

文章编号: 1001-1986(2010)01-0071-05

地质雷达频率补偿与校正技术

苏茂鑫¹, 田 钢², 李术才¹, 薛翊国¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

2. 浙江大学地球科学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 雷达波在地下传播过程中会发生衰减、频散和受到其他干扰的影响, 这在一定程度上限制了地质雷达的探测分辨率和最终解释效果。为了降低这些影响, 在地层系统响应模型基础之上, 通过从原始记录中求取频率补偿与校正因子, 既而对原始记录的频谱进行补偿校正, 达到改善地质雷达剖面记录, 提高探测分辨率的目的。为了更好地了解频率补偿与校正技术的有效性, 从原理到应用效果给予了详细的介绍, 同时与尖脉冲反褶积的应用效果作比较, 进一步说明了频率补偿与校正技术在降噪和提高分辨率处理上的一些技术特点。

关键词: 频率补偿与校正; 系统响应; 分辨率; 反褶积

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.01.017

Ground radar frequency compensation and correction technique

SU Maoxin¹, TIAN Gang², LI Shucan¹, XUE Yiguo¹

(1. *Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;*

2. *Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: Ground radar wave propagation in ground is influenced by the attenuation, dispersion and other interference, to certain extent, which will limit ground radar detection resolution and final interpretation effect. In order to reduce the attenuation, dispersion and the impact of interference, this paper presented a frequency compensation and correction method, which was based on the stratum system response model, through computing a frequency compensation and correction factor from the ground penetrating radar raw data, the raw recorder spectrum will be corrected, which will improve the ground penetrating radar profile record and enhance the vertical detection resolution. For better understanding of the effect of the stratum spectrum correction method, this article gave detailed introduction of its principle and application effect, but also compared its effect with that of sharp pulse deconvolution, which can further prove that the stratum spectrum correction method has advantage in reducing noise and enhancing resolution of the ground penetrating radar data.

Key words: frequency compensation and correction; system response; resolution; deconvolution

地质雷达是利用高频电磁波来确定介质内部物质分布规律的一种地球物理方法^[1-2], 具有无损性、分辨率高、工作效率高等优点, 广泛应用于岩土工程勘察、地质超前预报、工程建筑物结构调查和考古等众多领域。但地质雷达发送的电磁波在地下传播过程中会发生衰减、频散和受到其他干扰, 特别是在软土或松动的土层介质中衰减和频散严重, 这在很大程度上限制了地质雷达的探测分辨率和最终解释效果。因此, 为了尽可能地减少衰减和频散所带来的影响, 改善地质雷达剖面记录, 提高探测分辨率, 通常会对地质雷达原始记录进行相应的处理。

这些处理手段主要包括带通滤波、多次叠加技术、反褶积、反 Q 滤波、谱白化等。这些处理方法各有所长, 在一定条件下均能取得较好的效果, 但也存在很多不足。详见参考文献[3-11], 或者查阅相应的文献资料。

以频率域信号处理技术为基础, 参考 2005 年田钢等人提出的一种利用微测井资料进行高频补偿^[12]方法, 结合反褶积技术的一些特点^[13], 本文提出了一种建立在地层系统响应模型^[14]基础上的, 可用于降低噪声干扰和提高地质雷达信号分辨率的频率补偿与校正技术。同时, 还做了与尖脉冲反褶积技术

收稿日期: 2009-05-02

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金项目(50727904); 山东省博士后创新专项资金项目(200703076); 国家自然科学基金项目(50908134, 40902084)

作者简介: 苏茂鑫(1980—), 广西北海人, 博士, 讲师, 从事应用地球物理和地下工程教学与研究工作。

应用效果的相互比较，从而可以让读者更好地了解笔者提出的频率补偿与校正技术。

1 频率补偿与校正技术的基本原理

频率补偿与校正技术，简单地说就是把地层看作一个系统，根据地层系统响应模型特点，从原始记录中求取一个或多个频率补偿与校正因子，然后利用此频率补偿与校正因子对原始记录的频谱进行校正，从而达到提高分辨率的目的。

图 1 中的 T 和 R 分别为地质雷达的发射天线和接收天线；Ch1 和 Ch2 为截取过的记录道，其中 Ch1(期望输出道)只留有 i 界面的响应子波(期望输出子波)，Ch2(期望输入道)只留有 j 界面的响应子波(期望输出子波)。

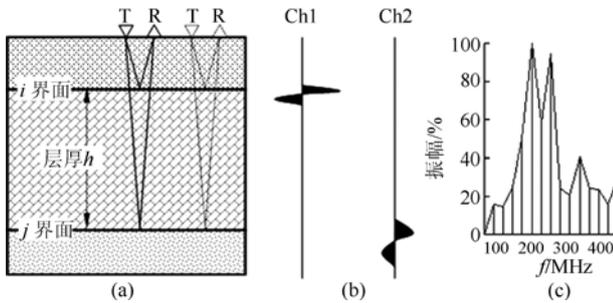


图 1 频率补偿与校正技术的基本原理图

Fig. 1 Principle of frequency compensation and correction
a——地层系统响应模型；b——截取的界面响应子波；
c——频率与补偿校正因子频谱图

设由界面 i 反射得到的地面雷达信号分别为 $x_i(t)$ ，在实际求取频率补偿与校正因子时，只截取留下此界面的一个反射子波(通常为一个视周期数据)，如图 1 中的 Ch1。 $x_i(t)$ 经过厚度为 h 的地层到达 j 界面，把这一厚度的地层看作一个系统，则此时对应的雷达信号为

$$x_j(t) = q_h x_i(t) * x_j(t), \quad (1)$$

式中 $*$ 为褶积符号； $x_j(t)$ 为 j 界面的反射子波，与 $x_i(t)$ 类似，如图 1 中的 Ch2； $q_h(t)$ 表示厚度为 h 地层对反射信号 $x_i(t)$ 的衰减影响，即系统响应。那么，反算子 $P_h = q_h^{-1} = \{p_h(t)\}$ 就可以用来校正地层 h 对反射信号 $x_i(t)$ 的影响，有

$$x_j(t) = q_h(t) * x_j(t). \quad (2)$$

将式(2)的两边做傅氏变换，有

$$X_j(f) = P_h(f) X_i(f). \quad (3)$$

其中 $X_i(f)$ 、 $X_j(f)$ 分别为 $X_i(t)$ 、 $X_j(t)$ 的傅氏变换； $P_h(f)$ 是 $P_h(t)$ 的傅氏变换。

由式(3)， $P_h(f)$ 可写为

$$P_h(f) = X_i(f) / X_j(f) = \frac{X_i(f) \overline{X_j(f)}}{|X_j(f)|^2 + \alpha^2}. \quad (4)$$

其中 α 为噪声。那么反算子 $P_h(f)$ 即为所要求取的频率补偿与校正因子。

为了应用频率补偿与校正因子 $P_h(f)$ 对原始记录进行校正，对 $P_h(f)$ 作 Hilbert 变换^[15]，则

$$P_h(f) = U_{ph}(f) + iV_{ph}(f). \quad (5)$$

其振幅谱为

$$A_{ph}(f) = |P_h(f)| = \sqrt{U_{ph}^2(f) + V_{ph}^2(f)}; \quad (6)$$

相位谱为

$$\phi_{ph}(f) = \arctg \frac{V_{ph}(f)}{U_{ph}(f)}. \quad (7)$$

那么，频率补偿与校正因子还可以写为

$$P_h(f) = A_{ph}(f) e^{j\phi_{ph}(f)}. \quad (8)$$

实际应用时，为了使校正后的数据不发生时移现象，将频率补偿与校正因子的相位谱置零，此时

$$P_h(f) = A_{ph}(f). \quad (9)$$

假设第 k 道原始记录 $x_k(t)$ 的频谱为

$$X_k(f) = U_{xk}(f) + iV_{xk}(f), \quad (10)$$

那么，经频率补偿与校正因子校正后的第 k 道原始频谱就等于

$$Y_k(f) = A_{pk}(f) \cdot X_k(f). \quad (11)$$

由于最终需要输出的是时间域记录，这时，只要利用傅立叶逆变换即可把频率域的 $Y_k(f)$ 转换到时间域，也即得到经过 h 厚度层补偿与校正后的雷达数据。

2 频率补偿与校正因子的实际求取和选择

频率补偿与校正因子的求取是地质雷达地层频谱校正最关键的一步，为了得到一个好的频率补偿与校正因子，具体应遵从以下几个步骤：

a. 求取前准备工作 首先应准备好数据所对应的地质资料情况，相应的地质资料掌握和了解越多，就越容易求得好的频率补偿与校正因子；其次视情况可对原始数据做适当的预处理工作。

b. 选择记录道 在选择记录道前，应对雷达数据对应的地质背景有一定了解，以便了解哪些地层和部位是需要校正的，这样在选择记录道时可以避免盲目性。另外，期望输入和输出道尽量选择位于同一地层中的，且经过的路径基本相同的两道，还应明确校正的目标，如想了解某一目标体的反射波特征，那么，期望输入和输出道应尽可能在探测目标体附近位置进行选择，这样才能在数据校正后突显目标体。

c. 选择期望输入和输出子波 不管是输入还是输出子波，首先应确定子波的真实性和完整性。另外，输入与输出子波应保持周期和极性的一致性。特别要注意的是，削波是不能选取的，要尽量选择有

着明显界面反射的子波。期望输出子波应该在较浅部位选择, 尽量选视频率^[14]较高的子波, 或者直接选择直达波。而期望输入子波应在期望输出子波以下较深部分选取, 尽量选视频率较低的子波。

d. 频率补偿与校正因子的选择 由于同一个地质雷达剖面记录可以求取多个频率补偿与校正因子, 这就涉及到频率补偿与校正因子的选择问题。一般来说, 选择频率补偿与校正因子的时候最好把频率补偿与校正因子的频谱图(图 1c)与被校正雷达数据的频谱图做一个对比。频率补偿与校正因子的频谱图中的能量值越大, 所对应的那部分频率的能量就会被校正得越多。所以, 通过分析被校正数据的频谱情况, 就可以利用频率补偿与校正因子频谱的这一特点选择合适的校正因子。

3 应用实例分析

下面将分别通过正演模拟数据和模型实验数据的频谱校正效果分析来验证频率补偿与校正技术对降低噪声和提高地质雷达分辨率的有效性。此外, 还给出了与尖脉冲反褶积处理效果的对比分析, 这样可以较为全面的了解频率补偿与校正技术特点和应用效果。

3.1 正演模拟数据分析

图 2 给出了一个薄层模型。

数值模型的相关参数分别为: 测量方式为剖面测量; 天线中心频率为 200 MHz; 天线距为 1 m; 点距为 0.1 m; A 介质的电性参数为: 相对介电常数 $\epsilon_r=5$, 电导率 $\sigma=0.0005$ S/m, 相对磁导率 $\mu_r=1$; B 介质的电性参数为相对介电常数 $\epsilon_r=30$, 电导率 $\sigma=0.000$ 1S/m, 相对磁导率 $\mu_r=1$; 模型的相关长度和厚度在图 2 中均有标注, 其中 T 和 R 分别为发射和接收天线。

考虑到实际雷达探测的垂直分辨率是以 $\lambda/4$ (1/4 波长) 为上限, 为了说明频谱校正技术在提高垂直分辨率上的能力, 这里设薄层厚度为 0.2 m。

对于此薄层模型, 在求取频率补偿与校正因子时, 选择了直达波子波为期望输出子波, 而期望输

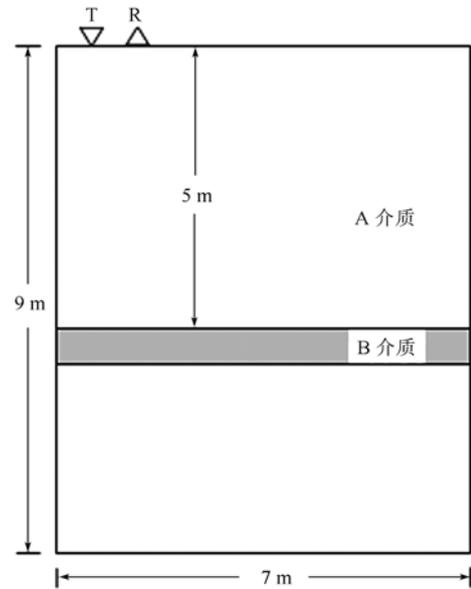


图 2 地质雷达数值模拟模型示意图

Fig. 2 Sketched digital simulation model of ground radar

入子波则为薄层的反射子波。校正前后的频谱对比图和时间域剖面对比图分别见图 3 和图 4。

从校正前后剖面所对应的频谱图可以看到, 校正前高频能量不足, 从 200 MHz 往后, 高频能量迅速下滑。而校正后的频谱, 高频部分的能量的百分比得到了很大提高, 衰减变得缓慢, 有效频带宽度也得到了很大展宽, 对应的时间剖面可以清晰分辨薄层的上下界面反射。尖脉冲反褶积处理后的频谱, 虽然其频宽比校正后的频谱要宽, 但对应的时间剖面的分辨率效果并不如频谱校正后的效果。这就说明了尖脉冲反褶积这种通过压缩子波来提高频带宽度的方法只是盲目地试图提高每一频率成份的能量, 其结果只能造成有效信号和噪声同时被放大, 并不能象频率补偿与校正技术那样具有明显针对性。另外, 尖脉冲反褶积还会产生时移现象, 容易产生解释错误。

3.2 实验数据分析

图 5 给出了一个水槽实验模型。

水槽模型的相关参数为: 天线的中心频率为 900 MHz, 测量方式为点测, 点距为 5 mm。模型中

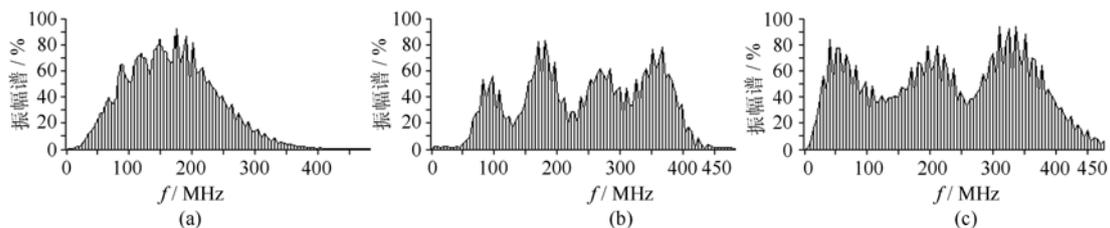


图 3 频谱对比图

Fig. 3 Comparison of frequency spectrum
a——原始记录频谱; b——校正后频谱; c——尖脉冲反褶积频谱

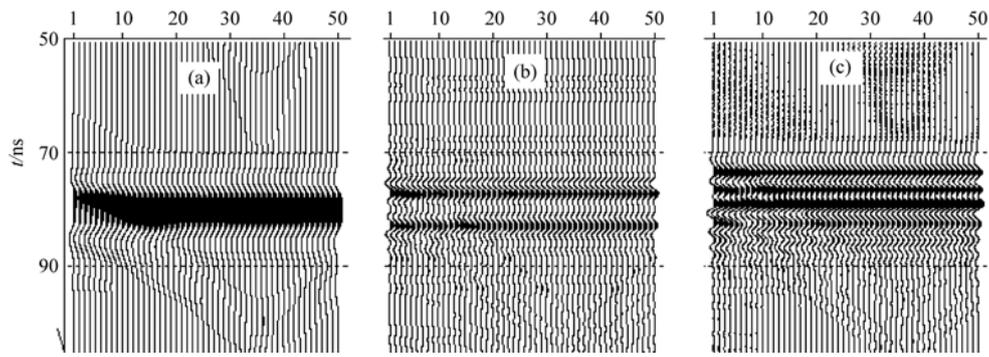


图 4 时间剖面对比

Fig. 4 Comparison of time profiles

a——原始时间剖面；b——校正后的时间剖面；c——尖脉冲反褶积后的时间剖面

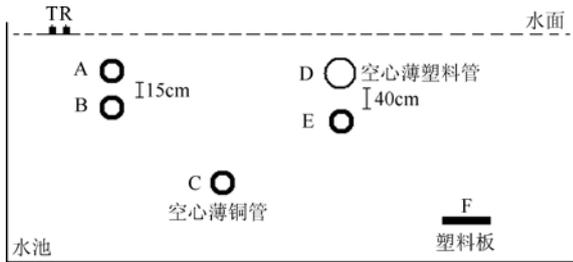


图 5 水槽模型

Fig. 5 Water trough model

的 A、B、C、E 均是直径为 4 cm、长为 50 cm 的空

心薄铜管。D 是直径为 5 cm、长为 50 cm 的空心薄塑料管。E 为长 35 cm、宽 20 cm、厚 1.5 cm 的塑料板。A 和 D 离水面均为 50 cm；C 离水面 120 cm；F 离水面 150 cm。A、C、D、F 的横向间距为 33 cm。其中 T 和 R 分别为发射和接收天线。

由于水池里除了目标体外，就只有水(自来水)一种介质，为了突出 F 目标体，从最深的 F 目标体附近选择期望输入子波，从 D 目标体附近选择期望输出子波，来求得频谱校正因子。经频谱校正因子校正前后的频谱和时间剖面对比如图 6 和图 7。

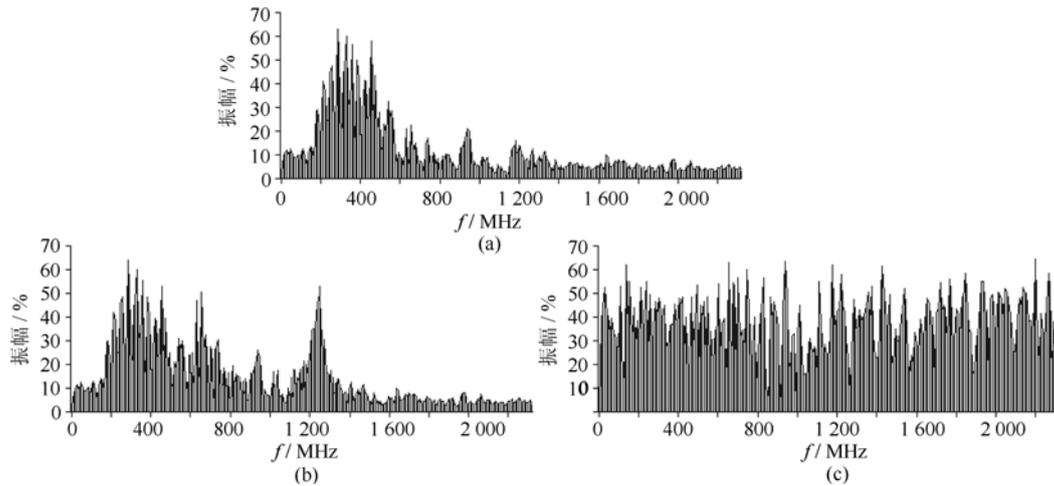


图 6 频谱对比图

Fig. 6 Comparison of frequency spectrum

a——原始记录频谱；b——校正后频谱；c——尖脉冲反褶积频谱

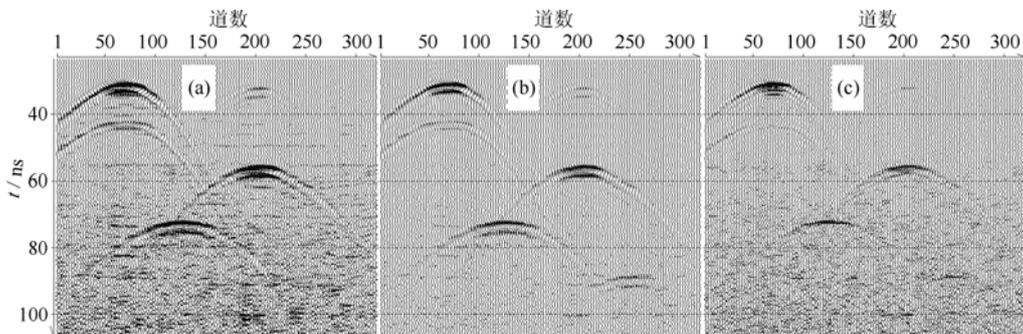


图 7 时间剖面对比

Fig. 7 Comparison of time profiles

a——原始时间剖面；b——校正后的时间剖面；c——尖脉冲反褶积后的时间剖面

从图 6 和图 7 可以看到, 校正后的频谱, 在保留低频成份能量基本不变的情况下, 有效地提高了高频成份的能量。在对应的时间剖面上, 由于高频能量所占百分比得到了提升, 而噪声能量百分比下降, 信噪比得到较大改善, 可以清晰地分辨 F 目标体的反射信号。这里同样附上尖脉冲反褶积处理后的频谱和对应的时间剖面, 仔细对比观察后可以发现, 尖脉冲处理后的频谱接近于谱白化, 整个频段范围的能量都很高, 而由于噪声的存在, 处理后对应的时间剖面, 特别是深部的信噪比并没得到较好的改善, 分辨率也一般, 虽然比原始剖面的信噪比和分辨率要好, 但相对于地层频谱校正后的效果要差。这进一步说明了频率补偿与校正技术在降低噪声干扰和提高分辨率处理上相比于尖脉冲反褶积具有一定的优势。

4 结论与展望

a. 理论和实践表明, 建立在地层系统响应模型基础上的地质雷达频率补偿与校正技术是可行的, 在降低噪声干扰和提高分辨率方面取得了较好的实验效果。

b. 频率补偿与校正因子的好坏直接影响到地质雷达频率补偿与校正技术的应用效果。所以, 在实际应用频率补偿与校正技术时, 求取和选择一个好的频率补偿与校正因子是关键。

c. 在试图拓宽频谱处理上, 尖脉冲反褶积处理带有一定盲目性, 而频率补偿与校正技术则是一种具有针对性处理方法, 其对应的物理意义也很明确, 易于理解。另外, 由于地层频谱校正技术是建立在地层系统响应模型基础之上, 在期望输入或输出子波的选择上要比反褶积方法灵活很多。因此, 在对地质雷达信号的干扰消除和提高分辨率处理上, 频率补偿与校正技术要比一些经典反褶积方法具有一定的优势。

d. 由于雷达波和地震波遵循同一形式的波动方程, 在运动学上具有相似性, 因此, 频率补偿与校正技术理论上讲也适合于地震反射波的频谱校正处理, 但其应用效果如何还需做进一步研究。

在实际探测中, 地下介质分布较为复杂, 如果测线较长, 经过的地层情况可能相差较大, 此时, 可

以根据探测要求, 考虑在测线上分段^[16]求取校正因子并施以频谱校正处理。地层频谱校正技术在实际应用过程可能还会碰到各种新问题, 需要不断加以完善和提高。总而言之, 地层频谱校正技术在降低噪声干扰和提高分辨率上存在着一定优势, 可作为地质雷达噪声干扰和分辨率处理的一种较好的补充方法。

参考文献

- [1] 李大心. 地质雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [2] 曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 地质雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 赵永辉, 吴健生, 万明浩. 多次叠加技术在地质雷达资料处理中的应用[J]. 物探与化探, 2000, 24(3): 215-218.
- [4] WANG B B, TIAN G, SUN B. An analysis of the multi-fold method for GPR exploration the application of multiple stacking technique to the data-processing work of ground-penetrating radar[J]. Apply Geophysics, 2006, 3(3): 187-191.
- [5] PEDRO X N. A practical approach to correct attenuation effects in GPR data [J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 59: 140-151.
- [6] TURNER G, SIGGINS A F. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses [J]. Geophysics, 1994, 59(8): 1192-1200.
- [7] TIM B, KLAUS H. Finite-difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media [J]. Geophysics, 1998, 63 (3): 856-867.
- [8] JAMES D I, ROSEMARY J K. Removal of wavelet dispersion from ground-penetrating radar data [J]. Geophysics, 2003, 68(3): 960-970.
- [9] 唐建人, 李学勤, 王允清, 等. 高分辨率地震勘探理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [10] 周洁玲, 成世琦. 反褶积与信噪比的关系研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2002, 17(4): 24-27.
- [11] 张志勇. 地质雷达谱白化法[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 159-161.
- [12] 田钢, 石战结, 董世学, 等. 利用微测井资料补偿地震数据的高频成分[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(5): 546-547.
- [13] YILMAZ O. 地震数据处理[M]. 黄德绪, 译. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [14] 李庆忠. 走向精确勘探道路-高分辨地震勘探系统工程剖析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [15] 程乾生. 数字信号处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [16] 孙成禹. 空变地震子波提取方法研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(1): 77-84.