidence angle of target; multi-look processing; nonstationary filter

地雷危机是一个世界范围的问题,许多国家投入了大量的人力、物力致力于安全有效的检测和清除地雷的研究。然而地雷种类繁多及地雷周围介质的复杂性使得有效地、精确地检测地雷仍然相当困难。在现有的地雷检测技术中,探地雷达与其他检测技术相比具有显著的优点。

当前,探地雷达可分为下视探地雷达和前视探地雷达。由于前视探地雷达与下视探地雷达相比具有更高的效率、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^[1-9]。前视探地雷达可分为车载前视探地雷达、机载前视探地雷达等。本文主要集中于车载前视探地雷达(简称为前视探地雷达)三维合成孔径成像及多视图处理的研究。通过三维合成孔径成像处理,既可提高目标的方位分辨

力,又可解决二维成像的不足,有助于更加详细地了解地下目标的分布和相对位置关系,获得更多的目标信息^[10];而多视处理与单视处理相比可提高信杂比及降低虚警率。

目前,国外对前视探地雷达三维合成孔径成像的研究已取得了一些成果。文献[1]提出了一种距离偏移前视探地雷达三维合成孔径成像法;文献[2]提出了一种近场条件下空间变化匹配滤波前视探地雷达三维合成孔径成像法;文献[3]讨论了延迟求和前视探地雷达三维合成孔径成像法。上述三维合成孔径成像方法需要先对所有的地下回波数据进行折射校正,然后再进行合成孔径处理。但在探地雷达回波数据中的有用信息不到2%^[11],因此,如果对所有的地下回波数据进行折射校正,将增加成像处理的运算量。同时,由于前视探地雷达在前行过程中对

收稿日期: 2008-08-14; 修回日期: 2009-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(60472014); 中国民用航空总局专项项目(210710)

作者简介: 樊勇(1977-),男,博士,主要从事探地雷达信号处理等方面的研究。

同一探测区域可以得到多幅不同俯视角的SAR图像,因此,可以对同一探测区域进行多视处理。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多视处理方法不再适用。

根据非平稳滤波理论^[12],非平稳线性滤波可以应用于时变滤波处理,其广泛应用于复杂介质中波的单向传输、时间偏移、正Q滤波及反Q滤波等地震数据处理。基于上述分析,根据工作在近场的前视探地雷达中回波信号的特性,本文提出一种新的变波速条件下前视探地雷达三维合成孔径成像方法。该方法首先利用非平稳滤波处理实现变波速条件下前视探地雷达时-空域三维合成孔径成像;再利用估计的目标入射角及目标回波传输延时而对目标回波数据进行折射校正。同时,利用估计的目标入射角可以实现前视探地雷达多视处理,提高信杂比及降低虚警率。对实测数据进行处理的结果证明了该方法的有效性。

1 前视探地雷达三维合成孔径成像

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。取图1所示的参考坐标,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,r表示斜距,H为雷达离地高度,h为点目标M的埋地深度, θ 、 ϕ 分别表示电磁波入射角及对应的折射角,介质1是空气,介质2是土壤(相对介电常数 ϵ_2),地表面为xy平面,设点散射源坐标为 $M(x_0, y_0, h)$,天线坐标为 $N(x, 0, -H)$ 。

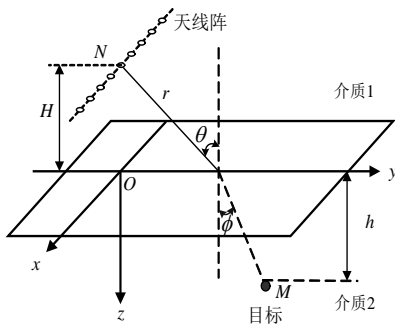


图1 目标和雷达间的几何关系

根据工作在近场的前视探地雷达中回波信号的特性,当波速仅在深度方向变化时,根据非平稳滤

波理论,可利用非平稳滤波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 $u(x, y, r, t)$ 满足三维标量波动方程^[3]:

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

式中 v 表示电磁波传播速度。

定义 $U(k_x, k_y, r, \omega)$ 是 $u(x, y, r, t)$ 对变量 x 、 y 、 t 的傅里叶变换。由于波速 v 在深度方向随时间变化,式(1)为包含一变系数的二阶微分方程,利用系数近似方法^[13],在层速度模型下成像平面内上行波表达式为:

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

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

如果将式(2)对 k_x 、 k_y 、 ω 进行傅里叶反变换,取 $t=0$,可得到目标图像重建,但由于波速是时变的,Stolt快速求解方法不再适用;若采用对变量 ω 直接求和法实现目标图像重建,需要多次偏移成像处理而耗时。将式(2)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:

$$U(k_x, k_y, \tau, t=0) = \frac{1}{2\pi} \int U(k_x, k_y, 0, \omega) \alpha(k_x, k_y, \tau, \omega) \times \exp(j\omega\tau) d\omega \quad (3)$$

式中

$$\alpha(k_x, k_y, \tau, \omega) = \exp\left[j \left(\int_0^\tau \sqrt{\omega^2 - v^2(k_x^2 + k_y^2)} d\tau - \omega\tau \right)\right] \quad (4)$$

称为时间-频率域非平稳滤波变换函数。对于离散信号,当 k_x 、 k_y 确定时,由于 v 随偏移时间 τ 变化, $\alpha(k_x, k_y, \tau, \omega)$ 是关于 τ 、 ω 的非平稳滤波函数。同时,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(3)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 $A(k_x, k_y, \eta, \omega)$ 为 $\alpha(k_x, k_y, \tau, \omega)$ 对变量 τ 的傅里叶变换,即:

$$A(k_x, k_y, \eta, \omega) = \int \alpha(k_x, k_y, \tau, \omega) \exp(-j\eta\tau) d\tau \quad (5)$$

将式(3)对 τ 进行傅里叶变换,可得频率域重建

目标频谱为:

$$U(k_x, k_y, \eta) = \frac{1}{2\pi} \int U(k_x, k_y, 0, \omega) A(k_x, k_y, \eta - \omega, \omega) d\omega \quad (6)$$

由式(6)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处理实现重建目标频谱。

将式(6)进行傅里叶逆变换, 则利用非平稳滤波的前视探地雷达三维合成孔径成像为:

$$u(x, y, \tau, t=0) = \frac{1}{4\pi^2} \iint U(k_x, k_y, \eta) \times \exp[j(\eta\tau - k_x x - k_y y)] dk_x dk_y d\eta \quad (7)$$

由上述分析可以看出, 基于非平稳滤波的前视探地雷达三维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, 实现重建目标频谱, 最后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; 目标图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。

2 目标归位处理及多视图处理

2.1 目标入射角估计

首先, 估计目标 $M(x_0, y_0, h)$ 的方位坐标为:

$$\tilde{x}_0 = \arg \max_x (|u(x, y, \tau, t=0)|) \quad (8)$$

其次, 估计目标的地距坐标 \tilde{y}_0 及埋地深度 \tilde{h} :

选取雷达分别位于 y_1 、 y_2 时回波中包含目标的 B 扫描数据 $u(x, y_1, r, t)$ 、 $u(x, y_2, r, t)$, 利用快速的二维 SAR 成像算法^[8]进行处理, 分别记为 $u(x, y_1, \tau, t=0)$ 、 $u(x, y_2, \tau, t=0)$ 。估计目标回波延时 $\tilde{\tau}_1$ 、 $\tilde{\tau}_2$ 为:

$$\begin{cases} \tilde{\tau}_1 = \arg \max_{\tau} (|u(\tilde{x}_0, y_1, \tau, t=0)|) \\ \tilde{\tau}_2 = \arg \max_{\tau} (|u(\tilde{x}_0, y_2, \tau, t=0)|) \end{cases} \quad (9)$$

设雷达分别位于 y_1 、 y_2 时, 电磁波照射到目标 M 时的入射角分别为 θ_1 、 θ_2 及对应的折射角分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 , 电磁波在空气和土壤中的传播速度分别为 c 、 v_g 。根据雷达和目标间的几何关系可得方程组:

$$\begin{cases} \tau_1 = 2H \sec \theta_1 / c + 2h \sec \phi_1 / v_g \\ y_0 = y_1 + H \tan \theta_1 + h \tan \phi_1 \\ \tau_2 = 2H \sec \theta_2 / c + 2h \sec \phi_2 / v_g \\ y_0 = y_2 + H \tan \theta_2 + h \tan \phi_2 \end{cases} \quad (10)$$

利用 $\phi = \arcsin(v_g \sin \theta / c)$ 、式(9)及式(10)可得雷达分别位于 y_1 、 y_2 时的目标入射角 $\tilde{\theta}_1$ 、 $\tilde{\theta}_2$, 以及目标的地距坐标 \tilde{y}_0 及埋地深度 \tilde{h} 。

最后, 利用 \tilde{y}_0 、 \tilde{h} 及式(10)可得雷达位于 y_n 时的目标入射角 $\tilde{\theta}_n$, 其中 $n \in N$, N 表示前视探地雷达在前行过程中探测到同一目标的视数。

2.2 目标归位处理

由式(7)可知, 利用非平稳滤波的前视探地雷达三维合成孔径成像处理, 目标图像表现为目标的时间-空间信息, 回波信号延时表现为斜距平面内的传输延时, 因此, 必须进行折射校正。

根据雷达和目标间的几何关系, 利用估计的目标入射角 $\tilde{\theta}_n$, 将成像处理后的目标图像进行折射校正, 经折射校正后的目标图像可表示为 $u(x, y'_n, z)$, 其中:

$$\begin{cases} y'_n = y_n + H \tan \tilde{\theta}_n + \int_{\tau_n}^{\tau} v_g t \sin \tilde{\phi}_n d\tau \\ z = -H + \int_{\tau_n}^{\tau} v_g t \cos \tilde{\phi}_n d\tau \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\tau_n = 2H \sec \theta_n / c$ 。

2.3 多视处理

对 B 扫描数据 $u(x, y_n, r, t)$ 利用快速的二维 SAR 成像算法^[8]分别进行成像处理, 记为 $u(x, y_n, \tau, t=0)$ 。利用估计的目标入射角 $\tilde{\theta}_n$, 将 $u(x, y_n, \tau, t=0)$ 投影到 xy 平面, 记为 $u(x, y'_n)$, 其中:

$$y'_n = y_n + H \tan \tilde{\theta}_n + \int_{\tau_n}^{\tau} v_g t \sin \tilde{\phi}_n d\tau \quad (12)$$

以第一幅图为基准, 则采用平均加权得到的 N 视结果为:

$$u^{ml}(x, y') = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u(x, y'_n + (1-n)\Delta y) \quad (13)$$

2.4 入射角估计误差对目标归位和多视处理的影响

由前视探地雷达回波信号特性知, 点散射源到雷达的最短延迟时间为:

$$t_0 = 2H \sec \theta / c + (2h \sec \phi) / v_g \quad (14)$$

利用式(14)及目标和雷达间的几何关系, 当估计的目标入射角为 $\tilde{\theta}$ 时, 对应的目标埋地深度 \tilde{h} 和目标的地距坐标 \tilde{y}_0 可分别表示为:

$$\begin{cases} \tilde{h} = [v_g t_0 / 2 - H \sec \tilde{\theta} / \sqrt{\epsilon_2}] \cos \tilde{\phi} \\ \tilde{y}_0 = H \tan \tilde{\theta} + \tilde{h} \tan \tilde{\phi} \end{cases} \quad (15)$$

式中 $\tilde{\phi} = \arcsin(v_g \sin \tilde{\theta} / c)$ 。

由式(15)可见, \tilde{h} 和 \tilde{y}_0 与 $\tilde{\theta}$ 有关。当 $\tilde{\theta}$ 大于电磁波照射到目标的实际入射角时, \tilde{h} 小于真实地目标埋地深度, \tilde{y}_0 大于真实地目标地距坐标; 当 $\tilde{\theta}$ 小于电磁波照射到目标的实际入射角时, \tilde{h} 大于真实地目标埋地深度, \tilde{y}_0 小于真实地目标地距坐标。

对于多视处理, 当入射角估计误差较大时, 将导致不同入射角图像序列很难配准, 从而使得多视处理后图像信杂比降低。

3 实测数据处理结果

本文所用实测数据来自RAMAC公司生产的带宽为500 MHz单脉冲雷达在一个长度、宽度、深度分别为5 m、3 m、2 m的沙坑采集的实验数据。数据相关参数为: 雷达在 x 方向采样间距为0.009 5 m, 在 y 方向采样间距为0.01 m, 每个A扫描等效采样频率为8.099 GHz, $H=0.3$ m, $h=0.06$ m。目标为装满水的塑料矿泉水瓶(直径为0.06 m, 高度为0.22 m), 沿 x 方向放置, $\theta=30^\circ$ 。由于淡水的相对介电常数为80, 因此在雷达接收数据中目标回波存在多次反射波, 通过对实测数据进行预处理, 即均值滤波及幅度衰减处理, 预处理后的数据如图1所示。利用式(7)对预处理后的数据进行三维成像处理, 结果如图2所示。由图2可以看出, 经三维合成孔径成像处理后, 在 x 方向及 y 方向目标图像被压缩, 方位分辨率显著提高。利用估计的目标入射角, 将成像处理后的目标图像进行折射校正, 经折射校正后的目标图像如图3所示。由图3可以看出, 经折射校正后, 目标图像表现为三维空间信息, 同时地距坐标发生了变化。

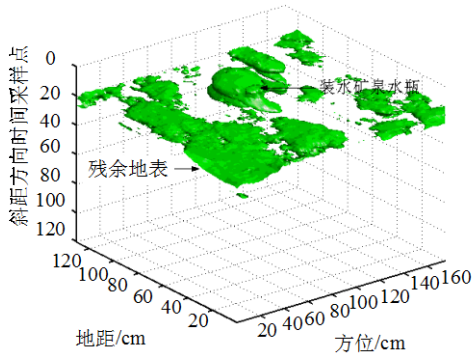


图1 预处理后的三维数据

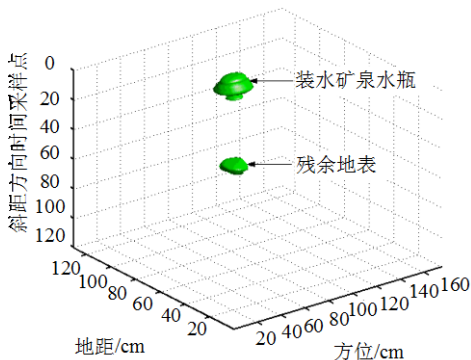


图2 利用非平稳滤波的三维合成孔径成像
利用估计的目标入射角对目标图像进行多视处

理(以第一幅图为基准), 图4描述了在 xy 平面的多视处理, 装水的塑料矿泉水瓶坐标为(1.1,1.26), 单位为m。其中, 图4a表示视数 $N=1$ 时的结果; 图4b表示视数 $N=5$ 时的结果; 图4c表示视数 $N=10$ 时的结果; 图4d表示视数 $N=20$ 时的结果。由图4可以看出, 随着视数的增加, 目标的信杂比(SCR)逐渐提高。图5为不同视数处理的接收机工作特性(ROC)曲线^[13], 由图5可见, 在相同检测率时, 多视处理具有更低的虚警率。表1比较了不同视数处理时信杂比(SCR)的变化情况。由表1可见多视处理后SCR得到提高。

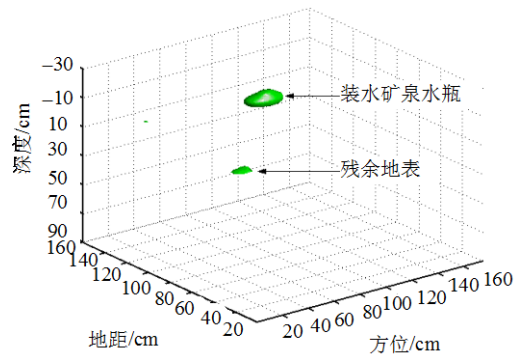


图3 折射校正后的目标图像

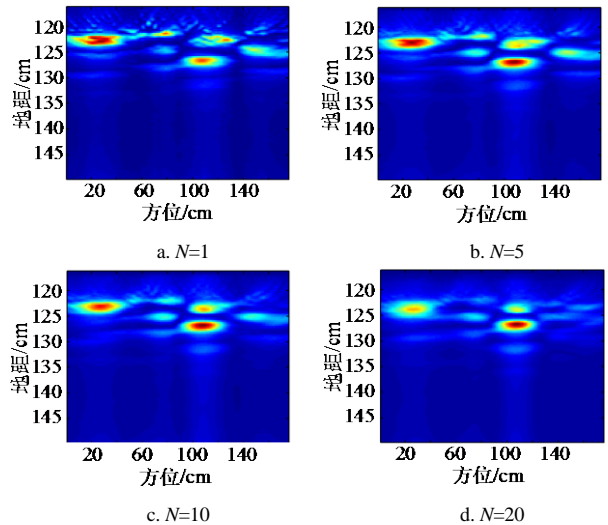


图4 多视处理前后比较

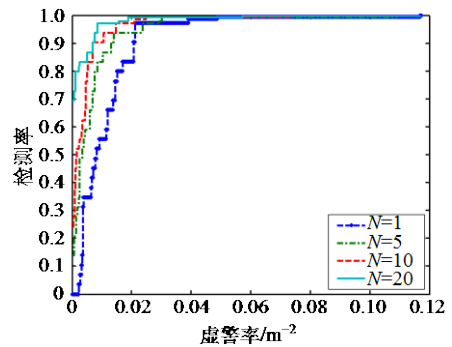


图5 不同视数处理的ROC

表1 多视处理前后SCR的比较

多视处理	$N=1$	$N=5$	$N=10$	$N=20$
SCR/dB	10.97	12.61	13.83	15.31

4 结 论

对实测数据进行处理结果证明,非平稳滤波能应用于波速在向深度变化条件下前视探地雷达三维合成孔径成像,通过估计目标入射角,对目标图像进行多视处理能提高信杂比及降低虚警率。

参 考 文 献

- [1] LOPEZ-SANCHEZ J M, FORTUNY-GUASCH J. 3-D radar imaging using range migration techniques[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(5): 728-737.
- [2] FORTUNY-GUASCH J. A novel 3-D subsurface radar imaging technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(2): 443-452.
- [3] LIU Guo-qing, WANG Yan-wei. SAR imaging for a forward-looking GPR system[C]//Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII. Orlando, Florida, USA: Holloway, 2003.
- [4] WANG Yan-wei, LI Xi, SUN Yi-jun, et al. Adaptive imaging for forward-looking ground penetrating radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 922-936.
- [5] SUN Yi-jun, LI Jian. Adaptive learning approach to landmine detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 973-985.
- [6] WANG T, KELLER J M, BUSCHM, et al. On the confidence level fusion of IR and forward-looking GPR[C]//Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI. Kissimmee, Florida, USA: Holloway, 2006.
- [7] WANG T, KELLER J M, GADER P D, et al. Frequency subband processing and feature analysis of forward-looking ground-penetrating radar signals for land-mine detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(3): 718-729.
- [8] FAN Y, ZHOU Z O, XU J L. SAR imaging algorithm based on nonstationary filtering for FLGPR[J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 17(1): 173-177.
- [9] STONE K, KELLER J, HO K C, et al. On the registration of FLGPR and IR data for a forward-looking landmine detection system and its use in eliminating FLGPR false alarms[C]//Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIII. Orlando, Florida, USA: Holloway, 2008.
- [10] 冯德山, 戴前伟. 探地雷达小波域三维波动方程偏移[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 566-574.
FENG De-shan, DAI Qian-wei. The migration of GPR three dimension wave equation in wavelets domain[J]. Chinese Journal Geophysics, 2008, 51(2): 566-574.
- [11] AL-NUAIMY W, HUANG Y, SHIHAB S. Automatic target detection in GPR data[C]//Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar. Santa Barbara, California, USA: [s.n], 2002.
- [12] MARGRAVE G F. Theory of nonstationary filtering in the Fourier domain with application to time-variant filtering[J]. Geophysics, 1998, 63: 244-259.
- [13] ROBINSON E A. Migration of seismic data by the WKBJ method[J]. Proceedings of the IEEE, 1986, 74(3): 428-439.
- [14] BRUNZELL H. Detection of shallowly buried objects using impulse radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2): 875-886.

编辑 税红