

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-01>

УДК 535.361:535.555:535.573+577.3.0

Д.О. БАТРАКОВ¹, д.ф.-м. наук, проф.

e-mail: batrakov@karazin.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

М. М. КОВАЛЬОВ¹, аспірант

e-mail: nikolaj791@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0083-5000>

А.Г. БАТРАКОВА², д. тех. наук, проф.

e-mail: agbatr@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

С.М. УРДЗИК², к.тех.наук

e-mail: urdzick@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6914-1221>

¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОРАДАРІВ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ, ЧАСТИНА II)

Актуальність. Актуальність досліджень, які викладено в статті, обумовлена, в першу чергу, спрямованістю на реалізацію державної стратегії забезпечення надійності та подовження залишкового ресурсу транспортних та інженерних споруд. Реалізація пов'язана з методами та засобами отримання інформації та її обробки у реальному масштабі часу, а також з методами оцінки стану інженерних споруд, особливістю яких є значна неоднорідність геометричних і фізико-механічних параметрів. Зрозуміло, що це ускладнює використання результатів діагностики. При цьому, незважаючи на переваги хвильових методів зондування, застосування таких методів стримується складністю завдань інтерпретації отриманих результатів та пов'язаними з цим похибками у визначенні параметрів конструкцій, а також багатофакторністю завдань оцінки параметрів багатокомпонентних матеріалів конструкцій та недосконалістю існуючих методів дефектоскопії.

Мета роботи – огляд можливостей сучасних імпульсних георадарів, а також засобів обробки надширокосмугових сигналів спільно з комп'ютерно-орієнтованими системами чисельного моделювання та оптимізації методів обробки георадарних даних з метою вирішення задач виявлення та ідентифікації підповерхневих неоднорідностей у конструкції нежорсткого одягу автомобільних доріг, які припускають застосування моделей плоскошаруватого середовища.

Матеріали та методи. У другій частині статті наведено короткий огляд сучасних методів обробки наборів даних, що отримуються за допомогою імпульсних георадарів. Для досягнення мети було необхідно вирішити кілька завдань. Перше завдання полягає у виборі оптимальних технічних засобів з метою отримання вихідної інформації, а також обґрунтування технічних характеристик георадарів. Ще одне завдання пов'язане з розробленням ефективних методів обробки отриманих даних. Останнє завдання має на меті встановлення зв'язків отриманих даних з геометричними та фізико-механічними характеристиками дорожнього покриття.

Результати. Основу отриманих результатів становлять дані дистанційного зондування, а також запропоновані математичні моделі та методи обробки даних дистанційного зондування. За результатами проведеного порівняльного аналізу можливостей імпульсних георадарів в роботі запропоновано практичні рекомендації щодо підвищення надійності пошуку та ідентифікації таких дефектів як підповерхневі тріщини та ділянки втрати міжшарового зчеплення між шарами конструкції дорожнього одягу.

Висновки. Представлені в статті результати лабораторних експериментів свідчать про потужні можливості сучасних технологій дистанційного зондування. Аналіз існуючих засобів дистанційного зондування, в першу чергу, за допомогою георадарів дозволив сформулювати якісно новий підхід до вирішення актуальної проблеми виявлення прихованих дефектів у шаруватих конструкціях. Також слід зазначити, що існують можливості вдосконалення технічних засобів та методів обробки георадарних даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: підповерхневі тріщини, імпульсні надширокосмугові георадари, комп'ютерні програми обробки даних.

Як цитувати: Батраков ДО, Ковальов ММ, Батракова АГ, Урдзік СМ. Неруйнівний контроль автомобільних доріг за допомогою георадарів (оглядова стаття, частина II). Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2022;36:7-14. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-01>

In cites: Batrakov DO, Kovalov MM, Batrakova AG, Urdzik SN. Non-destructive control of roads by georadars (review article, part II). Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2022;36:7-14. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-01> (In Ukrainian)

ВСТУП

У першій частині статті розглянуто питання застосування надширококутних георадарів для контролю стану автомобільних доріг з нежорстким покриттям. Головним завданням першої частини дослідження є визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу. Друга частина статті присвячена вирішенню завдання пошуку небезпечних підповерхневих дефектів, в першу чергу, тріщин та втрати міжшарового зчеплення. Частина інформації щодо тріщин вже викладена в [1]. Але постійно з'являються нові публікації [2-8], що свідчить про важливість цього напрямку досліджень.

У наступній частині основна увага приділена проблемі пошуку підповерхневих тріщин, а також інших небезпечних неоднорідностей.

Проблема оцінки сучасного стану автомобільних доріг є актуальною через високий рівень витрат на їх ремонт та утримання [9-11]. Ця проблема стимулює вирішення завдань розроблення методів оцінки механічних і геометричних параметрів, а також діагностики різного роду пошкоджень дорожнього покриття, оскільки це найбільш матеріаломістка і коштовна частина дорожньої конструкції. До основних геометричних параметрів дорожнього покриття зазвичай відносять товщину шарів [12,13], до механічних властивостей – здатність дорожнього покриття витримувати багаторазові навантаження [14]. Найпоширенішими дефектами дорожнього покриття є тріщини, втрата міжшарового зчеплення, вибоїни, колія тощо [15]. Тріщини, в тому числі підповерхневі, вважаються найбільш небезпечними дефектами, оскільки їх несвоєчасне виявлення призводить до відбитого тріщиноутворення та згодом до руйнування дорожнього покриття [16, 17]. Тому основною метою даної роботи є аналіз існуючих засобів отримання інформації про тріщини в дорожньому покритті та методів обробки вихідних даних і на цій основі вдосконалення підходу до пошуку та ідентифікації прихованих дефектів у плоскошаруватих середовищах методами неруйнівного контролю. Основним об'єктом даного дослідження є нежорсткий дорожній одяг. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити кілька суміжних завдань.

Перше завдання полягає у виборі оптимальних технічних засобів для отримання вихідної інформації та їх технічних характеристик. Друге завдання пов'язане з розробленням ефективних методів обробки отриманих даних. Нарешті, третє завдання – встановити зв'язок отриманих даних з технічними характеристиками дорожнього покриття. Під технічними характеристиками дорожнього покриття будемо розуміти ті параметри конструкції, які безпосередньо впливають на стан конструкції нежорсткого дорожнього одягу та забезпечують здатність конструкції опиратися дії транспортного навантаження і кліматичних факторів. Правильна оцінка дозволяє прогнозувати термін служби дорожнього покриття до ремонту та дає змогу оцінити терміни та вартість поточного та капітального ремонтів. Досягнення комп'ютерних технологій та прогрес у галузі засобів неруйнівного контролю формують основу для постановки та вирішення цих проблем. Наголошуємо, що універсального засобу вирішення завдань дистанційного зондування та неруйнівного контролю на сьогодні ще не запропоновано. Тому, виходячи з логіки дослідження, робота має таку структуру. Перший розділ містить аналіз літературних джерел та постановку проблеми. Метою даного аналізу є реалізація постановки задачі з урахуванням суперечливості вимог до параметрів сигналу, а отже, і до характеристик антени. У наступному розділі запропоновано новий алгоритм обробки даних дистанційного зондування, заснований на результатах попередніх досліджень авторів статті, та результати лабораторних і польових випробувань. У висновку сформульовано можливі шляхи розвитку цього наукового напрямку для вирішення актуальних завдань дорожньої галузі – забезпечення нормативного експлуатаційного стану дорожнього покриття протягом терміну служби до капітального ремонту.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ Й МЕТОД РІШЕННЯ

Щоб досягти наочності викладення матеріалу, розглянемо більш детально постановку проблеми. Для цього розглянемо модель дорожнього покриття в найбільш загальному вигляді – як плоскошарувате середовище, що складається з кількох однорідних шарів. Будемо вважати, що середовище складається з трьох шарів, розташованих на напівнескінченній підкладці: покриття, що складається з двох шарів монолітних матеріалів, шар основи з зернистих матеріалів, що розташований на природній ґрунтовій основі, яка вважається нескінченним напівпростором. Тріщини, в тому числі підповерхневі, розташовані тільки в шарах з монолітних матеріалів (в нашому випадку шарах з асфальтобетону). Шари основи з нез'язаних матеріалів мають відносно близькі значення діелектричної проникності, тому вважатимемо, що основа являє собою один шар з середньою діелектричною проникністю. Тріщина розташована в нижньому шарі асфальтобетону і має прямокутний перетин (Рис. 1). Основними вихідними даними для вирішення задачі виявлення та позиціонування (визначення напрямку) тріщини приймаємо результати георадарного зондування.

Будемо вважати, що в процесі отримання первинних масивів даних було проведено попереднє обстеження ділянки дороги, що досліджується, за допомогою імпульсного георадара, наприклад георадара «Одяг» [17]. Антенний блок імпульсних георадарів, як правило, містить дві антени - передавальну (A1 -

на Рис. 1) і приймальну (A2 - на Рис. 1). Ці антени, як правило, можуть бути орієнтовані під кутом одна до одної. Кут зазвичай має значення в діапазоні від нуля градусів до 30 градусів. Таким чином, завдання виявлення тріщин, у тому числі підповерхневих, в рамках цього підходу зводиться до розроблення алгоритму аналізу прийнятих імпульсних сигналів - сигналів без несучої. Цей термін означає, що антена фіксує безпосередньо зміну параметрів електромагнітного поля, а не зміну амплітуди несучої частоти, як у випадку з класичним радаром.

Перш ніж перейти до опису запропонованого підходу, відзначимо, що найбільш поширеним методом обробки георадарних даних є візуальна оцінка радарограм оператором. Як приклад, розглянемо радарограму, що отримана за результатами обстеження автомобільної дороги загального користування на території України під час зондування малого мосту. На радарограмі чітко спостерігаються гіперболи у місці сполучення перехідної плити на початку та в кінці мосту, Рис. 2.

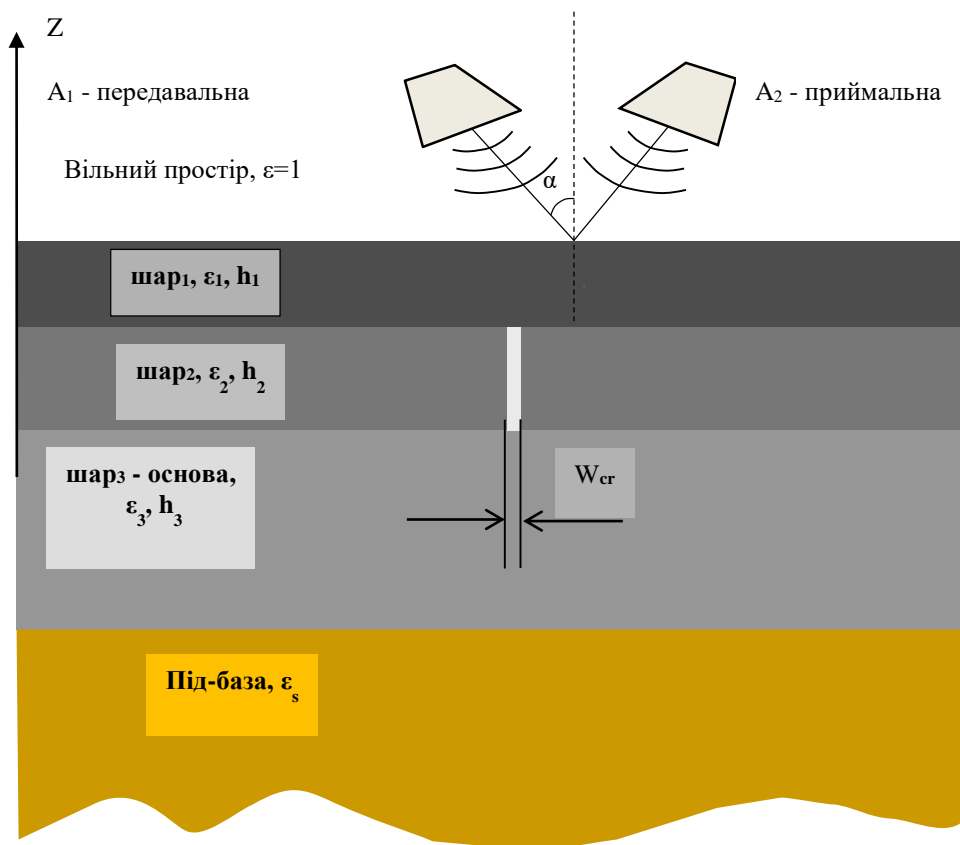


Рис. 1. Геометрія завдання
Fig. 1 Geometry problem

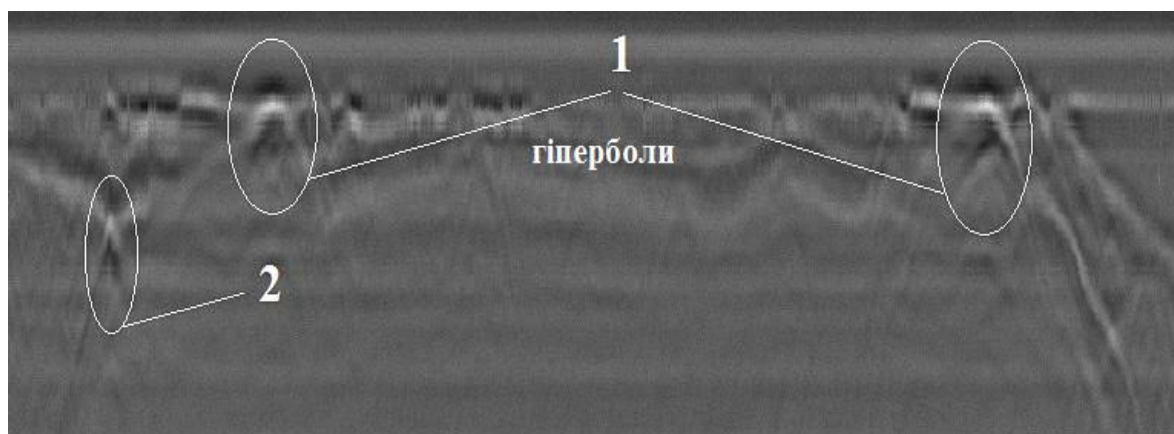


Рис.2. Радарограма отримана на одній із доріг України.
Fig.2. Radar chart obtained on one of the roads of Ukraine.

Для аналізу отриманих даних можна використовувати наближені методи [18]. Один із можливих варіантів цього підходу базується на припущенні, що тріщина розташована в нижньому шарі асфальтобетону (другий шар покриття) і має відносно невелике відношення товщини до висоти – не більше 0,5. Товщина верхнього шару дорожнього покриття, яка на даному етапі вважається невідомою, позначається через h_1 , а діелектрична проникність верхнього шару дорівнює ε_1 . Для другого шару дорожнього покриття відповідно - h_2 , ε_2 .

Позначимо висоту розташування антенного блоку над верхньою межею покриття як d і припустимо, що проведено два вимірювання - перше, коли антена розташована безпосередньо над тріщиною (O_1 Рис. 3), а друге, коли антена зміщена по горизонталі від першого положення (O_2 Рис. 3).

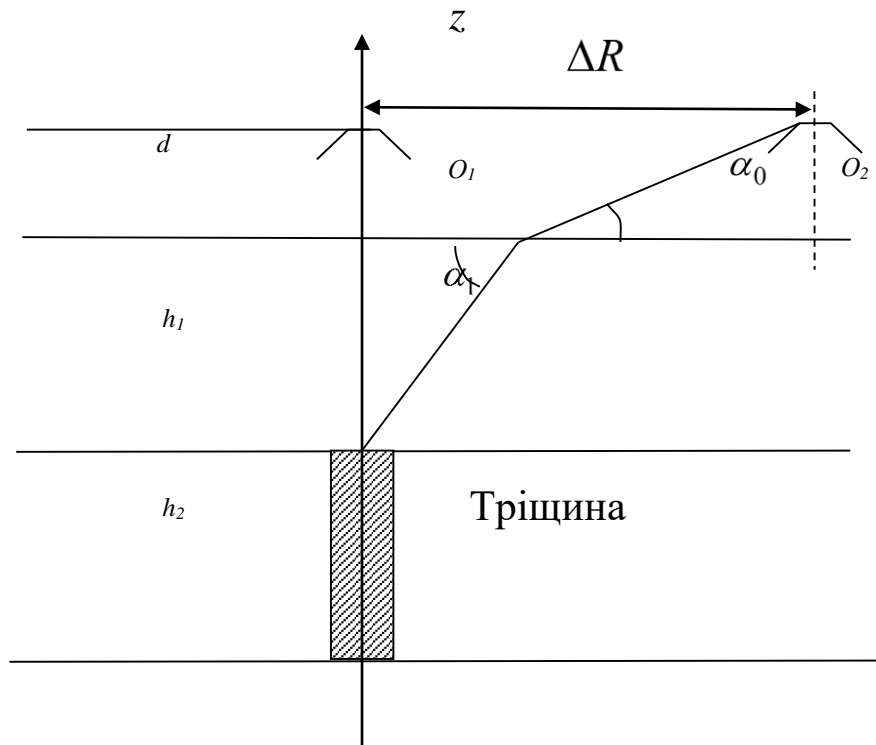


Рис. 3. Геометрія задачі візуального виявлення підземних тріщин.

Fig. 3. Geometry of the problem of visual detection of underground cracks.

Будемо вважати, що час проходження сигналу від антени до верхньої межі тріщини в цих двох випадках відомий і позначимо ці величини t_1 і t_2 відповідно. Тоді, використовуючи закон Снелліусу [19], отримуємо:

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0\right) \cdot n_0 &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) \cdot n_1; \\ n_0 &= \sqrt{\varepsilon_0} = 1; \quad n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Далі в наближенні геометричної оптики можна записати основні рівняння зв'язку відомих параметрів задачі з невідомими:

$$\begin{cases} \frac{d}{c} + \frac{h_1 \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{c} = \frac{t_1}{2} \\ \frac{d}{\sin \alpha_0 \cdot c} + \frac{h_1 \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{\sin \alpha_1 \cdot c} = \frac{t_2}{2} \\ \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right) = \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 \right), \\ (\varepsilon_0 = 1). \end{cases} \quad (2)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, см/нс.

Якщо діелектрична проникність верхнього шару невідома, то рівняння системи (2) містять чотири невідомі величини $\varepsilon_1, h_1, \alpha_0, \alpha_1$, і ця система, строго кажучи, не має єдиного розв'язку. Для подальшого отримання наближеного рішення були запропоновані різні методи. Один з них передбачає обчислення значення кута α_0 за геометричними даними та обчислення першого члена в другому рівнянні системи (2). Також можна замінити це рівняння іншим наближеним рівнянням, яке більше не містить першого члена ліворуч:

$$\frac{h_1 \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{\sin \alpha_1 \cdot c} = \frac{t_2}{2}. \quad (3)$$

Інші підходи до вирішення цієї проблеми передбачають обробку великого обсягу інформації, а деякі з них дуже складні з обчислювальної точки зору. Тому виникає необхідність розроблення більш складних алгоритмів обробки сигналів, які дозволяють не тільки виявляти, а й ідентифікувати підповерхневі тріщини.

Тому далі розглянемо проблему виявлення підповерхневої тріщини в структурі дорожнього покриття. Розглянемо найпростішу модель середовища, яка має три шари, розташовані на напівнескінченній підкладці (Рис. 1). Використання такої моделі пов'язане з тим, що так званий електричний контраст - відношення значень відносної проникності нижніх шарів слабке і впливом багаторазових відображень сигналів між межами нижніх шарів можна знехтувати. Іншими словами, невеликі відмінності між значеннями діелектричної проникності призводять до слабких амплітуд сигналів, відбитих від нижніх границь. Крім того, товщина нижніх шарів, зазвичай, значно перевищує товщину верхніх шарів, що зумовлює їх зміщення вздовж осі часу на радарограмі. Це дає можливість на першому етапі обробки сигналу ігнорувати відбиття від нижніх меж.

Як зазначалося вище, основним недоліком візуального аналізу радарограм є неможливість отримання кількісних оцінок параметрів тріщин. Тому раніше автори запропонували підхід до вирішення проблеми кількісних оцінок. Цей підхід містить етапи проведення вимірювань та обробки результатів за допомогою спеціалізованих програм, розроблених авторами. На першому етапі виконуються стандартні операції для вимірювання сигналу прямого проходження, тобто потужного сигналу прямого зв'язку (сигналу, який безпосередньо пройшов у приймальну антену, минаючи досліджуване середовище) і пошуку однорідної опорної ділянки без будь-якої неоднорідності. Алгоритм реєстрації сигналу прямого проходження описаний у [20-22], а еталонна ділянка вибирається, виходячи за умови відсутності змін на радарограмі. У деяких випадках ці дані можна отримати на ділянках доріг, що не мають дефектів, під час будівництва з метою подальшого використання в процесі експлуатації для пошуку дефектів. Після вибору еталонної ділянки оцінюється товщина шарів покриття. Для цього використовується програма GeoVizu, яка дозволяє в напівавтоматичному режимі оцінити значення діелектричної проникності та товщини шарів дорожнього покриття. Надалі ця інформація використовується для оцінки параметрів тріщин. Задача визначення параметрів тріщин може бути сформульована на основі різних фізичних принципів. У цій роботі ми розглянемо один з можливих варіантів реалізації, який базується на використанні лише одного антенного блоку. Метою такого підходу є використання найпростіших і доступних технічних засобів. Звичайно, це можливо лише за рахунок деякого зниження загальної якості підсумкової оцінки.

ПРОПОНОВАНИЙ МЕТОД РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ.

Випробування проводилися в лабораторії на моделі дорожньої конструкції з застосуванням георадара «Одгя-5», Рис. 4. Для зручності на рисунку наведено дві антени (передавальна та приймальна) та модель

тріщини конструкції дорожнього покриття. За раніше запропонованою схемою було проведено декілька серій експериментальних досліджень, які полягали у вимірюванні:

- сигналу прямого зв'язку;
- сигналу, відбитого від листа металу;
- сигналів від досліджуваної структури.

Оскільки антени розташовані паралельно (Рис. 4), вектори електричного поля антен також є паралельними. Очевидно, що під час зондування тріщина може розташовуватися під різними кутами до напрямку векторів електричного поля антен. Зрозуміло, що амплітуда відбитого від тріщини сигналу буде залежати від відносної орієнтації антен і тріщини. Теоретично спрогнозувати тип цієї залежності є досить складним завданням. Це пов'язано як зі складним характером взаємодії імпульсних сигналів надширокосмугового георадара з шаруватими середовищами, так й з різноманітними геометричними конфігураціями та заповненням тріщин. Очевидно, що тріщина, яка заповнена водою, буде відбивати імпульсний сигнал набагато інтенсивніше, ніж тріщина, яка заповнена повітрям, через різницю в діелектричній проникності між водою і повітрям.

На першому етапі експериментальних досліджень проведено експерименти з аналізу можливостей виявлення підповерхневих тріщин на лабораторних моделях (Рис. 4.). Для перевірки використано модель тріщини шириною 2 см у нижньому шарі асфальтобетону товщиною 6,5 см. Верхній шар мав товщину 5,5 см. (Рис. 5).



Рис. 4. Експериментальне встановлення.
Fig. 4. Experimental installation.

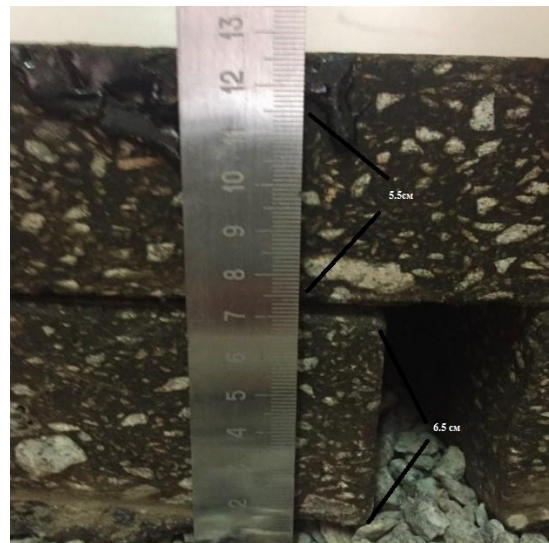


Рис. 5. Розміри досліджуваної конструкції.
Fig. 5. Dimensions of the studied structure.

Для отримання вихідних даних була використана така схема. Після виконання стандартних процедур, описаних вище, здійснювався проїзд георадаром над конструкцію. Далі антени повертали над тріщиною для аналізу впливу поляризаційного стану зонduючого електромагнітного поля на розподіл відбитих імпульсів. Метою цього експерименту є визначення оптимальних параметрів зонduючого поля для вирішення задачі виявлення та позиціонування підповерхневих тріщин. Результати аналізу поляризаційного стану зонduючого електромагнітного поля можуть бути використані не тільки для вдосконалення алгоритмів обробки сигналів, але й для створення антенних блоків з комутованою поляризацією [22]. Сподіваємося, що це знайде відображення у наступних публікаціях авторів.

Після реєстрації сигналів, здійснювалося їх оброблення за допомогою програмного забезпечення GeoVizu-2020. Вигляд вікна програми під час оброблення георадарних даних наведено на Рис. 6.

Основою методу оброблення даних імпульсного зондування є пошарове визначення двох параметрів – відносної проникності та товщини кожного шару [20]. Цей підхід є основою запропонованого в цій статті методу виявлення тріщин. Його суть полягає у використанні інформації, яка була накопичена на перших етапах, для подальшого більш детального аналізу імпульсних сигналів. Ще раз підкреслимо, що загальна ідея полягає у дослідженні можливості виявлення підповерхневих тріщин за допомогою існуючого стандартного антенного блоку через деяку модифікацію процедури реєстрації даних, яка полягає у проведенні додаткових вимірювань під час обертання антенного блоку над щілиною. Ця процедура проводиться в разі виявлення характерних відмінностей на радарограмі.

Для ілюстрації запропонованого алгоритму на Рис. 6 наведено три різних сигнали. Вони позначені індексами 1 - сигнал, відбитий від листа металу, 2 - сигнал, відбитий від конструкції в зоні без тріщини, і 4 - віртуальний сигнал, створений програмою GeoVizu-2020. Ще два сигнали (3 і 5) є результатом застосування перетворення Гільберта [23,24] до сигналів 2 і 4 відповідно.

Програмне забезпечення GeoVizu-2020 дозволяє обробляти дані в напівавтоматичному режимі. Це означає, що на першому етапі для вибору необхідної точки відліку необхідно натиснути кнопку «min» або «max», в залежності від полярності вихідного сигналу. Після цього програма автоматично формує віртуальний сигнал 4, що дозволяє розрахувати товщину шару [20]. В результаті обробки даних на цьому етапі програма визначає значення двох параметрів верхнього шару – діелектричної проникності та товщини та відображає результати у вікнах «h1» та «pmt1» (Рис.6). Крім того, на першому етапі при необхідності можна відняти сигнал прямого проходження в напівавтоматичному режимі. Для прискорення обробки GeoVizu-2020 також має функцію віднімання сигналу прямого проходження з усього профілю з подальшим збереженням даних.

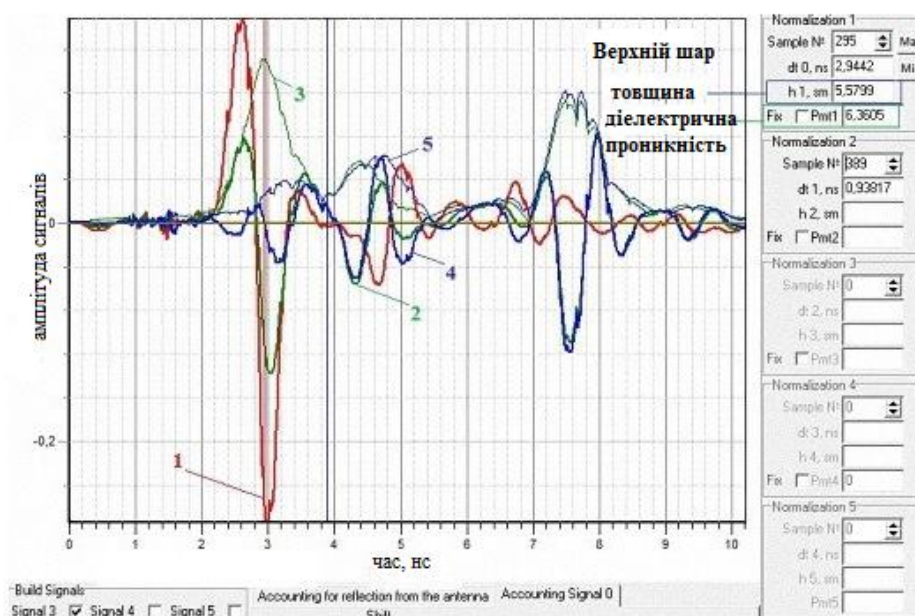


Рис. 6. Перегляд вікна програми під час обробки даних
Fig. 6. View the program window during data processing

На наступному етапі визначають параметри другого шару. Цей шар являє собою шар асфальтобетону товщиною близько 6,5 см і містить тріщину (Рис. 5). Для отримання необхідних даних, як і на попередньому етапі, використовується алгоритм синтезу віртуального сигналу, який дозволяє автоматично отримати значення товщини та відносної діелектричної проникності наступного шару. В результаті розраховані значення відображаються у відповідних вікнах «h2» і «pmt2» (Рис7). Далі процес можна продовжити для отримання параметрів наступного шарі. На цьому підготовчий етап запропонованого алгоритму завершено.

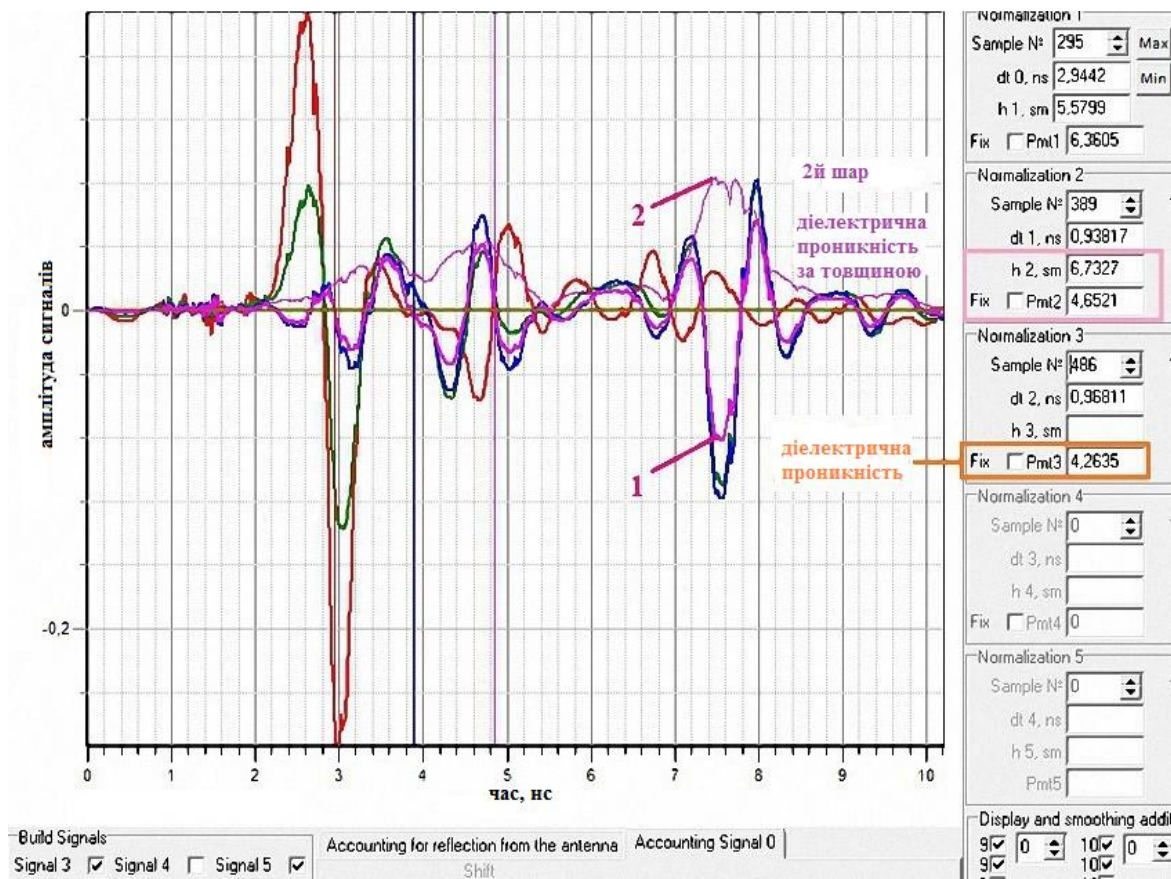


Рис. 7. Вікно обробки даних на наступному етапі
Fig. 7. Data processing window at the next stage

Наступним кроком є проведення детального порівняльного аналізу різних сигналів. Для виконання цього завдання програмне забезпечення GeoVizu-2020 надає можливість одночасного відображення та аналізу декількох часткових сигналів. Терміном «частковий сигнал» позначимо окремі відліки в координатах «час – амплітуда» (Рис. 6, Рис. 7). Метою цього аналізу є порівняння сигналів з урахуванням отриманої раніше інформації про товщину шарів.

Основна проблема полягає в тому, що підповерхневі тріщини, з точки зору теорії електромагнетизму, мають дуже слабкий контраст. В іншому випадку, через невеликий розмір і відносно невелику різницю в значеннях діелектричної проникності, вони викликають незначну зміну відбитого сигналу. Тому головною ідеєю запропонованого підходу є цілеспрямований пошук відмінностей у формі сигналів на основі попередніх даних про значення товщини та діелектричної проникності шарів. Цей алгоритм дозволяє користувачеві зосередитися на певних сегментах розподілу сигналів у часі, щоб знайти відмінності. Проблема ускладнюється ще й тим, що при русі георадара автомобільною дорогою неминуче виникають невеликі відхилення від початкової висоти антенного блоку над поверхнею дороги. Це призводить до відповідних відмінностей у формах хвиль, які не пов'язані з наявністю підповерхневих неоднорідностей. Тому в рамках цього дослідження були проведені лабораторні експерименти, насамперед, для аналізу принципової можливості виявлення низькоконтрастних похованих об'єктів. В результаті була встановлена можливість виявлення підповерхневих тріщин за допомогою аналізу радарограм. Це проілюстровано на Рис. 8 і Рис. 9. На цих рисунках позначення осей такі ж самі, як й на Рис. 6 і Рис. 7.

На Рис. 8 наведено графіки трьох часткових сигналів без попередньої обробки. Ці цифри наочно ілюструють виникнення відхилень, тобто зміщення сигналу, що пов'язано з переміщенням георадара над поверхнею конструкції навіть у лабораторних умовах. Проблема ще більше ускладнюється наявністю незначної нестабільності параметрів самого георадара. Проте результати попередньої обробки за даними про товщину шарів дозволили виявити область можливого розташування підповерхневих неоднорідностей. На Рис. 9 наведено результати корекції вихідних даних шляхом зміщення графіків вздовж осі часу без зміни їх амплітуди.

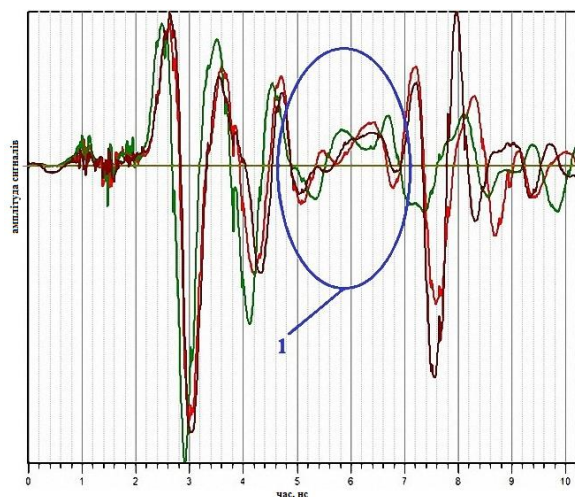


Рис. 8. Три часткових сигнали без попередньої обробки.
Fig. 8. Three partial signals without pre-processing.

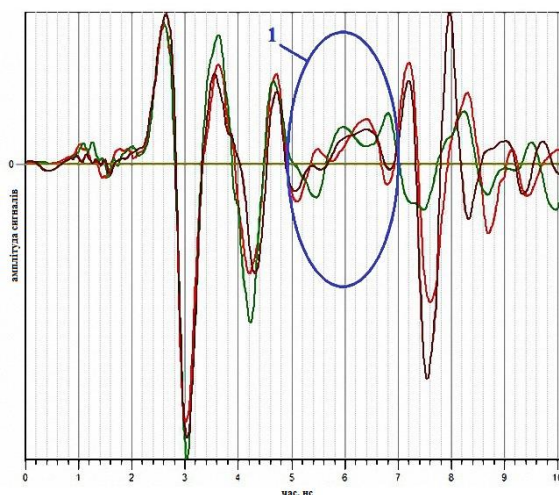


Рис. 9. Результати виправлення вихідних даних.
Fig. 9. The results of the original data correction.

Аналіз Рис. 9 дозволяє зробити висновок про стабільність вихідного сигналу, викликану відбиттям від зовнішньої поверхні дорожнього покриття та малими відхиленнями амплітуди сигналу, відбитого від нижньої поверхні верхнього шару. Під час проведення вимірювань на автомобільній дорозі це може бути пов'язано зі зміною (варіацією) товщини шарів асфальтобетону, а під час лабораторних вимірювань – з нерівністю нижніх поверхонь зразків та їх рихлістю.

Нарешті, щоб дослідити додаткові можливості імпульсного георадару щодо виявлення підповерхневих тріщин розглянемо деякі особливості вимірювань під час обертання антенного блоку над тріщиною. У процесі таких вимірювань антенний блок георадара повертали над тріщиною так, щоб відстань до поверхні покриття залишалася незмінною. У процесі проведення експерименту на початку зондування антени розташовувалися так, як наведено на Рис. 4, а далі поверталися на 90 градусів.

Результати експерименту наведено у таблиці 1. Оскільки графіки імпульсних сигналів, відбитих від підповерхневих неоднорідностей, є складними, було вирішено враховувати лише зміну максимальної амплітуди сигналу. У таблиці 1 наведено не тільки амплітуди сигналів, які зафіксовані у процесі експерименту, але й їх відхилення від середнього значення.

Аналіз результатів, що наведені в таблиці 1, з урахуванням даних, які наведено на Рис. 8 і Рис. 9, свідчить про неможливість використання простих кількісних моделей для інтерпретації отриманих даних. Це пов'язано з дисперсією діелектричної проникності, а також зі складним характером хвильових процесів за наявності низькоконтрастних підповерхневих неоднорідностей. При цьому першочергове значення має сам факт можливості виявлення підповерхневих неоднорідностей за допомогою відносно простих технічних засобів. Звичайно, використання більш досконалих підходів [9, 25], що передбачають аналіз стану поляризації зондуючого та відбитого сигналів, може ще більше покращити якість отриманих кількісних оцінок.

Таблиця 1. Отримані дані

Table 1. Obtained data

Кут повороту	0	20	45	70	90
мінімальна амплітуда у відносних одиницях з урахуванням знака максимуму	-1,02	-2,84	-2,08	-2,13	-2,27
відхилення від середнього у відносних одиницях	0,56	0,26	0,31	0,23	0,18

ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛІ ОБРОБКИ ДАНИХ.

Як відомо з теорії електромагнетизму, відносна діелектрична проникність реальних середовищ має властивість дисперсності [25], тобто залежить від частоти. Тому процедура визначення значення діелектричної проникності шарів дорожнього покриття шляхом вимірювання коефіцієнта відбиття імпульсних сигналів георадару, загалом кажучи, потребує уточнення. У той же час у довільному випадку відповісти на питання про точність визначення значення діелектричної проникності досить складно. Тому найбільш простим і ефективним методом є запропонований метод оцінки товщини шарів. Цю величину

легко виміряти в лабораторії, а потім порівняти отримані результати з результатами обробки георадарних даних. При проведенні георадарного зондування на автомобільних дорогах можна використовувати результати прямих вимірювань з кернів.

Для підтвердження адекватності запропонованих моделей і методів були проведені відповідні експерименти, результати яких наведено у таблиці 2. Перша серія експериментів проведена в лабораторних умовах за технологією, що відповідає описаним раніше експериментальним дослідженням (Рис. 4 - Рис. 7). Друга серія експериментів відображає результати вимірювань на автомобільній дорозі в Харківській області. Зіставлення результатів обробки отриманих експериментальних даних (Табл. 2) свідчать про досить високу точність відновлення товщини шару. Зрозуміло, що через накопичення похибок вимірювань і обробки точність визначення товщини нижніх шарів погіршується в порівнянні з точністю відновлення товщини верхніх шарів. Проте загалом отримані результати дозволяють стверджувати про переваги використання георадара для пошуку підповерхневих тріщин та оцінки стану дорожнього покриття. Детальне обговорення результатів щодо обробки похибок відображені в [20].

Таблиця 2. Результати двох випадків.

вимірюване значення товщини	1-й випадок		2-й випадок	
	5,50	6,5	7,2	8
визначається за даними георадара, у відносних одиницях	5,57	6,73	7,01	8,24
відсоткова різниця	1,2	3,5	2,7	3,0

ВИСНОВКИ

Представлені результати лабораторних експериментів наочно демонструють можливості сучасних технологій дистанційного зондування із застосуванням георадарів. Аналіз існуючих засобів дистанційного зондування дозволив сформулювати новий підхід до вирішення актуальної проблеми виявлення прихованих підповерхневих тріщин. Запропонований підхід базується на раніше розроблених авторами алгоритмах обробки імпульсних радіолокаційних сигналів наземного проникнення [17]. Такий підхід продемонстрував здатність узгоджено вирішувати декілька проблем. Першим завданням був вибір найбільш оптимальних технічних засобів діагностики з одночасним проведенням лабораторних експериментів, за результатами яких підтверджено ефективність методу. Іншим завданням було подальше вдосконалення методів і обчислювальних алгоритмів обробки даних зондування. В результаті модернізації програми GeoVizu нова версія GeoVizu-2020 дозволила обробляти складні імпульсні сигнали та реалізувати можливість відображення кількісних значень найважливіших параметрів шарів дорожнього покриття - відносної проникності та товщини. Для перевірки адекватності отриманих результатів використовувався запропонований авторами метод, заснований на процедурі вимірювання реальної товщини шарів в лабораторних і польових умовах та порівняння цих даних з результатами, отриманими за допомогою чисельного моделювання. В результаті наведено докази переваг використання імпульсних георадарів для дослідження дорожнього покриття, пошуку підповерхневих тріщин та оцінки геометричних параметрів шару.

Як перспективи подальших досліджень у цьому напрямку слід зазначити, що існують можливості вдосконалення технічних засобів (антени, генератори), а також розроблення методів обробки результатів георадарного зондування щодо пошуку, позиціонування та ідентифікації під поверхневих неоднорідностей з наступним оцінюванням експлуатаційного стану конструкції дорожнього одягу та прогнозуванням обсягів фінансування на ремонт та експлуатаційне утримання дорожньої мережі [26,27].

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Batrakov DO, Antyufeeva MS, Batrakov AG. Application of georadars for detecting subsurface defects in layers of non-rigid road pavements. Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics." 2020;(32):6-15. Original article <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-01> ; <https://periodicals.karazin.ua/radiophysics/article/view/16753/15575>.
2. Dong J, Stankovic V, Davidson N. Target Detection and Recognition of Ground Penetrating Radar using Morphological Image Analysis and Graph Laplacian Regularisation. 2021 Sensor Signal Processing for Defence Conference (SSPD). 2021 Sep doi: <https://doi.org/10.1109/SSPD51364.2021.9541516>.
3. Massaro A, Savino N, Selicato S, Panarese A, Galiano A, Dipierro G. Thermal IR and GPR UAV and Vehicle Embedded Sensor Non-Invasive Systems for Road and Bridge Inspections. 2021 IEEE International Workshop

- on Metrology for Industry 40 & IoT (MetroInd40&IoT). 2021;248-253. doi: <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488483>.
4. Li M, Huang L, Al-Jumaily A. Methods for Asphalt Road Density Measurement: A Review. 2021 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). 2021:269-274. doi: <https://doi.org/10.1109/M2VIP49856.2021.9664991>.
 5. Comite D, Ahmad F, Amin MG, Dogaru T. Forward-Looking Ground-Penetrating Radar: Subsurface target imaging and detection: A review. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2021 Dec;9(4):173–90. doi: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2020.3048368>.
 6. Chen G, Bai X, Wang G, Wang L, Luo X, Ji M, et al. Subsurface Voids Detection from Limited Ground Penetrating Radar Data Using Generative Adversarial Network and YOLOV5. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. 2021 Jul 11; p. 8600-8603, doi: <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554954>.
 7. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG. GPR Application with Different Antennas for Road Pavement Condition Assessment. 2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW). 2021 Oct 7; p. 233-237, doi: <https://doi.org/10.1109/MTTW53539.2021.9607094>.
 8. Abdul Rahman M, Zayed T, Bagchi A. Deterioration Mapping of RC Bridge Elements Based on Automated Analysis of GPR Images. Remote Sensing. 2022 Feb 25;14(5):1131. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14051131>
Academic Editor: Roberto Orose.
 9. Volovski M, Murillo-Hoyos J, Saeed TU, Labi S. Estimation of Routine Maintenance Expenditures for Highway Pavement Segments: Accounting for Heterogeneity Using Random-Effects Models. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. 2017 May;143(5). doi: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000041>.
 10. Woldemariam W, Murillo-Hoyos J, Labi S. Estimating Annual Maintenance Expenditures for Infrastructure: Artificial Neural Network Approach. Journal of Infrastructure Systems. 2016 Jun;22(2):04015025. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000280](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000280).
 11. Adams T. M. Estimating Cost per Lane Mile for Routine Highway Operations and Maintenance. National Center for Freight and Infrastructure Research and Education, University of Wisconsin, Madison, WI, USA, 2011, Technical Report No. MRUTC 07-12.
 12. Ground penetrating radar, theory and applications. Jol Harry M. Amsterdam: Elsevier B.V.; 2009. 508 p.
 13. Evans RD. Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to assess Pavements [dissertation]. Loughborough University; August 2009. 219 p.
 14. Xu Y, Sun L. Study on Permanent Deformation of Asphalt Mixtures by Single Penetration Repeated Shear Test. Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2013 Nov;96:886–93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.101>
 15. Zulufqar Bin Rashid1, Dr. Rakesh Gupta. Study of defects in flexible pavement and its maintenance. International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD) www.ijrerd.com, 2017;02(06):30-37. ISSN: 2455-8761.
 16. Rasol MA, Pérez-Gracia V, Fernandes FM, Pais JC, Santos-Assunção S, Santos C, et al. GPR laboratory tests and numerical models to characterize cracks in cement concrete specimens, exemplifying damage in rigid pavement. Measurement. 2020 Jul;158:107662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107662>.
 17. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakov AG. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2017 Jun; doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996072>
 18. Tian Xia, Dryver Huston. High Speed Ground Penetrating Radar for Road Pavement and Bridge Structural Inspection and Maintenance. Final Report. Project Number: SPR-RSCH017-738, Report Submitted on: 06/30/2016, 43P. <https://vtrans.vermont.gov/sites/aot/files/highway/documents/materialsandresearch/completedprojects/Final%20Report%20-%20738%20-%20High%20Speed%20GPR%2010-17-2016.pdf>
 19. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Electromagnetic theory of propagation, interference, and diffraction of light. Pergamon, London; Macmillan, New York; ed. 2, 1964. 808 p.
 20. Pochanin GP, Masalov SA. Ruban VP, Kholod PV, Batrakov DO, Batrakov, AG, Urdzik SN, Pochanin OG. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying, in Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. 20-65. CRC Press - Taylor & Francis Group, London. 2016. 474 p. ISBN 9781466586574 - CAT# K20299 doi: <http://dx.doi.org/10.1201/9781315374130-3>
 21. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG, Antyufeyev AV. UWB Signal Processing for the Solving Inverse Scattering Problem of Plane-Layered Media. 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). 2018 Sep; p. 140-143. <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2018.8520255>

22. Пат. 118409 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення та визначення напрямку у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті / Батраков Д.О., Батракова А. Г., Почанін Г.П., Орленко О.А.; заявник та патентоутримувач Харківський національний автомобільно-дорожній університет; Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна; Батраков Д.О., Батракова А. Г., Почанін Г.П., Орленко О.А. – а201705456; заявл. 02.06.2017; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1/2019 (винахід) <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/612571/>
23. Astanin LY, Kostylev AA. Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing. By: The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 1997.
24. Batrakov DO, Golovin DV, Simachev AA, Batrakov AG. Hilbert transform application to the impulse signal processing. 2010 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2010 Sep; p. 113-115, doi: <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2010.5609110>
25. Pasquini B, Vanderhaeghen M. Dispersion Theory in Electromagnetic Interactions. Annual Review of Nuclear and Particle Science. 2018 Oct 19;68(1):75–103. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-101917-020843>.
26. Batrakov AG, Batrakov DO. Prediction of the road pavement condition index using stochastic models // Roads and Bridges - Drogi i Mosty. Warsaw: Road and Bridge Research Institute, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.020.015> <https://www.rabdim.pl/index.php/rb/article/view/v19n3p225>
27. Pat. 113916 Ukraine, (51) IPC E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Method for detecting subsurface cracks in asphalt pavement during movement of diagnostic laboratory in traffic flow / Batrakov DO, Urdzik SM, Pochanin G.P., Batrakov AG; applicant and patent holder Batrakov DO, Urdzik SM, Pochanin GP, Batrakov AG - а201511191; stated 11/13/2015; publ. March 27, 2017, Bull. № 6/2017 (invention) <http://base.ukrpatent.org/searchINV/search.php?action=search>

REFERENCES

1. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG. Application of georadars for detecting subsurface defects in layers of non-rigid road pavements. Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics.” 2020;(32):6-15. Original article <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-01> ; <https://periodicals.karazin.ua/radiophysics/article/view/16753/15575>.
2. Dong J, Stankovic V, Davidson N. Target Detection and Recognition of Ground Penetrating Radar using Morphological Image Analysis and Graph Laplacian Regularisation. 2021 Sensor Signal Processing for Defence Conference (SSPD). 2021 Sep doi: <https://doi.org/10.1109/SSPD51364.2021.9541516>.
3. Massaro A, Savino N, Selicato S, Panarese A, Galiano A, Dipierro G. Thermal IR and GPR UAV and Vehicle Embedded Sensor Non-Invasive Systems for Road and Bridge Inspections. 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 40 & IoT (MetroInd40&IoT). 2021;248-253. doi: <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488483>.
4. Li M, Huang L, Al-Jumaily A. Methods for Asphalt Road Density Measurement: A Review. 2021 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). 2021:269-274. doi: <https://doi.org/10.1109/M2VIP49856.2021.9664991>.
5. Comite D, Ahmad F, Amin MG, Dogaru T. Forward-Looking Ground-Penetrating Radar: Subsurface target imaging and detection: A review. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2021 Dec;9(4):173–90. doi: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2020.3048368>.
6. Chen G, Bai X, Wang G, Wang L, Luo X, Ji M, et al. Subsurface Voids Detection from Limited Ground Penetrating Radar Data Using Generative Adversarial Network and YOLOV5. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. 2021 Jul 11; p. 8600-8603, doi: <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554954>.
7. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG. GPR Application with Different Antennas for Road Pavement Condition Assessment. 2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW). 2021 Oct 7; p. 233-237, doi: <https://doi.org/10.1109/MTTW53539.2021.9607094>.
8. Abdul Rahman M, Zayed T, Bagchi A. Deterioration Mapping of RC Bridge Elements Based on Automated Analysis of GPR Images. Remote Sensing. 2022 Feb 25;14(5):1131. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14051131> Academic Editor: Roberto Orose.
9. Volovski M, Murillo-Hoyos J, Saeed TU, Labi S. Estimation of Routine Maintenance Expenditures for Highway Pavement Segments: Accounting for Heterogeneity Using Random-Effects Models. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems. 2017 May;143(5). doi: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000041>.
10. Woldemariam W, Murillo-Hoyos J, Labi S. Estimating Annual Maintenance Expenditures for Infrastructure: Artificial Neural Network Approach. Journal of Infrastructure Systems. 2016 Jun;22(2):04015025. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000280](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000280).

11. Adams T. M. Estimating Cost per Lane Mile for Routine Highway Operations and Maintenance. National Center for Freight and Infrastructure Research and Education, University of Wisconsin, Madison, WI, USA, 2011, Technical Report No. MRUTC 07-12.
12. Ground penetrating radar, theory and applications. Jol Harry M. Amsterdam: Elsevier B.V.; 2009. 508 p.
13. Evans RD. Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to assess Pavements [dissertation]. Loughborough University; August 2009. 219 p.
14. Xu Y, Sun L. Study on Permanent Deformation of Asphalt Mixtures by Single Penetration Repeated Shear Test. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2013 Nov;96:886–93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.101>
15. Zulufqar Bin Rashid1, Dr. Rakesh Gupta. Study of defects in flexible pavement and its maintenance. *International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD)* www.ijrerd.com, 2017;02(06):30-37. ISSN: 2455-8761.
16. Rasol MA, Pérez-Gracia V, Fernandes FM, Pais JC, Santos-Assunção S, Santos C, et al. GPR laboratory tests and numerical models to characterize cracks in cement concrete specimens, exemplifying damage in rigid pavement. *Measurement*. 2020 Jul;158:107662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107662>.
17. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakova AG. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2017 Jun; doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996072>
18. Tian Xia, Dryver Huston. High Speed Ground Penetrating Radar for Road Pavement and Bridge Structural Inspection and Maintenance. Final Report. Project Number: SPR-RSCH017-738, Report Submitted on: 06/30/2016, 43P. <https://vtrans.vermont.gov/sites/aot/files/highway/documents/materialsandresearch/completedprojects/Final%20Report%20-%20738%20-%20High%20Speed%20GPR%2010-17-2016.pdf>
19. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Electromagnetic theory of propagation, interference, and diffraction of light. Pergamon, London; Macmillan, New York; ed. 2, 1964. 808 p.
20. Pochanin GP, Masalov SA, Ruban VP, Kholod PV, Batrakov DO, Batrakova, AG, Urdzik SN, Pochanin OG. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying, in *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications*. 20-65. CRC Press - Taylor & Francis Group, London. 2016. 474 p. ISBN 9781466586574 - CAT# K20299 doi: <http://dx.doi.org/10.1201/9781315374130-3>
21. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Antyufeyev AV. UWB Signal Processing for the Solving Inverse Scattering Problem of Plane-Layered Media. 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). 2018 Sep; p. 140-143. <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2018.8520255>
22. Patent 118409 Ukraine, (51) IPC E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Method for detecting and determining direction including subsurface cracks in asphalt pavement / Batrakov DO, Batrakova AG, Pochanin G. P., Orlenko OA; applicant and patent holder Kharkiv National Automobile and Road University; Kharkiv National University named after V.N. Karazina; Batrakov DO, Batrakova AG, Pochanin GP, Orlenko OA - a201705456; stated 02.06.2017; publ. January 10, 2019, Bull. № 1/2019 (invention) <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/612571/> (In Ukrainian)
23. Astanin LY, Kostylev AA. Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing. By: The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 1997.
24. Batrakov DO, Golovin DV, Simachev AA, Batrakova AG. Hilbert transform application to the impulse signal processing. 2010 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2010 Sep; p. 113-115, doi: <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2010.5609110>
25. Pasquini B, Vanderhaeghen M. Dispersion Theory in Electromagnetic Interactions. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. 2018 Oct 19;68(1):75–103. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-101917-020843>.
26. Batrakova AG, Batrakov DO. Prediction of the road pavement condition index using stochastic models // *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*. Warsaw: Road and Bridge Research Institute, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.020.015> <https://www.rabdim.pl/index.php/rb/article/view/v19n3p225>
27. Pat. 113916 Ukraine, (51) IPC E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Method for detecting subsurface cracks in asphalt pavement during movement of diagnostic laboratory in traffic flow / Batrakov DO, Urdzik SM, Pochanin G.P., Batrakova AG; applicant and patent holder Batrakov DO, Urdzik SM, Pochanin GP, Batrakova AG - a201511191; stated 11/13/2015; publ. March 27, 2017, Bull. № 6/2017 (invention) <http://base.ukrpatent.org/searchINV/search.php?action=search>

Стаття надійшла до редакції: 14 січня 2022 р.

Рекомендовано до друку: 6 квітня 2022 р.

NON-DESTRUCTIVE MONITORING OF HIGHWAYS USING GEORADAR (REVIEW ARTICLE, PART II)**D.O. Batrakov¹, M. M. Kovalov¹, A.G. Batrakova², S.N. Urdzik²**¹*V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*²*Kharkiv National Automobile and Highway University (KNAHU), 25, Yaroslava Mudrogo St, Kharkiv, 61002, Ukraine*

Relevance. The relevance of the research presented in the article is primarily due to the focus on the implementation of the state strategy to ensure the reliability and prolong the residual life of transport and engineering structures. Implementation is associated with methods and means of obtaining information and processing it in real time, as well as methods of assessing the condition of engineering structures, which are characterized by significant heterogeneity of geometric and physical-mechanical parameters. It is clear that this complicates the use of diagnostic results. However, despite the advantages of wave sounding methods, the use of such methods is constrained by the difficulty of interpreting the results and related errors in determining the parameters of structures, as well as multifactorial tasks of estimating the parameters of multicomponent materials and imperfections of existing methods of defectoscopy.

The aim of the work is to review the capabilities of modern pulsed georadars, as well as means of processing ultra-wideband signals together with computer-oriented numerical simulation systems and optimize methods of georadar data processing to solve problems of detection and identification of subsurface inhomogeneities in application of flat-layered medium models.

Materials and methods. The second part of the article provides a brief overview of modern methods of processing data sets obtained using pulsed georadars. To achieve the goal it was necessary to solve several tasks. The first task is to select the optimal technical means to obtain source information, as well as substantiation of the technical characteristics of georadars. Another task is to develop effective methods of processing the data. The last task is to establish the relationship of the obtained data with the geometric and physico-mechanical characteristics of the road surface.

Results. The basis of the obtained results is remote sensing data, as well as the proposed mathematical models and methods of remote sensing data processing. Based on the results of a comparative analysis of the capabilities of pulsed georadars, the paper offers practical recommendations for improving the reliability of search and identification of defects such as subsurface cracks and areas of loss of interlayer adhesion between layers of pavement.

Conclusions. The results of laboratory experiments presented in the article testify to the powerful possibilities of modern remote sensing technologies. The analysis of the existing means of remote sensing, first of all, with the help of georadars allowed to formulate a qualitatively new approach to solving the current problem of detecting hidden defects in layered structures. It should also be noted that there are opportunities to improve technical means and methods of georadar data processing.

KEY WORDS: *subsurface cracks, pulsed ultra-wideband georadars, computer data processing programs.*

The article was received by the editors: January 14 2022.

The article is recommended for printing: April 6 2022.