

黄忠来, 张建中. 利用探地雷达频谱反演层状介质几何与电性参数. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1381-1391, doi: 10. 6038/ cjpg20130432.

Huang Z L, Zhang J Z. An inversion method for geometric and electric parameters of layered media using spectrum of GPR signal. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(4): 1381-1391, doi: 10. 6038/ cjpg20130432.

利用探地雷达频谱反演层状介质几何与电性参数

黄忠来¹, 张建中^{2*}

1 厦门大学信息科学与技术学院, 厦门 361005

2 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

摘 要 通过对地下层状介质探地雷达(GPR)回波广义反射系数的奇偶分解,建立了联系 GPR 反射系数序列频谱与介质几何参数、电性参数的代价函数,这些介质参数包括地下反射面的深度、层厚度以及各层的介电常数和电导率,从而提出了一种由 GPR 频谱同时估算地下介质多参数的全局优化反演方法. 为了对多参数全局优化算法给出一个合理的参数初值,研究了不同参数对反射系数序列频谱属性的影响规律,提出了利用不同频谱属性分别估算不同参数的分步反演方法. 以分步反演方法得到的结果作为多参数全局优化反演的初值,可以极大地提高反演计算的效率和反演结果的可靠性. 用理论模型合成数据和 GPR 公路检测数据对本文方法进行了测试,结果表明本文方法效果良好,具有较高的分辨率,能较好的给出厚度小于调谐厚度的薄层的深度、厚度和介电常数等参数.

关键词 层状介质, 探地雷达, 频谱反演, 广义反射系数

doi: 10. 6038/ cjpg20130432

中图分类号 P631

收稿日期 2012-04-25, 2013-03-13 收修定稿

An inversion method for geometric and electric parameters of layered media using spectrum of GPR signal

HUANG Zhong-Lai¹, ZHANG Jian-Zhong^{2*}

1 School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract The generalized reflection coefficients of underground layered media for Ground Penetrating Radar (GPR) wave are defined and a pair of the coefficient of three-layer media is decomposed into the even component and the odd one. A cost function is established to connect the spectrum of reflection coefficient sequence with the layer's parameters, which include position of reflection interfaces, layers' thickness, dielectric permittivity and electric conductivity. Then a global optimal inversion method is proposed for multiple parameters of underground layered media from GPR signal spectrum. Moreover, through the research on the effects of different parameter on the spectrum of reflection coefficient sequence, a method for estimation of different parameter from different spectral attributes is proposed, namely staged inversion method. The result of the staged inversion was used as the starting value for the global inversion, the efficiency and accuracy of which were then improved greatly. The methods in this paper were tested using synthetic and observed data, and good results of layer thickness, interface position and electric

基金项目 国家自然科学基金项目(41074077, 40774065)资助.

作者简介 黄忠来,男,1982年生,博士研究生,主要从事探地雷达信号处理研究.

* **通讯作者** 张建中,男,1963年生,教授,主要从事地球物理勘探方法研究. E-mail: zhangjz@ouc.edu.cn

properties were obtained, even when thickness of the layer is less than tuning thickness.

Keywords Layered media, Ground Penetrating Radar (GPR), Spectral inversion, Generalized reflection coefficients

1 引言

探地雷达(GPR)具有分辨率高、无损、快速等优点,是探测近地表介质的主要技术之一.利用GPR,不仅可以得到地层的埋深和厚度,也可以获取地下反射面的反射系数以及地层的介电常数和电导率等参数,为此,人们在正演^[1-4]和反演方面^[5-9]做了很多研究.目前层状介质参数的反演方法大体可分为时域反演和频域反演两类.在时域反演算法中,Chien等^[10]利用地震勘探中的共中心点方法(CMP),求取地下两层介质的厚度和介电常数,张蓓^[11]根据路面层状结构,在时域对探地雷达波进行反演,得到层的复介电常数和厚度,但是这两种方法都要求在时域能够分辨出不同反射层的回波;另一些算法则要求有先验信息作为基础,如Huang等^[12]采用参数校验方法,通过在介电常数计算式中引入校验参数来求取水平路基的层厚和介电常数,但需要事先利用钻孔得到地下介质的有关参数.在频域反演方面,通过建立频域正演模型,不断改变模型参数,使模型计算的回波频谱与实际数据频谱一致,获取地层的厚度和电性参数.Qin等^[13]通过求取电磁波在层状介质中的传输函数,反演地层的厚度和广义反射系数,但不能求得地层的电性参数;Minet以及Lambot等^[14-16]利用Green函数建立目标函数,反演厚度和电性参数,但参数过多时,只有给出目标层的先验信息后才能取得较好的结果.谱反演算法^[17]是最近提出的利用地震记录的频谱,反演地层深度、厚度和反射系数的新方法.与时域反演方法相比,谱反演算法对薄层(如油气储层)有较强的适应性.本文在谱反演算法^[17]的基础上,结合电磁波在层状介质中的传播规律和GPR信号频谱特征,提出了一种利用地下层状介质GPR回波信号频谱,同时估算介质几何参数和电性参数的频域反演算法;通过分析模型参数对GPR频谱的影响规律,提出了分别单独估计一个或几个参数的分步反演方法,并以此结果作为进一步同时反演所有参数的初始值.最后,用理论模型的模拟数据和实测数据对方法进行了测试.

2 频谱反演方法原理

GPR测量目标往往处于天线场远区^[18-19],且GPR多发射高频电磁脉冲.利用傅里叶变换,电磁脉冲可以分解为一系列不同频率的谐波,而这些谐波的传播都可以近似为平面波的传播形式.可见GPR的理论基础是平面波在介质中的传播规律^[20].因此,本文将雷达波作为平面波处理.对于GPR发射的电磁波来说,地下介质实际上是非理想的有耗介质,电磁波在传播时会逐渐衰减,影响传播的因素除了反射系数、透射系数外还有衰减常数.当介质为非理想介质时,电导率 $\sigma \neq 0$,等效介电常数 $\epsilon_c = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$ 为复数,此时波数 $k_c = \omega \sqrt{\mu \epsilon_c}$,传播常量的定义为^[21]

$$\gamma = jk_c = \alpha + j\beta. \quad (1)$$

其中, $\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} - 1 \right]}$ 为衰减常数,单位为Np/m,表示电磁波在传播1m后单位振幅衰减至 e^{-1} ; $\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} + 1 \right]}$ 为相位常数,单位为rad/m,表示波传播1m后的相移; ϵ 为介电常数, σ 为电导率, ω 为角频率.对于理想介质, $\sigma = 0$,则 $\alpha = 0$, $\beta = k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$.

图1所示的是包含4个反射系数的5层介质模型,虚线表示地面,其 z 轴坐标定为0,地下第 i 个反射层的深度用 d_i 表示,从上到下各层的介电常数分

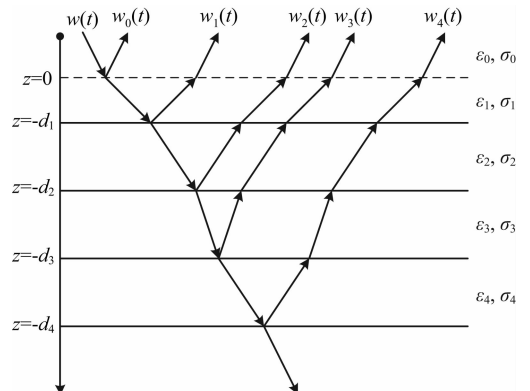


图1 探地雷达波在地下传播路径示意图

Fig. 1 Propagation path of GPR wave in layered media

别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 和 ϵ_4 , 各层电导率分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 和 σ_4 , 空气的介电常数为 ϵ_0 , 电导率为 σ_0 . $\omega(t)$ 为雷达发射波, $\omega_0(t), \omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t)$ 和 $\omega_4(t)$ 分别是在地表和地下各反射面的一次反射回波. 这里, 我们假设介质为非磁性介质, 并仅考虑雷达波入射角接近 0° , 即单天线形式 (Monostatic mode) 雷达或发射天线和接收天线之间的距离很小的情况. 为清晰起见, 图中将入射波角度放大, 并将回波路径分开表示. 第 i 层和 $i+1$ 层之间反射面的反射系数 $r_{i,i+1}$ 和透射系数 $\tau_{i,i+1}$ 分别为^[22-23]:

$$r_{i,i+1} = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}}, \quad (2)$$

$$\tau_{i,i+1} = \frac{2\sqrt{\epsilon_i}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}}. \quad (3)$$

且 $\tau_{i,i+1} = 1 + r_{i,i+1}$.

定义广义反射系数 $\bar{r}_{i,i+1}$ 为各反射回波与雷达发射波的电场强度之比, 则地下第一个反射界面的广义反射系数 \bar{r}_{12} 为

$$\begin{aligned} \bar{r}_{12} &= \tau_{01} e^{-\alpha_1 z_1} e^{-j\beta_1 z_1} r_{12} e^{-\alpha_1 z_1} e^{j\beta_1 z_1} \tau_{10} \\ &= r_{12} (1 - r_{01}^2) e^{-2\alpha_1 z_1} e^{-\alpha_0 z_0}, \end{aligned} \quad (4)$$

第二个反射界面的广义反射系数 \bar{r}_{23} 为

$$\begin{aligned} \bar{r}_{23} &= \tau_{01} e^{-j\beta_1 z_1} \tau_{12} e^{-j\beta_2 z_2} r_{23} e^{j\beta_2 z_2} \tau_{21} e^{j\beta_1 z_1} \tau_{10} e^{-2\alpha_1 z_1} e^{-2\alpha_2 z_2} e^{-\alpha_0 z_0} \\ &= r_{23} (1 - r_{01}^2) (1 - r_{12}^2) e^{-2\alpha_1 z_1} e^{-2\alpha_2 z_2} e^{-\alpha_0 z_0}, \end{aligned} \quad (5)$$

以此类推, 第 i 个广义反射系数 $\bar{r}_{i,i+1}$ 为

$$\bar{r}_{i,i+1} = r_{i,i+1} \prod_{k=0}^{i-1} (1 - r_{k,k+1}^2) \prod_{k=1}^i e^{-2\alpha_k z_k}. \quad (6)$$

式中, z_i 为波在第 i 层单向传播的距离, $\alpha_0 = 0$. 可以看到, 广义反射系数是电磁波在介质中传播距离以及介质电性参数的函数.

定义了广义反射系数后, 我们构造用于反演目标层深度、厚度以及电性参数的代价函数. 以下考虑地下含有两个水平反射界面的三层介质情况, 如图 2a 所示. 若上、下广义反射系数分别为 r_1 和 r_2 , 将地面作为时间零点, 上界面到地面的时间距离为 t_0 , 下界面到地面的时间距离为 t_1 , 中间层的时间厚度

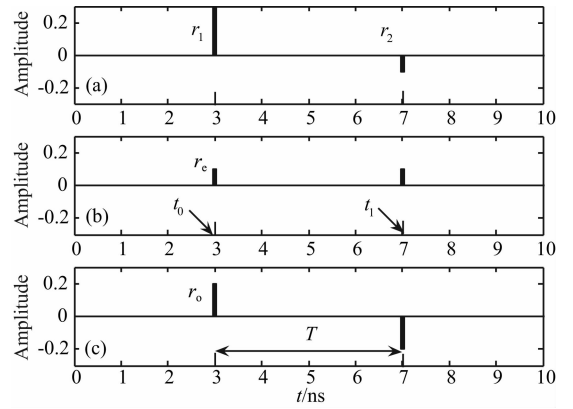


图 2 三层介质反射系数模型

Fig. 2 Reflection coefficients of a three-layer model

为 T , 则反射系数序列可以表示为

$$\bar{r}(t) = r_1 \delta(t - t_0) + r_2 \delta(t - t_1), \quad (7)$$

如果将分析窗口的时间零点放在中间层的中点位置, 那么反射系数序列的表达式变为

$$\bar{r}(t) = r_1 \delta(t + T/2) + r_2 \delta(t - T/2), \quad (8)$$

对上式进行傅里叶变换, 得到该反射系数序列的频谱:

$$\bar{r}(f) = r_1 \exp(i\pi f T) + r_2 \exp(-i2\pi f T), \quad (9)$$

将它表示成三角函数形式:

$$\bar{r}(f) = (r_1 + r_2) \cos(\pi f T) + i(r_1 - r_2) \sin(\pi f T). \quad (10)$$

令 $r_e = (r_1 + r_2)/2$, $r_o = (r_1 - r_2)/2$, 则^[17]:

$$\bar{r}(f) = 2r_e \cos(\pi f T) + i2r_o \sin(\pi f T). \quad (11)$$

其中, $\text{Re}[\bar{r}(f)] = 2r_e \cos(\pi f T)$, $\text{Im}[\bar{r}(f)] = 2r_o \sin(\pi f T)$ 分别是实部和虚部. 从定义式可以看出 r_e 和 r_o 分别是对 $\bar{r}(t)$ 进行奇偶分解后所得的偶分量和奇分量^[17], 如图 2(b,c) 所示. 实际上, 分析窗口的时间零点很难正好位于两反射系数的中点, 因此, 在式(11)的基础上导出窗口零点位置不在反射系数对中点的代价函数. 当时间零点位置在地面时, 反射系数序列 $r(t)$ 为

$$r(t) = r_1 \delta(t - t_0) + r_2 \delta(t - t_0 - T). \quad (12)$$

容易看出, $r(t) = \bar{r}\left(t - t_0 - \frac{T}{2}\right)$, 其频谱为

$$r(f) = \bar{r}(f) \exp\left[-i2\pi f\left(t_0 + \frac{T}{2}\right)\right] = [2r_e \cos(\pi f T) + i2r_o \sin(\pi f T)] \left\{ \cos[\pi f(2t_0 + T)] - i \sin[\pi f(2t_0 + T)] \right\}. \quad (13)$$

其实部和虚部分别为

$$\text{Re}[r(f)] = 2r_e \cos(\pi f T) \cos[\pi f(2t_0 + T)] + 2r_o \sin(\pi f T) \sin[\pi f(2t_0 + T)], \quad (14)$$

$$\text{Im}[r(f)] = -2r_e \cos(\pi f T) \sin[\pi f(2t_0 + T)] + 2r_o \sin(\pi f T) \cos[\pi f(2t_0 + T)]. \quad (15)$$

若雷达发射子波频谱为 $w(f)$, 接收到的反射回波频谱为 $s(f)$, 则地下介质的反射系数序列的频谱为

$$r(f) = s(f)/w(f). \quad (16)$$

用雷达记录反射系数序列实部和虚部分别与褶

积模型反射系数序列实部和虚部之差的绝对值之和,定义的代价函数为

$$O(r_e, r_o, t_0, T) = \sum_{f=f_L}^{f_H} \left\{ abs \left[\text{Re}(s(f)/w(f)) - 2r_e \cos(\pi f T) \cos(\pi f(2t_0 + T)) - 2r_o \sin(\pi f T) \sin(\pi f(2t_0 + T)) \right] \right. \\ \left. + abs \left[\text{Im}(s(f)/w(f)) + 2r_e \cos(\pi f T) \sin(\pi f(2t_0 + T)) - 2r_o \sin(\pi f T) \cos(\pi f(2t_0 + T)) \right] \right\}. \quad (17)$$

其中, abs 表示绝对值; f_H 和 f_L 分别是所用频谱的频率上限和下限,将根据实际数据中所含噪声的分布情况确定,即尽量选取噪声较少的频带. 该代价函数的未知量包括目标层上反射面的时间位置 t_0 , 目标层的时间厚度 T , 广义反射系数对的偶分量 r_e 和奇分量 r_o . 由于广义反射系数是电性参数的函数,把代价函数中的广义反射系数奇、偶分量用电性参数替换,此时代价函数可表示成 $O(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n, t_0, T)$. 通过求解代价函数的最小值问题,就可以得到地下各层的时间位置、厚度和电性参数,从而实现地下介质几何参数和电性参数的同时反演.

3 反演问题的解法

3.1 全局优化算法

对于求解像(17)式的多参数代价函数的极小值问题,我们采用在模拟退火算法上改进的随机爬山法^[24]. 算法步骤为

(1)产生初始未知参数向量 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$. 每个参数的值可以在规定的范围内随机生成,也可以根据先验信息给定. 记初始参数向量对应的代价函数为 O .

(2)在 $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N\}$ 中随机选取一个参数进行修改. 例如选取的是第 i 个变量 x_i , 则修改后 x_i 变为 \tilde{x}_i , 且 $\tilde{x}_i = x_i + \text{sign} \cdot d \cdot \text{rand}$. sign 是随机选取的正负符号, -1 或 1 . rand 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数, d 为修改步长,用以控制修改参数的速度和精度. 对于本文的几何和电性参数,需给定不同的 d 值.

(3)用修改后的参数 \tilde{x}_i 代替 x_i , 产生新的参数向量 $\tilde{\mathbf{X}} = \{x_1, x_2, \dots, \tilde{x}_i, \dots, x_N\}$, 它对应的代价函数为 \tilde{O} .

(4)若 $\tilde{O} < O$, 则接受本次对参数进行的修改; 否则不接受修改,继续随机选择下一个变量. 重复(2)到(4)的操作,直到最后计算出的代价函数值满足收敛条件,或者迭代次数超过设定值为止. 每次修改时的步长 d 不是固定的,开始时为了加快收敛速度,步长可以取得较大,在算法的结果不再明显变化

后,逐渐减小 d ,从而提高每次修改的精度.

3.2 分步反演方法

通过分析有关参数与 GPR 回波信号频谱之间的变化特征,提出了分别确定未知参数的分步反演方法.

考察广义反射系数序列的频谱:

$$r(f) = [2r_e \cos(\pi f T) + i2r_o \sin(\pi f T)] \\ \times \exp \left[-i2\pi f \left(t_0 + \frac{T}{2} \right) \right], \quad (18)$$

其幅度谱为

$$|r(f)| = \sqrt{4r_e^2 - 2(r_e^2 + r_o^2)[1 - \cos(2\pi f T)]}. \quad (19)$$

对上式求导并令导数为 0, 即,

$$\frac{d|r(f)|}{df} = \frac{-2\pi T(r_e^2 + r_o^2)\sin(2\pi f T)}{\sqrt{4r_e^2 - 2(r_e^2 + r_o^2)[1 - \cos(2\pi f T)]}} = 0. \quad (20)$$

解之得

$$f = \frac{n-1}{2T}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (21)$$

f 表示幅度谱极大值点和极小值点的频率, 这些极大值点和极小值点分别是周期性分布的, 相邻极小值点频率之差, 即幅度谱凹陷周期为

$$\Delta f = f(n+1) - f(n-1) = \frac{1}{T}. \quad (22)$$

(22)式表明,幅度谱凹陷周期由时间厚度 T 决定,而与其它参数无关. 例如当 T 分别取 $T_1 = 6.67$ ns 和 $T_2 = 3.33$ ns, 其它参数保持不变时,幅度谱凹陷周期分别为 $\Delta f_1 = 150$ MHz 和 $\Delta f_2 = 300$ MHz, 如图 3 所示. 利用这一点,我们就可以在不考虑其它参数的情况下,仅利用反射系数序列幅度谱凹陷周期来确定 T . 当层的厚度很小时,反射系数幅度谱凹陷周期将很大,若超出所设定的反演频带,就不能使用(22)式估算 T . 这时,可以找出幅度谱的第一个极大值点频率,峰值频率 f_p ,再利用(21)式估算 T ,在式(21)中令 $n=2$,即得到 $T=1/(2f_p)$.

从(21)和(22)式可以看出,随着层厚度的减小,反射系数幅度谱的第一个峰值频率和幅度谱凹陷周期将不断增大. 即使当层厚度小于调谐厚度时,反射系数幅度谱也有这样明显的变化规律,从而可以利

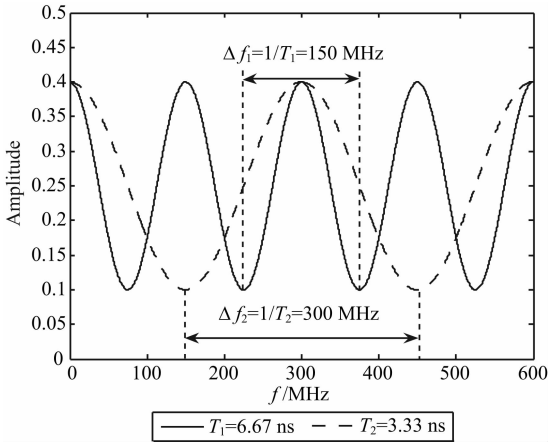
图3 幅度谱凹陷周期与层时间厚度 T 的关系

Fig. 3 Relationship between amplitude spectral notches period and layer's temporal thickness T

用频谱分辨或反演小于调谐厚度的薄层。

将相位谱分为两个部分,第一部分不包含参数 t_0 ,第二部分不包含反射系数的奇偶分量:

$$\angle r(f) = \theta_1 + \theta_2, (\theta_1, \theta_2 \in [-\pi, \pi]). \quad (23)$$

其中,

$$\theta_1 = \arctan\left[\frac{r_o}{r_e} \tan(\pi f T)\right], \quad (24)$$

$$\theta_2 = \arctan[-\tan(2\pi f t_0 + \pi f T)]. \quad (25)$$

由于 r_o/r_e 与频率 f 无关,所以相位谱 $\angle r(f)$ 随频率 f 变化的快慢由 t_0 和 T 决定,且 θ_1 随频率 f 的变化速度比 θ_2 慢 $2\pi f t_0$. 当 T 按上述方法被确定后,就可以利用相位谱的变化快慢估算 t_0 . 为说明 r_o/r_e 对于相位谱的影响,我们随机给定一组参数向量,并使其它参数保持不变,只改变 r_o/r_e 的值,相应的相位谱如图4所示. Δf 是相位发生跳变前持续的频率间隔,基本不随 r_o/r_e 变化,这说明 r_o/r_e 比值主要影响相位谱的幅值,而对相位谱变化快慢的影响很小. 这样,在确定 T 参数后,就可以单独估算 t_0 .

考察相位谱中不含参数 t_0 的项 θ_1 . 由式(3)可以得,当地下有三层介质时,

$$\frac{r_o}{r_e} = \frac{(\bar{r}_1 - \bar{r}_2)/2}{(\bar{r}_1 + \bar{r}_2)/2} = \frac{r_1 - r_2(1 - r_1)e^{-2\alpha_2 z_2}}{r_1 + r_2(1 - r_1)e^{-2\alpha_2 z_2}}. \quad (26)$$

由于 r_1 和 r_2 只与介电常数有关, α_2 由第 $i+2$ 层介质的电导率以及介电常数决定, z_2 由 T 以及第2层的介电常数决定. 即当 T 和 t_0 被确定以后,影响相位谱的只有3层的介电常数和第2层的电导率. 这样,仅利用相位谱就可以反演三个介电常数和中间层的电导率.

通过上面分析可知,不同参数对反射系数序列频谱的影响是不同的. T 单独决定了幅度谱凹陷周

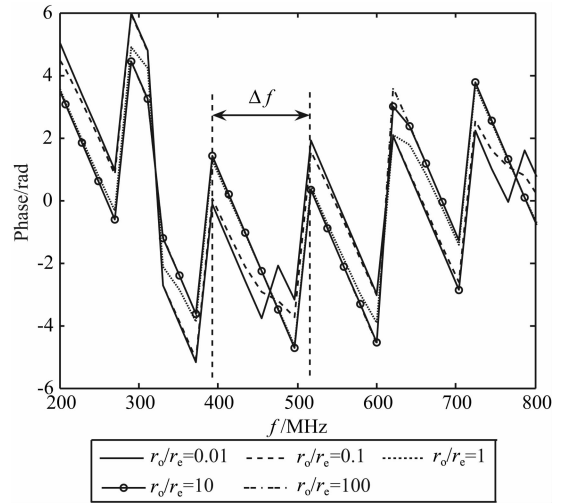
图4 相位谱随 r_o/r_e 值的变化

Fig. 4 Variation of phase spectrum with the value of r_o/r_e

期大小, t_0 和 T 共同影响相位谱的变化快慢, t_0 和各层的介电常数以及中间层电导率则完全确定了相位谱. 因此,可以这样分别确定这些参数:首先根据幅度谱的凹陷周期确定厚度参数 T ,再根据相位谱的变化速度反演时间位置参数 t_0 ,然后根据相位谱反演3层的介电常数和中间层的电导率,最后反演上层的电导率. 采用随机爬山法分别反演 t_0 、三个介电常数以及中间层电导率.

这里用理论数据来说明分步求取参数的有效性. 图5和图6中的实线是利用正确参数向量生成的反射系数序列的频谱;点线是利用估算的参数向量生成的反射系数序列的频谱. 其中,图5(a,b)中的点线分别是由随机生成的一组参数向量计算出的反射系数序列频谱的幅度谱和相位谱,与理论频谱相差较大;图5c中点线是利用幅度谱凹陷周期估计 T 后计算的振幅谱. 可以看到在其它参数保持为原随机生成的参数值的情况下,估算的 T 使幅度谱凹陷周期与理论一致,当然相位谱仍然相差很大,如图5d所示. 图6(a,b)中的点线是在图5估算的 T 的基础上,利用相位谱估算 t_0 ,且其它参数不变时计算的幅度谱和相位谱. 可以看出,估算的 t_0 值使相位谱更接近理论值,且 t_0 的改变并不影响幅度谱的凹陷周期. 图6(c,d)中的点线是由前面确定的 T 和 t_0 值以及继续反演三层的介电常数以及中间层的电导率后计算的幅度谱和相位谱,这时计算的频谱与理论频谱基本一致,其小的差别是因为上层的电导率没有估算而随机选取的缘故. 可以看出,这样求出的介质参数值与理论参数值比较接近,计算的频谱也与理论频谱比较接近. 这种分步求取参数的好处是

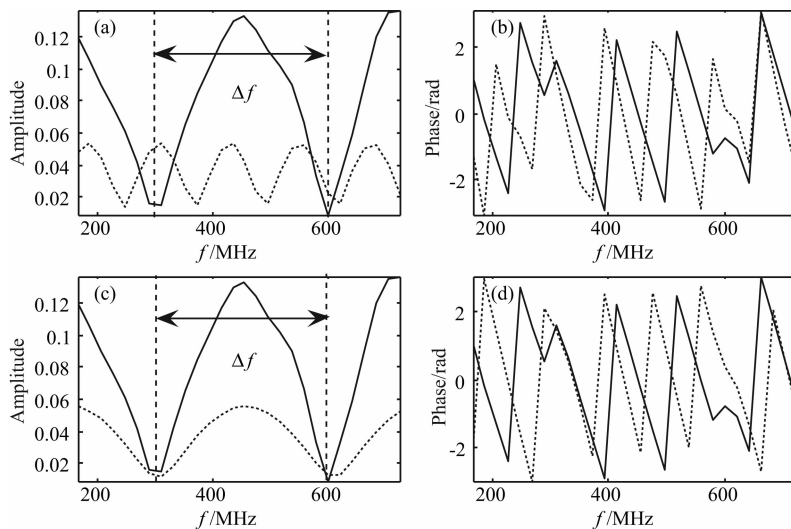
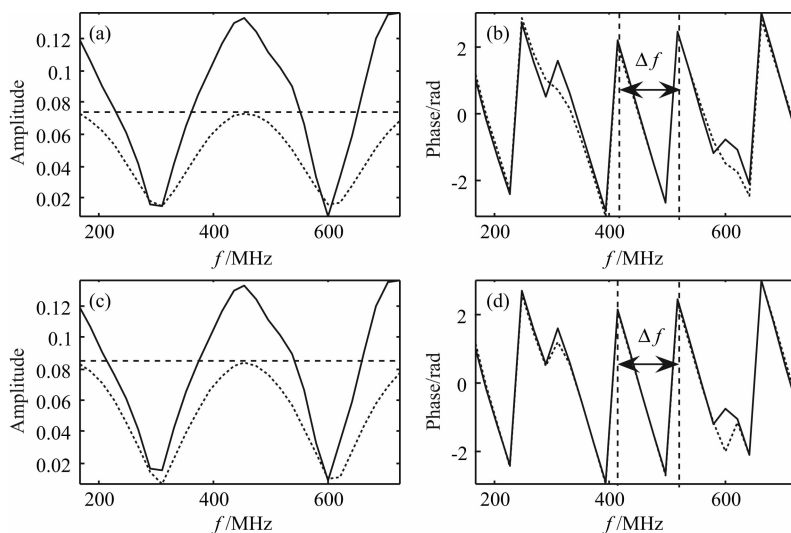
图 5 不同参数 T 计算的频谱与理论频谱的比较Fig. 5 Comparison of true spectra and those calculated using two parameter vectors with different T 

图 6 不同反演参数计算频谱与理论频谱的比较

Fig. 6 Comparison of true spectra and those calculated using different inverted parameters

可以极大地减少每次反演的未知量个数,降低收敛到局部最小值的几率,提高运算效率和反演结果的可靠性.特别是能在没有先验信息情况下的多参数全局优化算法提供接近真解的初值.

4 实验例子

分别利用理论模型合成数据和实测资料对本文方法进行了测试和应用.理论模型采用楔形目标模型,以测试反演方法对不同厚度目标层的有效性.实测资料是收集到的公路路面 GPR 检测数据.

4.1 理论模型实验

使用 GPRMax^[25]建立了楔形目标层模型并合成了理论 GPR 数据.发射雷克子波中心频率为 300 MHz;

上中下三层的介电常数 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 分别为 9、16 和 9,电导率 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为 0.02、0.01 和 0.02;楔形层上界面的反射系数为 -0.25,下界面反射系数为 0.25;楔形层上界面距离地表 0.38 m,楔形层的最大厚度为 0.125 m,是雷达发射波在楔形中波长的 1/2, 1/4 波长的调谐厚度位于第 25 道处.模型及楔形层上下反射面位置、楔形厚度以及各层电性参数的反演结果如图 7 和图 8 所示.可以看到,当目标厚度小于调谐厚度时,依然可以得到正确的反演结果.

现在以模型第 35 道为例,说明采用分步反演结果作为初始值的效果.图 9 给出了分别采用不同初始值时,代价函数随迭代次数的变化.实线为初始值采用分步反演结果,当迭代次数为 1200 次时就已收敛,对应的代价函数值是 0.2834;点划线的初值是

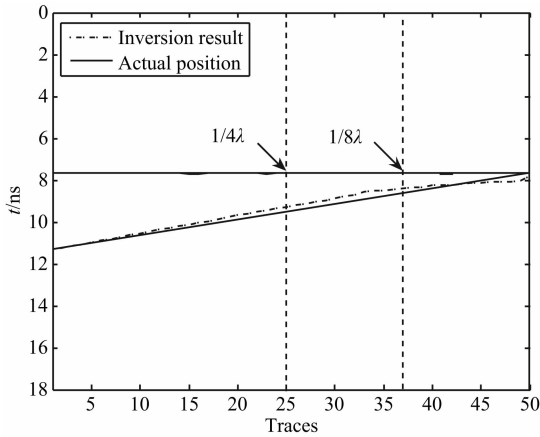


图7 楔形层的理论和反演边界

Fig. 7 True and inverted boundaries of the wedge model

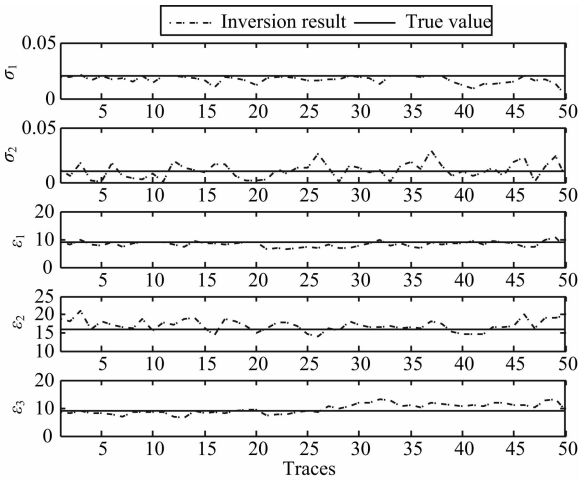


图8 楔形模型的理论和反演的电性参数

Fig. 8 True and inverted electric parameters of the wedge model

随机生成的,当迭代次数超过 2500 时才收敛,对应的代价函数是 0.4269. 显然,用分步反演结果作为初值时,反演收敛得更快且收敛于更小的代价函数值. 表 1 列出了参数理论值、用作初值的分步反演结果和同时反演结果,图 10 是用该反演结果计算的幅度谱(a)及相位谱(b)与理论频谱之间的对比.

从上述反演结果可以看到,当楔形层的厚度大于 $1/8$ 波长(即图 7 中第 37 道位置)时,本文方法可以给出较准确的上反射面时间位置和楔形层的时间厚度,电性参数也基本都在理论值附近;当楔形层厚度小于 $1/8$ 波长后,反演结果误差较大. 总的来说,深度和厚度参数的反演结果优于电性参数的结果. 对目标层的时间厚度 T 的反演较准确,这是因为幅度谱凹陷周期大小主要与它相关,而与其它参数的联系不密切,分步反演给出了非常接近真值的初始值. 同样,使用与反射面位置参数 t_0 相关而与其它

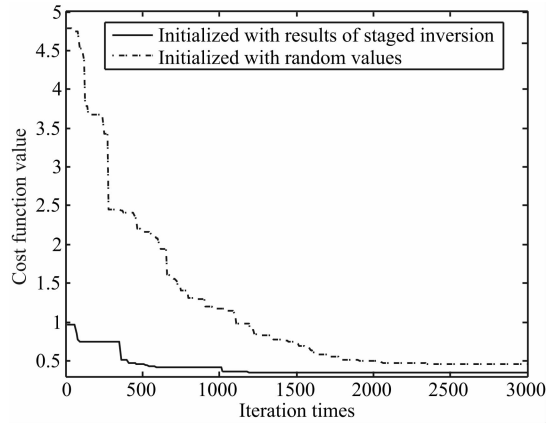


图9 采用不同初始值代价函数随迭代次数的变化

Fig. 9 Cost function versus iteration times using different starting model

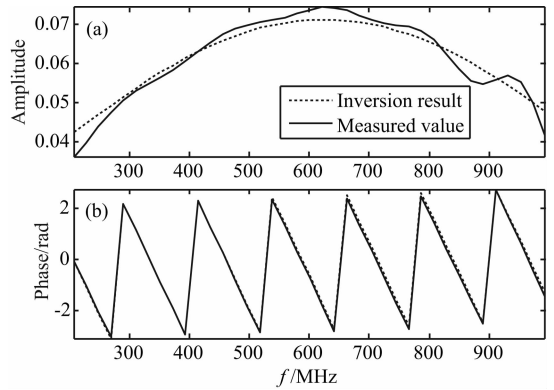


图10 用反演参数计算的幅度谱(a)及相位谱(b)与实际值的比较

Fig. 10 Comparison of amplitude and phase spectra calculated using inversion results and true ones, respectively

表 1 采用分步反演数据为初始值的参数反演结果

Table 1 Parameter results of inversion starting with initial values given by the staged inversion method

参数	理论值	分步反演值	最终反演值
T/ns	0.8	0.824	0.82
t_0/ns	7.67	7.69	7.68
σ_1	0.02	0.0289	0.019
σ_2	0.01	0.002	0.018
ϵ_1	9	7.8482	7.3725
ϵ_2	16	28.1246	18.6992
ϵ_3	9	14.3942	11.1375

参数不相关的相位谱属性,使 t_0 的反演结果也比较准确. 介电常数既影响相位谱,又影响幅度谱. 当需要反演的介电常数个数较多时,反演结果就容易陷入局部最优,这也是介电常数的反演结果没有 T 和 t_0 结果准确的主要原因. 相比之下,电导率反演结果

不够准确,因为它决定雷达波的衰减程度,主要体现在雷达信号的幅值变化上,但幅值不仅与电导率有关,还与反射面上、下介电常数的差值以及层厚度有关系。

为了进一步说明本文分步反演方法的性能,将本文方法与参考文献[11]中的频域反演方法做了比较。文献[11]中的方法是针对地下三层介质,在地下第一层介质厚度、介电常数和电导率已知的情况下,反演第二层厚度和两个反射界面的广义反射系数。因此,设计了中间有一薄层的三层模型。第一层厚度为 40 cm,中间薄层厚度为 3 cm,约为电磁波在层中波长的 $1/7$ 。从上到下三层的相对介电常数分别是 9, 25, 9, 电导率为 0.02, 0.01, 0.02。发射天线中心频率为 300 MHz。分二种情况对这两种方法进行比较:方案一是按照文献[11]方法已知第一层的厚度和电性参数,随机给定其余参数的初值进行反演;方案二是随机给定包括第一层介质参数的所有参数的初值进行反演。两种方法反演过程的代价函数随迭代次数的变化曲线如图 11 所示,反演出的中间薄层的厚度见表 2。可以看出,当第一层的厚度和电性参数已知时,两种反演方法都能很快收敛,且反演结果与理论值误差较小。当所有参数初始值随机选取时,两种方法达到收敛所需要的迭代次数增加,本文方法大约在迭代 1200 次时收敛,这时反演的薄层厚度与理论值的误差为 0.26 cm,文献[11]方法则大约在迭代 2300 次时才收敛,且代价函数仍然比前者大很多,反演的薄层厚度与理论值的误差为 0.35 cm。可见,在没有先验信息获得较好初值的情况下,本文的分步反演方法可以提高反演精度和效率。

表 2 用两种方法反演薄层厚度(单位:cm)

Table 2 Thin-layer thickness inverted using the two algorithms

初始参数	理论值	本文方法结果	误差	文[11]方法结果	误差
方案一	3.0	2.87	0.13	2.84	0.16
方案二	3.0	2.74	0.26	3.35	0.35

4.2 实际资料应用

第一个实测 GPR 数据来自广东某公路的混凝土路面检测资料。公路设计为水泥稳定碎石基层加水泥混凝土路面,采用 C30 混凝土,水泥层设计厚度为 26 cm,基层设计厚度为 22 cm。通常水泥层介电常数为 5.5,电导率约为 0.01~0.05;碎石介电常数约为 5~15,电导率为 3~20。实际钻芯位置在 K0+000—K1+000 处,钻探显示水泥的平均厚度为 23 cm。

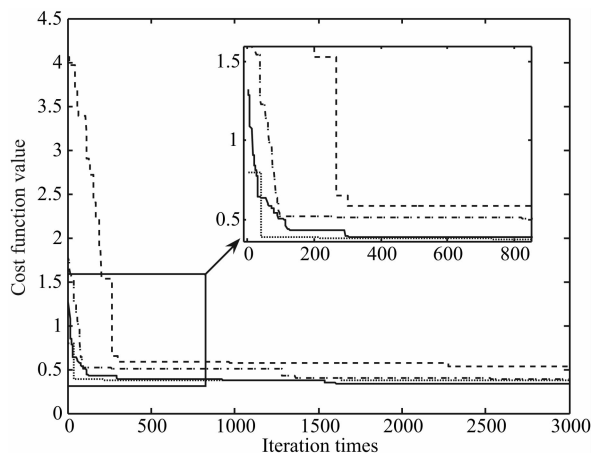


图 11 两种反演方法代价函数随迭代次数的变化。实线表示初始参数接近理论值的本文方法结果;点划线为随机取初值的本文方法结果;点线为初始参数接近理论值的文献[11]方法结果;点线为随机取初值时的文献[11]方法结果。右上方框中曲线是对左下角曲线的放大。

Fig. 11 Cost functions versus iteration number for the two algorithms

Iteration result of the inversion algorithm introduced in this paper is drawn with solid line and parameters are initialized with values close to true ones; result of algorithm of this paper with randomly initialized parameters is drawn with dot-dashed line; result of algorithm of [11] with initial parameters close to true ones is drawn in dot line; result of algorithm of [11] with randomly initialized parameters is drawn in dash line.

GPR 天线发射频率为 900 MHz,每道采样时间长度为 15 ns,采集 512 个数据。图 12 是 GPR 实测数据剖面及反演结果,其中介电常数分别为 4、6.5 和 15,电导率分别为 0.01 和 0.025,把时间单位换算成长度单位,水泥层的平均厚度为 24 cm,基层平均厚度为 21 cm,反演结果与钻探结果基本一致,但水泥层厚度却略小于原设计厚度,也说明施工的水泥层厚度略微不够。

为了验证本文反演算法对于薄层的效果,我们收集了某沥青公路的 GPR 数据。雷达天线发射频率 900 MHz,每道采样时间长度为 15 ns,采集 512 个数据。雷达波在沥青中的波长大约为 0.167 m,沥青层上面层的厚度为 0.04 m,略小于 $1/4$ 波长,因此可以被视为薄层。在时域剖面图上,沥青上面层的下底面回波与地表回波叠加在一起,很难对两者做出区分,而本文的频谱反演算法能给出沥青上面层的厚度。图 13 为第 600 道数据的上面层回波反射系数幅度谱,由于该层厚度小,难以确定幅度谱凹陷周期,但可以获取幅度谱的第一个峰值频率 f_p 为 940 MHz,根据式(21)得到 T 的初值为 0.53 ns,约 0.041 m。

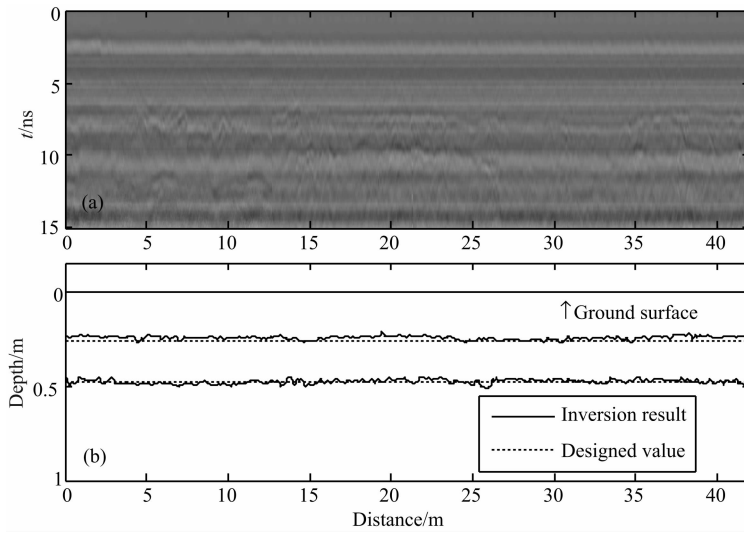


图 12 某混凝土公路检测的 GPR 剖面(a)及反演结果(b)

Fig. 12 GPR profile from a highway detection and corresponding inversion result

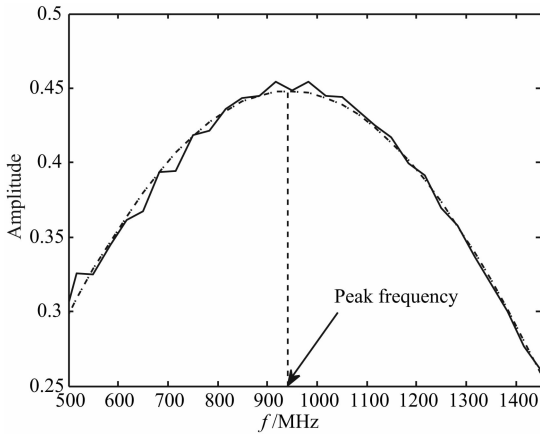


图 13 实际反射系数幅度谱和根据反演模型计算的幅度谱
黑色实线为实际幅度谱,黑色点划线为生成的幅度谱.

Fig. 13 GPR amplitude spectra obtained from measured data and calculated using inversion model, respectively

Solid line is amplitude spectrum measured and dot-dashed line is that calculated.

通过全局优化反演后得到该段沥青路面的上面层和下面层的深度和厚度如图 14 所示,其中反演的从上至下各层的平均相对介电常数的分别为 0.83、5.3 和 3.8,平均电导率分别为 6×10^{-6} 和 0.005.

5 结 论

通过对电磁波在层状介质中的传播规律和单天线模式或发射天线与接收天线间距很小时的 GPR 信号频谱特征的研究,基于地下层状介质 GPR 回波信号频谱及全局优化算法,提出了一种同时估算介质几何参数和电性参数的频域反演方法. 理论模型

和实际资料测试结果表明,该方法效果良好,具有较高的分辨率,对厚度为 $1/8$ 发射脉冲波长左右的薄层介质仍有较好结果,而且对几何参数的反演精度优于对电性参数的反演.

地下层状介质的不同参数对于反射系数序列频谱属性的影响不同. 如目标层时间厚度决定了幅度谱凹陷周期的大小,目标层时间厚度和上顶界面时间位置决定相位谱的变化快慢,上顶界面时间位置和各层的介电常数以及中间层电导率共同影响相位谱. 据此,我们提出了利用不同的频谱属性分别估算不同未知参量的分步反演方法. 以该分步反演结果作为全局优化反演的初值,可以大大提高反演的收敛速度和反演结果的可靠性.

致 谢 感谢重庆交通科研设计院为本文提供实际公路检测资料.

参考文献(References)

[1] 冯德山, 张彬, 戴前伟等. 基于速度估计的改进型线性变换有限差分偏移在探地雷达中的应用. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1340-1347.
Feng D S, Zhang B, Dai Q W, et al. The application of the improved linear transformation of finite difference migration based on the velocity estimation in the GPR data processing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(5): 1340-1347.

[2] 冯旭, 邹立龙, 刘财等. 全极化探地雷达正演模拟. 地球物理学报, 2011, 54(2): 349-357.
Feng X, Zou L L, Liu C, et al. Forward modeling for full-polarimetric ground penetrating radar. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2): 349-357.

[3] 田钢, 林金鑫, 王帮兵等. 探地雷达地面以上物体反射干扰

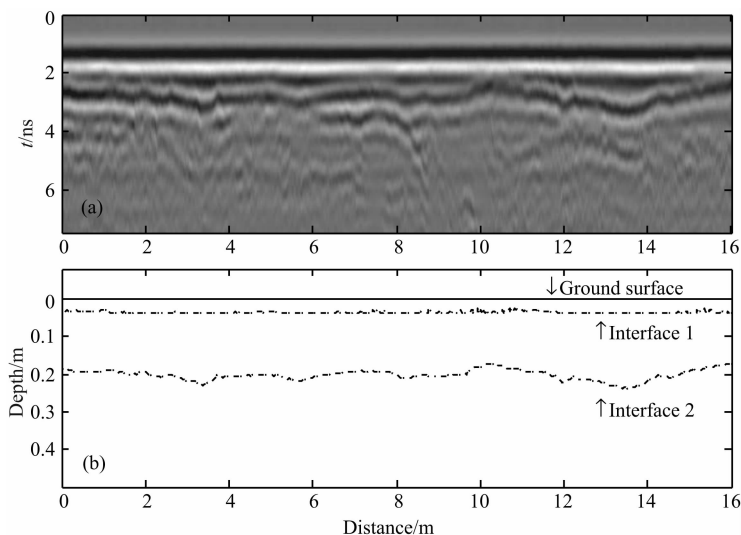


图 14 某沥青路面的 GPR 剖面(a)及反演结果(b)

Fig. 14 GPR profile of asphalt pavement and corresponding inversion result

特征模拟和分析. 地球物理学报, 2011, 54(10): 2639-2651.

Tian G, Lin J X, Wang B B, et al. Simulation and analysis reflections interference from above surface objects of ground penetrating radar. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(10): 2639-2651.

[4] Huang Y Q, Zhang J Z, Liu Q H. Three-dimensional GPR ray tracing based on wavefront expansion with irregular cells. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(2): 679-687.

[5] Huang Y Q, Liu Y H, Liu Q H, et al. Improved 3-D GPR detection by NUFFT combined with MPD method. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, 103: 185-199.

[6] Liu C R, Li J, Gan X, et al. New model for estimating the thickness and permittivity of subsurface layers from GPR data. *IEE Proc. -Radar Sonar Navig.*, 2002, 149(6): 315-319.

[7] Meles G A, Van der Kruk J, Greenhalgh S A, et al. A new vector waveform inversion algorithm for simultaneous updating of conductivity and permittivity parameters from combination crosshole/borehole-to-surface GPR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(9): 3391-3407.

[8] 王兆磊, 周辉, 李国发. 用地质雷达数据资料反演二维地下介质的方法. 地球物理学报, 2007, 50(3): 897-904.

Wang Z L, Zhou H, Li G F. Inversion of ground-penetrating radar data for 2D electric parameters. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(3): 897-904.

[9] 丁亮, 韩波, 刘润泽等. 基于探地雷达的混凝土无损检测反演成像方法. 地球物理学报, 2012, 55(1): 317-326.

Ding L, Han B, Liu R Z, et al. Inversion imaging method for concrete non-destructive testing based on GPR. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(1): 317-326.

[10] Kao C P, Li J, Wang Y Q, et al. Measurement of layer thickness and permittivity using a new multilayer model from

GPR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(8): 2463-2470.

[11] 张蓓. 路面结构层材料介电特性及其厚度反演分析的系统识别方法: 路面雷达关键技术研究[博士论文]. 重庆: 重庆大学, 2003.

Zhang B. System identification method for backcalculating the dielectric property and thickness of pavement structures: study on applied technology of ground penetrating radar (in Chinese) [Doctor's thesis]. Chongqing: Chongqing University, 2003.

[12] Huang C L, Su Y. A new GPR calibration method for high accuracy thickness and permittivity measurement of multi-layered pavement. // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. Delft, The Netherlands: IEEE, 2004; 627-630.

[13] Qin Y, Chen J, Fang G Y, et al. Research on thin-layer recognition technique based on the spectrum inversion method of ground penetrating radar. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2760-2763.

[14] Minet J, Patriarca C, Slob E C, et al. Characterization of layered media using full-waveform inversion of proximal GPR data. // 2010 URSL International Symposium on Electromagnetic Theory. Berlin: IEEE, 2010; 1004-1007.

[15] Minet J, Lambot S, Delaide G, et al. A generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(4): 1063-1072.

[16] Patriarca C, Lambot S, Mahmoudzadeh M R, et al. Reconstruction of sub-wavelength fractures and physical properties of masonry media using full-waveform inversion of proximal penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 74(1): 26-37.

[17] Puryear C. I, Castagna J P. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion;

- Theory and application. *Geophysics*, 2008, 73(2): R37-R48.
- [18] 李大心. 探地雷达方法与应用. 北京: 地质出版社, 1994.
Li D X. Methods and Applications of Ground Penetrating Radar (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [19] Balanis C A. Antenna Theory: Analysis and Design. New Jersey: John Wiley, 2005.
- [20] 曾昭发, 刘四新, 王者江等. 探地雷达方法原理及应用. 北京: 科学出版社, 2006.
Zeng Z F, Liu S X, Wang Z J, et al. Principles and Applications of GPR Method (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006.
- [21] Guru B S, Hızıroğlu H R. Electromagnetic Field Theory Fundamentals. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [22] Schmelzbach C, Scherbaum F, Tronicke J, et al. Bayesian frequency-domain blind deconvolution of ground-penetrating radar data. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 75(4): 615-630.
- [23] Jol H M. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Singapore: Elsevier, 2009.
- [24] 张霖斌, 纪晨, 姚振兴. 叠后地震道反演的随机爬山法. 石油地球物理勘探, 1997, 32(1): 75-80.
Zhang L B, Ji C, Yao Z X. Stochastic hill-climbing algorithm for poststack seismic trace inversion. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 1997, 32(1): 75-80.
- [25] Giannopoulos A. Modelling ground penetrating radar by GprMax. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(10): 755-762.

(本文编辑 汪海英)