DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2026.03.010
文章编号:1671-2579(2026)03-0082-07

基于探地雷达的沥青路面内含水率检测图谱特征分析

杨丽,何平平*,刘威震,付安
(长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114)

摘要:探地雷达(Ground Penetrating Radar,GPR)作为一种新型道路无损检测方法,能够通过定期检测道路内部含水状况,有效预防道路水损害。然而,在分析探地雷达含水数据时,依靠单一图谱特征分析得到的含水状况可能存在误判。为提高探地雷达路面内部含水率检测的准确度和可靠性,该文聚焦于探地雷达含水率检测图谱的时频域分析,开展模拟试验,对道路面层含水检测的影响因素和结果进行了深入研究,重点分析了不同面层体积含水率下雷达检测图谱的表现规律。研究发现:天线高度的变化对地面反射波的影响较大,而面层厚度的变化主要影响面层-基层交界面回波信号的到达时间和能量强弱。此外,随着面层含水率的增加,地面反射波振幅显著增大,含水层下界面反射波到达时间延长,且层内反射波频率呈现降低趋势。研究成果可为采用探地雷达对道路内部含水率检测提供理论依据。

关键词:道路工程;探地雷达;含水率;时频域分析;图谱特征
中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A

Characteristic Analysis of Detection Profiles for Internal Moisture Content of Asphalt Pavements Based on Ground Penetrating Radar

YANG Li, HE Pingping*, LIU Weizhen, FU An
(School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: As a novel non-destructive testing method for roads, ground penetrating radar (GPR) can effectively prevent road water damage by regularly detecting the internal moisture condition of roads. However, when the moisture data of GPR are analyzed, the moisture conditions obtained by relying solely on the analysis of a single profile characteristic may be misjudged. To improve the accuracy and reliability of GPR in detecting the internal moisture content of pavements, focus was placed on the time-frequency domain analysis of GPR moisture content detection profiles in this paper. Simulation tests were conducted, and the influencing factors and results of moisture detection in the pavement surface layer were deeply investigated. Furthermore, the performance patterns of radar detection profiles under different levels of volumetric moisture content of the surface layer were emphatically analyzed. The results indicate that the change in antenna height has a significant impact on the ground reflected wave, while the change in surface layer thickness mainly affects the arrival time and energy intensity of the echo signal at the surface layer-base interface. In addition, as the moisture content of the surface layer increases, the amplitude of the ground reflected wave increases significantly; the arrival time of the reflected wave at the lower interface of the moisture layer is prolonged, and the frequency of the reflected wave within the layer shows a decreasing trend. The research results provide a theoretical basis for detecting the internal moisture content of roads using GPR.

Keywords: road engineering; ground penetrating radar; moisture content; time-frequency domain analysis; profile characteristic

收稿日期:2024-12-02 **修回日期:**2025-03-02
基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:S2024JJQNJJ1224);长沙理工大学科研创新项目(编号:GSLGCX23021)
作者简介:杨丽,女,硕士研究生. E-mail:22101030094@stu.csust.edu.cn
***通信作者:**何平平,女,博士,讲师. E-mail:pingping.he@csust.edu.cn

0　引言

中国道路建设飞速发展，伴随而来的质量检测问题日趋突出[1-2]。道路在长期服役过程中，环境中的水分通过孔隙、裂缝以及边坡等方式浸入路表，经过长时间渗入作用，导致道路内部含水率增大，最后可能引起路基软化坍塌，路面开裂、滑坡等问题[3-4]，影响道路使用寿命。因此，定期检测服役道路内部水分含量，对于整体评价道路质量，预防及处治道路病害具有重要意义。

作为一种新型道路内部病害检测手段，探地雷达（Ground Penetrating Radar，GPR）相比传统的钻孔取芯法具有无损、高效和超高分辨率等优点[5]。探地雷达对目标的探测主要取决于材料的介电常数差异，水的介电常数远大于道路材料的介电常数，道路内部含水率过高会明显影响雷达信号[6]，因此探地雷达逐渐被用于道路含水率无损测量[7-9]。

含水率图谱分析是探地雷达含水率研究中关键的环节[10-11]。Zhang等[7]采用2.3 GHz地面耦合天线对沥青桥面进行了数据采集，通过对图谱中强反射信号的识别，在雷达B-scan图谱中发现了水损害，并采用取芯法验证了图谱中高亮特征的区域存在水损害；黄乐艺[12]在管道渗漏病害检测中，通过模拟方法得到雷达检测B-scan图谱，并且分析图谱确认了渗漏区域在B-scan中存在高亮特征；凌同华等[13]在隧道检测中使用探地雷达剖面图B-scan识别了不同含水率充填介质空洞。尽管大量研究都证明含水区域在探地雷达B-scan图谱中会呈现高亮特征，但是由于道路材料和结构的复杂性，检测结果受到很多其他因素的干扰，仅依靠B-scan图谱中的高亮特征并不能有效判定检测区域包含含水区域且无法反映道路内部含水量变化。

针对上述探地雷达含水率检测中的图谱分析问题，本文开展仿真模拟试验，考虑不同面层厚度和不同天线高度在探地雷达所得图谱的表现特征及影响，设置不同面层含水率的路面结构模型，通过图谱分析法对仿真数据含水状况进行深入分析研究，总结道路内部在不同含水状况时，雷达图谱的时域、频域表现特征，可为探地雷达对道路内部含水率检测提供依据。

1　探地雷达检测原理

探地雷达利用高频电磁波探测不同电磁特性的目标结构和分布[14]。如图1所示，发射天线T发射的高频电磁波，在遇到地下介质变化时，会在不同介质的分界面处发生反射与折射作用[15]，相邻介质材料介电常数差异越大，反射能量越强。20 ℃时，纯水的介电常数为81，空气介电常数为1，而道路材料如沥青混凝土、水泥稳定碎石，其介电常数为3～12[16]。因此，含水率高的区域整体介电常数大，反射能量强，回波信号特征会更加明显，探地雷达的探测效果也会更好。

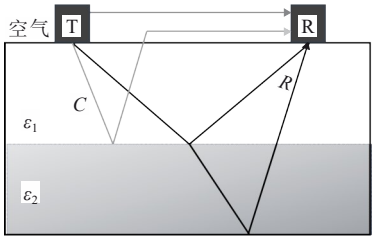


图1　电磁波的传播

Figure 1　Propagation of electromagnetic waves

基于探地雷达的含水率分析计算主要依赖于反射信号。反射信号的延时、调频和幅度是评价材料特性的有效指标[17]。电磁波在道路内部的传播过程满足Maxwell方程，它建立起了电场和磁场以及介质特性之间的联系[18]。根据接收的反射信号的波形、振幅强度、时间变化等因素，可以推断出道路内部材料的介电特性。与其他道路所用材料相比，水的介电常数ε很大，当道路内部含水时，介电特性会明显不同[19]。因此，通过建立相应的电性参数与含水量之间的数学关系，探地雷达即可实现对道路内部含水率的无损检测。

2　试验设计

探地雷达数值模拟是通过计算机建模，重构电磁波在地下介质中的传播特性，生成与实际检测高度一致的雷达图谱。相较于传统室内试验方法，数值模拟能够实现更理想的波传播效果，并且可精准调控含水率、天线高度、面层厚度等参数，从而显著降低数据分析的难度[20-21]。因此，本文通过数值模拟方法开展探地雷达对道路不同面层含水率的检测研究。研究依靠探地雷达仿真软件GprMax进行数值模拟。

试验内容包括两部分，模拟天线高度和面层厚度变化对面层含水率检测结果的影响，以减少纵向深度设置产生的检测误差。模拟面层体积含水率为0%、6%、9%、12%、15%时的雷达检测，对检测结果

进行图谱分析，在时频图中分析含水率变化在图谱中的表现特征。

试验需建立路面几何结构模型并进行GprMax电磁仿真，试验变量包括面层厚度、天线高度、面层含水率。面层厚度和面层含水率是路面结构参数，建立几何结构模型时进行设置；天线高度是电磁仿真参数，在仿真模拟时设置。最后得到仿真结果并对A-scan、B-scan图谱进行结果分析。

建立路面几何结构模型。研究所用几何模型是在Matlab软件中基于随机函数建立的非均质路面结构模型，如图2所示，模型单元格大小为0.001 4 m×0.001 4 m，模型大小为2.80 m×0.42 m，模型由上至下分别为面层和基层，面层厚度为0.14 m（在研究面层厚度对检测结果影响时，面层厚度会产生变化），包含沥青混凝土、空气、水3种组分，基层厚度为0.28 m，包含水泥稳定碎石和空气两种组分。因为本研究只针对面层进行检测，基层尺寸和各组分材料比例不会发生变化。

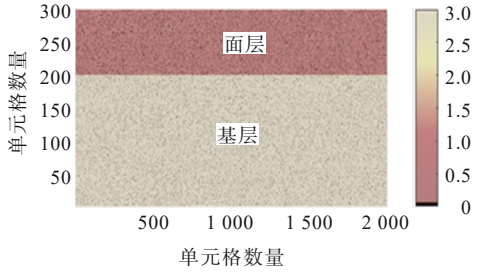


图2 非均匀路面结构模型

Figure 2 Non-uniform pavement structure model

面层厚度设置，改变面层纵向单元格数量，得到0.12 m、0.14 m、0.16 m、0.18 m、0.20 m共5组不同面层厚度的路面几何结构模型；含水率设置，改变面层各组分的比例，模型中沥青混凝土的体积比例始终不变，保持为85%，设置空气体积比例分别为15%、9%、6%、3%、0%，得到0%、6%、9%、12%、15%共5组不同面层含水率的路面几何结构模型。

GprMax参数设置及电磁仿真。沥青混凝土和水泥稳定碎石的电性参数可以参考已有文献进行设置，具体数值如表1所示。天线激励源设置为Ricker子波，中心频率为1 200 MHz，时窗设置为7 ns。天线测量方式选择剖面法，即收发天线间距固定为3 cm，采集过程中收发天线同步向前移动，每次移动1 cm。改变天线高度，设置天线高度为2 cm、4 cm、6 cm、8 cm，对5组不同面层含水率的路面结构模型开展电磁仿真；固定天线高度为6 cm，对5组不同面层厚度的路面结构模型开展电磁模拟计算。

表1 电磁仿真模拟中各材料电性参数设置

Table 1 Electrical parameter settings of each material in electromagnetic simulation

各组分材料	相对介电常数ε	电导率σ/(S·m^{-1})	磁导率μ/(H·m^{-1})
沥青混凝土	5[22]	0	1
水泥稳定碎石	7[22]	0	1
空气	1	0	1
水	81	0.01	1

时频数据提取。通过Matlab编程提取A-scan、B-scan图谱中的电磁数据，绘制时频曲线。基于Cmor函数对面层不同含水率的电磁数据进行连续小波变换，得到时频图，小波变化公式如式(1)所示：

$$\psi(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\mathrm{e}^{iw_0t}\mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2\sigma}} \tag{1}$$

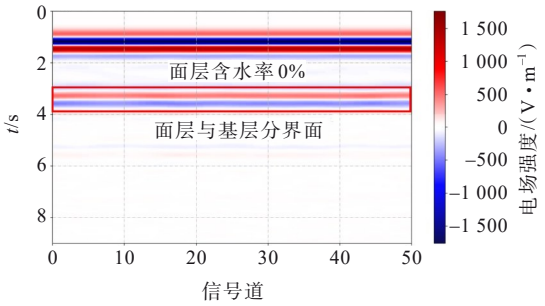
式中：$\psi(t)$为小波函数；t为时间变量(s)；w_0为小波的中心频率(Hz)；σ为小波包络的标准差(s)，控制小波的时间局部化程度。

3 结果与讨论

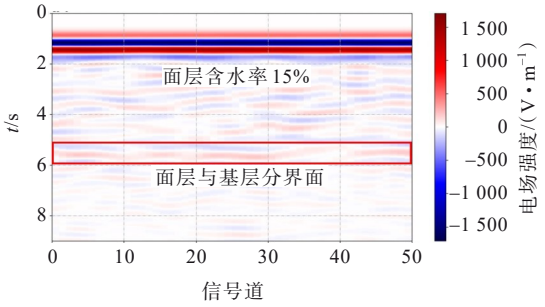
通过模拟试验得到的不同体积含水率影响下的道路面层B-Scan图谱如图3所示。可以很明显地观察到面层与基层的分界面，且随着含水率增大，面层与基层的交界面下移。这是因为含水率增大，面层的整体介电常数变大，引起电磁波在面层内的波速降低，电磁波在面层的传播时间变久，符合电磁波传播的基本规律。

3.1 天线高度和面层厚度对含水率检测的影响

天线高度不同时，面层时域信号随着含水率的变化模拟结果如图4所示。本文为便于解释，将空气与路面交界面的反射波称为地面反射波，道路内部面层与基层交界面的反射波称为面层-基层层界面反射波，图4中，出现的第一段波形为直达波与地面反射波，在天线高度为2 cm、4 cm、6 cm、8 cm时，直达波与地面反射波重叠，无法观察到含水率变化时地面反射波的变化规律；红色框选部分为面层-基层层界面反射波，可以发现，随着天线高度的增加，面层与基层层界面反射波到达时间逐渐变长，并且天线高度为6 cm和8 cm时，只有面层含水率为0%可以观察到清晰的面层-基层反射界面，随着含水率增加，电磁信号衰减严重，下层界面反射信号变弱。



（a）面层含水率0%



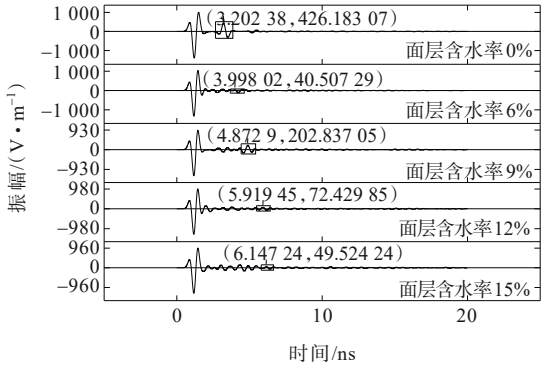
（b）面层含水率15%

图3　不同面层含水率的B-Scan图谱

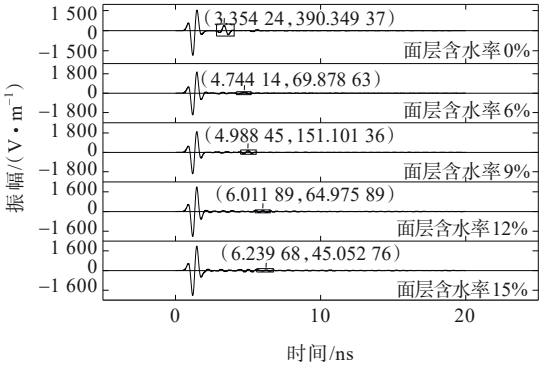
Figure 3　B-Scan profiles under different levels of surface layer moisture content

为区分直达波和地面反射波，对更多组的天线高度进行模拟，发现在天线高度大于35 cm之后，直达波与地面反射波完全分离，提取此时的直达波，并对不同含水率波形图进行直达波去除处理，结果如图5所示。去除直达波后，不同面层含水率时的地面反射波有了明显规律，随着含水率不断增加，地面反射波的振幅逐渐增大，这可能是因为面层含水率的增加使得面层内部相对介电常数变大，面层与空气层间的反射系数变大，导致反射波信号增强。

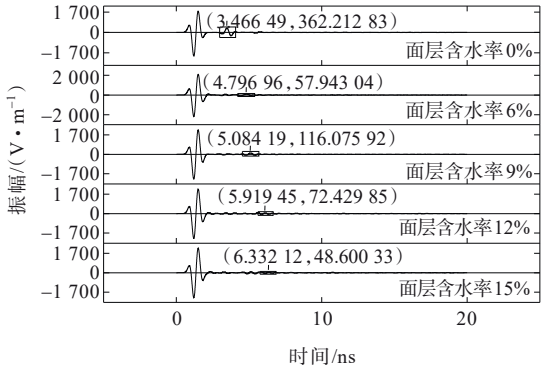
面层厚度不同时，面层时域信号随着含水率的变化模拟结果如图6、图7所示。由图6、图7可知：在面层含水率为0%时，面层厚度变化，对地面反射波无明显影响，面层厚度变化改变了回波信号中面层-基层交界面的信号到达时间。但是，面层内部含水时，回波信号中地面反射波的振幅受到了轻微影响，且面层-基层交界面回波在含水时，随着面层厚度变化，到达时间变晚且能量逐渐减弱。这意味着仅依靠下界面回波特征进行面层含水率检测会受到面层厚度变化的干扰，必须结合地面反射波一起对面层内部含水率进行综合分析。



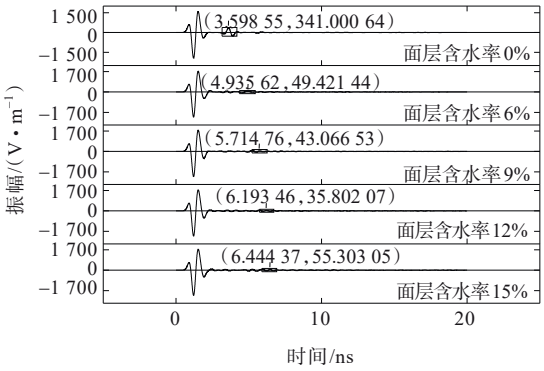
（a）天线高度2 cm



（b）天线高度4 cm



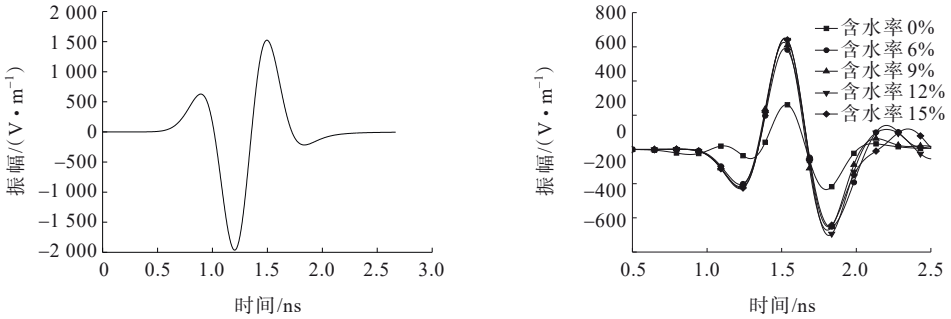
（c）天线高度6 cm



（d）天线高度8 cm

图4　不同天线高度时面层含水率检测时域图

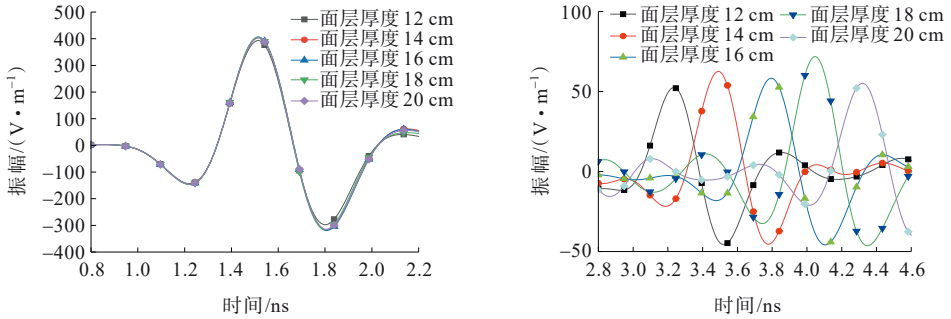
Figure 4　Time domain chart of surface layer moisture content detection under different antenna heights



(a) 直达波　　(b) 去除直达波后

图 5　地面反射波效果

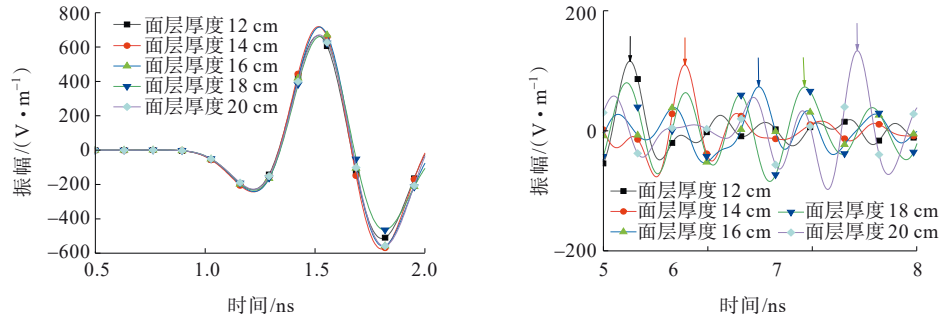
Figure 5　Effect of ground reflected waves



(a) 地面反射波　　(b) 面层-基层交界面反射波

图 6　不含水时不同面层厚度地面反射波和面层-基层交界面反射波

Figure 6　Ground reflected waves and reflected waves at surface layer-base interface under different surface layer thicknesses without water



(a) 地面反射波　　(b) 面层-基层交界面反射波

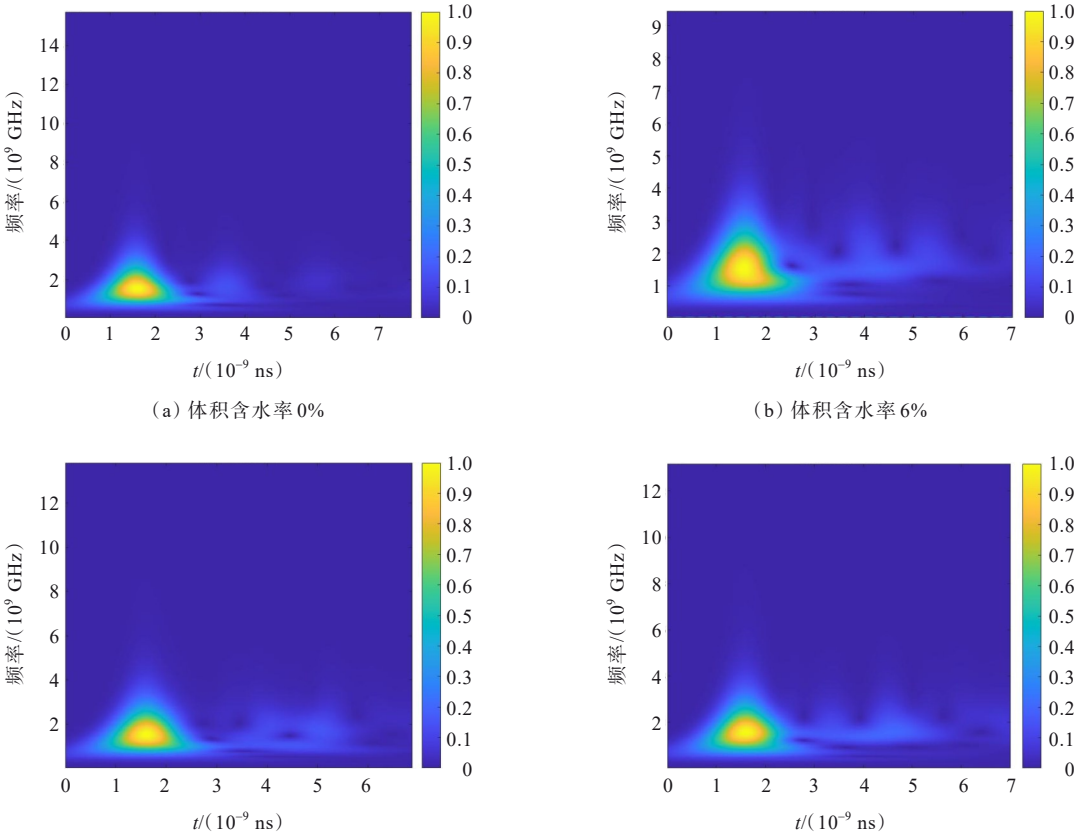
图 7　含水时不同面层厚度地面反射波和面层-基层交界面反射波

Figure 7　Ground reflected waves and reflected waves at surface layer-base interface under different surface layer thicknesses with water

3.2　面层不同含水率时频结果分析

为了更加直观完整地观察到含水率变化对检测结果的影响[23]，利用 Matlab 中的 Cmor 函数对体积含水率为 0%、6%、9%、12% 的面层仿真数据进行连续小波变换，得到探地雷达含水率检测的时频图，结果如图 8 所示。在时频图中，既包含时域信息，又包含频域信息，横轴代表时间，纵轴代表频率，图内亮度越高，说明反射能量越强。图 8 中，时间深度 1～2 ns 时到达的是地面反射波，在这之后到达的为路面内部的反射波，可以发现：相较不含水时，含水后路内反射波范围变大，能量变强，除了面层-基层交界面发生明显反射外，面层内也多次发生局部明显反射现象。这是由于非均质模型内水分子的存在改变了道路内部局部的介电常数，使得电磁波在介电常数差异处发生反射，当反射后的信号被接收天线接收后就会产生这种连续片状图像。此外，随着含水率升高，观察到反射

信号向低频移动的现象，这是因为试验所用模型为非均质模型，模型颗粒尺寸远小于入射波的波长，当电磁波进入面层后，发生瑞利散射，含水量越高，衰减越高，从而导致可观察到的“频移”现象。



（a）体积含水率0%　（b）体积含水率6%　（c）体积含水率9%　（d）体积含水率12%

图8　不同体积含水率检测时频图

Figure 8　Time-frequency diagram of detection under different levels of volumetric moisture content

4　结论

探地雷达技术的不断成熟，为道路含水率检测提供了新的方法。雷达检测图谱中包含很多与含水率有关的信息，本文聚焦于探地雷达含水率图谱分析，开展数值模拟试验，对道路面层含水检测的影响因素和检测的图谱结果进行了深入研究。得到以下主要结论：

（1）道路工程中所用材料为低耗材料，导电性差，雷达反射信号与道路内部水分含量有强相关性，探地雷达可用于道路内部含水率检测。

（2）天线高度变化会干扰地面反射波观测，需通过直达波消除技术提取有效信号；而面层厚度主要影响面层–基层交界面信号的时延和能量强度。

（3）随着面层含水率变大，时频图像中表现出特定的规律：地面反射波振幅变大，含水层下界面反射波到达时间延长，层内反射波频率降低。

（4）研究验证了0%～15%体积含水率的检测规律，但受限于模拟条件，建议后续通过扩展数据样本和实测验证，提升结果可靠性。

参考文献：

References：

[1]　王伟，郑睿．基于探地雷达的道路半刚性基层含水率检测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(12): 1248-1255.
WANG Wei, ZHENG Rui. Water content detection of road semi-rigid base based on ground penetrating radar[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(12): 1248-1255.

[2]　刘宪明，夏晗，胡冬平，等．公路路面损坏与内部隐伏病害的关联性研究[J]. 中外公路, 2024, 44(5): 75-82.
LIU Xianming, XIA Han, HU Dongping, et al. Correlation between pavement distress and structural hidden distress [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(5): 75-82.

[3]　肖洪智．高速公路路基路面排水存在的问题及快速养护

方案[J]. 交通世界, 2020(16): 30-31.
XIAO Hongzhi. Problems existing in drainage of expressway subgrade and pavement and quick maintenance scheme[J]. TranspoWorld, 2020(16): 30-31.

[4] 徐希忠, 韦金城, 闫翔鹏, 等. 长寿命沥青路面研究现状及展望[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 36-43.
XU Xizhong, WEI Jincheng, YAN Xiangpeng, et al. Review and outlook for long-life asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 36-43.

[5] XIONG X T, XIAO S Q, TAN Y Q, et al. Estimation of density and moisture content in asphalt mixture based on dielectric property[J]. Construction and Building Materials, 2021, 298: 123518.

[6] CHANZY A, TARUSSOV A, BONN F, et al. Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1318-1326.

[7] ZHANG J, ZHANG C, LU Y M, et al. In-situ recognition of moisture damage in bridge deck asphalt pavement with time-frequency features of GPR signal[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244: 118295.

[8] CAO Q Q, AL-QADI I L. Effect of moisture content on calculated dielectric properties of asphalt concrete pavements from ground-penetrating radar measurements [J]. Remote Sensing, 2022, 14(1): 34.

[9] CAO Q Q, ABUFARES L, AL-QADI I L. Development of a simulation-based approach for cold in-place recycled pavement moisture-content prediction using ground-penetrating radar[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2022, 2676 (10): 682-694.

[10] 江桂升. 基于空气耦合式探地雷达的沥青路面水损害识别方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
JIANG Guisheng. Research on moisture damage identification method of asphalt pavement based on air-coupled ground penetrating radar[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.

[11] 王大为, 吕浩天, 汤伏蛟, 等. 三维探地雷达道路隐性病害检测分析与数字化技术综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 1-19.
WANG Dawei, LYU Haotian, TANG Fujiao, et al. Road structural defects detection and digitalization based on 3D ground penetrating radar technology: A state-of-the-art review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(3): 1-19.

[12] 黄乐艺. 城市地下供水管线渗漏探地雷达正演模拟与解释方法应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
HUANG Leyi. Application on the GPR forward simulation and interpretation methods for the leakage of underground water supply pipelines in the urban area[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[13] 凌同华, 刘芳, 何文超, 等. 含水空洞的探地雷达正演模拟与试验研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3): 40-47.
LING Tonghua, LIU Fang, HE Wenchao, et al. Forward simulation and experimental study of GPR for water-bearing cavity[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3): 40-47.

[14] COLEMAN Z W, SCHINDLER A K. Investigation of ground-penetrating radar defect detection capabilities, influence of moisture content, and optimal data collection orientation in condition assessments of concrete bridge decks[J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 202: 104655.

[15] KLEWE T, STRANGFELD C, KRUSCHWITZ S. Review of moisture measurements in civil engineering with ground penetrating radar-Applied methods and signal features[J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122250.

[16] LIU X B, CHEN J, CUI X H, et al. Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: A review of current methods[J]. International Journal of Digital Earth, 2019, 12(1): 95-118.

[17] BENEDETTO F, TOSTI F, ALANI A M. An entropy-based analysis of GPR data for the assessment of railway ballast conditions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(7): 3900-3908.

[18] 曾昭发, 刘四新, 冯晅, 等. 探地雷达原理与应用[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2023.
ZENG Zhaofa, LIU Sixin, FENG Xuan. Principles and applications of ground penetrating radar[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2023.

[19] LYU G, YANG J, LI N, et al. Dielectric characteristics of unsaturated loess and the safety detection of the road subgrade based on GPR[J]. Journal of Sensors, 2018, 2018 (1): 5185460.

[20] 曾良生. 探地雷达正演数值模拟和天线仿真设计[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2023.
ZENG Liangsheng. Numerical simulation of ground penetrating radar forward and antenna simulation design [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2023.

[21] GIANNAKIS I, GIANNOPOULOS A, WARREN C. A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(1): 37-51.

[22] 邹宝刚. 雷达法检测沥青路面厚度影响因素分析[J]. 天津建设科技, 2018, 28(4): 36-38.
ZOU Baogang. Influence factors analysis of asphalt pavement thickness detected by radar method[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2018, 28(4): 36-38.

[23] 林博煌, 石立万, 廖伟杰, 等. 基于图像处理的粗集料细观分布均匀性研究[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 214-218.
LIN Bohuang, SHI Liwan, LIAO Weijie, et al. Study on meso-distribution uniformity of coarse aggregate based on image processing[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 214-218.