

DOI: 10.11779/CJGE201504017

频谱反演法在探地雷达隧道衬砌检测中的应用研究

刘宗辉^{1, 2}, 吴恒^{1, 2}, 周东^{1, 2*}, 韦鸿耀^{1, 2}

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 隧道衬砌模型的空间结构属于典型的层状分布, 采用探地雷达进行隧道二衬检测时, 往往很难识别高度小于调谐厚度的脱空。通过建立含有脱空薄层的隧道二衬层状几何模型, 结合电磁波在隧道衬砌中的传播规律, 给出了隧道衬砌检测时电磁波的反射模型, 并推导了其广义反射系数谱域表达式, 从而提出一种根据反射系数序列频谱估算隧道二衬厚度及脱空高度的反演方法。通过分析反射系数序列的幅度谱属性, 进一步提出一种估计脱空层高度的快速方法, 即根据幅度谱凹陷周期确定脱空层双程走时, 进而估算脱空层高度。最后, 利用 1stOpt 数学优化分析软件进行全局优化, 并反演求解各参数。物理模型实验及现场应用实例的处理结果表明, 当脱空厚度小于 1/4 波长时, 本文所述的频谱反演法仍能准确反演出二衬厚度及脱空层高度, 从而提高了探地雷达资料的垂直分辨率。

关键词: 隧道衬砌; 探地雷达; 频谱反演; 脱空高度; 二衬厚度

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0711-07

作者简介: 刘宗辉(1987-), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事隧道无损检测与隧道工程地质方面的研究。E-mail: zonghui87621@163.com。

Application of spectrum inversion method in GPR signal processing for tunnel lining detection

LIU Zong-hui^{1, 2}, WU Heng^{1, 2}, ZHOU Dong^{1, 2}, WEI Hong-yao^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The spatial structure of tunnel lining model is a typical stratiform distribution, so it is difficult to identify the void area if its height is less than tuning thickness when using ground penetrating radar (GPR) to detect the second lining of tunnel. In this paper, by establishing a geometrical model for the second lining layer of tunnel including void area and considering the spreading law of electromagnetic waves in tunnel lining, a reflection model for electromagnetic waves in tunnel lining detection is obtained, and the generalized reflection coefficient in spectrum expression is deduced as well as an inversion method to further estimate the lining thickness of tunnel and the height of void area according to the reflection coefficient sequence spectrum. By analyzing the amplitude spectrum properties of the reflection coefficient sequence, a quick method to estimate the height of void area is proposed, namely determining the two-way travel time of void area and leading to the height of void area according to the depressing period of the amplitude spectra. Finally, 1stopt mathematical optimization analysis software is adopted for the global optimization and calculation of parameters. The results of physical model experiments and field tests indicate that the spectrum inversion method can also estimate the lining thickness of tunnel and the height of void area accurately when the height of void area is less than 1/4 wavelength, consequently enhancing the vertical resolution of GPR data.

Key words: tunnel lining; ground penetrating radar (GPR); spectrum inversion; void area height; second lining thickness

0 引言

二衬是隧道重要的支护结构, 不仅是安全储备, 而且往往承载着较大的围岩松散压力。在二衬混凝土浇筑过程中, 受人为、技术等因素的影响, 隧道二衬经常存在厚度不足、衬砌与围岩之间存在空洞、不密实等缺陷。近年来, 探地雷达无损检测技术在隧道衬砌质量检测中得到了广泛的应用^[1-2], 国内外也有很多

学者对此进行了研究, 如 Siggins 等^[3]通过室内模型试验模拟了隧道二衬中常见的多种病害, 并根据雷达图像对各种病害进行了定性分析; Bungey 等^[4]采用油水

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178124); 广西科技重点项目(桂科攻 10124006-10)

收稿日期: 2014-08-21

*通讯作者

乳胶体来代替混凝土,通过模型试验深入讨论了钢筋网对其下方空洞等病害探测的影响;杨艳青等^[5]以铁路复合式衬砌为研究对象,进行了探地雷达检测衬砌试件模型和典型病害试验研究,并探讨了复合式衬砌厚度定量计算方法;刘新荣等^[6]进行了隧道衬砌空洞探地雷达三维正演模拟;杨峰等^[7]通过时域有限差分数值模拟计算,提出了基于极值点振幅比反演脱空量的解释策略。

然而,实际衬砌检测过程中,探地雷达资料解释仍然停留在基于经验的定性状态,很难给出准确的定量解释结果。根据探地雷达图像一般能识别脱空的存在,但很难判断脱空的高度。因此,急需寻求一种可靠、快速的混凝土厚度及脱空高度的反演方法,以提高探地雷达隧道衬砌质量检测的精度与速度。

隧道衬砌模型从空间结构上来看属于典型的层状分布。目前层状介质反演方法主要有时域反演和频域反演两类。当脱空高度小于调谐厚度时,脱空上、下界面的时域反射波会叠加,此时时域方法很难准确识别脱空高度^[8-10]。这里的调谐厚度是指介质中电磁波中心频率所对应波长的 1/4。频谱反演法来源于地震勘探领域,人们对该方法进行了改进,并应用于探地雷达检测中,通过利用探地雷达所记录的电磁波频谱,来反演层状介质厚度、深度。与传统的时域反演法相比,频谱反演法能较好的识别薄层介质^[11-13]。

本文通过分析电磁波在隧道衬砌中的传播规律,给出了隧道衬砌检测时电磁波的反射模型,并推导了其广义反射系数谱域表达式,从而提出一种根据反射系数序列频谱估算隧道二衬厚度及脱空高度的反演方法。物理模拟实验以及实际资料的处理结果表明,本文提出的谱反演法能准确反演出隧道二衬的厚度及脱空高度,从而提高了探地雷达资料的垂直分辨率。

1 电磁波在隧道衬砌中的传播

使用地面耦合天线进行隧道衬砌检测时,辐射源接近二衬表面。二衬表面任一处的辐射场,可被局部视为平面波以一定的角度入射到边界上,入射角由辐射源的高度和横向距离决定。仅考虑该局部,入射信号反射和折射遵循 Snell 定律和 Fresnel 系数^[14]。

1.1 隧道衬砌模型

为研究电磁波在隧道衬砌中的传播规律,我们建立了含有脱空薄层的层状模型,模型如图 1 所示。本文假设各层均为非磁性介质,空气和脱空层电导率为零,并考虑二衬混凝土介质电导率的影响。由于电磁波在空气中传播速度快、衰减小,且脱空厚度一般小于空气中电磁波中心频率所对应波长的一半,所以电

磁波在脱空层中的多次反射不能被忽略;而在二衬混凝土介质中,电磁波传播较空气中速度慢、衰减快,且二衬厚度远大于混凝土中电磁波中心频率所对应的波长,此时可不考虑电磁波在二衬中的多次反射,电磁波在隧道衬砌中的传播路径如图 1 所示。

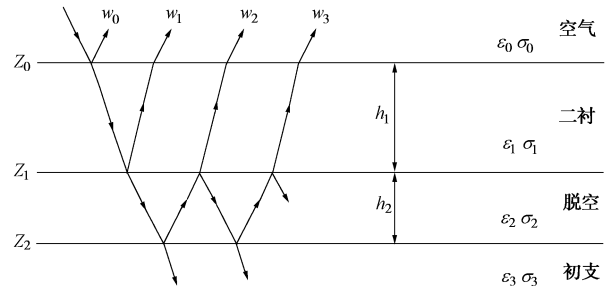


图 1 隧道衬砌雷达波反射模型

Fig. 1 Radar wave reflection model for tunnel lining

假定电磁波以 TEM 平面波入射到二衬表面时,垂直方向入射波电场强度向量表达式为 $E_z = E_0 e^{-jkz}$, 其中 k 为平面波在介质中 z 方向的波矢量。电磁波由空气进入二衬表面时的反射系数为 R_{01} , 透射系数为 T_{01} ; 由二衬进入脱空上界面时的反射系数为 R_{12} , 透射系数为 T_{12} ; 由脱空下界面进入初支界面时的反射系数为 R_{23} 、透射系数为 T_{23} ; 图 1 中 w_0, w_1, w_2, w_3 分别为二衬表面反射波、脱空上界面反射波、脱空下界面一次反射波与脱空下界面二衬反射波的垂直方向电场强度,其表达式为^[15]

$$w_0 = E_z R_{01} \quad (1)$$

$$w_1 = E_z T_{01} R_{12} T_{10} e^{2jk_1 h_1} \quad (2)$$

$$w_2 = E_z T_{01} T_{12} R_{23} T_{21} T_{10} e^{2jk_1 h_1} e^{2jk_2 h_2} \quad (3)$$

$$w_3 = E_z T_{01} T_{12} R_{23}^2 R_{21} T_{21} T_{10} e^{2jk_1 h_1} e^{4jk_2 h_2} \quad (4)$$

式中, $R_{21} = -R_{12}$, $1 + R_{12} = T_{12}$, $T_{01} = -T_{10}$, $T_{12} = -T_{21}$ 。

1.2 广义反射系数谱域表达式

定义界面广义反射系数为所有上行波和下行波电场强度之比,则二衬表面广义反射系数 \tilde{R}_{01} 可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{01} &= \frac{1}{E_z} (w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + \dots) \\ &= R_{01} + T_{01} R_{12} T_{10} e^{2jk_1 h_1} + T_{01} T_{12} R_{23} T_{21} T_{10} e^{2jk_1 h_1} e^{2jk_2 h_2} + \\ &\quad T_{01} T_{12} R_{23}^2 R_{21} T_{21} T_{10} e^{2jk_1 h_1} e^{4jk_2 h_2} + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

即

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{01} &= R_{01} + T_{01} T_{10} e^{2ik_1 h_1} (R_{12} + \\ &\quad T_{12} R_{23} T_{21} e^{2jk_2 h_2} + T_{12} R_{23}^2 R_{21} T_{21} e^{4jk_2 h_2} + \dots) \end{aligned} \quad (6)$$

由二项式定理,式(6)可变为

$$\tilde{R}_{01} = R_{01} + (1 - R_{01}^2) \frac{R_{12} + R_{23} e^{2ik_2 h_2}}{1 + R_{12} R_{23} e^{2ik_2 h_2}} e^{2ik_1 h_1} \quad (7)$$

式中, $\omega = 2\pi f$, $k_1 = -\sqrt{\omega^2 \mu_1 \epsilon_1 - i\omega \sigma_1 \mu_1}$, $k_2 = -\sqrt{\omega^2 \mu_2 \epsilon_2 - i\omega \sigma_2 \mu_2}$, $R_{i,i+1} = (\sqrt{\omega^2 \epsilon_i - i\omega \sigma_i} - \sqrt{\omega^2 \epsilon_{i+1} - i\omega \sigma_{i+1}}) /$

$$(\sqrt{\omega^2 \varepsilon_i - i\omega \sigma_i} + \sqrt{\omega^2 \varepsilon_{i+1} - i\omega \sigma_{i+1}})。$$

现场检测时大多采用地面耦合的测量方式, 收发天线间的直达波和衬砌表面反射波在时间域上无法区分, 在数据处理时往往会随直达波一起去除, 此时二衬表面广义反射系数谱域表达式为

$$\tilde{R}(f) = (1 - R_{01}^2) \frac{R_{12} + R_{23} e^{2ik_2 h_2}}{1 + R_{12} R_{23} e^{2ik_2 h_2}} e^{2ik_1 h_1}。 \quad (8)$$

由于各层均为非磁性介质, 且空气和脱空层电性参数可视为已知量, 此时式(8)中未知量有二衬厚度 h_1 , 介电常数 ε_1 , 电导率 σ_1 , 脱空层厚度 h_2 , 初支介电常数 ε_3 。

1.3 实际反射系数频谱

假定雷达发射子波为 $w(t)$, 地下介质反射系数序列为 $r(t)$, 接收到的反射回波为 $s(t)$, 则由卷积定理可知^[16]

$$s(t) = w(t) * r(t) \xrightarrow{FT} s(f) = w(f) \times r(f)。(9)$$

式中 “*” 表示卷积运算; “ \times ” 表示乘积运算; FT 为傅里叶正变换; $s(f)$ 为雷达接收反射回波频谱; $w(f)$ 为发射子波频谱; $r(f)$ 为反射系数的频谱。

由于雷达发射波会随测试环境的改变而改变, 在每次现场检测时, 需要采用金属板反射法^[17]来获取实际发射波, 从而计算发射子波频谱。

现场雷达记录的实际反射系数频谱可以表示为

$$r(f) = \frac{s(f)}{w(f)}。 \quad (10)$$

2 频谱反演算法

2.1 反演方法原理

为求隧道二衬厚度及脱空高度, 我们需要根据二衬表面广义反射系数的谱域表达式和实际反射系数序列频谱构建多参数反演目标函数, 其表达式为

$$\Phi(q_i) = 1/N \cdot \sum_{f_L}^{f_M} \|r(f) - \tilde{R}(f)\|, \quad (11)$$

式中, $r(f)$ 为利用现场雷达记录得到的实际反射系数序列频谱, $\tilde{R}(f)$ 为根据反射系数谱域表达式计算得到的理论频谱, N 为计算点数, f_M , f_L 分别为反演时频谱范围的上限和下限; q_i 为反演参数, 包括 h_1 , ε_1 , σ_1 , h_2 , ε_3 。通过逼近目标函数最小值, 实现各层介质参数的反演。

本文采用1stOpt数学优化分析软件进行参数的反演求解。该软件中通用全局优化算法(UGO)的最大特点是由软件随机给出参数初始值, 克服了优化计算领域中使用迭代法必须给出合适初值的难题, 同时该软件也可以实现带复数的函数拟合。

2.2 脱空高度快速估算方法

虽然1stOpt不需要给定参数初始值, 但是, 接近参数真实值的初始参数会加快其收敛速度, 并有助于提高最终反演结果的准确度。幅度谱和相位谱是用来详细刻画反射系数序列频谱两个主要参数, 下面通过分析反射系数序列的幅度谱特征, 给出脱空层高度快速估算方法。

当脱空层视为理想介质时, $k_2 = -\sqrt{\omega^2 \mu_2 \varepsilon_2}$; 由于混凝土电导率相对较小, 对反射系数 $R_{i,i+1}$ 影响较小, 故其表达式可简化为

$$R_{i,i+1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_i} - \sqrt{\varepsilon_{i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_i} + \sqrt{\varepsilon_{i+1}}}。 \quad (12)$$

首先对式(8)进行近似简化, 将复数 k_1 直接开方, 可得

$$k_1 = -\sqrt{r} \left(\cos \frac{\theta}{2} + i \sin \frac{\theta}{2} \right), \quad (13)$$

式中, $r = \omega \mu_1 \sqrt{\omega^2 \varepsilon_1^2 + \sigma_1^2}$, $\theta = \arctan \left(\frac{-\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \right)$, 则

$$2ik_1 h_1 = 2\sqrt{r} h_1 \left(\sin \frac{\theta}{2} - i \cos \frac{\theta}{2} \right)。 \quad (14)$$

令 $c_1 = 2\sqrt{r} h_1 \cos \frac{\theta}{2}$, $c_2 = 2k_2 h_2$, 最终式(8)可化简为

$$\tilde{R}_{01} = (1 - R_{01}^2) \cdot e^{2\sqrt{r} h_1 \sin \frac{\theta}{2}} \cdot \frac{R_{12} e^{-ic_1} + R_{23} e^{-ic_1} e^{ic_2}}{1 + R_{12} R_{23} e^{ic_2}}。 \quad (15)$$

对式(15)求模:

$$|\tilde{R}_{01}| = (1 - R_{01}^2) \cdot e^{2\sqrt{r} h_1 \sin \frac{\theta}{2}} \cdot \frac{\sqrt{R_{12}^2 + R_{23}^2 + 2R_{12} R_{23} \cos c_2}}{\sqrt{1 + 2R_{12} R_{23} \cos c_2 + (R_{12} R_{23})^2}}。 \quad (16)$$

当 $\frac{-\sigma_1}{\omega \varepsilon_1}$ 取值较小时:

$$\theta = \arctan \left(\frac{-\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \right) \approx \frac{-\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \approx \sin \theta, \quad (17)$$

$$2\sqrt{r} h_1 \sin \frac{\theta}{2} \approx -h_1 \cdot \frac{\sigma_1 \mu_1^{1/2}}{\varepsilon_1^{1/2}}。 \quad (18)$$

取电磁波在脱空层双程走时为 T , 则最终反射系数幅度谱可以简化为

$$|\tilde{R}_{01}| = (1 - R_{01}^2) \cdot e^{-h_1 \frac{\sigma_1 \mu_1^{1/2}}{\varepsilon_1^{1/2}}} \cdot \sqrt{1 + \frac{R_{12}^2 + R_{23}^2 - 1 - (R_{12} R_{23})^2}{1 + 2R_{12} R_{23} \cos(2\pi f T) + (R_{12} R_{23})^2}}。 \quad (19)$$

从式中可以看出, 反射系数幅度谱极大值点和极小值点是呈周期分布的, 且其最小凹陷周期为

$$\Delta f = \frac{1}{T}, \quad (20)$$

式中, Δf 表示幅度谱最小凹陷周期。上式表明幅度谱凹陷周期只与脱空层双程走时有关, 且脱空层双程走时可表示为 $T=1/\Delta f$ 。图 2 为不同脱空高度的幅度谱, 模型参数为 $h_1=40\text{ cm}$, $\varepsilon_1=6$, $\sigma_1=0.008\text{ S/m}$, $\varepsilon_3=10$ 。由于脱空层介电常数均小于上、下两层介质, 即上、下层面的反射系数 R_{12} , R_{23} 异号, 此时频率零点值点可视为幅度谱第一个极小值点, 第一个峰值点所对应的频率可视为半个凹陷周期。

当脱空层厚度较小时, 反射系数幅度谱凹陷周期较大, 且现场数据往往存在各种干扰, 很难获得完整的凹陷周期, 此时可以根据第一个峰值频率来确定脱空层厚度。假定幅度谱的第一个极大值点频率为 f_p , 则脱空层双程走时 $T=1/(2f_p)$ 。

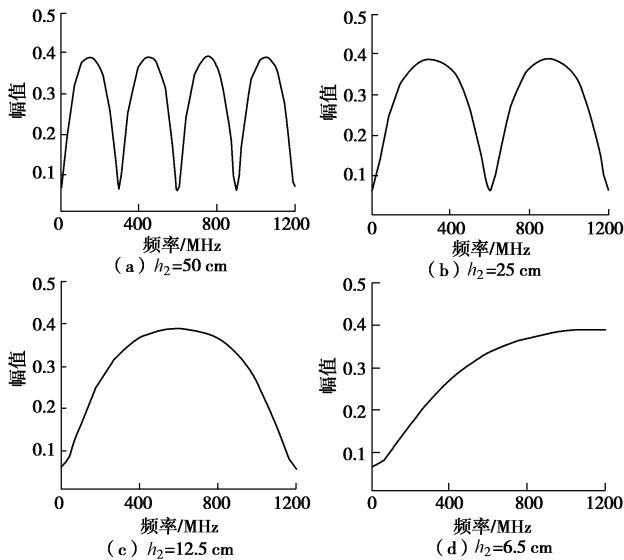


图 2 不同脱空高度反射系数幅度谱

Fig. 2 Amplitude spectra of reflection coefficient sequence with different heights of void area

在关注幅度谱同时也不能忽略相位谱, 根据文献[12]中论述, 相位谱的变化快慢由电磁波在二衬与脱空两者双程走时共同决定, 在根据幅度谱凹陷周期估算出脱空高度后, 相位谱拟合程度能进一步反映二衬厚度的反演效果。

综合上述分析可知, 在利用反射系数频谱进行反演之前可以先求出反射波的幅度谱, 根据幅度谱凹陷周期确定脱空层双程走时 T , 进而快速估算脱空层高度 h_2 。同时可以将脱空层高度估计值作为初始值, 利用式(11)反演各参数最终值, 以进一步减少迭代次数、提高反演收敛速度、排除赝解。

3 物理模拟实验

首先, 设计了室内的物理模拟试验来测试反演方法对二衬厚度及脱空高度的识别能力。由于钢筋网对

探测结果有一定的干扰, 本文不讨论二衬中含有钢筋网的情况, 模型使用的为素混凝土。

3.1 试验方案及过程

考虑到试验过程中要模拟不同二衬厚度及脱空高度, 采用活动模型来模拟各种工况。模型纵剖面示意图如图 3 所示, 试验模型总长 2 m, 脱空位置二衬厚度 h_1 分别设计 20 cm 与 30 cm 两种类型, 脱空设计长度为 100 cm, 高度 h_2 分别 5, 10, 15 与 20 cm 4 种类型。

试验仪器采用意大利 K2 探地雷达, 天线中心频率 600 M, 此时电磁波在空气中传播时的 1/4 波长为 12.5 cm, 每道数据的采集时间为 30 ns, 采样点数 512 点, 采样步长 2 cm。

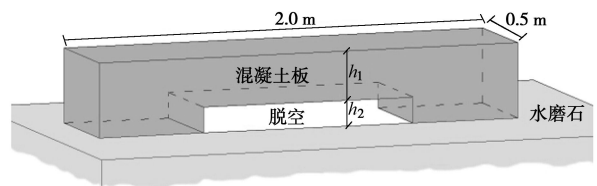


图 3 模型示意图

Fig. 3 Schematic representation of model



图 4 $h_1=20\text{ cm}$ 和 $h_2=10\text{ cm}$ 的实体模型图

Fig. 4 Model of $h_1=20\text{ cm}$ and $h_2=10\text{ cm}$

实验前浇筑长 200 cm、宽 50 cm、高 10 cm 的长混凝土板 3 块, 同时浇筑长 50 cm、宽 50 cm、高分别 5, 10, 15 与 20 cm 的短混凝土板各两块, 混凝土板浇筑时严格控制表面平整度, 以消除板与板之间的反射波, 混凝土强度为 C25。通过叠加不同块数长混凝土板来模拟不同二衬厚度, 并通过改变短混凝土板的类型来改变脱空高度。脱空处二衬厚度 20 cm, 脱空高度 10 cm 的实体模型如图 4 所示, 此时脱空高度小于 1/4 波长。试验时首先通过铁板反射试验获取雷达发射波, 然后分别采集不同模型试验数据。每条测线标记 5 个点, 分别用钢尺量测标记点二衬厚度及脱空高度。

3.2 试验数据反演结果

图 5 为二衬厚度 20 cm, 脱空高度 10 cm 处的地质雷达实测剖面图及测线位置 0.5 m 处的单道波波形图。从左边灰度图中可以看出一条明显的强反射带, 但无法区分上下反射界面位置, 同时从右边单道波也可以看出脱空层上下界面时域反射波已经完全叠加, 无法通过波分波峰与波谷时间差的方法来判断脱空高度。

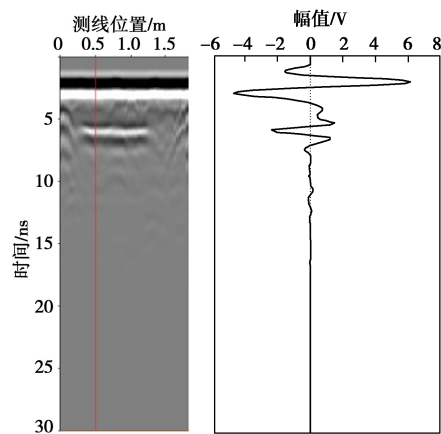


图 5 图 4 实体模型 GPR 剖面图及标记处单道波波形图
Fig. 5 GPR profile and single-channel waveform in marked place of model in Fig. 4

下面以测线位置 0.5 m 处反射波为例来说明文中所述反演方法过程及效果。图 6 (a) 中虚线为反射系数幅度谱, 由于脱空层高度小于 1/4 空气波长, 无法在反演频带内获得幅度谱完整凹陷周期, 此时, 通过寻找峰值频率点来初步估计脱空层高度, 幅度谱的峰值频率为 675 MHz, 故可初步估计脱空厚度为 11.1 cm。然后以脱空层高度估计值作为初始值, 通过全局

优化算法利用式 (11) 最终反演二衬厚度及脱空高度。图 6 (a)、(b) 分别为幅度谱及相位谱实际值和反演值对比, 图中两者拟合程度较高, 此时二衬厚度及脱空高度最终计算值分别为 21.5, 10.9 cm。

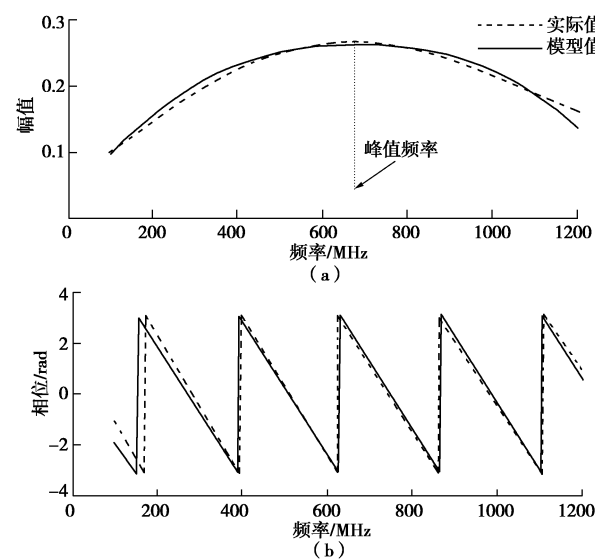


图 6 幅度谱和相位谱实际值与反演值对比
Fig. 6 Comparison between actual and inversion values of amplitude and phase spectra

各模型实际二衬厚度及脱空高度与最终反演结果如表 1 所示。表中所列每个模型实际值与反演值均为 5 个标记点数据平均值。从各模型反演结果可以看出, 随着脱空高度逐渐减小其反演结果误差逐渐增大, 而二衬厚度反演结果较为稳定。总体来说, 当脱空厚度小于 1/4 波长时, 本文所述的频谱反演法仍能较准确反演二衬厚度及脱空层高度, 满足隧道衬砌检测要求。

表 1 模型值与最终反演结果对比

模型编号	脱空高度			二衬厚度		
	实际值/cm	反演值/cm	相对误差/%	实际值/cm	反演值/cm	相对误差/%
1	19.9	19.2	3.5	20.2	22.1	9.4
2	19.9	20.9	5.0	30.4	32.3	6.3
3	15.1	15.8	4.6	20.3	21.8	7.4
4	15.1	16.2	7.3	30.5	33.1	8.5
5	10.1	10.9	7.9	20.2	21.5	6.4
6	10.1	11.2	10.9	30.4	29.2	3.9
7	5.2	6.1	17.3	20.3	19.1	5.9
8	5.2	6.5	25.0	30.5	31.6	3.6

表 2 最终反演结果与钻孔验证值对比

标记点号	二衬厚度			脱空高度		
	反演值/cm	钻孔验证值/cm	相对误差/%	反演值/cm	钻孔验证值/cm	相对误差/%
1	28.2	30.4	7.2	6.2	4.9	26.5
2	26.5	25.0	6.0	12.5	11.2	11.6
3	19.2	18.6	3.2	15.2	16.1	5.6
4	25.7	28.1	8.5	9.8	8.2	19.5
5	20.1	18.9	6.3	16.5	15.5	6.5

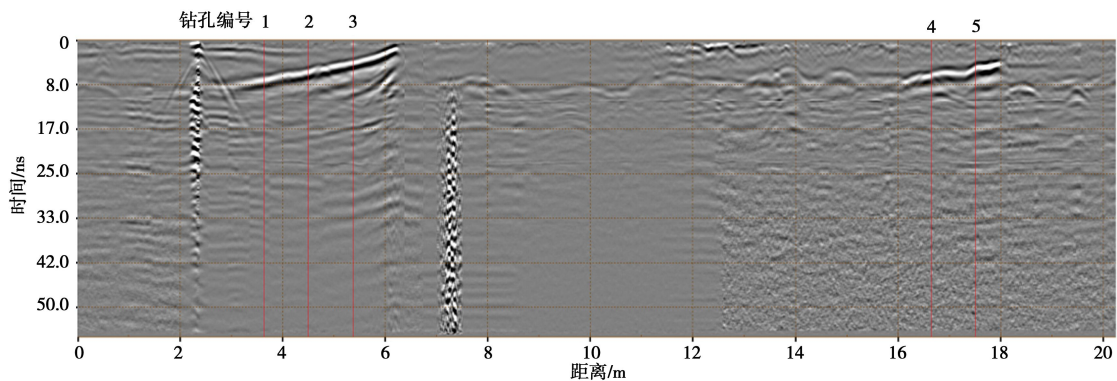


图 7 隧道左洞拱顶 DK10+131—DK10+151 处探地雷达图像
Fig. 7 GPR image at left tunnel vault DK10+131—DK10+151

4 实际数据反演

采用意大利 K2 探地雷达对广西梧州岑溪大隧道衬砌进行检测，雷达天线中心频率 600 MHz，数据采集时窗 60 ns，采样点数 512 点，采样步长 0.02 m。现场探测时，使用软件标记功能对探测数据可疑位置进行标记，同时在衬砌表面喷漆标记，以便进一步钻孔验证。在实际数据反演时，围岩中经常存在空洞或裂隙，其对二衬厚度和脱空高度的最终反演结果会有一定程度的影响，故在采用探地雷达数据反演隧道二次衬砌厚度和脱空高度时只需截取人们所关心的二衬部分的反射波即可。图 7 为隧道左洞拱顶 DK10+131—DK10+151 处探地雷达图像，图中存在两处明显脱空，此段测线共标记 5 个点。

采用本文所述的频谱反演法分别计算各标记点二衬厚度及脱空量。图 8 (a) 虚线为标记点 3 处反射系数幅度谱，根据幅度谱的第一个峰值频率可大致估算脱空层厚度为 15.4 cm，然后以此估计值作为初始值，通过全局优化算法最终反演二衬厚度及脱空高度。图

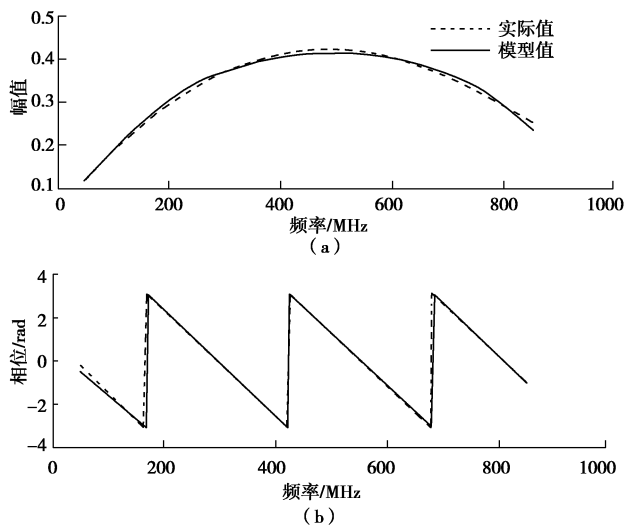


图 8 幅度谱和相位谱实际值与反演值对比
Fig. 8 Comparison between actual and inversion values of amplitude and phase spectra

8 (a) 和 (b) 分别为标记点 3 处幅度谱及相位谱实际值和反演值对比，图中两者拟合效果较好，此时二衬厚度及脱空高度最终计算值分别为 19.2，15.2 cm。

各标记点最终反演结果与现场钻孔结果对比如表 2 所示，从表中可以看出，本文所述的方法能准确反演二衬厚度及脱空高度，满足检测要求。

5 结 语

二衬厚度及脱空高度是隧道二衬检测时最关注的两个几何参数，本文通过分析电磁波在隧道衬砌中的传播规律，给出了隧道衬砌检测探地雷达电磁波反射模型并推导了其广义反射系数谱域表达式，提出一种根据反射系数频谱估算隧道二衬厚度及脱空高度的反演方法。

反射系数序列幅度谱凹陷周期决定于脱空层双程走时，在利用反射系数频谱进行反演之前可以先求出反射波的幅度谱，根据幅度谱凹陷周期快速估算脱空层高度。以此作为初始值，可加快反演收敛速度，并有助于提高最终反演结果的准确度。

物理模拟实验以及实测探地雷达数据的反演结果表明，本文提出的谱反演方法，不但能够计算出隧道二衬的真实厚度，还能够准确给出厚度小于 1/4 波长的脱空层高度，提高了探地雷达数据的垂直分辨率。该方法不仅为隧道二衬厚度及脱空高度定量解释提供了一种技术手段，同时也对后续隧道衬砌检测雷达图像自动识别技术提供依据。

致 谢：感谢广西信达高速公路有限公司为本文现场测试工作提供的帮助。

参考文献：

[1] 李晋平, 邵丕彦, 谷 牧. 地质雷达在铁路隧道工程质量检测中的应用[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 56 - 59. (LI Jin-ping, SHAO Pi-yan, GU Mu. Application and analysis of GPR in railway tunnel engineering quality inspection[J].

- China Railway Science, 2006, **27**(2): 56 - 59. (in Chinese))
- [2] 郭有劲. 地质雷达在铁路隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2002, **74**(2): 71 - 74. (GUO You-jin. Exploration and application of geology radar for quality examination of railway tunnel lining[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002, **74**(2): 71 - 74. (in Chinese))
- [3] SIGGINS A F, WHITELY R J A. Laboratory simulation of high frequency GPR responses of damaged tunnel liners[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2000, **40**(11): 805 - 811.
- [4] BUNGEY J H, MILLARD S G, SHAW M R. Influence of reinforcing steel on radar surveys of concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 1994, **8**(2): 119 - 126.
- [5] 杨艳青, 贺少辉, 齐法琳, 等. 铁路隧道复合式衬砌地质雷达检测模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1159 - 1165. (YANG Yan-qing, HE Shao-hui, QI Fa-lin, et al. Simulation tests on GPR detection of composite linings of railway tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1159 - 1165. (in Chinese))
- [6] 刘新荣, 舒志乐, 朱成红, 等. 隧道衬砌空洞探地雷达三维探测正演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(11): 2221 - 2229. (LIU Xin-rong, SHU Zhi-le, ZHU Cheng-hong, et al. Study of forward simulation for ground penetrating radar three-dimensional detection of tunnel lining cavity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(11): 2221 - 2229. (in Chinese))
- [7] 杨峰, 彭苏萍, 刘杰, 等. 衬砌脱空雷达波数值模拟与定量解释[J]. 铁道学报, 2008, **30**(5): 92 - 96. (YANG Feng, PENG Su-ping, LIU Jie, et al. Simulation of lining void area by radar waves and explanatory strategy[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, **30**(5): 92 - 96. (in Chinese))
- [8] HUANG C L, SU Y. A new GPR calibration method for high accuracy thickness and permittivity measurement of multi-layered pavement[C]// Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. Delft, IEEE, 2004: 627 - 630
- [9] WIDESS M B. How thin is a thin bed[J]. Geophysics, 1973, **38**(6): 1176 - 1180.
- [10] 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[D]. 重庆: 重庆大学, 2003. (ZHANG Bei. System identification method for conversion analysis of dielectric characteristics and thickness of pavement structure: research of the key techniques of pavement radar[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. (in Chinese))
- [11] PURYEAR C I, CASTAGNA J P. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: Theory and application[J]. Geophysics, 2008, **73**(2): 37 - 48.
- [12] 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[J]. 地球物理学报, 2013, **54**(4): 1381 - 1391. (HUANG Zhong-lai, ZHANG Jian-zhong. An inversion method for geometric and electric parameters of layered media using spectrum of GPR signal[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, **54**(4): 1381 - 1391. (in Chinese))
- [13] 秦瑶, 陈洁, 方广有. 频谱拟合法提高探地雷达垂直分辨率[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(7): 1148 - 1453. (QIN Yao, CHEN Jie, FANG Guang-you. Spectrum fitting method for improving the vertical resolution of ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, **31**(7): 1148 - 1453. (in Chinese))
- [14] JOL H M. Ground penetrating radar: theory and applications[M]. Amsterdam: Elsevier Science 2009.
- [15] WENG CH CH. Waves and fields in inhomogeneous media[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1990: 37 - 65.
- [16] 柴新涛, 韩文功, 李振春, 等. 基于LSQR算法的谱反演方法研究[J]. 石油物探, 2012, **51**(1): 11 - 18. (CHAI Xin-tao, HAN Wen-gong, LI Zheng-chun, et al. Spectrum inversion method analysis based on the LSQR algorithm[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, **51**(1): 11 - 18. (in Chinese))
- [17] LOIZOS A, PLATI C. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches[J]. NDT&E International, 2007, **40**: 147 - 157.