

УДК 625.7:528.48

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.125

РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ КОНСТРУКТИВНИХ ШАРІВ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ТА ПОШУКУ ЛОКАЛЬНИХ ВКРАПЛЕНЬ МЕТОДАМИ ПІДПОВЕРХНЕВОЇ ГЕОРАДІОЛОКАЦІЇ

Батракова А. Г., Дорожко Є. В., Урдзік С. М., Шелкова І. С.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті запропоновано метод реєстрації відбиття надширококутних імпульсних сигналів георадара на різних поляризаціях та описано процедуру оброблення георадарних показників під час розв'язання завдань товщинометрії та дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу з підповерхневими неоднорідностями та слабкоконтрастними шарами. Емпіричні дослідження підтвердили ефективність запропонованого методу та алгоритму. Сукупність досягнутих результатів підвищує точність визначення товщини шарів і позиціонування підповерхневих неоднорідностей.

Ключові слова: нежорсткий дорожній одяг, георадар, надширококутні імпульсні сигнали, діелектрична проникність, товщинометрія, підповерхневі неоднорідності.

Вступ

Аналіз сучасних світових тенденцій щодо забезпечення функціонування об'єктів критичної інфраструктури вказує на зміщення акцентів щодо забезпечення їх безпеки та стійкості – здатності протистояти та відновлюватися після техногенних аварій або реалізації загроз природного походження та інших інцидентів. Автомобільні дороги, аеродроми, мости, транспортні тунелі є об'єктами вищої категорії складності та небезпеки, порушення або припинення функціонування яких завдає шкоди національним інтересам: економіці, державній безпеці та обороні. На сьогодні прийняття рішень щодо стійкості та надійності таких об'єктів стримується складністю завдань позиціонування та ідентифікації підповерхневих неоднорідностей природного або штучного походження в багатокомпонентних середовищах і багатошарових конструкціях.

Забезпечення заданого рівня надійності дорожнього одягу на автомобільних дорогах потребує розроблення методів і засобів безперервного отримання інформації та її оброблення в реальному часі, з огляду на параметри структурної неоднорідності, неоднорідності фізико-механічних параметрів конструкцій, а також їх змінювання в часі. Розв'язання зазначеної проблеми стримується складністю завдань отримання та інтерпретації показників підповерхневого зондування та пов'язаними з цим похибками у визначенні параметрів конструкцій, недосконалістю методів дефектоскопії плоскошаруватих конструкцій з підповерхневими неоднорідностями, багатofакторністю

задач оцінки фізико-механічних параметрів багатокомпонентних матеріалів. Вирішення окреслених завдань пов'язано з розробленням методів реєстрації зондувальних надширококутних імпульсних сигналів георадара, відбитих від підповерхневих неоднорідностей, з удосконаленням методів і алгоритмів оброблення та інтерпретації георадарних показників. Це дасть змогу підвищити точність георадарної діагностики дорожнього одягу і достовірність оцінки його надійності та залишкового ресурсу.

Аналіз публікацій

Проблемам георадарної діагностики та оцінювання стану об'єктів транспортної інфраструктури присвячено значну кількість наукових робіт. Численні дослідження спрямовані на розв'язання завдань, зокрема позиціонування прихованих неоднорідностей і руйнувань [1, 2]. На сучасному етапі дослідження в галузі георадарної діагностики набули розвитку в трьох основних напрямках [1–11]: створення практичних методик георадарного зондування [3, 4]; розроблення методів первинного оброблення та інтерпретації сигналів георадара [5, 6]; оптимізація параметрів георадарного обладнання та підвищення роздільної здатності [7, 8]. Найбільш ґрунтовний аналіз технічних можливостей сучасних георадарів для розв'язання завдань пошуку та ідентифікації прихованих неоднорідностей містить робота [10]. Вирішення завдань інтерпретації результатів зондування ґрунтоване на методах попереднього оброблення з метою вилучення «шумів» та збійних сигналів [3, 5].

Для пошуку й визначення геометричних параметрів підповерхневих тріщин запропонований багаточастотний підхід [1], що передбачає застосування антен із високою частотою імпульсу для оцінювання геометричних параметрів тріщин, з низькою частотою – для пошуку тріщин, автоматичної ідентифікації відхилень у структурі та властивостях матеріалів шарів [6], також набули розвитку методи, основані на результатах чисельного й фізичного моделювання впливу вертикальних тріщин на хвильове поле георадара. Метод дає змогу визначити горизонтальне положення, глибину та відносну ширину прихованих неоднорідностей на глибині до 2 м. Серед багатьох методів позиціонування та ідентифікації прихованих неоднорідностей необхідно згадати доробок вітчизняних учених – методи виявлення та класифікації підповерхневих об'єктів із застосуванням штучних нейронних мереж [2]. Найбільш перспективними, на наш погляд, є дослідження, орієнтовані на застосування георадара, антени якого випромінюють на двох різних високих частотах за різної орієнтації антени [10]. Такий підхід дає змогу вивчати поляризаційний стан імпульсних сигналів георадара для виконання завдань товщинометрії, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин. Але, незважаючи на стрімкий розвиток досліджень у галузі дефектоскопії багатошарових середовищ, залишаються відкритими питання: забезпечення точності відновлення електричних параметрів, підвищення надійності результатів вимірювань, розроблення методів, алгоритмів та програмного забезпечення щодо оброблення та аналізу сигналів з метою позиціонування та ідентифікації підповерхневих неоднорідностей (вкраплень) різного походження.

Мета та постановка завдання

Результати підповерхневого зондування переважно інтерпретуються як глибинний розріз конструкції, що призводить до суттєвих похибок під час розв'язання завдань товщинометрії та дефектоскопії. Методи інтерпретації основані на апріорній інформації про електрофізичні характеристики матеріалів конструкцій, що потребує додаткового калібрування приладів та істотно знижує точність відновлення структури. Тому розроблення методу автоматичного визначення діелектричної проникності, що забезпечує точність розв'язання завдань товщинометрії та дефектоскопії, а також підвищує оперативність діагностики, є актуальним науковим і практичним напрямом.

Дефектоскопія плоскошаруватих композитних середовищ, зокрема конструкцій нежорсткого дорожнього одягу, методами георадіолокації стримується також складною залежністю динамічних характеристик хвиль від фізичних властивостей матеріалів конструкції. Більшість методів, що відомі авторам, мають обмеження, пов'язані з припущеннями про однорідність і незмінність структурних і електрофізичних параметрів шарів конструкцій, або обмежені певним типом антенних систем. Розвиток методів реєстрації кросполяризаційної компоненти сигналу та аналізу електромагнітного поля зі змінним станом поляризації дає змогу на якісно новому рівні оцінити локалізацію порушень суцільності конструкції.

Тому метою дослідження є підвищення точності та надійності визначення границь шарів конструкції нежорсткого дорожнього одягу, які мають слабкий рівень електродинамічного контрасту, що обумовлений взаємопроникненням матеріалів шарів або змінюванням їх фізико-механічних властивостей. Розв'язання поставленого завдання пов'язано з розробленням методу отримання відбитих сигналів георадара та удосконаленням алгоритмів їх оброблення.

Метод реєстрації відбиття на різних поляризаціях

Як доводять попередні теоретичні та емпіричні дослідження авторів, розвиток методів аналізу електромагнітного поля зі змінним станом поляризації дає змогу на якісно новому рівні оцінити локалізацію порушень суцільності конструкції та, на відміну від відомих і раніше розроблених методів, позиціонувати невеликі за розміром вкраплення навіть за незначного контрасту в діелектричній проникності [12].

Запропонований метод реєстрації відбиття надширокосмугового імпульсного сигналу георадара на різних поляризаціях реалізується за допомогою вимірювання відбитого сигналу від листа металу в процесі похилого падіння та паралельної поляризації, реєстрації відбитого імпульсу на перпендикулярній поляризації з подальшим вимірюванням коефіцієнта відбиття від досліджуваної конструкції нежорсткого дорожнього одягу на паралельній і перпендикулярній поляризації.

На першому етапі вимірювань лист металу розміщують на поверхні досліджуваної конструкції, а передавальну та приймальну антени георадара – над металевим листом для вимірю-

вання відбитого надширококутного імпульсу в процесі похилого падіння та паралельної поляризації (компоненти вектора електричного поля спадної A_{\parallel} та відбитої $R_{m,\parallel}$ хвиль розташовані в площині, паралельній площині падіння) і реєстрації відбитого імпульсу (рис. 1).

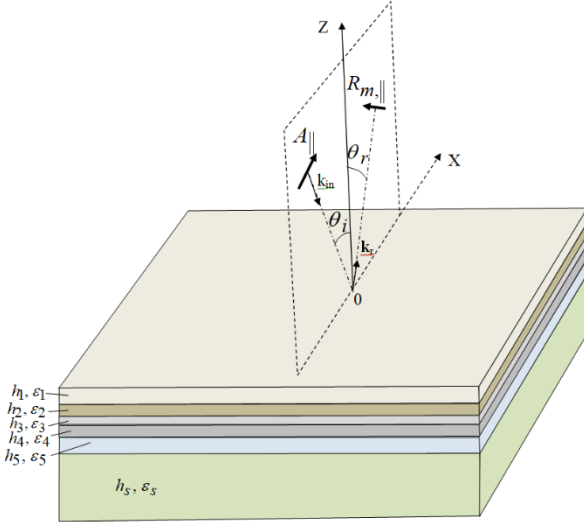


Рис. 1. Зондування на паралельній поляризації

Далі передавальна та приймальна антени повертаються на кут 90 градусів (рис. 2) для реєстрації відбитого імпульсу на перпендикулярній поляризації.

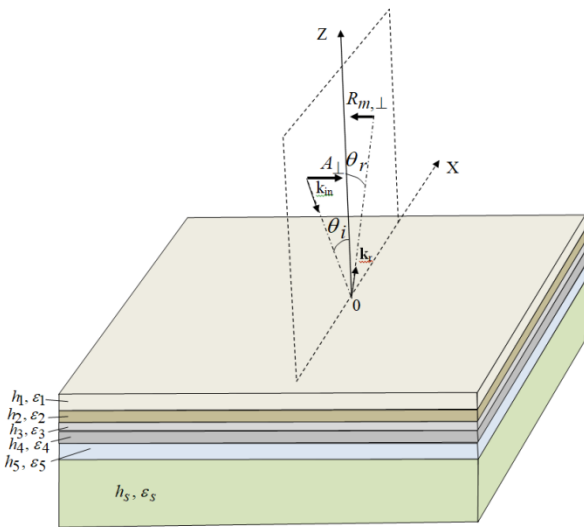


Рис. 2. Зондування на перпендикулярній поляризації

У цьому разі компоненти вектора електричного поля спадної хвилі A_{\perp} і відбитої хвилі $R_{m,\perp}$ розташовані в площині, перпендикулярній площині падіння. Далі вимірювання коефіцієнта відбиття проводять від досліджуваної

конструкції дорожнього одягу на паралельній та перпендикулярній поляризаціях ($R_{k,\parallel}$, $R_{k,\perp}$) відповідно до рис. 1 і 2.

Оброблення добутих показників запропоновано реалізовувати у два етапи. На першому етапі відповідно до алгоритму калібрування, запропонованого в роботі [12], розташований розподіл у часі імпульсу, що падає на досліджувану конструкцію. Для цього обчислюється відношення коефіцієнтів відбиття від конструкції до коефіцієнтів відбиття від листа металу на відповідних поляризаціях:

$$R_{n,\square} = \frac{R_{k,\square}}{R_{m,\square}}; \quad R_{n,\perp} = \frac{R_{k,\perp}}{R_{m,\perp}}. \quad (1)$$

де $R_{n,\parallel}$, $R_{k,\parallel}$, $R_{m,\parallel}$ – відповідні коефіцієнти відбиття для паралельної поляризації; $R_{n,\perp}$, $R_{k,\perp}$, $R_{m,\perp}$ – коефіцієнти відбиття для ортогональної поляризації.

У результаті в комп'ютері зберігається розподіл у часі нормованих відбитих сигналів (імпульсів) на двох ортогональних поляризаціях.

На наступному етапі вирішується завдання товщинометрії за алгоритмом розв'язання оберненої задачі в області значень поляризаційних параметрів, який був запропонований у роботі [13]. Розв'язання задачі полягає в знаходженні поправки до деякого початкового наближення розподілу діелектричної проникності, яке може бути знайдено, наприклад, з розв'язання задачі визначення товщини шарів відповідно до алгоритму першого етапу. У такому разі цей розв'язок використовується як початкове наближення $\epsilon_{aux}(\vec{R})$ до шуканого профілю (розподілу) діелектричної проникності $\epsilon_p(\vec{R})$, яке далі уточнюється, для чого додається поправка $\eta(\vec{R}) = \epsilon_p(\vec{R}) - \epsilon_{aux}(\vec{R})$, значення якої обчислюється з розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$x_j + \sum_{n=1}^N a_{jn} x_n = \psi_j; \quad (j=1, 2...N), \quad (2)$$

де

$$a_{jn} = w_n \int_{V_p} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') L^{(n)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') \frac{dV}{\alpha w(\vec{R}')};$$

$$\psi_j = \int_{V_p} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \frac{q(\vec{R}')}{\alpha w(\vec{R}')} dV';$$

$$L(R_H, R') = p(R_H)G_{ee}(R_H, R')E_{aux}(R') \left[\frac{ik_0c}{4\pi} \right];$$

$G_{ee}(R_H, R')E_{aux}(R')$ – відповідно, функція Гріна та вектор напруженості електричного поля в ділянці середовища, що зондується; $\vec{p}(\vec{R})$ – вектор, що визначає поляризацію, на якій реєструється поле в точці спостереження; \vec{R}_H – радіус-вектор точки спостереження поза досліджуванним середовищем; V_p, \vec{R}' – ділянка простору, де проводиться зондування та радіус-вектор точок цієї ділянки; $w_n, \alpha, w(\vec{R}')$ – відповідно, невід’ємні сталі та функція, значення яких обираються за відомим алгоритмом [11]; j – індекс, що відповідає номеру вимірювання.

Далі знаходиться значення поправки (відхилення від $\epsilon_{aux}(\vec{R})$) за формулою

$$\eta(\vec{R}) = \frac{1}{\alpha w(\vec{R})} \left[q(\vec{R}) + \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') x_j \right], \quad (3)$$

де

$$q(\vec{R}) = \sum_{j=1}^N w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}) [U_{in}^{(j)}(\vec{R}_H) - U^{(j)}(\vec{R}_H)].$$

Визначається шуканий розподіл діелектричної проникності $\epsilon_p(\vec{R}) = \epsilon_{aux}(\vec{R}) - \eta(\vec{R})$.

Завдяки запропонованому методу реєстрації відбитого сигналу на різних поляризаціях та процедурі оброблення показників георадарного зондування підвищується точність і надійність визначення границь конструктивних шарів дорожнього одягу, що мають відносно слабкий рівень електродинамічного контрасту, а також значень їх діелектричної проникності.

Процедуру доцільно застосовувати з метою усунення похибок під час визначення діелектричної проникності та товщини шарів конструкції дорожнього одягу з неконтрастними границями, що зумовлено взаємопроникненням матеріалів шарів конструкції або зміною їх вологості.

Алгоритм визначення товщини шарів і позиціонування локальних неоднорідностей

Відповідно до теоретичних і емпіричних досліджень для оброблення результатів реєстрації кросполяризаційної компоненти зондува-

льного імпульсу розроблено алгоритм позиціонування та ідентифікації підповерхневих тріщин, який передбачає такі етапи (рис. 3):

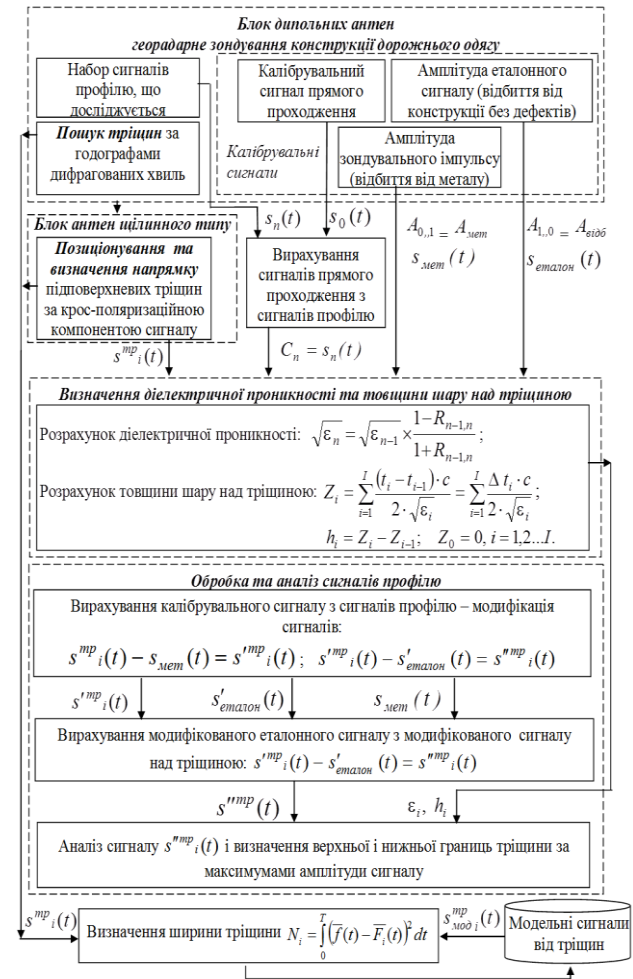


Рис. 3. Схема алгоритму визначення товщини шарів та позиціонування локальних неоднорідностей

– калібрування антенних блоків для обґрунтованого вибору еталонної ділянки без тріщин і подальшої реєстрації та запису еталонних радарограм;

– отримання первинних показників та їх оброблення з метою поліпшення якості добутої інформації – вилучення перешкод, фільтрація;

– віднімання з луна-профілю сигналу прямого проходження для підвищення достовірності результатів подальшого оброблення сигналів;

– оцінювання глибини розташування центра (осі) тріщини. Під час виконання цього етапу застосовують показники сканування блоком дипольних антен, що дає змогу визначити діелектричну проникність і товщину шарів конструкції дорожнього одягу. За наявності

тріщин завширшки понад 0,2 см у шарах з діелектричною проникністю матеріалу понад $\epsilon = 5$ і завтовшки від 4 см оцінюється глибина залягання неоднорідності.

Емпіричні дослідження

Для оцінювання ефективності запропонованого методу реєстрації кросполяризаційної компоненти сигналу, утвореної за наявності неоднорідності підповерхневої досліджуваної структури, автори провели серії експериментів на автомобільних дорогах.

Під час камерального оброблення результатів геораданого обстеження нежорсткого дорожнього одягу з метою позиціонування підповерхневих тріщин проводилась візуалізація та первинне оброблення радарограм із застосуванням програмного забезпечення *GPR Proview*. Для оброблення імпульсних сигналів георадара використовувалася програма оброблення імпульсних сигналів георадара *GeoVisy-2*, функції якої були вдосконалені за результатами досліджень відповідно до завдань визначення товщини слабкоконтрастних шарів та позиціонування підповерхневих неоднорідностей (рис. 4).

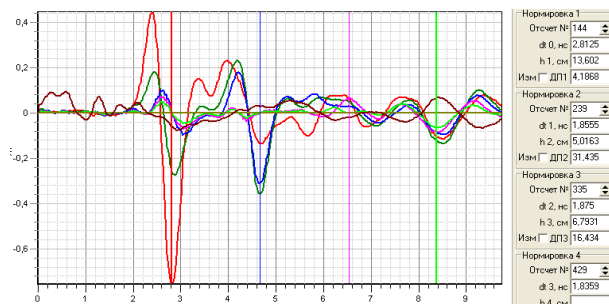


Рис. 4. Визначення діелектричної проникності та товщини шарів конструкції

Унаслідок георадарного зондування дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги та оброблення радарограм виявлено приховані неоднорідності в конструктивних шарах дорожнього одягу та проведено їх попереднє оцінювання (табл. 1).

Верифікація результатів георадарного зондування оцінювалася за допомогою зіставлення з кернами, відібраними на ділянках, де проводилося георадарне обстеження. Завдяки дослідженням отримано добрий збіг розрахункової та фактичної товщини слабкоконтрастних шарів, а також підтверджено наявність прихованих тріщин у шарах покриття та шарах основи.

Таблиця 1 – Результати обстеження

Пікет	Сигнал	Відлік сигналу за глибиною на ділянках із підповерхневою неоднорідністю	Розташування неоднорідності
ділянка 1			
44+91,69	214	237-418	у шарі асфальтобетону
43+06,26	4903	541	у зміцнених шарах основи
41+36,08	9210	506	у зміцнених шарах основи
ділянка 2			
39+28,93	651	388-225	у шарі асфальтобетону
40+39,07	2990	425	у зміцнених шарах основи

Теоретичні та емпіричні дослідження підтверджують ефективність запропонованого способу реєстрації відбитих сигналів та процедури оброблення результатів георадарного зондування під час обстеження нежорсткого дорожнього одягу зі слабкоконтрастними шарами та підповерхневими неоднорідностями (тріщинами) у шарах основи.

Висновки

Методи відновлення електрофізичних параметрів просторово неоднорідних середовищ та аналізу поляризаційного стану сигналів дають змогу позиціонувати невеликі за розміром підповерхневі неоднорідності.

Процедура відновлення електрофізичних параметрів, що основана на розв'язку обернених задач розсіювання, забезпечує точність визначення слабкоконтрастних границь конструкції дорожнього одягу та підвищує точність позиціонування підповерхневих неоднорідностей. Алгоритми оброблення надширококутових імпульсних сигналів георадара ґрунтуються на процедурах аналізу їх поляризаційного стану, що допомагає визначати геометричні параметри підповерхневих неоднорідностей.

Сукупність досягнутих результатів підвищує точність і надійність показників георадарної діагностики та оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу на підставі найбільш повної та достовірної інформації про підповерхневу будову досліджуваних конструкцій.

Фінансова підтримка досліджень

Експерименти проведені за підтримки Національного фонду досліджень України під час виконання проєкту «Розроблення комплексу методів і засобів георадарної діагностики для оцінювання надійності об'єктів критичної транспортної інфраструктури».

Література

1. Erica Carrick Utsi. *Ground Penetrating Radar: Theory and Practice*. Butterworth - Heinemann, 2017. 224 p.
2. Pryshchenko O., Dumin O., Plakhtii V., Shyrokorad D. and Pochanin G. Collective Artificial Intelligence Approach for the Problem of Object Classification with UWB GPR, *2021 IEEE 26th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*, 2021, P. 185–190, doi: 10.1109/DIPED53165.2021.9552257.
3. Zhang H., Zhang Z., Zhao R., Lu J., Wang Y. and Jia P. Review on UWB-based and multi-sensor fusion positioning algorithms in indoor environment. *2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 2021, P. 1594–1598, doi: 10.1109/IAEAC50856.2021.9390630.
4. Garcia-Fernandez M., Morgenthaler A., Alvarez-Lopez Y., Las Heras F., and Rappaport C. Bistatic landmine and IED detection combining vehicle and drone mounted GPR sensors. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, 2299, doi: [10.3390/rs11192299](https://doi.org/10.3390/rs11192299).
5. Cao Q, Al-Qadi IL. Signal Stability and the Height-Correction Method for Ground-Penetrating Radar In Situ Asphalt Concrete Density Prediction. *Transportation Research Record*. April 2021. doi:[10.1177/03611981211004585](https://doi.org/10.1177/03611981211004585)
6. Patrick Fiske, Dryver Huston, Tian Xia. Software defined radar-based frequency modulated continuous wave ground penetrating radar. *Proc. SPIE 11742, Radar Sensor Technology XXV*, 117420E (12 April 2021), doi:[10.1117/12.2586099](https://doi.org/10.1117/12.2586099)
7. Muslim N.H., Mohamed M.I., Amin Z.M., Shafaghat A., Ismail M., Keyyanfar A. Ground Penetrating Radar's (GPR) imaging and applications to pavement structural assessment: A case of Malaysia. *Archives of Transport*. 2017. Vol. 42. iss. 2. P. 39–51.
8. Jol Harry M. *Ground penetrating radar, theory and applications*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 508 p.
9. Shah S., Chaiwong K., Kovavisaruch L.O., Kaemarungsi K. and Demeechai T. Antenna Delay Calibration of UWB Nodes. *IEEE Access*, 2021. Vol. 9, P. 63294–63305. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075448.
10. Levatti H., Prat P., Ledesma A., Cuadrado A., Cordero J. Experimental analysis of 3D cracking in drying soils using ground-penetrating radar. *Geotechnical Testing Journal*, 2017. No. 2. P. 221–243. <https://openresearch.lsbu.ac.uk/item/8703v>
11. Francisco F., Jorge P., Mercedes S., Mattia F., Andrea B., Luca C. GPR dipoles orientation in road pavement cracking identification. *20th EGU General Assembly*. Proceedings from the conference held 4–13 April, 2018. Vienna, Austria.
12. Gennadiy P. Pochanin, Sergey A. Masalov, Vadym P. Ruban, Pavlo V. Kholod, Dmitriy O. Batrakov, Angelika G. Batrakova, Liudmyla A. Varyanytsia-Roshchupkina, Sergey N. Urdzik, Oleksandr G. Pochanin. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying: [in the book of *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications*]. London: CRC Press -Taylor & Francis Group, 2016. 476 p.
13. Batrakov D.O., Zhuck N.P. Inverse Scattering Problem in the Polarization Parameters Domain for Isotropic Layered Media: Solution via Newton-Kantorovich Iterative Technique. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1994. Vol. 8, № 6. P. 759–779.

Referenses

1. Erica Carrick Utsi. *Ground Penetrating Radar: Theory and Practice*. Butterworth - Heinemann, 2017. 224 p.
2. Pryshchenko O., Dumin O., Plakhtii V., Shyrokorad D. and Pochanin G. Collective Artificial Intelligence Approach for the Problem of Object Classification with UWB GPR, *2021 IEEE 26th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*, 2021, P. 185–190, doi: 10.1109/DIPED53165.2021.9552257.
3. Zhang H., Zhang Z., Zhao R., Lu J., Wang Y. and Jia P. Review on UWB-based and multi-sensor fusion positioning algorithms in indoor environment. *2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 2021, P. 1594–1598, doi: 10.1109/IAEAC50856.2021.9390630.
4. Garcia-Fernandez, M., Morgenthaler A., Alvarez-Lopez Y., Las Heras F., and Rappaport C. Bistatic landmine and IED detection combining vehicle and drone mounted GPR sensors. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, 2299, doi: [10.3390/rs11192299](https://doi.org/10.3390/rs11192299).
5. Cao Q, Al-Qadi IL. Signal Stability and the Height-Correction Method for Ground-Penetrating Radar In Situ Asphalt Concrete Density Prediction. *Transportation Research Record*. April 2021. doi:[10.1177/03611981211004585](https://doi.org/10.1177/03611981211004585)
6. Patrick Fiske, Dryver Huston, Tian Xia. Software defined radar-based frequency modulated continuous wave ground penetrating radar. *Proc. SPIE 11742, Radar Sensor Technology XXV*, 117420E (12 April 2021), doi:[10.1117/12.2586099](https://doi.org/10.1117/12.2586099)
7. Muslim N.H., Mohamed M.I., Amin Z.M., Shafaghat A., Ismail M., Keyyanfar A. Ground Penetrating Radar's (GPR) imaging and applications to pavement structural assessment: A case of Malaysia. *Archives of Transport*. 2017. Vol. 42. iss. 2. P. 39–51.
8. Jol Harry M. *Ground penetrating radar, theory and applications*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 508 p.

9. Shah S., Chaiwong K., Kovavisaruch L.O., Kaemarungsi K. and Demeechai T. Antenna Delay Calibration of UWB Nodes. *IEEE Access*, 2021. Vol. 9, P. 63294–63305, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075448.
10. Levatti H., Prat P., Ledesma A., Cuadrado A., Cordero J. Experimental analysis of 3D cracking in drying soils using ground-penetrating radar. *Geotechnical Testing Journal*, 2017. No. 2. P. 221–243. <https://openresearch.lsbu.ac.uk/item/8703v>
11. Francisco F., Jorge P., Mercedes S., Mattia F., Andrea B., Luca C. GPR dipoles orientation in road pavement cracking identification. *20th EGU General Assembly*. Proceedings from the conference held 4–13 April, 2018. Vienna, Austria.
12. Gennadiy P. Pochanin, Sergey A. Masalov, Vadym P. Ruban, Pavlo V. Kholod, Dmitriy O. Batrakov, Angelika G. Batrakova, Liudmyla A. Varianytsia-Roshchupkina, Sergey N. Urdzik, Oleksandr G. Pochanin. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying: [in the book of Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications]. London: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016. 476 p.
13. Batrakov D.O., Zhuck N.P. Inverse Scattering Problem in the Polarization Parameters Domain for Isotropic Layered Media: Solution via Newton-Kantorovich Iterative Technique. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1994. Vol. 8, № 6. P.759–779.

Батракова Анжеліка Геннадіївна, д.т.н., проф. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, agbatr@ukr.net, тел. +38 050-323-13-78,

Дорошко Євген Вікторович, к.т.н., доц. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, evgeniy.dorozhko@gmail.com, +38 068-069-97-22,

Урдзік Сергій Миколайович, к.т.н., доц. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, urdzick@gmail.com, +38 067-593-50-92,

Шелкова Ірина Сергіївна, асист. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, irinagunko98@gmail.com, +38 099 481 32 19.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Development of the algorithm for determining the thickness of the structural layers of the non-rigid pavement and searching for local inclusions using sub-surface georadiolocation methods

Problem. The article is part of the authors' research in the field of road construction using GPR technologies. Ensuring a certain level of pavement reliability on highways requires the development of methods and means for continuous information acquisition and processing in real time, taking into account the parameters of structural heterogeneity, heterogeneity of physical and mechanical parameters of structures, as well as their changes over time. The solution of this problem is limited by the complexity of tasks of obtaining and interpreting the data of subsurface sensing and the asso-

ciated errors in determining the parameters of structures, imperfection of methods of flaw detection of structures with subsurface inhomogeneities, multifactorial tasks of estimation of physical and mechanical parameters of multicomponent materials. **Goal.** Improving the accuracy and reliability of determining the boundaries of layers of non-rigid pavement structure, which have a low level of electrodynamic contrast due to interpenetration of layer materials or changes in their physical and mechanical properties. The solution of this problem is connected with the development of a method of obtaining reflected GPR signals and the improvement of algorithms for their processing. **Methodology.** The development of methods for the analysis of the electromagnetic field with a variable state of polarization makes it possible to assess the localization of violations of the integrity of the pavement structure at a qualitatively new level and allows the positioning of small inclusions even with a slight contrast in the dielectric constant. The proposed method of recording the reflection of an ultra-wideband GPR pulse signal at different polarizations is implemented by measuring the reflected signal from a metal sheet at oblique incidence and parallel polarization, recording the reflected pulse at perpendicular polarization, followed by measuring the reflection coefficient from the structure of the non-rigid pavement under study at parallel and perpendicular polarization. The electrophysical parameter recovery procedure is based on the solution of inverse scattering problems and ensures the accuracy of determining the low-contrast boundaries of the pavement structure and increases the accuracy of positioning subsurface heterogeneities. GPR signal processing algorithms are based on procedures for analyzing their polarization state, which allows determining the geometric parameters of subsurface heterogeneities.

Practical value. The combination of the obtained results increases the accuracy and reliability of the results of GPR diagnosis and assessment of the condition of non-rigid pavement based on the most complete and reliable information about the subsurface structure of the structures under investigation.

Key words: non-rigid pavement, GPR, ultra-wideband pulse signals, dielectric constant, thickness measurement, subsurface heterogeneities.

Batrakova Angelika, Professor, Doct. of Science, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>, agbatr@ukr.net,

Dorozhko Yevhen, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2894-2131> evgeniy.dorozhko@gmail.com,

Urdzik Serhii, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6914-1221>, urdzick@gmail.com,

Shelkova Iryna, assistant, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2562-2175>, irinagunko98@gmail.com.

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.