

文章编号:1673-2049(2007)03-0082-05

雷达波在混凝土无损检测中的应用

涂文戈, 邹银生, 陈理庆, 田明革

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对雷达波在介质中的传播特性和衰减特性,建立了雷达信号在混凝土介质中传播和衰减的数学模型;基于探地雷达的工作机理,提出了对被接收的雷达反射波信号的衰减进行补偿,并且给出了衰减补偿公式。采用该方法对存在裂缝、孔洞和混凝土不密实区域的混凝土构件进行雷达无损检测,经过对雷达信号数据进行衰减补偿后,再对数据进行成像处理以获得雷达扫描图像。结果表明,扫描图像可以较为清晰地显示混凝土构件深部中的缺陷,与工程实际情况符合良好。

关键词:雷达;衰减;补偿;混凝土;无损检测

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Application of Radar Wave in Nondestructive Testing of Concrete

TU Wen-ge, ZOU Yin-sheng, CHEN Li-qing, TIAN Ming-ge

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: According to the characteristics of diffuse and attenuation of radar wave in medium, the mathematical model of diffuse and attenuation of radar signal in concrete medium was established. Based on the work mechanism of radar wave, a formula about compensating the attenuation of the reflecting radar wave signal was presented, and an attenuation compensation formula was given. By image processing on the radar testing data compensated with the method, the radar scanning images were enough clear-cut to display defects in inner concrete, such as the crack, void, incompact zones and so on. It is illustrated with the radar images in practice, which displays the same fabric as the detected inner concrete member with damages. As a result, the method brings radar scanning images into accord with practice.

Key words: radar; attenuation; compensation; concrete; nondestructive testing

0 引言

探地雷达(GPR)探测方法是一种高分辨率的非破坏性的原位探测技术,可以获得被探测介质的连续剖面信息,被广泛应用于环境、地质、工程质量检测等各个方面^[1-4]。探地雷达通过发射天线向介质中发射高频、宽频带的雷达波(其数量级为 $10 \sim 10^3$ MHz),接收天线接收并采集雷达波遇到介质界面后的反射波信号。根据接收到的雷达波的波形、

波幅、同相轴和双程走时等参数分析和推断被检测介质的构造及隐蔽目标体的反射界面、空间位置、几何形态等信息。

探地雷达的探测目标是客观存在的界面,所以传播介质的电性差异和物性差异是探地雷达适用与否的重要标准。传播介质间的物性差异越大,二者间的界面越易于分辨。建筑工程中,雷达探测主要是对混凝土工程进行工程质量的无损探测。因为雷达波在混凝土中传播存在着信号能量的衰减,而混

收稿日期:2007-06-03

基金项目:湖南省建设厅资助项目(200406)

作者简介:涂文戈(1971-),男,湖南长沙人,副教授,工学博士,E-mail:steel_tu@hnu.cn。

凝土构件的病害和缺陷(混凝土不密实、孔洞等)存在于深层混凝土之中,所以在混凝土工程的检测中需要对采集的雷达反射波信号进行更深层次的信号处理和分析,才能获取混凝土工程的构造信息,并及时发现混凝土工程中存在的病害和缺陷。

笔者对雷达波在混凝土介质中的传播特性进行分析,针对混凝土中雷达波的传播速度和衰减特性,提出了对雷达反射波信号的衰减进行补偿,并且给出衰减补偿公式和算法。采用该方法对混凝土工程中的雷达探测数据进行处理和分析,以获得与实际工程情况符合较好的雷达扫描图像。

1 雷达波在地下介质中的传播特性

探测雷达是将高频、宽频带的雷达波能量直接送入混凝土介质中,而雷达波的传播及其反射和透射取决于混凝土中各种介质的高频导电特性及其混凝土的内部构造。由于混凝土由凝胶材料与骨料构成,两者的介电特性和传导特性近似^[5-15],在雷达信号分析中常忽略两者之间的差别,视两者为同一种材料。对于存在病害和缺陷的混凝土,常由于有空气的存在,使空气与混凝土的介电特性和传导特性有着较大的差别,因此通过信号二维成像技术,确定空气存在的区域,以判别孔洞、裂缝和不密实区域。高频雷达波在混凝土介质中的传播存在着衰减,随着传播深度的加大,信号衰减加重,同时由于干扰波覆盖有效信号,使得较深层的混凝土病害与缺陷将难以被探测到。

1.1 传播机理

对二维无源问题,Maxwell 方程为

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: ϵ 为介质复介电常数, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, $j = \sqrt{-1}$; σ 为介质的导电率, $\sigma = \sigma' + j\sigma''$; μ 为介质的磁导率; E 为电场强度; t 为时间。

高频雷达波在混凝土的介电质中传播时,介质的位移电流 ϵ 远大于传导电流 σ ,并且认为磁导率 μ 不变。则高频雷达波在地下二维介质传播的 Maxwell 方程可写成

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中: $v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$ 。

雷达发射雷达波信号和接收的反射波信号为宽频带信号。一般地,雷达波可以通过傅立叶分析方法将其分解为不同频率的正弦波的叠加。对于某一

中心频率的电磁脉冲波垂直入射到铺砌材料组成的传播介质中,则式(2)的解为

$$E(x, t) = E(x) \exp(j\omega t) \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; x 为沿传播方向的距离; $\exp(j\omega t)$ 为时间因子。

1.2 衰减和相移

设信号沿以混凝土构件表面的法线传播,并且定义为沿着 x 轴传播,混凝土材料中的电场强度为矢量,抽出其时间因子 $\exp(j\omega t)$ 的电场强度 $E(x)$ 简写为 E ,则 Maxwell 方程可写为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -k^2 E \quad (4)$$

式中: k 为传播常数,满足以下关系

$$k^2 = \omega^2 \mu\epsilon - j\omega\mu\sigma \quad (5)$$

则式(4)的解为

$$E = E_0 \exp(-jkx) = E_0 \exp(-\alpha x) \exp(-j\beta x) \quad (6)$$

式中: E_0 为电场强度矢量的振幅; α 、 β 分别为传播介质中的衰减因子和相移因子,满足以下关系

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \quad (7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)} \quad (8)$$

式中: δ 为介质的损耗角,是传播介质的总复数导电率的实部与虚部之比,即 $\tan \delta = (\sigma + \omega\epsilon'')/(\omega\epsilon')$ 。

由式(6)可知,电磁脉冲波在介质中传播时,传播距离越远,其电场强度衰减越快,并且雷达波脉冲形状也受 βx 非线性相位的影响而引起畸变。

1.3 在多层介质中的传播速度

多层介质中传播的雷达波,反射电磁场 E_R 和透射电磁场 E_T 可以表示为

$$E_R(n) = R(n) E_T(n) \quad (9)$$

$$E_T(n+1) = T(n) E_T(n) \quad (10)$$

式中: $R(n)$ 为反射系数; $T(n)$ 为透射系数。

探地雷达单脉冲波在多层介质中传播时,在介质界面上会产生反射和透射,反射系数和透射系数分别为

$$R(n) = \frac{k_n - k_{n+1}}{k_n + k_{n+1}} \quad (11)$$

$$T(n) = \frac{2k_n}{k_n + k_{n+1}} \quad (12)$$

式中: k_n 为第 n 层介质的传播常数。

雷达波在介质中的传播时间是分析和建立雷达扫描截面图的关键因素。同时由于雷达波的传播波速、各层介质厚度和传播时间可以相互获取,因此也是采用雷达波进行混凝土厚度评估的重要依据。此

外,通过已知雷达波的传播波速可以获取混凝土的相对介电常数及其对应的混凝土物理性状。

由式(1)得雷达波在介质中的传播速度为

$$v = C \left\{ \frac{\epsilon' - \sigma''/\omega}{2\epsilon_0} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon'' + \sigma'/\omega}{\epsilon' - \sigma''/\omega} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

由于式(9)中, ω 远大于 σ' 和 σ'' , 且 ϵ'' 远小于 ϵ' , 因此, 式(9)可简化为

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon'/\epsilon_0}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (14)$$

式中: ϵ_r 为介质的相对介电常数。一般地, 混凝土的相对介电常数为 6~9。

2 雷达波的衰减补偿

雷达发射雷达波与接收反射波生成雷达扫描截面图, 对扫描图中反射波同相轴错动、同相轴局部缺失, 雷达反射波波形畸变, 雷达反射波频率变化, 雷达反射波中出现的断面波、绕射波等特征进行观察、提取和分析, 获取地下介质结构信息; 然而反射波在时间剖面上的特征往往不是孤立的, 有时是几种特征同时存在, 有时只是某些特征更突出, 而其他特征则不明显。这就需要工程技术人员除对被测区域地质条件充分了解外, 还必须具有丰富的实践经验。

通过对反射波信号加以补偿, 可以将深层反射波及其特征加以放大, 得到更加准确的深层介质信息。由第 1.2 节可知, 雷达波在同一介质中传播存在衰减, 从一种介质入射到另一种介质存在反射和透射, 这 2 种因素共同作用导致深层介质雷达波能量衰减。

第 n 层介质中雷达波的波幅为

$$E_n = \prod_{i=1}^n T(i) E_0 \exp(-\alpha_i x_i) \exp(-j\beta_i x_i) \quad (15)$$

式中: 下标 i 表示第 i 层介质的物理系数(物理量)。

忽略多次反射的影响, 则传播到第 n 层介质的雷达波波幅的衰减系数为

$$\gamma_n = \prod_{i=1}^n T(i) \exp(-\alpha_i x_i) \quad (16)$$

由式(15)、(16)可知, 衰减主要考虑透射和传播介质衰减因子的影响。

对雷达接收的时间序列信号乘以放大系数 η_n 加以补偿, 补偿后的信号 \hat{E} 为

$$\hat{E} = \eta_n E_n \quad (17)$$

式中: $\eta_n = 1/\gamma_n$ 。

由式(16)可知, 放大系数 η_n 与介质分布、各介质的电磁特性相关。为简化问题, 考虑各介质之间

的传播常数相等, 即透射系数为 1, 则随测试深度(测试延迟时间)变化的放大系数为

$$\eta = \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i\right) = \exp\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i v_i t_i\right) \quad (18)$$

式中: v_i 为雷达波在第 i 层介质中的传播速度。

一般地, 因为介质结构未知, 因此介质的衰减因子和传播速度亦未知, 工程中可以通过如式(19)所示的随测试延迟时间变化的放大系数对接收的雷达波信号加以放大, 近似地获得未衰减的雷达信号及其相关的扫描截面图。

随测试延迟时间近似的放大系数 $\eta(t)$ 为

$$\eta(t) = \exp(\lambda t) \quad (19)$$

式中: $\lambda = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i = \alpha_{eq} v_{eq}$, α_{eq} 、 v_{eq} 分别为等效单层介质衰减因子和传播速度。

3 工程应用

采用笔者所提出的雷达波衰减补偿方法对采集的雷达数据进行后处理成像。数据采集样本为底部混凝土框架上部为砌体的商住两用楼房的混凝土转换层, 共采集数据样本 386 个。使用的雷达为发射天线和接受天线的中心频率为 1.2 GHz 的高频雷达。数据采集过程中, 雷达紧贴混凝土构件表面对构件进行扫描, 扫描距离通过外接旋转式光电位移计加以测量。被测混凝土构件厚度分别为 0.35、0.40 m。通过对数据样本进行分析和成像处理, 得到典型的混凝土缺陷雷达扫描截面图。

3.1 混凝土构件雷达扫描截面

图 1 为完好混凝土构件的雷达扫描截面, 由图 1 可知:

(1) 被测面以及其背面钢筋的波形清晰可见(钢筋在扫描截面图中呈倒“V”字波形)。

(2) 被测面倒“V”字波形的中部存在一条亮线, 为纵向钢筋, 这是因为扫描路径靠近纵向钢筋所致; 若扫描路径与纵向钢筋稍远, 则没有此亮线, 如图 2 所示的被测面的钢筋波形。

(3) 被测面背面的倒“V”字波形上方有一亮线或者暗线, 为被测面背面的纵向钢筋。

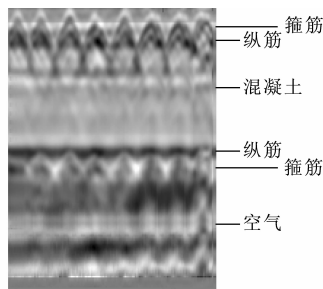


图 1 无损混凝土构件的雷达扫描截面

Fig. 1 Section of Radar Scanning of Nondestructive Concrete Member

(4)根据雷达波在不同介质中传播特性的不同,经过衰减补偿可以在扫描图中较好地反映不同传播介质,混凝土构件与空气被较好地区别开来,并且从图 1 中可以估算沿雷达传播方向混凝土的厚度约为 0.40 m。

3.2 混凝土裂缝雷达扫描截面

图 2 为混凝土中的宽裂缝、窄裂缝、斜裂缝、混凝土表面裂缝和孔洞波形。需要指出的是:因雷达波在混凝土材料中传播的复杂性,大量干扰信号的存在和各种滤波成像算法的使用,故在采用雷达进行混凝土裂缝的探测时,一般只能探测混凝土裂缝是否存在与大致位置,而不能精确地测出其宽度。

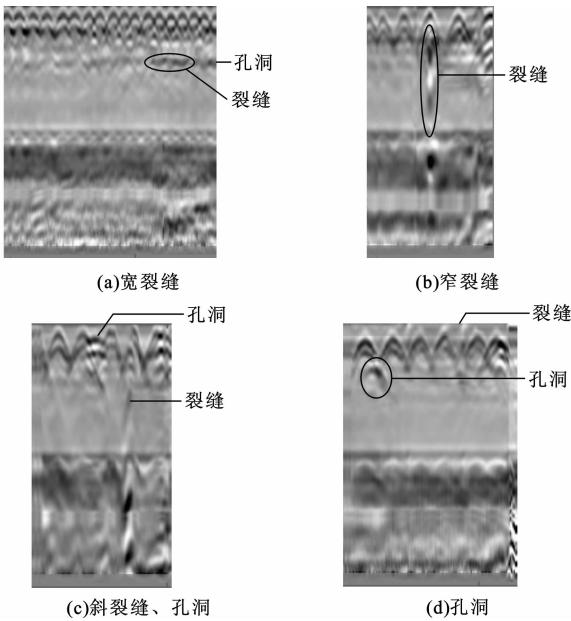


图 2 混凝土构件裂缝、孔洞雷达扫描截面

Fig. 2 Radar Scanning Section of Concrete Member with Cracks and Core Holes

3.3 混凝土孔洞雷达扫描截面

图 2(a)、(c)、(d)所示为混凝土中孔洞存在的反应波形——倒“V”字波形,与钢筋的反应波形一致,这是由于空气或钢铁和混凝土之间介电特性较大,雷达波在它们的交界面将产生强反射。根据倒“V”字波形的曲率可以估计孔洞的大小(钢筋直径),曲率越大,混凝土中孔洞越小;反之则越大。图 2(a)为小孔洞,图 2(c)为两钢筋之间的较大孔洞,图 2(d)为位于钢筋下的孔洞。

3.4 混凝土不密实雷达扫描截面

图 3 为一根钢筋主梁的雷达扫描截面。图 3 中存在小孔洞和斜裂缝,以及混凝土不密实波形。混凝土的不密实区域含有较多的空气,在扫描图中反

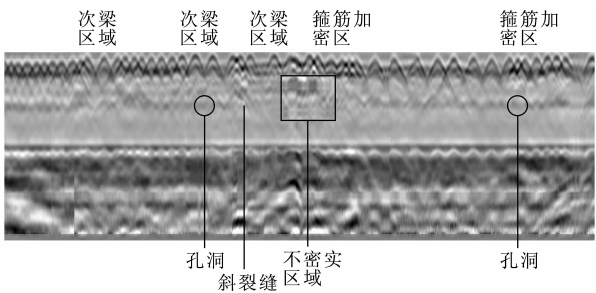


图 3 混凝土构件不密实区的雷达扫描截面

Fig. 3 Radar Scanning Section of Concrete Member with Incompacted Zones

应波形为多层并且一层多个倒“V”字波形相互不规则叠加而成,如图 3 中矩形框所示。

4 结 语

混凝土雷达无损探测可以快速对被测混凝土构件进行扫描,利用空气与混凝土的介电特性和传导特性的差别,通过信号二维成像技术和对信号衰减加以补偿技术,可以在雷达扫描截面图中确定空气存在的区域,根据雷达反射波在混凝土介质中不同的特征反应信号波形判别孔洞、裂缝和不密实区域。综上所述,对雷达波进行衰减补偿获得的雷达扫描截面图,可以直观地反映各种混凝土缺陷。相对于声纳法或者超声波法进行的混凝土无损检测,雷达波检测具有直观性,经过对数据进行信号分析和可视化处理以后有较好的可读性,但是其不足之处在于无法反演获取混凝土或者传播介质的力学参数。

参考文献:

References:

[1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994.
LI Da-xin, Method and Application of Ground Penetrating Radar[M]. Beijing:Geology Press,1994.

[2] 孙洪星,李凤明. 探地雷达高频电磁波传播衰减机理与应用实例[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3): 413-417.
SUN Hong-xing, LI Feng-ming. Attenuation Mechanism and Application Study of High Impulse Electromagnetic Wave Propogation of GPR [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21 (3);413-417.

[3] 刘传孝. 探地雷达空洞探测机理研究及应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):238-241.
LIU Chuan-xiao, Research on the Mechanism of Probing Cavity with Ground Penetrating Radar and Anal-

- ysis on Application Examples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 238-241.
- [4] 樊正芳, 许小剑, 赵素. 毫米波雷达的高分辨力成像[J]. 红外与毫米波学报, 1994, 13(4): 261-266.
FAN Zheng-fang, XU Xiao-jian, ZHAO Su. High Resolution Imaging with Wideband Millimeter-wave Radar[J]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 1994, 13(4): 261-266.
- [5] 樊可清, 倪一清, 高赞明. 大跨度桥梁模态频率识别中的温度影响研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 67-73.
FAN Ke-qing, NI Yi-qing, GAO Zan-ming. Research on Temperature Influences in Long-span Bridge Eigenfrequencies Identification[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 67-73.
- [6] 李忠献, 武魏娜. 大型结构非线性物理参数识别的线性化算法[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 15-20.
LI Zhong-xian, WU Wei-na. Linearization Method to Identify Nonlinear Physical Parameters of Large Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 15-20.
- [7] 王桂萱, 中村秀明, 晏班夫, 等. 基于模糊神经网络的桥梁诊断辅助系统研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 45-50.
WANG Gui-xuan, HIDEAKI Nakamura, YAN Ban-fu, et al. Research on Bridge Diagnosis System with Fuzzy-neural Network[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 45-50.
- [8] 马玉平, 马听, 崔建涛. 高强度混凝土试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 67-69.
MA Yu-ping, MA Xin, CUI Jian-tao. Experimental Research on High-strength Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 67-69.
- [9] 张杨, 李国强. 通用频率指纹库在固接梁损伤定位中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 40-44.
ZHANG Yang, LI Guo-qiang. Application of Universal Bank of Natural Frequency Indexes in Damage Location of Beams with Fixed Ends[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 40-44.
- [10] 王春生, 陈艾荣, 陈惟珍. 基于断裂力学的老龄钢桥剩余寿命与使用安全评估[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 42-47.
WANG Chun-sheng, CHEN Ai-rong, CHEN Wei-zhen. Assessment of Remaining Fatigue Life and Service Safety for Old Steel Bridges Based on Fracture Mechanics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 42-47.
- [11] 王柏生, 何宗成, 赵琛. 混凝土大坝结构损伤检测振动法的可行性[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 51-57.
WANG Bai-sheng, HE Zong-cheng, ZHAO Chen. Feasibility About Vibration-based Method for Structural Damage Detection of Concrete Dams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 51-57.
- [12] 吴方伯, 汪幼林, 周绪红, 等. 混凝土密肋空心楼盖试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 59-62.
WU Fang-bo, WANG You-lin, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Research on Hollow-ribbed Concrete Floor[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 59-62.
- [13] 向天宇, 赵人达. 结构损伤识别的双重网格算法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 94-97.
XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da. Dual Mesh Method for Structure Damage Detection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 94-97.
- [14] 丁幼亮, 李爱群, 缪长青, 等. 基于小波包能量谱的大跨桥梁结构损伤预警指标[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 34-40.
DING You-liang, LI Ai-qun, MIAO Chang-qing, et al. Structural Damage Alarming Indices for Long-span Bridges Based on Wavelet Packet Energy Spectrum[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 34-40.
- [15] 常军, 张启伟, 孙利民. 基于随机子空间结合稳定图的拱桥模态参数识别方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(1): 21-25.
CHANG Jun, ZHANG Qi-wei, SUN Li-min. Identified Method of Arch Bridge Modal Parameters Based on Stochastic Subspace Combined with Stabilization Diagram[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(1): 21-25.