

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-05>

УДК 621.574.4

Д.О. БАТРАКОВ¹, д. ф.-м. наук, проф.

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

А.Г. БАТРАКОВА², д. техн. наук, проф.

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

М. М. КОВАЛЬОВ¹,

А.О. МАСЛЕННИКОВ¹

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

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61022, Україна

АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ГЕОРАДАРІВ І ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Актуальність проблеми. Актуальність завдань вдосконалення методів обробки георадарних даних обумовлена необхідністю отримання достовірної інформації про стан будівельних конструкцій та об'єктів транспортної інфраструктури. Тому розвиток методів неруйнівного контролю, що спираються на застосування георадарів як інструмент отримання інформації про внутрішню будову та підповерхневі неоднорідності багатошарових конструкцій, удосконалення алгоритмів обробки георадарних даних, створюють основу для оперативної оцінки технічного стану конструкцій і споруд за відносно низької собівартості робіт.

Мета роботи - огляд існуючих методів обробки даних неруйнівного контролю та удосконалення раніше запропонованого авторами алгоритму обробки даних, отриманих за допомогою георадара.

Матеріали та методи. Розроблений метод, що призначений для вирішення завдань товщинометрії плоскошаруватих середовищ. Метод реалізований в обчислювальному алгоритмі. Основу алгоритму склали результати досліджень в області теорії дифракції та математичної фізики.

Результати. Доведено ефективність процедури отримання та застосування калібрувальних сигналів георадара для визначення зондуючого сигналу. За результатами лабораторних експериментів: визначено вплив частоти сигналу георадара на ефективність процедури обробки даних, підтверджено адекватність запропонованого алгоритму в частині відновлення геометричних та електрофізичних параметрів шарів конструкцій; встановлені обмеження методу відновлення електрофізичних параметрів плоскошаруватих конструкцій, що стосуються кількості шарів; доведено принципову можливість розвитку даного методу і програмного забезпечення для подальшого збільшення кількості аналізованих шарів і підвищення точності визначення геометричних і електрофізичних параметрів конструкцій, що досліджуються.

Висновки. Отримані результати сприятимуть розвитку методів неруйнвної діагностики автомобільних доріг і транспортних споруд із застосуванням георадарів. Окремо слід зазначити перспективи подальшого розвитку запропонованого підходу для вирішення завдань позиціонування та ідентифікації підповерхневих неоднорідностей.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: неруйнівний контроль, георадари, імпульсні сигнали, плоскошаруваті середовища

Як цитувати: Батраков Д.О., Батракова А.Г., Ковальов М.М., Масленіков А.О. Алгоритми обробки сигналів георадарів і підвищення якості неруйнівного контролю. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023;38:45-55

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-05>

In cites: Batrakov DO, Batrakova AG, Kovalov MM, Maslenikov AO. Georadars signal processing algorithms and improvement of non-destructive test quality. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radiophysics and Electronics". 2023;38:45-55. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-05> (In Ukrainian)

ВСТУП

Науковий напрямок, що пов'язаний із розв'язанням задач неруйнівного контролю та дистанційного зондування, спирається на обробку наборів даних, отриманих за допомогою різних фізичних принципів. У статті розглянемо технології, що спираються на застосування георадарів (Ground Penetrating Radars – GPR) та подальшу обробку дифрагованих на неоднорідностях сигналів. У більшості випадків основна інформація про внутрішню будову досліджуваного середовища (числові значення геометричних параметрів – товщини шарів та фізичних параметрів – значення відносної діелектричної проникності)

© Батраков Д.О., Батракова А.Г., Ковальов М.М., Масленіков А.О., 2023

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

оцінюється оператором георадару на підставі його досвіду та кваліфікації. По суті, оператор у такому випадку вирішує так зване зворотне завдання. До класу обернених завдань відносять завдання визначення внутрішніх параметрів об'єктів за відомими наборами даних, отриманих у зовнішній стосовно об'єкта області. Типові приклади - комп'ютерна томографія, ультразвукове дослідження в медицині, сейсморозвідка в акустиці та ін. При цьому ключове питання полягає у перевірці достовірності отриманих оцінок, оскільки набори вихідних даних з математичної точки зору не є повними. Це призводить до появи додаткових рішень, які не є правильними (об'єкт має лише один набір властивостей), проте задовольняють сформульованим математичним рівнянням модельної задачі. Тому актуальним завданням є також розробка методу розв'язання задачі неруйнівного контролю, який би забезпечував отримання єдиного та правильного рішення.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Питання технічного розвитку георадарів, можливостей їх застосування для вирішення завдань неруйнівного контролю та дистанційного зондування відображені у багатьох дисертаціях [1-3] монографіях [4-6], статтях [7-11] та доповідях на конференціях [12-15]. Слід зазначити, що інтенсивні дослідження у цьому напрямі проводяться не тільки у сфері теорії, але й у завданнях прикладного характеру. Багато прикладних результатів також відображені у звітах [16-19].

Основні завдання, які необхідно вирішувати в процесі реєстрації та обробки даних неруйнівного контролю, що отримані за допомогою георадарів, передбачають:

- вибір оптимальних параметрів приладу;
- обґрунтування характеристик зондувальних сигналів;
- розроблення методу аналізу отриманих даних;
- створення обчислювальних алгоритмів та програмного забезпечення для обробки радарограм;
- розроблення моделей та методів інтерпретації даних, отриманих за результатами обробки дифрагованих на різних неоднорідностях сигналів.

У роботі розглянемо, передусім, методи аналізу даних контролю за допомогою георадарів і алгоритми перетворення сигналів та його спектральних характеристик з метою підвищення надійності результатів інтерпретації даних зондування.

Перелічені завдання можна умовно поділити на завдання товщинометрії та завдання пошуку дефектів (неоднорідностей). Зазначимо, що не всі підповерхневі неоднорідності є дефектами. Наприклад, внутрішні підповерхневі кабелі, дренажні труби або технологічні шви є неоднорідностями, але не є дефектами. Тоді як тріщини, особливо у внутрішніх шарах багатошарової конструкції, створюють значну загрозу несучої здатності конструкції через неможливість їх візуального виявлення і адекватної оцінки впливу на стан усієї конструкції [20, 21]. Ще один вид дефектів описується терміном розшарування (delamination) – порушення зчеплення між шарами нежорсткого дорожнього покриття. Ця проблема з погляду діагностики призводить до необхідності виявлення шарів конструкції з малою відносною товщиною [8, 11, 22, 25].

Нарешті, підкреслимо, що майже всі питання контролю поточного стану будівельних конструкцій спираються на відповідні моделі, які можуть враховувати різні параметри. Наприклад, більшість методів контролю товщини шарів у різній мірі спирається на модель плоскошаруватого середовища та застосування формул Френеля [26-29]. Водночас поверхні реальних об'єктів контролю, наприклад, автомобільних доріг, є шорсткими. Врахування шорсткості зовнішньої та внутрішніх меж вимагає залучення інших моделей розсіювання електромагнітних хвиль [30]. З проведеного аналізу випливає, що універсальний підхід до вирішення загального завдання неруйнівного контролю шарувато-неоднорідних середовищ на сьогоднішній час відсутній. Тому методи вирішення таких завдань та алгоритми обробки даних георадарного зондування необхідно розробляти з урахуванням особливостей структури, що досліджується, та технічних параметрів вимірювального інструменту - георадару.

Постановка задачі формулюється в такий спосіб. Первинними даними є імпульсні сигнали, що відбиті від внутрішніх неоднорідностей зондованого середовища та зареєстровані приймачем надширокосмугового (UWB) георадару. Багатошарову структуру, що досліджується, будемо вважати плоскошаруватим середовищем з межами, нерівності яких малі в порівнянні з просторовими геометричними параметрами. Тоді завдання полягає у визначенні значень фізичних (діелектрична проникність) та геометричних параметрів (товщина) матеріалів такого середовища. При вирішенні цієї задачі спиратимемося на раніше розроблені методи визначення діелектричної проникності верхнього шару за допомогою вимірювання коефіцієнта відбиття [12, 15, 25], визначення товщини шарів на підставі вимірювання затримки за Гільбертом та застосування інтегрального перетворення [15, 22, 25].

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основна мета даної роботи полягає в удосконаленні раніше запропонованого алгоритму обробки даних, отриманих за допомогою GPR для визначення значень товщини шарів плоскошаруватого середовища та їх діелектричної проникності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- з'ясувати можливості раніше запропонованої схеми калібрування зондувального імпульсного сигналу за допомогою визначення коефіцієнта відбиття від металу для визначення параметрів зондувального імпульсу;
- провести аналіз можливостей отримання наборів первинних даних на реальних лабораторних конструкціях за допомогою імпульсного георадару «Odyag-5» та визначити вплив значень параметрів імпульсних модельних сигналів георадарів на процес обробки даних;
- виконати обробку отриманих експериментальних даних про відбиті від лабораторних конструкцій сигнали за допомогою розробленого програмного забезпечення;
- провести оцінку характеристик лабораторних конструкцій з різними параметрами за допомогою георадару з метою встановлення можливості використання такого георадару у процесі контролю поточного стану об'єктів транспортної інфраструктури, насамперед автомобільних доріг;
- обґрунтувати можливість розвитку даного методу та програмного забезпечення з метою подальшого збільшення кількості шарів, що аналізуються, та підвищення точності визначення значень їх товщини.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДУ ОБРОБКИ ДАНИХ ЗОНДУВАННЯ

Основою даного методу є рівняння, що зв'язує значення швидкості поширення електромагнітних хвиль V_n у середовищі з діелектричною проникністю \mathcal{E}_n зі швидкістю поширення світла (електромагнітних хвиль) у вакуумі (1), а також формули Френеля [26], що зв'язують амплітуду та інтенсивність хвилі Т, яка пройшла, та відбитої R електромагнітної хвилі при проходженні через плоску межу розділу двох середовищ з різними значеннями діелектричної проникності \mathcal{E} (показника заломлення n).

$$v_n = \frac{c}{\sqrt{\mathcal{E}_n}} \quad (1)$$

Запропоновану схему застосування формул Френеля стосовно задачі визначення товщини шарів плоскошаруватого середовища в найпростішому випадку двох шарів з товщиною h_1 і h_2 та значеннями діелектричної проникності \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 відповідно, розташованих на напівнескінченній підкладці з діелектричною проникністю \mathcal{E}_s ілюструє Рис. 1.

Амплітуди падаючої і відбитої електромагнітної хвилі, а також електромагнітної хвилі, що проходить через першу межу структури позначені як $A_{0,-}$, $R_{0,+}$, $T_{0,-}$ відповідно, де індекси «+» і «-» означають поширення електромагнітної хвилі в прямому і зворотному відносно осі OZ напрямках.

Далі для коефіцієнтів відбиття від шару з номером n у шар з номером $n - 1$ маємо:

$$R_{n-1,n} = \frac{A_{n,n-1}}{A_{n-1,n}} = \frac{\sqrt{\mathcal{E}_{n-1}} - \sqrt{\mathcal{E}_n}}{\sqrt{\mathcal{E}_{n-1}} + \sqrt{\mathcal{E}_n}}, \quad (2)$$

а для коефіцієнтів проходження:

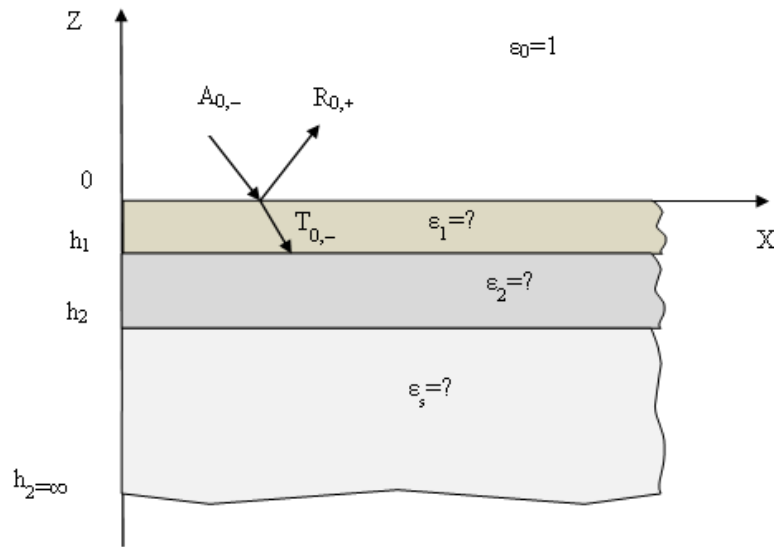


Рис. 1. Схема зондування плоскошаруватого середовища.

Fig. 1. Scheme of sounding a flat-layered medium.

$$T_{n\mp 1,n} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\varepsilon_{n-1}}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}}, \\ \frac{2\sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}}} \end{cases}, \quad (3)$$

де $n-1$, n , $n+1$ – номери шарів; $A_{n-1,n}$, $A_{n,n-1}$ – амплітуди падаючого на межу між шаром з ε_{n-1} і шаром з ε_n і відбитого в $n-1$ шар сигналів ($A_{n-1,n} = A_0$); $T_{n-1,n}$ – коефіцієнт проходження з $n-1$ -го шару в n -й шар; $T_{n+1,n}$ – коефіцієнт проходження з $n+1$ -го шару в n -й шар; $R_{n,n-1}$ – коефіцієнт відбиття від межі між $n-1$ -м і n -м шарами в $n-1$ -й шар.

Основною метою першого етапу є визначення величини коефіцієнта відбиття від зовнішньої межі плоскошаруватого середовища, що досліджується, за відомою (вимірною експериментально) амплітудою сигналу на виході структури (у верхньому напівпросторі, тобто в повітрі). Для вирішення цього завдання використовуються процедури калібрування, що складаються з: вимірювання сигналу, який відбито від тонкого листа металу, який розташований на поверхні конструкції, що зондується; вимірювання сигналу від конструкції.

Для зручності запису в компактній формі, вводимо поняття передаточної функції шару P_n як множника при коефіцієнті відбиття у рівнянні, яке зв'яже амплітуду хвилі, що відбита від крайньої межі шару, з амплітудою хвилі, що пройшла назад у верхній шар. При проходженні хвилі через межу, припустимо, що між шарами з індексами «1» та «2» у прямому та зворотному напрямках передаточна функція буде визначатися відповідним коефіцієнтом проходження та, згідно з (3), буде дорівнювати:

$$P_2 = T_{1,2} \cdot T_{2,1} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \cdot \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} = 4 \frac{\sqrt{\varepsilon_2} \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{(\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2})^2}. \quad (4)$$

Приймальна антена георадара реєструє повний сигнал, що є суперпозицією всіх парціальних сигналів, відбитих від внутрішніх неоднорідностей. Позначимо амплітуди цих парціальних сигналів через C_n . Тоді для нижньої межі першого шару маємо очевидне співвідношення:

$$C_1 = P_1 \cdot B_1 = (T_{0,1} \cdot T_{1,0}) \cdot A_0 \cdot R_{1,2}. \quad (5)$$

Перевагою такої форми запису є те, що для отримання передаточної функції системи, що

складається з n шарів достатньо перемножити їх власні передаточні функції. Наприклад, для шару з номером n маємо формулу:

$$R_{n,n+1} = A_0^{-1} \cdot C_n / (P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n) = A_0^{-1} \cdot C_n / \prod_{n=1}^N P_n, \quad (6)$$

де $P_n = T_{n-1,n} \cdot T_{n,n-1}$.

Далі за допомогою коефіцієнта відбиття $R_{n,n+1}$, який для відповідної межі може бути записаний у вигляді $R_{n,n+1} = \frac{A_{n+1,n}}{A_{n,n+1}}$, із співвідношення (2) може бути отриманий вираз діелектричної проникності нижнього шару (Рис. 1):

$$\sqrt{\varepsilon_{n+1}} = \sqrt{\varepsilon_j} \frac{A_{n,n+1} - A_{n+1,n}}{A_{n,n+1} + A_{n+1,n}}. \quad (7)$$

Скористуємося формулою (7) для розрахунку коефіцієнту проходження через нижню межу n -го шару. Далі операції (4-7) повторюються.

Визначена у такому порядку діелектрична проникність $(n+1)$ шару, а також, затримка за часу проходження сигналу через шар у прямому і зворотному напрямках Δt_n надають можливість розрахувати товщину шару h_n за формулою:

$$h_n = \frac{v_n \cdot \Delta t_n}{2}. \quad (8)$$

СХЕМА ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ І АЛГОРИТМ ОБРОБКИ ДАНИХ

Обчислювальний алгоритм складається з таких етапів:

1. На першому етапі вимірюють так званий сигнал прямого проходження – сигнал що безпосередньо пройшов у приймальну антену та минув середовище, що зондується. Цей сигнал не містить корисної інформації про об'єкт, що досліджується, та в разі накладення на основний імпульс призводить до його спотворення. Тому цей сигнал під час обробки результатів зондування необхідно вилучити, вивести, з основного імпульсу. Вимірювання цього сигналу здійснюється шляхом вимірювання сигналу у вільному просторі, що не містить перепон, розташованих на відстані в декілька метрів.

2. На другому етапі на поверхні конструкції, що досліджується, розміщують тонкий лист металу та реєструють відбитий сигнал, який у подальшому застосовують як модель зонduючого імпульсу при обчисленні коефіцієнта відбиття (2).

3. На третьому етапі реєструють сигнал, відбитий від досліджуваної конструкції та проводять зондування конструкції, що досліджується, шляхом переміщення георадара по поверхні конструкції.

4. Отримані дані зберігаються у файлі для подальшої обробки.

5. На основі первинної обробки даних зондування за допомогою перетворення Гільберта визначаються часові затримки сигналів (Δt_n), що пройшли від нижніх меж і та їх амплітуди. Ця інформація є вхідною інформацією для запропонованого алгоритму.

6. За формулою (7) визначається $\sqrt{\varepsilon_1}$ і ε_1 .

7. Далі за формулами (4-7) обчислюються $T_{0,1}$, $T_{1,0}$, $A_{0,1}$, $A_{1,0}$, а потім за формулою (7) обчислюється ε_2 . Розрахунок повторюється до останньої межі конструкції, де визначається тільки діелектрична проникність основи (підкладки).

8. Координати меж шарів визначаються за формулою:

$$Z_n = \sum_{n=1}^I \frac{(t_n - t_{n-1}) \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_n}} = \sum_{n=1}^I \frac{\Delta t_n \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_n}}, \quad (9)$$

де Z_n – координати n -ї межі шару (верхня межа має індекс 0); t_n, t_{n-1} – момент часу проходження сигналу n -ї і $(n-1)$ межі шару відповідно, визначені на етапі 1; ε_n – діелектрична проникність n -го шару (визначена на етапі 2 або 3), c – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вільному просторі (в повітрі).

9. Розраховуються значення товщини шарів за формулою (9).

10. Отримані дані заносяться у файл для подальшого використання.

Таким чином, алгоритм дозволяє одночасно і без додаткових лабораторних експериментів визначити значення товщини та діелектричної проникності шарів плоскошаруватих середовищ, зокрема будівельних конструкцій.

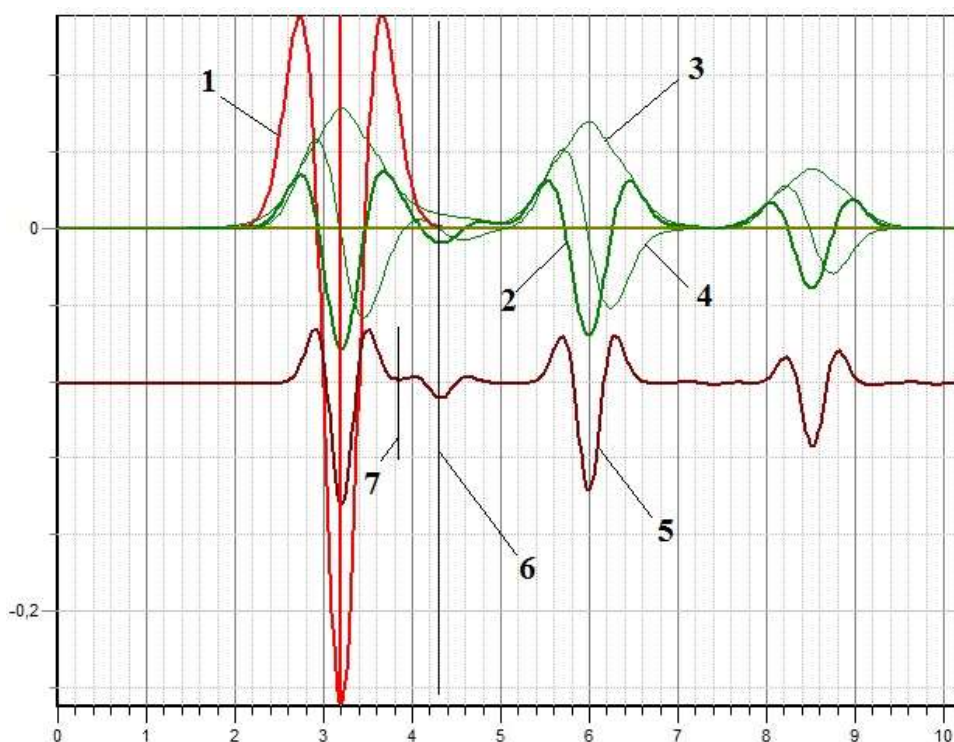
АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПІДХОДУ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ТОВЩИНОМЕТРІЇ

Для аналізу можливостей запропонованого підходу проведено серію лабораторних експериментів щодо зондування конструкцій та перевірки роботи алгоритму обробки георадарних даних за допомогою програмного забезпечення, що реалізує запропонований алгоритм.

Перший етап – моделювання поширення сигналів. Завданням цього етапу є встановлення можливостей обробки сигналів за умови, що форма сигналу близька до ідеальної. Для реалізації цього завдання за допомогою програми «GeoVizu» синтезовано тришарову модель середовища на підлозці. Товщина шарів 10 см, 14 см і 13 см, значення діелектричної проникності матеріалу шарів 2,8, 3,2, 8,4 і 15,0 відповідно.

Далі проведено процедуру моделювання зондування тришарової конструкції за допомогою штучно синтезованого сигналу. Форму синтезованого сигналу наведено на Рис. 2 (сигнал 1). На осях (Рис. 2) по осі ординат відкладені значення нормованої амплітуди сигналів, а по осі абсцис – час у наносекундах. Також на Рис. 2 наведено сигнал (сигнал 2), що моделює відбиття імпульсу від тришарової конструкції, що досліджується, та синтезований відбитий сигнал (5), отриманий за допомогою зондуючого імпульсу з більш високою центральною частотою (1500MHz). Для зручності візуального сприйняття цей сигнал штучно зсунутий вниз відносно осі OZ. Вертикальними лініями на Рис. 2 позначено нижню межу першого шару (6) і області відсутності сигналу (паузи) між зондуючим і відбитим від першої межі імпульсами (7).

Аналіз результатів численного моделювання свідчить про наявність суперечливих вимог до параметрів зондуючого сигналу – між його центральною частотою та глибиною зондування, оскільки сигнали з більш високою центральною частотою мають, як бачимо з Рис. 2, більш високу просторову роздільну здатність. На таких сигналах при відбитті є область затримки (7), що розділяє імпульси, які відбиті від меж шарів, товщина яких є порівняною з просторовими розмірами зондуючого імпульсу. Завдяки законам теорії електромагнетизму та властивостям імпульсних сигналів [1, 2, 12, 25, 26] такі сигнали мають значний коефіцієнт загасання по глибині, що зменшує глибину зондування.



- 1 – зондуючий сигнал ($f_c = 900\text{MHz}$); 2 – синтезований імпульс;
 3 – результат перетворення Гільберта синтезованого відбитого сигналу;
 4 – результат інтегрального перетворення синтезованого сигналу;
 5 – синтезований сигнал ($f_c \cong 1500\text{MHz}$); 6 – область першої межі шару;
 7 – область затримки між сигналами
- 1 – probing signal ($f_c = 900\text{MHz}$); 2 – synthesized impulse; 3 – the result of the Hilbert transformation of the synthesized reflected signal; 4 – the result of integral transformation of the synthesized signal;
 5 – synthesized signal ($f_c \cong 1500\text{MHz}$); 6 – region of the first limit of the layer;
 7 – area of delay between signals

Рис.2. Вікно обробки даних чисельного моделювання.

Fig. 2. Numerical Simulation Data Processing Window.

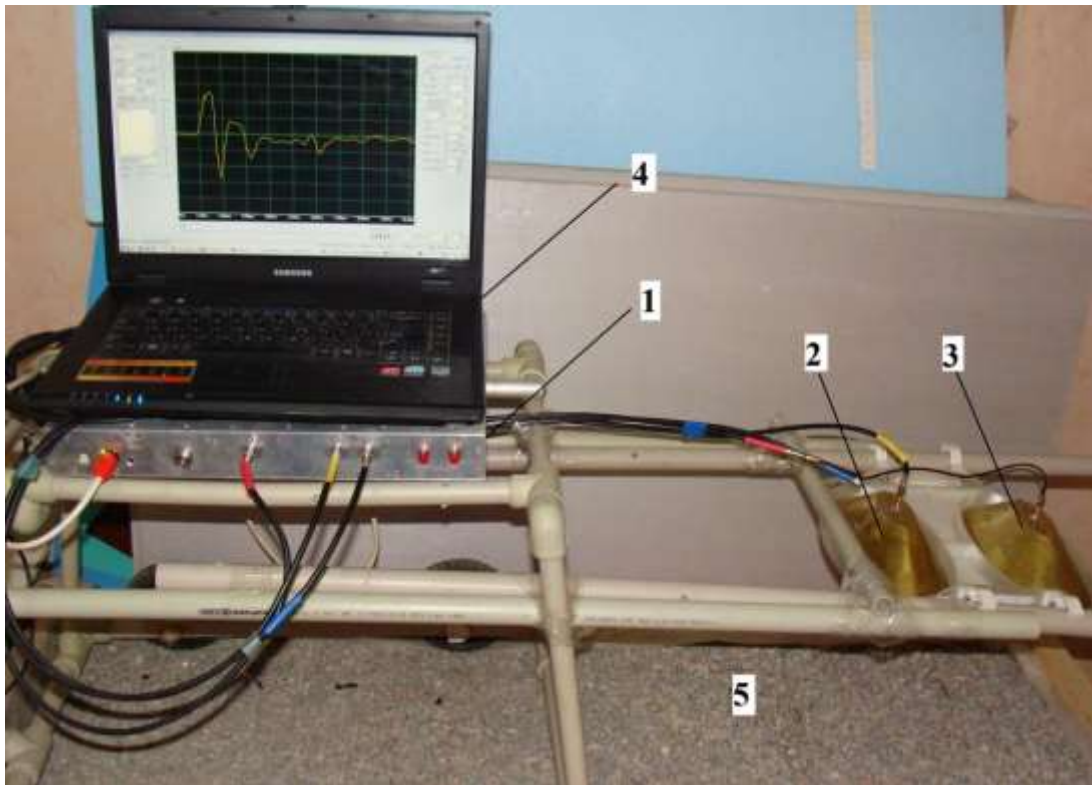
Тому наступним завданням цього дослідження є визначення оптимальних значень імпульсних сигналів георадару для вирішення завдань товщинометрії умовно плоскошаруватих конструкцій. Для вирішення цього завдання проведено серії лабораторних експериментів.

Другий етап передбачав проведення лабораторних досліджень на тришарових лабораторних моделях, електрофізичні параметри шарів яких близькі до електрофізичних параметрів шарів конструкції, що синтезована за допомогою програми «GeoVizu» на попередньому етапі досліджень. Конструкція складається з трьох шарів. Перший шар товщиною 10 см зі щебню крупнозернистого, другий шар – пісок товщиною порядку 14 см, третій шар – вологий суглинок товщиною 13 см. Для забезпечення загасання сигналу та запобігання додаткового відбиття від підкладки застосований додатковий шар-підкладка з вологої глини. Загальний вид конструкції та експериментального устаткування наведено на Рис. 3.

Результати обробки сигналів, що отримані за результатами лабораторних експериментів, за допомогою запропонованого алгоритму, наведено на Рис. 4.

У вікні програми (Рис. 4) відображені значення параметрів (товщини шарів та діелектричної проникності матеріалу шарів) конструкції, які визначені за допомогою програми «GeoVizu», що реалізує запропонований алгоритм у напівавтоматичному режимі. Термін «напівавтоматичний режим» передбачає, що для обробки необхідно натиснути кнопку «Min» у формі або ввести в поле «Count» на верхньому рівні значення відліку по часовій осі так, щоб вертикальна лінія 4 співпадала з максимумом амплітуди зондуючого сигналу (1).

Наступні етапи обробки результатів зондування передбачають повторення аналогічних операцій.



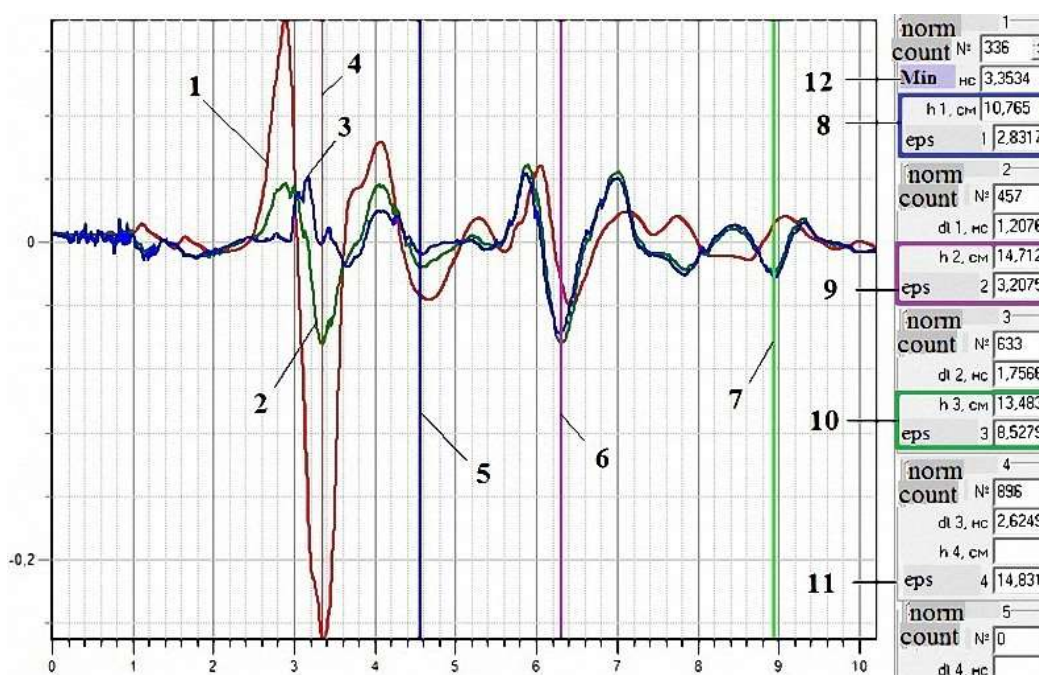
1 – головний блок георадара; 2 – антена випромінювач; 3 – приймальна антена;
 4 – персональний комп'ютер для обробки даних; 5 – верхній шар конструкції
 1 - GPR main unit; 2 - transmitting antenna; 3 - receiving antenna;
 4 - personal computer for data processing; 5 - the top layer of the structure

Рис. 3. Експериментальне устаткування.
 Fig. 3. Experimental equipment.

Лабораторні експерименти підтверджують працездатність алгоритму щодо відновлення параметрів плоскошаруватого середовища. За результатами проведених лабораторних експериментів на багатошарових моделях з різною кількістю шарів (від 3 шарів до 6 шарів) встановлено, що максимальна кількість шарів (разом з підкладкою), параметри яких можуть бути визначені за допомогою алгоритму, що реалізований у програмі «GeoVizu», без втрати точності відновлення геометричних і електрофізичних параметрів, дорівнює п'яти. Це обумовлено як загасанням сигналу з глибиною, так й спотворенням сигналу через додаткові перевідбиття від меж шарів.

Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на удосконалення як методу обробки імпульсних сигналів, так і конструкції георадара.

Разом з тим слід зазначити, що, як доводить досвід обробки георадарних даних, які отримані на автомобільних дорогах, можливості георадара «ОДЯГ-5» та програми «GeoVizu» є достатніми для вирішення завдань діагностики та оцінки поточного стану покриття автомобільних доріг.



1 – зондуєчий сигнал ($f_c \cong 900\text{MHz}$); 2 – виміряний експериментально відбитий імпульс; 3 – результат першого етапу обробки сигналу (2); 4 – відлік часу відбиття від зовнішньої межі середовища; 5, 6, 7 – відлік часу відбиття від першої, другої, третьої внутрішньої межі середовища відповідно; 8, 9, 10 – результати розрахунку товщини та діелектричної проникності першого, другого, третього шарів відповідно; 11 – результати розрахунку діелектричної проникності шару напівнескінченної підкладки.

1 – probing signal ($f_c \cong 900\text{MHz}$); 2 – experimentally measured reflected pulse; 3 – the result of the first stage of signal processing (2); 4 – counting the time of reflection from the outer boundary of the medium; 5, 6, 7 – counting of the reflection time from the first, second, third internal boundary of the medium, respectively; 8, 9, 10 – calculation results thickness and dielectric constant of the first, second, and third layers, respectively; 11 – the results of calculating the permittivity of the semi-infinite substrate layer.

Рис. 4. Результати чисельного моделювання
Fig. 4. The Results of numerical simulation

ВИСНОВКИ

Запропоновано метод обробки імпульсних сигналів георадару, що отримані під час неруйнвної діагностики плоскошаруватих середовищ. Для перевірки адекватності запропонованого підходу на першому етапі дослідження був використаний метод синтезованих сигналів. Використання чисельного моделювання дозволило наглядно продемонструвати можливості визначення товщини шарів плоскошаруватих середовищ за допомогою надширокосмугових сигналів сучасних георадарів. Перевірка запропонованого методу інтерпретації даних георадарного зондування виконана в лабораторних умовах за допомогою георадара «Одяг-5».

За результатами чисельного моделювання доведено ефективність процедури отримання та застосування калібрувальних сигналів георадару для визначення зондуєчого сигналу.

За результатами лабораторних експериментів:

- визначено вплив частоти сигналу георадару на ефективність процедури обробки даних, підтверджено адекватність запропонованого алгоритму в частині відновлення геометричних та електрофізичних параметрів шарів конструкцій;

- встановлені обмеження методу відновлення електрофізичних параметрів плоскошаруватих конструкцій, що стосуються кількості шарів. Загальна кількість шарів конструкції, параметри якої відновлюються, не повинна перевищувати п'яти шарів. Збільшення кількості шарів призводить до втрати точності результатів обчислень;

- доведено принципову можливість розвитку даного методу і програмного забезпечення для

подальшого збільшення кількості аналізованих шарів і підвищення точності визначення геометричних і електрофізичних параметрів конструкцій, що досліджуються.

Отримані результати сприятимуть розвитку методів неруйнівної діагностики автомобільних доріг і транспортних споруд із застосуванням георадарів. Окремо слід зазначити перспективи подальшого розвитку запропонованого підходу для вирішення завдань позиціонування та ідентифікації підповерхневих неоднорідностей.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Saarenketo T.: Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Academic dissertation, 2006, Original article <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf>
2. Evans RD. "Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to assess Pavements", A dissertation thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree Doctor of Engineering (EngD), at Loughborough University, August 2009, 219 pages. Original article <http://www.lboro.ac.uk/media/www/lboroacuk/content/cice/downloads/alumnitheses/2010/robert-evans.pdf>.
3. Vilbig RA. Air-Coupled and GroundCoupled Ground Penetrating Radar Techniques. A Thesis Presented By To The Department of Civil and Environmental Engineering, Northeastern University, Massachusetts, 2013, 60 P. Original article <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:848>.
4. Daniels DJ (2007). Ground Penetrating Radar. IET Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 15, 2nd Edition, 726 p. ISBN 08634136.09, 9780863413605 <https://searchworks.stanford.edu/view/12918552>
5. Ground penetrating radar, theory and applications [Jol Harry M. (Editor)], Amsterdam : Elsevier B.V., 2009, 508 p. ISBN: 9780444533487 <https://shop.elsevier.com/books/ground-penetrating-radar-theory-and-applications/jol/978-0-444-53348-7>
6. Raffaele Persico. Introduction to Ground Penetrating Radar : Inverse Scattering and Data Processing. John Wiley & Sons Inc, New York, United States, 2014, 392 p. ISBN: 978-1-118-30500-3 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118835647>
7. Antyufeyeva MS, Batrakov DO, Batrakova AG, Antyufeyev AV. Comparative Study of the Goldfarb Iterative and the Genetic Algorithm Methods for Solving Inverse Problems. 2018 Jul 1; <http://dx.doi.org/10.1109/MMET.2018.8460316>
8. Lech Krysiński, Sudyka J. Typology of reflections in the assessment of the interlayer bonding condition of the bituminous pavement by the use of an impulse high-frequency ground-penetrating radar. Nondestructive testing and evaluation. 2012 Sep 1;27(3):219–27. <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2012.674525>
9. Dong Z, Ye S, Gao Y, Fang G, Zhang X, Xue Z, et al. Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System. Sensors. 2016 Dec 6;16(12):2067. <https://doi.org/10.3390/s16122067>
10. Hu J, Vennapusa PKR, White DJ, Beresnev I. Pavement thickness and stabilised foundation layer assessment using ground-coupled GPR. Nondestructive Testing and Evaluation. 2015 Dec 13;31(3):267–87. <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2015.1111890>
11. Sudyka J, Krysiński L. Evaluation of Homogeneity of Thickness of New Asphalt Layers Using GPR. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018 May;356:012025. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012025>
12. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev OV, Batrakova AG. GPR application for the road pavements surveys. 2017 Aug 1; <https://doi.org/10.1109/MRRS.2017.8075033>
13. RafTarefder RA, Ahmed MU. Ground Penetrating Radar for Measuring Thickness of an Unbound Layer of a Pavement. Advances in intelligent systems and computing. 2017 Jun 11;160–7. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6_16
14. Ji-tong S, Guo Xiu-jun, Zhang Xiao-wei. Research on dielectric properties of asphalt concrete with GPR. 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 2012 Jun 1; <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254923>
15. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakova AG. Inverse problems and UWB signals in biomedical engineering and remote sensing. 2016 Sep 1; <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2016.7724174>
16. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakova AG. Remote sensing of plane-layered media with losses using UWB signals. 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2017 May; <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972666>
17. Final report: PART 2—DESIGN INPUTS. CHAPTER 5. EVALUATION OF EXISTING PAVEMENTS FOR REHABILITATION. ARA Inc., for National Cooperative Highway Research Program, 2004, 78 P.
18. Smart Pavement Monitoring System. Report No. FHWA-HRT-12-072, Report Date May 2013, 150 P.
19. Arnold, G, P Fon Sing, T Saarenketo and T Saarenpaa. Pavement moisture measurement to indicate risk to pavement life. NZ Transport Agency research report 611, 2017, 160p. ISSN 1173-3764 (electronic).
20. Pavement Condition Report, Indianapolis-Hendricks County Airport, Project 15805741, Indiana Department of Transportation, Office of Aviation, Februar y 2015, 91p.

21. 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; <https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996072>
22. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107662>
23. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakova AG. UWB signal processing during thin layers thickness assessment. 2016 Sep 1; <https://doi.org/10.1109/RMSW.2016.7778545>
24. Artur Zieliński, Mazurkiewicz E, Mikołaj Łyskowski, Wieczorek D. Use of GPR method for investigation of the mass movements development on the basis of the landslide in Kałków. 2016 Mar 31;15(1):61–70. doi:<http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.016.004>
25. Lachowicz J, Rucka M. Numerical modeling of GPR field in damage detection of a reinforced concrete footbridge. Diagnostyka. 2016;17(2): p.3-8.
26. Batrakov, DO, Batrakova, AG, Antyufeyeva MS. Combined GPR data analysis technique for diagnostics of structures with thin near-surface layers. Diagnostyka 19(3), 2018,11–20.
27. Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics. 6th Edition, Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. eBook ISBN: 9781483103204. Imprint: Pergamon, Published Date: 1st January 1980, PP. 836.
28. Batrakov, D.O., Tarasov, M.M. Algorithm of solving inverse scattering problems using the Pontryagin maximum principle. Radiotekhnika i Elektronika, 1999, 44(2), PP. 137-142.
29. Henry Crew. The wave theory of light; memoirs of Huygens, Young and Fresnel. October 10, 2018 196 P.
30. Zhuck NP, Batrakov DO. Determination of electrophysical properties of a layered structure with a statistically rough surface via an inversion method. Physical review B, Condensed matter. 1995 Jun 15;51(23):17073–80. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.17073>

Стаття надійшла до редакції: 12 січня 2023 р.

Рекомендовано до друку: 10 березня 2023 р.

GEORADARS SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS AND IMPROVEMENT OF NON-DESTRUCTIVE TEST QUALITY

D.O. Batrakov¹, A.G. Batrakova², M.M. Kovalov¹, A.O. Maslenikov¹

¹V. 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 tasks of improving the methods of processing GPR data is due to the need to obtain a decent infrastructure. Therefore, the development of non-destructive testing methods based on the use of GPR as a tool for obtaining information about the internal structure and subsurface inhomogeneities of multilayer structures, the improvement of algorithms for processing GPR data create the basis for an operational assessment of the technical condition of structures and structures at a relatively low cost of work.

The purpose of work is to review of existing methods for processing non-destructive testing data and improvement of the previously proposed by the author's algorithm for processing data obtained using GPR.

Materials and methods. A method has been developed for solving the problems of thickness measurement of flat-layered media. The method is implemented in a computational algorithm. The basis of the algorithm was the results of research in the field of diffraction theory and mathematical physics.

The results. The effectiveness of the procedure for obtaining and applying GPR calibration signals to determine the probing signal has been proven. Based on the results of laboratory experiments, the influence of the frequency of the GPR signal on the efficiency of the data processing procedure was determined, the adequacy of the proposed algorithm was confirmed in terms of restoring the geometric and electrical parameters of the layers of structures; the limitations of the method for restoring the electro physical parameters of plane-layered media structures regarding the number of layers are established; the fundamental possibility of developing this method and software for further increasing the number of analyzed layers and improving the accuracy of determining the geometric and electrical parameters of the structures under study has been proved.

Conclusions. The results obtained with contribute to the development of methods of non-destructive diagnostics of transport structures using GPR. Separately, it should be noted the prospects for further development of the proposed approach for solving problems of positioning and identification of subsurface inhomogeneity's.

KEY WORDS: non-destructive testing, ground penetrating radars, impulse signals, flat layered media

The article was received by the editors: 12 January 2023

The article is recommended for printing: 10 March 2023