

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-01>

УДК 537.876.23:537.877

Д.О. БАТРАКОВ<sup>1</sup>, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: [batrakov@karazin.ua](mailto:batrakov@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

М.С. АНТЮФЄЄВА<sup>1</sup>, к. ф.-м. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: [antyufeyeva@karazin.ua](mailto:antyufeyeva@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6654-4794>

А.Г. БАТРАКОВА<sup>2</sup>, д. техн. наук, проф.

e-mail: [agbatr@ukr.net](mailto:agbatr@ukr.net) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

С.М. УРДЗІК<sup>2</sup>, к. техн. наук, доц.

e-mail: [urdzick@gmail.com](mailto:urdzick@gmail.com) ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6914-1221>

<sup>1</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

<sup>2</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, м. Харків,  
вул. Ярослава Мудрого, 25

## ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ГЕОРАДАРІВ У ЗАВДАННЯХ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

**Актуальність.** Актуальність досліджень обумовлена необхідністю реалізації стратегічних завдань щодо подовження залишкового ресурсу інженерних споруд та забезпечення їх надійності. Реалізація цього напрямку пов'язується з методами підповерхневого зондування, засобами отримання інформації та її обробки. Незважаючи на значні успіхи у розробленні сучасних методів обробки сигналів георадара, завдання вибору найбільш ефективного методу відповідно до мети георадарного зондування досі не вирішено. Вирішення означеного завдання має ґрунтуватися на аналізі сучасних методів обробки сигналів георадара з визначенням області їх застосування, обмежень та переваг.

**Мета роботи** – полягає в аналізі можливостей сучасних надширококутних георадарів і методів обробки імпульсних сигналів георадара для вирішення завдань дефектоскопії у плоскошаруватих структурно неоднорідних конструкціях.

**Матеріали та методи.** Основу досліджень створюють фізико-математичні моделі поширення надширококутних сигналів у плоско-шаруватих середовищах, сучасні моделі і методи обробки та інтерпретації даних георадарного зондування стосовно до завдань дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу на автомобільних дорогах.

**Результати.** За результатами проведеного аналізу визначено область застосування методів обробки сигналів георадара стосовно до завдання пошуку та позиціонування підповерхневих неоднорідностей у плоскошаруватих структурно неоднорідних середовищах, зокрема у нежорсткому дорожньому одязі. Визначено напрямки подальших досліджень в області георадарної діагностики підповерхневих неоднорідностей.

**Висновки.** Накопичений значний досвід застосування георадарів для вирішення завдань дефектоскопії, але дослідження в області георадарної діагностики підповерхневих тріщин дуже обмежені. Подальші дослідження мають бути спрямовані: на удосконалення методів визначення діелектричної проникності у багатошарових конструкціях, що підвищує надійність інтерпретації георадарних даних; розвиток методів реєстрації та аналізу сигналу, відбитого від неоднорідностей конструкції, що створює теоретичний фундамент дефектоскопії та розширює можливості георадарної діагностики; обґрунтування типу антенних блоків для проведення вимірювань, що дозволить підвищити їх точність.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** надширококутні імпульсні сигнали георадара; методи обробки сигналів георадара; плоскошарувате середовище; підповерхневі тріщини; дефектоскопія

**Як цитувати:** Батраков Д.О., Антюфєєва М.С., Батракова А.Г., Урдзік С.М. Огляд сучасних методів обробки сигналів георадарів у завданнях дефектоскопії. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2022; 37:7-19. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-01>

**In cites:** Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Urdzik SN. Overview of modern methods of processing georadar signals in tasks of defectoscopy. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2022;37:7-19. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-01> (In Ukrainian)

### ВСТУП

Застосування георадарів для вирішення інженерних задач почалося в 80-х роках минулого століття з моменту виготовлення першого зразка георадара американською компанією GSSI. Сьогодні застосування георадара для неруйнівної діагностики автомобільних доріг широко розвинене у всьому світі [1 - 3]. Одним

з перших напрямків застосувань георадара в області діагностики доріг було визначення місця розташування з'єднаних стрижнів на дорогах з жорстким покриттям [4 - 6].

По мірі вдосконалення апаратної бази та обчислювальних алгоритмів активно розвиваються дослідження в частині застосування георадарів в системі діагностики та управління станом покриття. Сучасні дослідження спрямовані на вирішення завдань:

- а) оцінки товщини конструктивних шарів дорожнього одягу [2, 4, 6, 7];
- б) оцінки вологості ґрунтів земляного полотна [8 - 9];
- в) позиціонування підповерхневих неоднорідностей і руйнувань [10 - 13], в тому числі виявлення порожнеч під цементобетонними плитами [14];
- г) оцінки щільності матеріалів і ґрунтів [15, 16].

Для вирішення перерахованих завдань провідними світовими виробниками георадарів GSSI New Gemption (США), Sensor and Software Inc. (Канада), Era Technology (Великобританія), Mala (Швеція), Radar Systems (Латвія), OYO corporation (Японія) і Geozondas (Литва) постійно удосконалюється обладнання та програмне забезпечення. Основні типи використовуваних в даний час дипольних антен наведені в Таблиці 1.

Табл. 1. Основні параметри антен георадара [17]

Tabl. 1. The main parameters of the GPR antennas

Частота	900 МГц	1 ГГц	1,5 ГГц	4 ГГц
Довжина хвилі, мм	136	122	81	31
Роздільна здатність, см	68	61	41	15
Проникнення, мм	1000	800	500	100

Динамічний розвиток георадарних методів діагностики автомобільних доріг пов'язано з істотними перевагами хвильових методів, які:

- а) спираються на фізично більш змістовні явища, пов'язані, в тому числі, з можливістю використання поляризаційних характеристик електромагнітних хвиль;
- б) забезпечують можливість (на відміну від FWD і ультразвукових методів) проводити вимірювання при переміщенні лабораторії зі швидкістю транспортного потоку;
- в) допускають варіацію таких параметрів первинного імпульсу як амплітуда, поляризація, частота повторення, накопичення з метою підвищення інформативності та достовірності отриманих результатів (на відміну від пасивних технологій - тепловізорів).

Як свідчить проведений аналіз методів і технічних засобів дефектоскопії дорожнього одягу, до теперішнього часу не існує загального і надійного автоматичного методу для оцінки руйнувань за результатами діагностики дорожнього одягу.

Найбільший потенціал для вирішення завдання позиціонування та ідентифікації підповерхневих тріщин в покритті та укріплених шарах основи нежорсткого дорожнього одягу мають георадари, що застосовуються як самостійно, так і в комбінації з іншими технічними засобами діагностики автомобільних доріг. Переваги георадарного зондування для вирішення завдань дефектоскопії забезпечуються безперервністю збору даних, кращою роздільною здатністю в порівнянні з іншими геофізичними методами, високою швидкістю зйомки.

Сучасні можливості георадарів дозволили впритул підійти до вирішення завдань дефектоскопії дорожнього одягу, пов'язаних з позиціонуванням і ідентифікацією підповерхневих тріщин [13, 18, 19]. Для вирішення завдань дефектоскопії компанія Utsi Electronics Ltd. (Велика Британія) почала розробку системи GPR для визначення глибини тріщин в 1999 році. В даний час існує потенційна можливість виявлення тріщин глибиною більше 50 мм.

Як було зазначено раніше, георадарне зондування може бути застосовано до широкого спектру матеріалів, включаючи цементобетон, асфальтобетонні суміші, глину, мул, пісок тощо. [20]. Ця властивість електромагнітних хвиль георадара важлива для виявлення тріщин, оскільки електромагнітні хвилі повинні проходити через тріщину, в тому числі заповнену [21].

Таким чином, георадар відповідає основним вимогам, які пред'являються в дослідженні до обладнання для виявлення, позиціонування та ідентифікації тріщин в шарах нежорсткого дорожнього одягу. Труднощі в аналізі та інтерпретації георадарних даних є однією з причин, з яких Транспортні агентства обмежено застосовують георадар як інструмент оцінки стану дорожнього покриття [22], тому зупинимось більш детально на методах отримання та інтерпретації результатів георадарного зондування.

## МЕТОДИ ОДЕРЖАННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДУВАННЯ

Фізичну основу виявлення і позиціонування тріщин в покритті і укріплених шарах основи складають явища відбиття і дифракції електромагнітних хвиль на неоднорідностях (тріщинах) в досліджуваній конструкції. Крім того, завдяки векторному характеру електромагнітних хвиль, було запропоновано використовувати поляризаційні ефекти для виявлення підповерхневих тріщин [23].

Традиційно процедури інтерпретації результатів зондування та ідентифікації підповерхневих об'єктів здійснюються оператором [24], що знижує достовірність інтерпретації та оперативність отримання результатів. Підвищення достовірності діагностики підповерхневих руйнувань можливо шляхом відновлення геометричних та електрофізичних параметрів неоднорідностей.

Під час підповерхневого зондуванні загальна схема одержання й інтерпретації даних зображення представляється у такий спосіб:

а) знімання просторово-часових вибірок розсіяного підповерхневими об'єктами поля (з обґрунтуванням розміру області, кроку дискретизації, поляризаційного базису);

б) визначення геометричних і електрофізичних параметрів підповерхневої області, яка апроксимується плоско-шаруватою (квазішаруватою) структурою;

в) формування зображення зондуємої підповерхневої області, що дозволяє локалізувати неоднорідності та підійти до їх діагностики - визначенню геометрії та електрофізичних параметрів об'єкта.

Відповідно до логіки розв'язання задачі виявлення, позиціонування та ідентифікації тріщин в покритті і укріплених шарах основи, дослідження спрямовані на оцінку впливу параметрів, що забезпечують точність інтерпретації радарограм [21]:

а) характеристик георадара: тип антени, частота і тип передавача;

б) діелектричних властивостей матеріалів шарів і матеріалу заповнення тріщин;

в) геометричних параметрів тріщини та її розташування в покритті;

г) методів і алгоритмів обробки зображень і хвильових даних;

д) методів побудови зображення (двомірні і тривимірні зображення);

е) спрямованості антени георадара і напрямку тріщини щодо напрямку сканування під час зйомки.

Слід зазначити, що центральна частота зондуючого імпульсу георадара істотно впливає на можливість оцінки глибини розташування прихованої (підповерхневої) тріщини. Наприклад, георадар з частотою зондуючого імпульсу 900 МГц може бути застосований для виявлення прихованих тріщин на глибині близько 0,5 м [10]. Узагальнення результатів численних досліджень [11, 21], присвячених оцінці впливу характеристик георадарів на точність і відтворюваність результатів виявлення, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу, дозволяє сформулювати наступні положення:

а) антени з частотою від 1500 МГц до 2000 МГц ефективніші для виявлення тріщин в порівнянні з антенами з частотою від 2300 МГц до 2600 МГц. Для виявлення тріщин рекомендується використовувати діапазон частот від 700 МГц до 2000 МГц [21]. Для виявлення і оцінки геометричних параметрів тріщин у нежорсткому дорожньому одязі рекомендується багаточастотний підхід, який передбачає застосування антен з високою частотою імпульсу при оцінці геометричних параметрів тріщин, а з більш низькою частотою - для виявлення тріщин [11];

б) зі збільшенням частоти зондуючого імпульсу збільшується роздільна здатність, внаслідок чого антени з частотою понад 2000 МГц мають більш високу роздільну здатність [21];

в) збільшення ширини смуги частот зондуючого імпульсу збільшує ймовірність виявлення як дрібних, так і великих тріщин за допомогою георадара та забезпечує найкращі результати при оцінці геометрії тріщини [21]. Роздільна здатність по глибині залежить від ширини імпульсу (або ширини смуги) сигналу радара - чим менше ширина імпульсу, тим вище роздільна здатність за глибиною [10];

г) для забезпечення відтворюваності результатів вимірювань і підвищення ймовірності виявлення тріщин рекомендується, щоб довжина хвилі, яка обернено пропорційна частоті повторення імпульсів, була менша за ширину тріщини.

Принциповим питанням під час вирішення завдання оцінки геометричних параметрів тріщин є обґрунтування технічних характеристик георадара, що забезпечують задану роздільну здатність. В роботі [10] зазначено, що мінімальний розмір елемента прихованої тріщини істотно впливає на результати її виявлення.

Як доведено у роботі [10], зондування конструкцій з прихованими тріщинами георадаром з центральною частотою 900 МГц дозволяє виявити і позиціонувати приховані тріщини з мінімальним розміром елемента від 1 см до 3 см. Якщо мінімальний розмір елемента прихованої тріщини менше 1 см, інтенсивність відбиття є занадто слабкою, щоб створити видиму картину відображення на радіограмі, що призводить до суттєвих помилок ідентифікації тріщини. Якщо мінімальний розмір елемента прихованої тріщини перевищує 3 см, приховану тріщину слід розглядати як велику тріщину або порожнину, яка ідентифікується на радарограмах без додаткової обробки.

Найбільш широким дослідженням, присвяченим аналізу технічних можливостей сучасних георадарів в частині виявлення та ідентифікації прихованих тріщин мінімально можливої ширини, і оцінці мінімально можливої відстані між тріщинами слід вважати [25]. На підставі аналізу форми і центральної частоти зондуючого імпульсу георадарів, що випускаються в даний час, авторами обґрунтовано, що мінімально можлива ширина тріщини, яка може бути виявлена георадаром, становить від 1 мм до 2 мм, залежно від їх розташування і форми, в той час як тріщини розміром менше одного міліметра не можуть бути виявлені за допомогою існуючих в даний час георадарів. Мінімальна відстань між тріщинами, яка може бути оцінена за результатами георадарного зондування, становить 5 см.

Зростання об'єму тріщини за рахунок збільшення її глибини або ширини підвищує ймовірність виявлення тріщин за допомогою георадара [10]. При цьому, тріщини значної ширини формують на радарограмах контрастні гіперболічні відображення, які легко ідентифікуються. З іншого боку, збільшення глибини тріщини призводить до появи гіпербол з більш глибокими прольотами.

Можливість виявлення та позиціонування тріщин багато в чому обумовлена відмінністю в електрофізичних характеристиках матеріалів шарів дорожнього одягу, що містять тріщину, і матеріалу, що заповнює тріщину [20, 26]. Відмінності в діелектричній проникності асфальтобетону та заповнення тріщини залежать від температури, типу асфальтобетону, типу заповнювача тріщини. У нежорсткому дорожньому одязі, що знаходяться в експлуатації, заповнювачем тріщин можуть бути бітумісткі матеріали, глина, пісок, вода, повітря, органічні матеріали або їх суміші [12]. Різниця в діелектричній проникності матеріалів шару, що містить тріщину, і матеріалу заповнення тріщини забезпечує можливість її виявлення [11]. Таким чином, за допомогою георадара можуть бути виявлені тріщини, заповнені повітрям або водою, що обумовлено відмінностями в діелектричній проникності асфальтобетону (7,0), води (81), повітря (1). Разом з тим, відмінності в діелектричній проникності між асфальтобетоном і заповнювачем тріщини змінюються в процесі експлуатації [12], що підвищує ймовірність виявлення тріщин в конструкціях, які знаходяться в експлуатації тривалий термін, у порівнянні з новими покриттями [21].

#### **МЕТОДИ ОБРОБКИ ДАНИХ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДУВАННЯ У ЗАДАЧАХ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТРІЩИН**

Завдання підповерхневого зондування класифікують:

а) завдання відновлення структури, що вимагають наявності апріорної інформації для відновлення зв'язку між фізико-механічними параметрами дорожнього одягу і електрофізичними параметрами матеріалів шарів [5, 6, 20]. Для вирішення зазначених завдань модель дорожнього одягу представляється у вигляді шаруватого (квазі-шаруватого) середовища;

б) завдання пошуку (пошук локальних неоднорідностей і руйнувань в шарах дорожнього одягу). Модель дорожнього одягу представляється як шарувате (квазішарувате) середовище з локальними неоднорідностями циліндричної, сферичної або еліптичної форми, розташованими похило щодо границь розділу середовищ [25].

Для кожного класу задач характерні свої методи обробки даних георадарного зондування, методи відновлення електрофізичних і геометричних параметрів досліджуваних конструкцій і неоднорідностей в них.

Обробка даних георадара містить у собі [27]:

а) попередню обробку для видалення «шумів», збійних сигналів, що полегшує подальшу обробку імпульсних сигналів;

б) виявлення неоднорідностей і змін геометричних параметрів конструкції або властивостей матеріалів шарів конструкції [27].

Різні завдання, а також удосконалені методи обробки сигналів для георадарів (наприклад, оцінка параметрів і формування зображень) вимагають різних методів їх обробки. Основна складність обробки даних полягає у виявленні близького зворотного розсіювання відклику через обмежену роздільну здатність у часі. Базові методи обробки даних георадара зазвичай застосовуються до необроблених даних, щоб краще візуалізувати або інтерпретувати дані георадарів. Методи попередньої обробки даних георадара зазвичай передбачають [28, 29]:

а) видалення фону - редагування даних передбачає коригування зібраних необроблених даних шляхом видалення та виправлення спотворень сигналів;

б) корекцію зміщення нуля, що спрямована на фіксацію початкової точки нуля, яка визначається як базова часова точка, що відповідає часу першого приходу хвилі повітря/земля. Однак зазначимо, що ця точка нестабільна через температуру, довжину кабелю та висоту антени;

в) усунення шумів має на меті забезпечити якісну інтерпретацію даних шляхом зменшення впливу шуму на сигнали георадарів. Цей вид методу застосовується або шляхом оцінки потужності шуму, або з використанням методів посилення сигналу

в) частотну і вейвлет-фільтрацію.

Для оцінки товщини шарів конструкції дорожнього одягу використовуються різні методи визначення границь розділу шарів і процедури перетворення часу на глибину [30]. Методи виявлення дифракційної гіперболи зазвичай використовуються для картування структури і виявлення тріщин в бетонних мостах [31]. Відомі методи обробки даних георадарного зондування включають деконволюцію [32], аналіз незалежних компонентів [33], аналіз кривої потужності [34], нейронні мережі [35].

Авторами дослідження [36] запропоновано вдосконалену прогнозу деконволюцію на основі вейвлет-аналізу (скорочення від PDWA method). Метод PDWA спочатку розкладає сигнали GPR на підсигнали у часовій області з різними масштабами за допомогою вейвлет-аналізу, а потім фільтрує підсигнали в часовій області за допомогою прогнозованої згортки та вейвлет-порогового усунення шуму, нарешті реконструює відфільтровані підсигнали для отримання результату аналізу. Обробка сигналу виявлення модельного експерименту методом PDWA показує, що, порівняно з прогнозованою деконволюцією, метод PDWA може пригнічувати численні луна-перешкоди, точно ідентифікувати цільове відбиття та покращувати співвідношення сигнал/перешкода (SIR) цільового відбиття, тим самим підвищуючи роздільну здатність виявлення та точність аналізу зображень сигналів георадара.

Видалення шумів на етапі попередньої обробки сигналів георадара, що здійснюється шляхом модуляції крокової частоти безперервної хвилі (SFCW), порівняно з іншими модуляціями георадара, має багато переваг, зокрема широкий динамічний діапазон і відносно простоту обробки. Однак у складному робочому середовищі та різноманітних об'єктах, які потрібно виявляти у багатошарових конструкціях, системи георадара отримують різноманітні відбиття та гаусівський шум під час роботи системи георадара.

Для вирішення цієї проблеми запропоновані методи покращення порогової функції [37]. Завдяки відносно високому відношенню сигнал/шум (SNR) ці покращені порогові функції мають хорошу продуктивність у видаленні змішаного шуму, розподіленого на вейвлет-коефіцієнтах високої частоти. Однак є також певний шум, розподілений на вейвлет-коефіцієнтах низьких частот, тому досить складно використовувати одну порогову функцію для видалення як низькочастотного, так і високочастотного шуму. Авторами роботи [37] пропонується комбінований метод усунення шумів, що складається з покращеної порогової функції вейвлетів (IWTF) і високочастотного фільтра, для підвищення SNR відбиття SFCW-GPR. Фільтр високих частот спрямований на усунення низькочастотного шуму, а IWTF — на усунення гаусового шуму, спричиненого ланцюгом випромінювача та приймача.

У [38] пропонується нова техніка обробки сигналу надширокосмугового імпульсного георадара на основі багатомасштабних спектральних характеристик, які зважаються за допомогою підходу нейронної мережі. У цьому методі відгук георадара в частотній області обробляється багатомасштабним трикутним банком фільтрів, що створює набір постійних характеристик. Використовуючи алгоритм вибору ознак, обирають двадцять найбільш значущих ознак для множення на відповідну вагу, оптимізовану нейронною мережею.

Зважаючи на складність і багатофакторність задачі дефектоскопії, досить поширеним є метод аналізу радарограм, що передбачає:

а) наявність апріорної інформації про кількість шарів конструкції і електрофізичні характеристики матеріалів шарів;

б) можливість чисельного синтезування радарограм;

в) співставлення фактичних і синтезованих радарограм.

Наявність апріорної інформації про кількість шарів конструкції та електрофізичні параметри матеріалів шарів дозволяє оцінити геометричні параметри конструкції [39] і підійти до вирішення завдання позиціонування тріщин в шарах конструкції (Рис. 1.).

Інший підхід до автоматичного виявлення тріщин і структурних змін конструкції нежорсткого дорожнього одягу розглянуто в [27]. Метод спрямований на автоматичну ідентифікацію відхилень в структурі і властивостях матеріалів шарів. Метод заснований на розрахунку похідних від поздовжньої лінії тренду (швидкості зміни лінії тренду) і визначенні областей, що характеризуються критичною «швидкістю зміни», яка вважається індикатором зміни структури досліджуваної конструкції або властивостей матеріалу шару. Результатом роботи алгоритму, що реалізує даний метод, є позиціонування тріщин і ділянок змін товщини шарів в конструкції дорожнього одягу (Рис. 2.). Метод має ряд істотних обмежень, пов'язаних з припущеннями про однорідності і незмінності структурних (товщини і матеріалу шару) і електрофізичних параметрів шарів дорожнього одягу. Зазначені припущення обмежують застосування методу на автомобільних дорогах на етапі експлуатації.

Зі зростанням інтересу до позиціонування підповерхневих тріщин за допомогою георадара отримали розвиток методи, засновані на результатах чисельного і фізичного моделювання впливу вертикальних тріщин на хвильове поле георадара в горизонтально-шаруватих однорідних середовищах [10]. Метод дозволяє визначити горизонтальне положення, глибину і відносну ширину прихованих вертикальних тріщин у горизонтально-шаруватих однорідних середовищах на глибині до 2 м. Для забезпечення точності

виявлення тріщин, відстань між сусідніми імпульсами повинна бути на третину меншою за відстань між передавальною та приймальною антенами георадара (для бістатичних антенних систем). Дослідження закладає основу для виявлення і позиціонування прихованих тріщин.

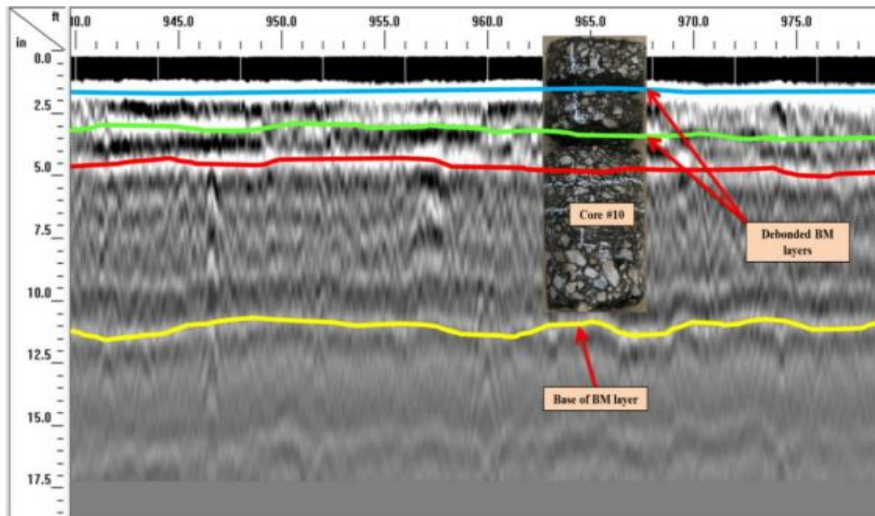


Рис. 1. Оцінка товщини шарів конструкції дорожнього одягу за наявності апріорної інформації [39]  
 Fig. 1. Estimation of the construction layers thickness of road pavement in the presence of a priori information [39]

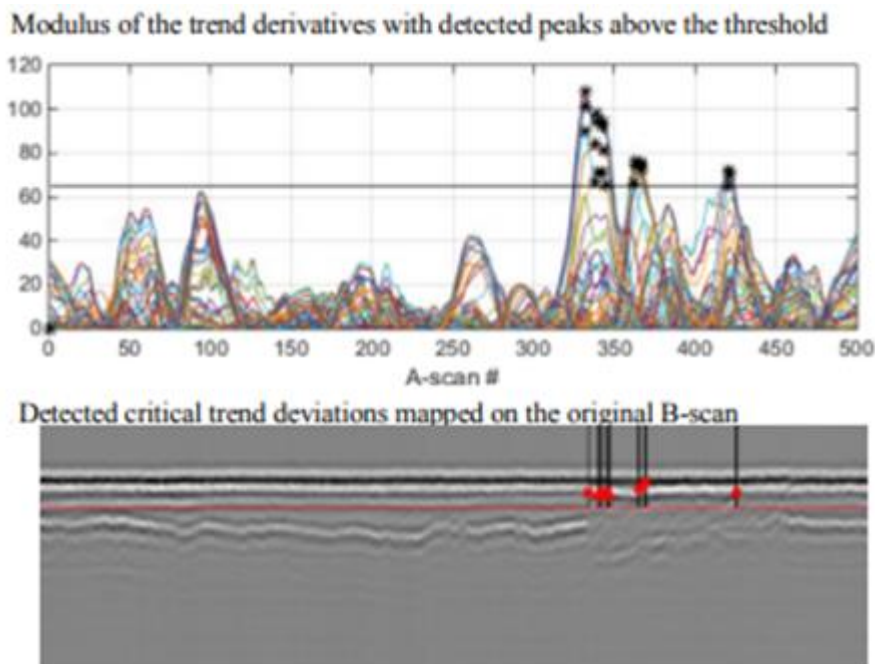


Рис. 2. Приклад обробки даних георадара [39]  
 Fig. 2. GPR data processing example [39]

Запропонований підхід [10] отримав розвиток в алгоритмі позиціонування положення прихованої тріщини на основі «еліптичної моделі» [10], яка може бути застосована при обробці даних георадарів з дипольними антенними системами, що обмежує область застосування методу. Найбільш перспективним, на наш погляд, слід вважати дослідження можливості виявлення та ідентифікації прихованих тріщин із застосуванням георадара, що працює на двох різних високих частотах (1,6 ГГц і 2,3 ГГц), при різній орієнтації диполів антени (перпендикулярно і паралельно тріщинам) [40]. Такий підхід дозволяє впритул підійти до дослідження поляризаційного стану імпульсних сигналів георадара при вирішенні задач позиціонування і ідентифікації прихованих тріщин.

Рішення задач дефектоскопії неможливо без розроблення алгоритмів обробки зображень і хвильових

даних, реалізованих методами чисельного моделювання хвильового поля георадара в середовищі з тріщиною різної ширини, глибини залягання і заповнення. При цьому відгук від простої вертикальної тріщини, поперечної до напрямку профілю, проявляється у вигляді дифракційних асимптот [11], які беруть початок зверху і знизу тріщини, що ілюструють явище гіперболічного розсіювання, заснованого на характерній формі відгуку в поперечному перерізі хвильового поля георадара.

Чисельне моделювання та порівняльний аналіз зв'язку між хвильовим полем георадара і тріщиною різної ширини показує, що зі збільшенням ширини тріщини різниця в ширині поперечних аномалій, викликаних тріщинами, стає меншою, а ширина тріщини не може бути виміряна безпосередньо по зображенню георадара [41]. Однак, амплітуда дифрагованої хвилі на вершині тріщини має очевидні закономірності, пов'язані з шириною тріщини, що забезпечує теоретичну основу для кількісної оцінки ширини прихованих тріщин в конструкції дорожнього одягу за даними георадара. За результатами чисельного моделювання встановлено, що амплітуда відбитого сигналу зростає з шириною тріщини, на відміну від їх форми, яка залишається досить постійною [42], а також зроблено висновок, що можливість виявлення тріщин суттєво залежить від контрасту шарів, що оточують цю тріщину [42].

Авторами дослідження [11] запропонований підхід до оцінки впливу вологості матеріалу, який заповнює тріщину, ширини і висоти тріщини, провідності матеріалу, що містить тріщину, і центральної частоти георадара на спостережуваний відгук (Рис. 3).

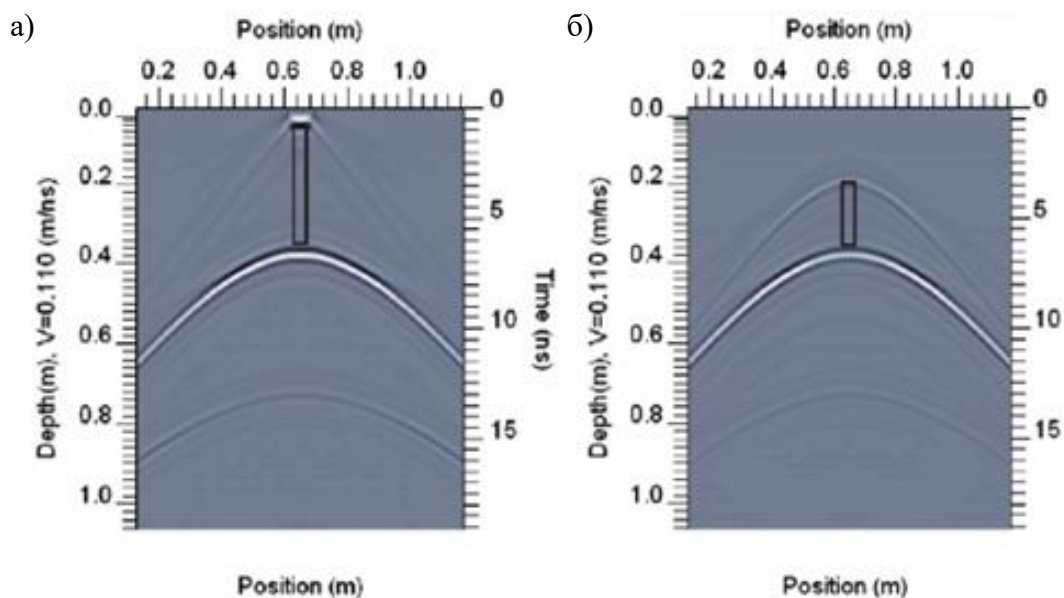


Рис. 3. Змодельована радараграма для антенної системи з центральною частотою 1000 МГц. Висота тріщини: (а) 350 мм, (б) 180 мм [11]

Fig. 3. Simulated radar pattern for antenna system with a center frequency of 1000 MHz. Crack height: (a) 350 mm, (b) 180 mm [11]

Оснoву запропонованого підходу складає чисельне моделювання хвильового поля георадара, що дозволяє розробити перелік ознак тріщин, видимих на радараграмах, на основі встановлення кореляції між візуально спостережуваними тріщинами і відповідними радараграмами з точністю до дециметра [18], що дозволяє ідентифікувати на радараграмах наскрізні тріщини аналогічної форми і розмірів. Цей підхід створює передумови для розробки компаративного алгоритму, основу якого складає реалізація процедури порівняння хвильового поля георадара для тріщин з різними геометричними параметрами.

У міру вдосконалення конструкцій георадарів, були розроблені методи і алгоритми обробки даних для виявлення підповерхневих неоднорідностей [23, 43]. Ці методи передбачають реєстрацію сигналів, відбитих від досліджуваного середовища з внутрішньою неоднорідністю і подальшу обробку цих сигналів різними спеціальними методами. Вони дають можливість визначення діелектричної проникності середовища (через значення кута розкриття гіперболи) і глибини залягання неоднорідності (за часом затримки відбитого сигналу). Однак такі алгоритми не дозволяють одночасно відновлювати характеристики плоскошаруватих середовищ (чисельні значення товщини і діелектричної проникності шарів) і параметри включень, зокрема підповерхневих тріщин (глибина залягання, геометричні розміри поперечного перерізу). Важливим фактором, що впливає на можливості георадара як інструменту дослідження тріщин, є кут і напрямок поширення електромагнітної хвилі щодо тріщини [21]. Для вирішення цих завдань було запропоновано використовувати аналіз поляризаційного стану відбитого

імпульсного сигналу [23, 44]. Незаперечною перевагою такого підходу є можливість здійснення неруйнівної діагностики дорожнього одягу з тріщинами при одночасному визначенні параметрів шарів покриття (діелектричної проникності і товщини). Достатньо суттєвим є те, що сучасні електронні компоненти, алгоритми обробки інформації та програмне забезпечення дозволяють здійснювати моніторинг дорожніх покриттів з тріщинами в режимі безперервного руху автомобіля. Під час руху транспортного засобу зі швидкістю транспортного потоку незначна зміна орієнтації напрямку випромінювання може відбуватися за рахунок коливань кузова автомобіля через нерівності дорожнього покриття. При цьому похибки, викликані порушенням ортогональності орієнтації напрямку зондування щодо меж шарів структури, накопичуються зі збільшенням глибини зондування. Експериментальними дослідженнями [45] підтверджено вплив навіть порівняно невеликих змін кута орієнтації осі зондування у поздовжній площині на амплітуду і форму імпульсних сигналів, відбитих від плоскошаруватого середовища. У роботі [45] метод постановки та розв'язання зворотної задачі розсіювання для плоскошаруватого середовища поширено на середовище з втратами (з урахуванням провідності середовища). Основу методу складають запропоновані авторами алгоритми обробки імпульсного сигналу, відбитого плоскошаруватими середовищами. Перевагами такого підходу є поєднання інформативності імпульсних сигналів надширокопосмугових сигналів та ефективності алгоритмів розв'язування обернених задач. Для обробки та інтерпретації експериментальних даних використовується схема Ньютона-Канторовича.

Більшість існуючих програмних систем обробки даних георадарного зондування, що застосовуються під час діагностики дорожнього покриття, реалізують алгоритми автоматичного відновлення значень відносної діелектричної проникності. Модернізація програмного забезпечення [46] дозволила обробляти складні імпульсні сигнали та реалізувати можливість відображення кількісних значень параметрів шарів дорожнього одягу - відносної діелектричної проникності, а також і товщини. Для перевірки адекватності отриманих результатів авторами запропонований метод, заснований на процедурі зіставлення вимірної товщини шарів у лабораторних і польових умовах з результатами, отриманими за допомогою чисельного моделювання.

### ВИСНОВКИ

Можна констатувати, що на цей час накопичений значний досвід застосування георадарів для вирішення завдання виявлення, позиціонування та ідентифікації наскрізних тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу, тоді як дослідження в області георадарної діагностики прихованих тріщин дуже обмежені. Отже, подальші дослідження повинні бути спрямовані на вирішення наступних завдань:

- а) удосконалення методів відновлення діелектричної проникності в багатошарових конструкціях, що дозволить підвищити надійність результатів інтерпретації георадарних даних і оперативність діагностики;
- б) розвиток методів реєстрації та аналізу крос-поляризаційної компоненти сигналу, відбитого від неоднорідностей конструкції, що створює теоретичний фундамент дефектоскопії конструкцій дорожнього одягу та розширює можливості георадарної діагностики;
- в) обґрунтування типу антенних блоків для проведення вимірювань, що дозволить підвищити охоплення вимірювань та їх точність.

Таким чином, проблема оперативного виявлення прихованих (підповерхневих) тріщин і оцінки їх параметрів у шарах нежорсткого дорожнього одягу до теперішнього часу в світовій практиці не вирішена. Для її вирішення необхідно подальше вдосконалення моделей і алгоритмів обробки результатів георадарної діагностики.

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Jol Harry M. Ground penetrating radar, theory and applications. Amsterdam: Elsevier B.V.; 2009. 508 p.
2. Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics. 2000;43:119–138. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X)
3. Forest R, Pynn J, Alani A, Ferne B. The Use of Ground Penetrating Radar for the Monitoring of Road Properties. In: TRL annual research review 2003. Crowthorne: TRL, 2004. pp. 25 - 37.
4. Lahouar S, Al-Qadi IL. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. NDT and E International Journal. 2008;41(2):69–81. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.09.001>
5. Al-Qadi L, Lahouar S. Detection of asphalt binder aging in flexible pavement by ground penetrating radar. Materials Evaluation. 2005;63(9):921–925.
6. Wong KT, Urbaez E. Ground Penetrating Radar (GPR) – a Tool for Pavement Evaluation and Design. Shaping the future: Linking policy, research and outcomes: 25th ARRB Conference. Perth, Australia: Proceedings.



- 2012; pp. 1–13.
7. Maser KR, Holland J, Roberts R, Popovics J. NDE methods for quality assurance of new pavement thickness. *International Journal of Pavement Engineering*. 2006;7(1):1–10. <https://doi.org/10.1080/10298430500501985>
  8. Abdullah R, Zulhaidi H, Shafri M, Mardeni R, Sabira Khatun. Evaluation of Road Pavement Density Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2009;2:100–111. <https://doi.org/10.3923/jest.2009.100.111>
  9. Grote K, Hubbard S, Harvey J, Rubin Y. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*. 2005;57:129–153. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.10.002>
  10. Shengli Li, Chaoqun Wang, Panxu Sun, Guangming Wu, Dongwei Wang. A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar. 2016;8(12):1–10. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814016683154>
  11. Diamanti Nectaria, Redman David. Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. *Journal of Applied Geophysics*. 2012;81:106–116. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.006>
  12. Ahmad N, Wistuba M, Lorenz H. GPR as a crack detection tool for asphalt pavements: Possibilities and limitations. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Shanghai. 2012; pp. 551–555. <http://dx.doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254925>
  13. Carrick Erica Utsi. *Ground Penetrating Radar: Theory and Practice*. Butterworth – Heinemann; 2017. 224 p.
  14. Miskiewicz M, Lachowicz J, Tysiac P, Jaskula P, Wilde K. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 356. 2018; 8 p. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012023>
  15. Mardeni R, Raja Abdullah R, Shafri HZM. Road pavement density analysis using a new non-destructive ground penetrating radar system. *Progress In Electromagnetics Research B*. 2010;21:399–417. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERB10032202>
  16. Al-Qadi IL, Lahouar S. Measuring layer thicknesses with GPR: Theory to practice. *Construction and Building Materials*. 2005;19:763–772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.005>
  17. Stryk Josef. Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. *Intersections Journal*. 2008;5(1):9.
  18. Krysiński Lech, Sudyka Jacek. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. *Journal of Applied Geophysics*. 2013;97:27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.010>
  19. Benedetto Andrea, Pajewski Lara. *Civil engineering applications of ground penetrating radar*. Springer. 2015; 371 p.
  20. Saarenketo T. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys. PhD thesis, Faculty of Science. Department of Geosciences. University of Oulu. 2006; 127 p.
  21. Noor Ahmad. Crack detection in asphalt pavements by means of Ground Penetrating Radar (GPR), Institut für Straßenwesen Braunschweig. 2016; 153 p. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201712080942>
  22. Al-Qadi I, Lahouar S, Jiang K, McGhee KK, Mokarem D. Accuracy of ground penetrating radar for estimating rigid and flexible pavement layer thicknesses, *Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board*. No. 1940. Washington, D.C. 2005; pp. 69–78. <http://dx.doi.org/10.1177/0361198105194000109>
  23. Патент на корисну модель. 81296 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01). Спосіб виявлення та визначення місць знаходження у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті / Батракова А.Г., Батраков Д.О., Почанін Г.П.; заявник та патентоутримувач Батракова А.Г., Батраков Д.О., Почанін Г.П., Орленко О.А. – u201300256; заявл. 08.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12/2013.
  24. *Ground penetrating radar, theory and applications*. Jol Harry M. (Editor). Amsterdam: Elsevier B.V. 2009; 508 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4>
  25. 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* 40. 2017;2:221–243. <http://dx.doi.org/10.1520/GTJ20160066>
  26. Annan AP. *Electromagnetic principles of GPR*. In: *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. 1st edition, Elsevier Science. Amsterdam; 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6>
  27. Uus A, Liatsis P, Slabaugh GG, Anagnostis A, Roberts S, Twist S. Trend Deviation Analysis for Automated Detection of Defects in GPR Data for Road Condition Surveys. *Proceedings of the 23rd International Conference on Systems, Signals and Image Processing*. 2016. <https://doi.org/10.1109/IWSSIP.2016.7502765>
  28. Sandmeier KJ. REFLEXW Version 9.5: Windows™ XP/7/8/10-program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data [software]. Karlsruhe (Germany): Dr. K.J. Sandmeier; Copyright 1998-2020. Available from: [www.sandmeier-geo.de/Download/reflexw\\_manual\\_a4\\_booklet.pdf](http://www.sandmeier-geo.de/Download/reflexw_manual_a4_booklet.pdf).

29. Sun M, Pan J, Cedric Le Bastard, Wang Y, Li J. Advanced Signal Processing Methods for Ground-Penetrating Radar: Applications to Civil Engineering. 2019 Jul 1;36(4):74–84. <https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2900454>
30. Solla M, X. Núñez-Nieto, M. Varela-González, Joaquín Martínez-Sánchez, Arias P. GPR for road inspection: Georeferencing and efficient approach to data processing and visualization. 2014 Jun 1; pp. 913-918. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970559>
31. Miskiewicz M, Lachowicz J, Tysiac P, Jaskula P, Wilde K. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018 May;356:012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012023>
32. Abdel-Qader I, Krause V, Abu-Amara F, Abudayyeh O. Comparative Study of Deconvolution Algorithms for GPR Bridge Deck Imaging. WSEAS Transactions on Signal Processing 2014;10:20-31.
33. Abu-amara F. An automated framework for defect detection in concrete bridge decks using fractals and independent component analysis. PhD Thesis, Western Michigan University. 2010.
34. Colagrande S, Ranalli D, Tallini M. Ground Penetrating Radar Assessment of Flexible Road Pavement Degradation. International Journal of Geophysics. 2011;2011:1–11. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/989136>
35. Cao Y, Guzina BB, Labuz JF. Pavement Evaluation Using Ground Penetrating Radar. Minnesota Department of Transportation. 2008.
36. Liu H, Ling T, Zhang L, Gu D, Cao F. An improved predictive deconvolution based on wavelet analysis for GPR signal processing. 2019 Jun 1. <http://dx.doi.org/10.1109/FENDT47723.2019.8962690>
37. Singh AP, Sharma A, Mishra R, Wagle M, Sarkar AK. Pavement condition assessment using soft computing techniques. International Journal of Pavement Research and Technology. 2018 Nov;11(6):564–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.12.006>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681417301487>
38. Budiman P.A. Rohrnan, Masahiko Niahirnoto. Estimation of Near-Surface Soil Moisture Through GPR Signal Processing Based on Multi-Scaled Spectral Feature Weighting. 2018 Aug 1; <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598023>
39. Dera Abdallah Alhadi. Assessment of highway condition using combined geophysical surveys. Doctoral Dissertations. Faculty of the Graduate School of the Missouri university of science and technology. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree doctor of philosophy in geological engineering. 2016.
40. 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. p.16166
41. Shi-li Guo, Fei Yan, Pei-min Zhu, Xiu-zhong Li. Numerical study on response of ground penetrating radar wave field to crack width. Progress in Geophysics.2016;31:(04). <https://doi.org/10.6038/pg20160451>
42. Fernandes FM, Pais JC. Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR Construction and Building Materials. 2017;154:1130-1138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.022>
43. Патент на корисну модель. 108136 Україна, (51) МПК E01C23/00, G01R 29/08 (2006.01). Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному потоці / Батраков Д.О., Урдзік С.М., Почанін Г.П., Батракова А.Г.; – а201511191; заявл. 13.11.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6/2017.
44. Патент на винахід. 113916 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному потоці / Батраков Д.О., Урдзік С.М., Почанін Г.П., Батракова А.Г.; – а201511191; заявл. 13.11.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6/2017
45. Batrakov D, Beloshenko K, Antyufeyeva M, Batrakov A, Urdzik S. Comparative study of signal processing of two uwb gpr antenna units. Telecommunications and Radio Engineering. 2019;78:109-116. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.20>
46. Batrakov DO, Batrakov AG, Urdzik SN, Danielyan VR. Nondestructive diagnostics and detection of subsurface cracks in non-rigid pavements with GPR. Diagnostyka. 2021;22(2):85-95. <https://doi.org/10.29354/diag/137915>

#### REFERENCES

1. Jol Harry M. Ground penetrating radar, theory and applications. Amsterdam: Elsevier B.V; 2009. 508 p.
2. Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics. 2000;43:119–138. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X)
3. Forest R, Pynn J, Alani A, Ferne B. The Use of Ground Penetrating Radar for the Monitoring of Road Properties. In: TRL annual research review 2003. Crowthorne: TRL, 2004. pp. 25 - 37.
4. Lahouar S, Al-Qadi IL. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. NDT and E International Journal. 2008;41(2):69–81. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2007.09.001>
5. Al-Qadi L, Lahouar S. Detection of asphalt binder aging in flexible pavement by ground penetrating radar.

- Materials Evaluation. 2005;63(9):921–925.
6. Wong KT, Urbaz E. Ground Penetrating Radar (GPR) – a Tool for Pavement Evaluation and Design. Shaping the future: Linking policy, research and outcomes: 25th ARRB Conference. Perth, Australia: Proceedings. 2012; pp. 1–13.
  7. Maser KR, Holland J, Roberts R, Popovics J. NDE methods for quality assurance of new pavement thickness. International Journal of Pavement Engineering. 2006;7(1):1–10. <https://doi.org/10.1080/10298430500501985>
  8. Abdullah R, Zulhaidi H, Shafri M, Mardeni R, Sabira Khatun. Evaluation of Road Pavement Density Using Ground Penetrating Radar. Journal of Environmental Science and Technology. 2009;2:100–111. <https://doi.org/10.3923/jest.2009.100.111>
  9. Grote K, Hubbard S, Harvey J, Rubin Y. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. Journal of Applied Geophysics. 2005;57:129–153. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.10.002>
  10. Shengli Li, Chaoqun Wang, Panxu Sun, Guangming Wu, Dongwei Wang. A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar. 2016;8(12):1–10. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814016683154>
  11. Diamanti Nectaria, Redman David. Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. Journal of Applied Geophysics. 2012;81:106–116. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.006>
  12. Ahmad N, Wistuba M, Lorenz H. GPR as a crack detection tool for asphalt pavements: Possibilities and limitations. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Shanghai. 2012; pp. 551–555. <http://dx.doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254925>
  13. Carrick Erica Utsi. Ground Penetrating Radar: Theory and Practice. Butterworth – Heinemann; 2017. 224 p.
  14. Miskiewicz M, Lachowicz J, Tysiac P, Jaskula P, Wilde K. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 356. 2018; 8 p. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012023>
  15. Mardeni R, Raja Abdullah R, Shafri HZM. Road pavement density analysis using a new non-destructive ground penetrating radar system. Progress In Electromagnetics Research B. 2010;21:399–417. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERB10032202>
  16. Al-Qadi IL, Lahouar S. Measuring layer thicknesses with GPR: Theory to practice. Construction and Building Materials. 2005;19:763–772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.005>
  17. Stryk Josef. Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. Intersections Journal. 2008;5(1):9.
  18. Krysiński Lech, Sudyka Jacek. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. Journal of Applied Geophysics. 2013;97:27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.010>
  19. Benedetto Andrea, Pajewski Lara. Civil engineering applications of ground penetrating radar. Springer. 2015; 371 p.
  20. Saarenketo T. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys. PhD thesis, Faculty of Science. Department of Geosciences. University of Oulu. 2006; 127 p.
  21. Noor Ahmad. Crack detection in asphalt pavements by means of Ground Penetrating Radar (GPR), Institut für Straßenwesen Braunschweig, 2016; 153 p. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201712080942>
  22. Al-Qadi I, Lahouar S, Jiang K, McGhee KK, Mokarem D. Accuracy of ground penetrating radar for estimating rigid and flexible pavement layer thicknesses, Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board. No. 1940. Washington, D.C. 2005; pp. 69–78. <http://dx.doi.org/10.1177/0361198105194000109>
  23. Utility model patent. 81296 Ukraine, (51) IPC E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01). The method of detection and determination of locations, including subsurface cracks in the asphalt concrete coating / Batrakova A.G., Batrakov D.O., Pochanin G.P.; applicant and patent holder Batrakova A.G., Batrakov D.O., Pochanin G.P., Orlenko O.A. – u201300256; statement 08.01.2013; published 25.06.2013, Bul. No. 12/2013. (In Ukrainian)
  24. Ground penetrating radar, theory and applications. Jol Harry M. (Editor). Amsterdam: Elsevier B.V. 2009; 508 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4>
  25. 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 40. 2017;2:221–243. <http://dx.doi.org/10.1520/GTJ20160066>
  26. Annan AP. Electromagnetic principles of GPR. In: Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. 1st edition, Elsevier Science. Amsterdam; 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6>
  27. Uus A, Liatsis P, Slabaugh GG, Anagnostis A, Roberts S, Twist S. Trend Deviation Analysis for Automated Detection of Defects in GPR Data for Road Condition Surveys. Proceedings of the 23rd International Conference on Systems, Signals and Image Processing. 2016. <https://doi.org/10.1109/IWSSIP.2016.7502765>
  28. Sandmeier KJ. REFLEXW Version 9.5: Windows™ XP/7/8/10-program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data [software]. Karlsruhe (Germany): Dr.

- K.J. Sandmeier; Copyright 1998-2020. Available from: [www.sandmeier-geo.de/Download/reflexw\\_manual\\_a4\\_booklet.pdf](http://www.sandmeier-geo.de/Download/reflexw_manual_a4_booklet.pdf).
29. Sun M, Pan J, Cedric Le Bastard, Wang Y, Li J. Advanced Signal Processing Methods for Ground-Penetrating Radar: Applications to Civil Engineering. 2019 Jul 1;36(4):74–84. <https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2900454>
  30. Solla M, X. Núñez-Nieto, M. Varela-González, Joaquín Martínez-Sánchez, Arias P. GPR for road inspection: Georeferencing and efficient approach to data processing and visualization. 2014 Jun 1; pp. 913-918. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970559>
  31. Miskiewicz M, Lachowicz J, Tysiac P, Jaskula P, Wilde K. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018 May;356:012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012023>
  32. Abdel-Qader I, Krause V, Abu-Amara F, Abudayyeh O. Comparative Study of Deconvolution Algorithms for GPR Bridge Deck Imaging. WSEAS Transactions on Signal Processing 2014;10:20-31.
  33. Abu-amara F. An automated framework for defect detection in concrete bridge decks using fractals and independent component analysis. PhD Thesis, Western Michigan University. 2010.
  34. Colagrande S, Ranalli D, Tallini M. Ground Penetrating Radar Assessment of Flexible Road Pavement Degradation. International Journal of Geophysics. 2011;2011:1–11. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/989136>
  35. Cao Y, Guzina BB, Labuz JF. Pavement Evaluation Using Ground Penetrating Radar. Minnesota Department of Transportation. 2008.
  36. Liu H, Ling T, Zhang L, Gu D, Cao F. An improved predictive deconvolution based on wavelet analysis for GPR signal processing. 2019 Jun 1. <http://dx.doi.org/10.1109/FENDT47723.2019.8962690>
  37. Singh AP, Sharma A, Mishra R, Wagle M, Sarkar AK. Pavement condition assessment using soft computing techniques. International Journal of Pavement Research and Technology. 2018 Nov;11(6):564–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.12.006>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681417301487>
  38. Budiman P.A. Rohrnan, Masahiko Niahirnoto. Estimation of Near-Surface Soil Moisture Through GPR Signal Processing Based on Multi-Scaled Spectral Feature Weighting. 2018 Aug 1; <https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8598023>
  39. Dera Abdallah Alhadi. Assessment of highway condition using combined geophysical surveys. Doctoral Dissertations. Faculty of the Graduate School of the Missouri university of science and technology. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree doctor of philosophy in geological engineering. 2016.
  40. 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. p.16166
  41. Shi-li Guo, Fei Yan, Pei-min Zhu, Xiu-zhong Li. Numerical study on response of ground penetrating radar wave field to crack width. Progress in Geophysics.2016;31:(04). <https://doi.org/10.6038/pg20160451>
  42. Fernandes FM, Pais JC. Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR Construction and Building Materials. 2017;154:1130-1138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.022>
  43. Patent for a utility model. 108136 Ukraine, (51) IPC E01C23/00, G01R 29/08 (2006.01). The method of detecting subsurface cracks in the asphalt concrete road surface during the movement of the diagnostic laboratory in the traffic flow / Batrakov D.O., Urdzik S.M., Pochanin G.P., Batrakova A.G.; – a201511191; statement 11/13/2015; published 27.03.2017, Bul. No. 6/2017. (In Ukrainian)
  44. Patent for an invention. 113916 Ukraine, (51) IPC E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) The method of detecting subsurface cracks in the asphalt concrete road surface during the movement of the diagnostic laboratory in the traffic flow / Batrakov D.O., Urdzik S.M., Pochanin H. .P., Batrakova A.G.; – a201511191; statement 11/13/2015; published 27.03.2017, Bul. No. 6/2017 (In Ukrainian)
  45. Batrakov D, Beloshenko K, Antyufeyeva M, Batrakova A, Urdzik S. Comparative study of signal processing of two uwb gpr antenna units. Telecommunications and Radio Engineering. 2019;78:109-116. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.20>
  46. Batrakov DO, Batrakova AG, Urdzik SN, Danielyan VR. Nondestructive diagnostics and detection of subsurface cracks in non-rigid pavements with GPR. Diagnostyka. 2021;22(2):85-95. <https://doi.org/10.29354/diag/137915>

Стаття надійшла до редакції: 14 вересня 2022 р.

Рекомендовано до друку: 2 листопада 2022 р.

## OVERVIEW OF MODERN METHODS OF PROCESSING GEORADAR SIGNALS IN TASKS OF DEFECTOSCOPY

D.O. Batrakov<sup>1</sup>, M.S. Antyufeyeva<sup>1</sup>, A.G. Batrakova<sup>2</sup>, S.N. Urdzik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University (KNAHU), 25, Yaroslava Mudrogo St, Kharkiv, 61002, Ukraine

**Relevance.** The relevance of research is due to the need to implement strategic tasks to extend the residual resource of engineering structures and ensure their reliability. Implementation of this direction is associated with methods of subsurface sounding, means of obtaining information and its processing. Despite significant progress in the development of modern GPR signal processing methods, the task of choosing the most effective method for the purpose of GPR sounding has not yet been solved. The solution of the given task should be based on the analysis of modern methods of processing GPR signals with the definition of the scope of their application, limitations and advantages.

**The purpose of the work** is to analyze the possibilities of modern ultra-broadband ground-penetrating radars and methods of processing pulsed ground-penetrating radar signals to solve problems of flaw detection in flat-layer structurally heterogeneous structures. Materials and methods. Physics-mathematical models of propagation of ultra-broadband signals in flat-layered media, modern models and methods of processing and interpretation of ground-penetrating radar sounding data in relation to the tasks of flaw detection of non-rigid road clothing on highways form the basis of research.

**The results.** Based on the results of the analysis, the field of application of georadar signal processing methods in relation to the task of finding and positioning subsurface heterogeneities in flat-layered structurally heterogeneous environments, in particular in non-rigid road wear, is determined. The directions of further research in the field of ground-penetrating radar diagnostics of subsurface inhomogeneity have been determined.

**Conclusions.** Considerable experience has been accumulated in the application of ground-penetrating radars to solve problems of flaw detection, but research in the field of ground-penetrating radar diagnostics of subsurface cracks is very limited. Further research should be aimed at: improving the methods of restoring dielectric permeability in multilayer structures, which increases the reliability of GPR data interpretation; development of methods of registration and analysis of the signal reflected from inhomogeneities of the structure, which creates a theoretical foundation of defectoscopy and expands the possibilities of ground-penetrating radar diagnostics; substantiating the type of antenna units for measurements, which will increase their accuracy.

**KEY WORDS:** *ultra-broadband GPR pulse signals; GPR signal processing methods; flat-layer environment; subsurface cracks; defectoscopy*

The article was received by the editors: 14 September 2022

The article is recommended for printing: 2 November 2022