

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-01>

УДК 621.574.4

## ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОРАДАРІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ У ШАРАХ ПОКРИТТЯ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

Д. О. Батраков<sup>1</sup>, М. С. Антюфєєва<sup>1</sup>, А. Г. Батракова<sup>2</sup>

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

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

E-mail: [batrakov@karazin.ua](mailto:batrakov@karazin.ua)

Надійшла до редакції 15 жовтня 2020 р.

**Актуальність** даної проблеми є наслідком високої вартості класичних методів обстеження дорожніх одягів. У той же час застосування сучасних імпульсних георадарів забезпечує відносно низьку собівартість моніторингу поточного стану автомобільних доріг, оскільки дозволяє отримувати георадарні дані при русі автомобіля-лабораторії зі швидкістю транспортного потоку. Тим самим мінімізується роль таких коштовних і трудомістких операцій, як відбір кернів або вирубок.

**Мета роботи** – удосконалення методик отримання первинних георадарних даних, які були раніше запропоновані авторами для підвищення точності та надійності результатів обробки сигналів імпульсних георадарів.

**Матеріали та методи.** При обробці модельних і експериментальних даних використовувалися в першу чергу сучасні теоретичні методи обробки імпульсних сигналів георадарів, а також методи комп'ютерного моделювання.

**Результати.** На основі проведеного аналізу факторів, які визначають ключові особливості сигналів георадарів, запропонований метод калібрування сигналів, який дозволяє підвищити надійність виявлення таких дефектів шарів нежорсткого дорожнього одягу з монолітних матеріалів, як втрата міжшарового зчеплення, або наявність тонких з електрофізичної точки зору шарів у багатошарових середовищах.

**Висновки.** Об'єднання методу калібрування сигналів разом із запропонованим раніше підходом до виявлення порушення контакту між шарами і проведеним чисельним моделюванням дали можливість підвищити надійність процедури неруйнівного контролю дорожнього одягу та інших будівельних конструкцій. При виконанні роботи були проведені лабораторні експерименти на модельних конструкціях. Аналіз отриманих даних був проведений за допомогою розробленого програмного забезпечення GeoVizu.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** імпульсні георадари, втрата міжшарового зчеплення, нежорсткі дорожні одяги.

## APPLICATION OF GEORADARS FOR DETECTING SUBSURFACE DEFECTS IN LAYERS OF NON-RIGID ROAD PAVEMENTS

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

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

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudrogo st., Kharkiv, 61002, Ukraine

**The relevance** of the problem under consideration is a consequence of the high cost of classical methods of pavement inspection. At the same time, the use of modern pulse georadars allows to ensure a relatively low cost of monitoring the current state of highways, since it allows to obtain georadar data when a laboratory vehicle is moving at the speed of a traffic flow. This minimizes the role of costly and time-consuming operations such as coring or cutting.

**The purpose** of this work is to improve the methods for obtaining primary GPR data, which were previously proposed by the authors to improve the accuracy and reliability of the results of processing pulsed GPR signals.

**Materials and methods.** When processing model and experimental data, first of all, modern theoretical methods of processing pulse signals from ground penetrating radars, as well as methods of computer modeling, were used.

**Results.** Based on the analysis of the factors that determine the key features of GPR signals, a signal calibration method has been proposed, which makes it possible to increase the reliability of detecting such defects in layers of non-rigid road pavement made of monolithic materials, such as loss of interlayer adhesion, or identification of thin layers from an electrophysical point of view in multilayer media.

**Conclusions.** Combining the signal calibration method together with the previously proposed approach to detecting the loss of interlayer adhesion and the performed numerical simulation made it possible to increase the reliability of the procedure for non-destructive testing of road pavements and other building structures. During the work, laboratory experiments were performed on model structures. The analysis of the obtained data was performed using the developed software GeoVizu.

**KEY WORDS:** impulse georadars, loss of interlayer adhesion, non-rigid pavement.

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В СЛОЯХ ПОКРЫТИЯ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Д. О. Батраков<sup>1</sup>, М. С. Антюфеева<sup>1</sup>, А.Г. Батракова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, 61022, г. Харьков, Украина

<sup>2</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого 25, г. Харьков, 61002, Украина

**Актуальность** рассматриваемой проблемы является следствием высокой стоимости классических методов обследования дорожных одежд. В то же время применение современных импульсных георадаров позволяет обеспечить относительно низкую себестоимость мониторинга текущего состояния автомобильных дорог, поскольку позволяет получать георадарные данные при движении автомобиля-лаборатории со скоростью транспортного потока. Тем самым минимизируется роль таких дорогостоящих и трудоемких операций, как отбор кернов или проведение вырубок.

**Цель работы** – усовершенствование методик получения первичных георадарных данных, которые были ранее предложены авторами для повышения точности и надежности результатов обработки сигналов импульсных георадаров.

**Материалы и методы.** При обработке модельных и экспериментальных данных использовались в первую очередь современные теоретические методы обработки импульсных сигналов георадаров, а также методы компьютерного моделирования.

**Результаты.** На основе проведенного анализа факторов, которые определяют ключевые особенности сигналов георадаров, предложен метод калибровки сигналов, который позволяет повысить надежность обнаружения таких дефектов слоев жесткой дорожной одежды из монолитных материалов, как потеря межслоистого сцепления, либо наличие тонких с электрофизической точки зрения слоев в многослойных средах.

**Выводы.** Объединение метода калибровки сигналов вместе с предложенным ранее подходом к обнаружению потери межслоистого сцепления и проведенным численным моделированием дали возможность повысить надежность процедуры неразрушающего контроля дорожных одежд и других строительных конструкций. При выполнении работы были проведены лабораторные эксперименты на модельных конструкциях. Анализ полученных данных был проведен с помощью разработанного программного обеспечения GeoVizu.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** импульсные георадары, потеря межслоистого сцепления, жесткие дорожные одежды.

### ВСТУП

Раніше авторами було проведено дослідження спектральних характеристик та інших властивостей сигналів імпульсних георадарів з метою підвищення ефективності обробки таких сигналів і, як наслідок, підвищення надійності одержуваних результатів неруйнівного контролю [1]. Зокрема, було відзначено, що різні завдання, для вирішення яких застосовується георадар, мають, крім загальних особливостей, також і свою специфіку. Під час вирішення завдань дистанційного зондування за допомогою стандартних підходів досліджуваній об'єкт знаходиться у так званій далекій зоні. У такому випадку для опису поведінки поля і інтерпретації результатів може бути використано наближення плоскої хвилі. Проте при вирішенні завдань діагностики стану покриття автомобільних доріг із застосуванням методів дистанційного зондування зовнішня границя антенної системи знаходиться на відстані 25-30 см від поверхні покриття. Це, з точки зору електродинаміки, відноситься до так званої проміжної зони або навіть до близької зони відносно антен георадару. Як зазначено в [1], у цих випадках використовувати класичні моделі, що засновані на формулах Френеля [2-4], для обробки результатів зондування слід з великою обережністю. Цей факт пов'язаний не тільки з характером зміни поля поблизу антени, але і з наявністю повторних відбиттів (далі будемо використовувати термін – перевідбиття) між передавальною антеною і зовнішньою поверхнею досліджуваного середовища. Обидві проблеми не мають універсального алгоритму обробки. Це пов'язано, в першу чергу, з тим, що кожна конструкція антени, а також і всього антенного блоку, має свої специфічні особливості. Особливості генератора первинних сигналів і приймального тракту георадару разом з технічними засобами реєстрації та алгоритмами обробки даних також вимагають спеціального підходу в кожному конкретному випадку. Виходячи з цього, в [1] основна увага була приділена дослідженню впливу перевідбиттів на параметри імпульсних сигналів. Ще раз відзначимо, що в [1] перевідбиття – це вторинні відбиття сигналу, які виникають при реєстрації сигналів, коли антенний блок розташований в безпосередній близькості від зовнішньої границі середовища що зондується.

З іншого боку, в роботі [5] була розглянута задача виявлення такого небезпечного дефекту дорожніх покриттів, як втрата міжшарового зчеплення. Цей термін означає порушення або втрату зчеплення між шарами покриття з монолітних матеріалів. У [5] зазначено, що в англійській літературі існують декілька подібних термінів – delamination, raveling та segregation. Термін розшарування (delamination) позначає порушення зчеплення між шарами покриття, яке за умови проникнення вологи, особливо в осінньо – зимовий період, призводить до прискореного руйнування конструкції. Оскільки втрата зчеплення між

шарами конструкції нежорсткого дорожнього одягу призводить до втрати розподільчої здатності та його прискореного руйнування, розроблення методики та засобів виявлення таких дефектів є важливим практичним завданням. Актуальність цього завдання стосовно до дорожньої галузі пов'язана з необхідністю оперативного контролю поточного стану покриттів автомобільних доріг на ділянках значної протяжності та, відповідно, зі значними витратами на ремонт та утримання [5-11].

Тому мета даної роботи полягає у підвищенні надійності процедур діагностики поточного стану покриттів автомобільних доріг шляхом об'єднання раніше запропонованих методів калібрування сигналів [1] і розвитку на цій основі запропонованого авторами алгоритму обробки результатів зондування конструкції дорожнього одягу [5].

### **ПОСТАНОВКА ВИХІДНОГО ЗАВДАННЯ І ЗАПРОПОНОВАНИЙ ПІДХІД ДО ЙОГО ВИРІШЕННЯ**

Відповідно до загальноприйнятої термінології [12, 13] будемо формулювати завдання виявлення ділянок покриття з втратою міжшарового зчеплення під час діагностики як завдання виявлення між основними шарами конструкції тонких додаткових шарів, які можуть бути заповнені водою або повітрям. Для вирішення поставленого завдання необхідно залучити сукупність відповідних моделей. Ці моделі повинні бути в достатній мірі адекватними до вихідної задачі, але при цьому не містити зайвих деталей і забезпечувати обробку даних за допомогою відносно простих і ефективних алгоритмів. Як вводить досвід застосування георадарів, за центральної частоти нижче 1,6 ГГц, шорсткістю зовнішньої границі і внутрішніх границь шарів конструкції, що досліджується, можна знехтувати. Тоді найпростішою моделлю конструкції дорожнього одягу (або шарів багатшарового дорожнього покриття) є плоскошарувате середовище, яке може містити неоднорідності – тріщини. У [4, 5] авторами був запропонований спосіб обробки даних, який передбачає такі етапи:

- реєстрація так званого сигналу прямого проходження, тобто сигналу, що безпосередньо передається з передавальної антени у приймач, минаючи досліджуване середовище;
- реєстрація сигналу, відбитого від листа металу, для подальшого його використання як моделі зондуючого імпульсу;
- зондування конструкції, що досліджується, і запис радарограми, яка є сукупністю розподілених у часі сигналів, відбитих від середовища, що зондується.

Такий підхід передбачає також проведення деяких підготовчих операцій. Для цього на початковому етапі обробки сигнал прямого проходження віднімається з усієї радарограми. Вид сигналів прямого проходження для георадарів Одяг-4.2 і TRF-1 наведено на Рис. 1. На цьому рисунку відображені 3 сигнали. Два перших сигнали є сигналами прямого проходження георадару Одяг-4.2 за різного часу реєстрації. Сигнал «1» відповідає часу реєстрації 20 нс, а сигнал «2» – часу 10 нс. Як можна бачити, два перших сигнали, які записані в різні моменти часу, практично ідентичні. Цей факт є підтвердженням стабільності роботи систем георадару і, відповідно, свідчить про надійність одержуваних даних. Нарешті, останній, третій сигнал, що зареєстрований від антенного блоку георадару TRF-1 18 квітня 2013 року. Цей антенний блок мав дві прийомні антени, що розташовані симетрично відносно передавальної антени для мінімізації сигналу прямого проходження. Детально принцип роботи такої системи з компенсацією описаний в [4], а загальний вигляд різних антенних блоків і самих георадарів наведені на Рис. 2, 3. Як впливає з графіків на Рис. 1, схема з двома прийомними антенами, що реалізована у георадарі TRF-1 для компенсації сигналу прямого проходження, не забезпечує повної компенсації, що призводить до необхідності виконання операції віднімання сигналу прямого проходження з усієї сукупності даних за допомогою спеціального програмного забезпечення. Також відзначимо, що центральна частота у георадарі TRF-1 дорівнює 900 МГц, в той час як у георадарі Одяг-4.2 центральна частота має значення близько 1.5 ГГц. Ці параметри, як відомо, не тільки визначають глибину проникнення сигналів у середовище, що досліджується, при наявності дисперсії і загасання (втрат), а й відіграють важливу з точки зору електродинаміки роль під час отримання вихідних даних у рамках запропонованого раніше алгоритму обробки результатів. Як зазначено в [1, 5, 14], запропонований підхід до інтерпретації даних передбачає виконання обробки первинних даних в декілька етапів. Перший етап полягає у виділенні із загального профілю власне зондуючого імпульсу. Для цього в [4, 14] запропоновано після реєстрації сигналу прямого проходження вимірювати відбиття від листа металу і далі здійснювати проїзд георадару над конструкцією, що досліджується. Ключовою особливістю вимірювання сигналу, який відбито від листа металу, є визначення точного часу «центру» такого сигналу. Це має принципове значення для вирішення завдання визначення товщини шарів за допомогою оцінки часу затримки сигналу. Визначення часу затримки сигналів є основою методу класичної радіолокації. Однак, у таких завданнях середовищем поширення сигналів є повітря із заздалегідь відомими електродинамічними характеристиками. При цьому до відносної точності визначення відстані не висуваються дуже високі вимоги. Але у завданні, що розглядається у даній роботі, ситуація принципово інша. Це пояснюється тим, що діелектрична проникність середовища не тільки невідома

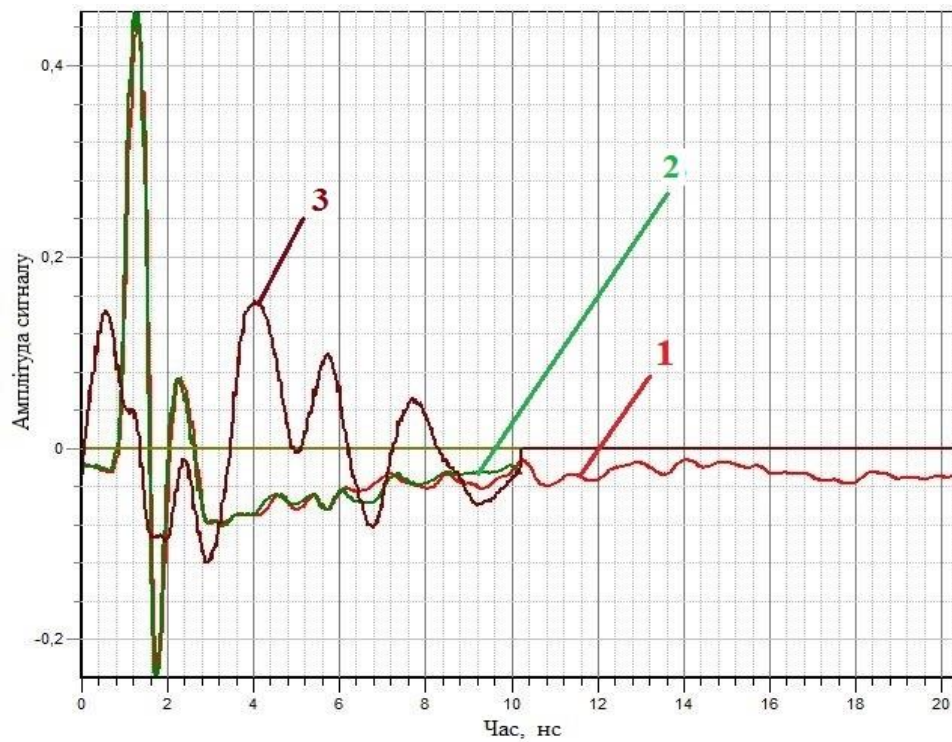


Рис. 1. Загальний вигляд сигналів прямого проходження для георадарів TRF-1 та Одяг-4.2  
1 – Одяг-4.2, розгортка 20 нс., 2 – Одяг-4.2, розгортка 10 нс., 3 – TRF-1, розгортка 10 нс.

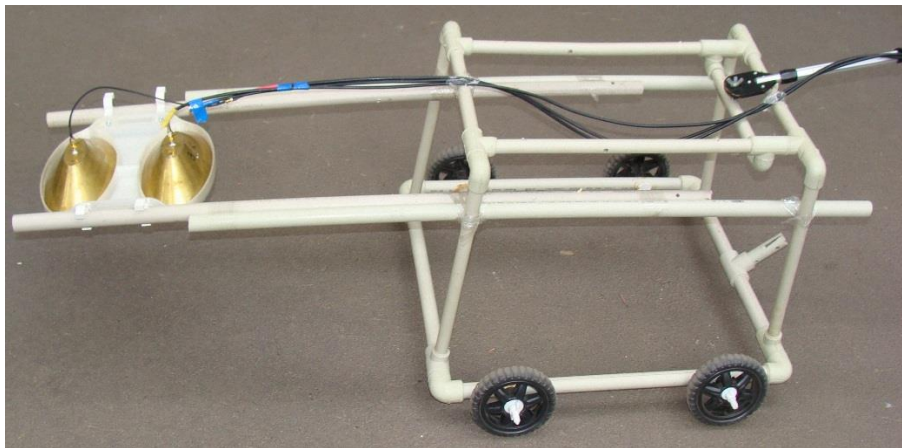


Рис. 2. Загальний вигляд антенного блоку Одяг-4.2.

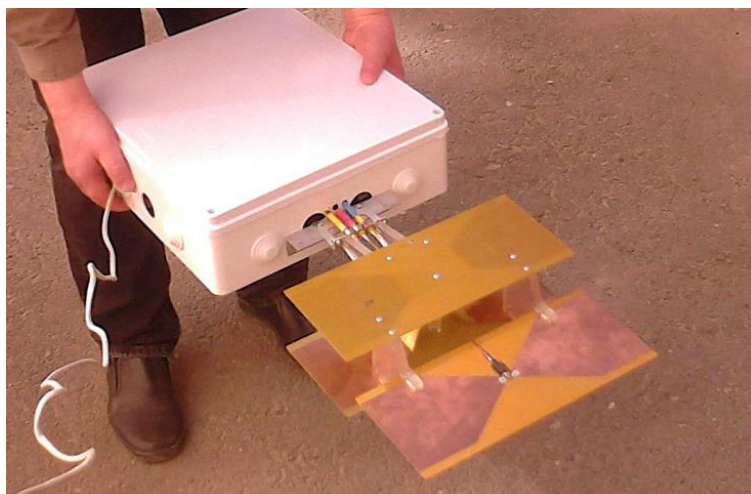


Рис. 3. Загальний вигляд георадару TRF – 1.



апріорі, але й змінюється від шару до шару. Тому раніше була запропонована схема пошарового визначення значень відносної діелектричної проникності з наступним визначенням товщини відповідного шару. Цей підхід базується на залученні формул Френеля [15]. У рамках такої методики спочатку вектор напруженості електричного поля падаючої хвилі представляється у вигляді розкладання на дві ортогональні складові. Тоді компонента, яка паралельна площині падіння, позначається індексом  $\parallel$ , а компонента, що перпендикулярна площині падіння, має індекс  $\perp$ . У такому випадку вектор напруженості магнітного поля визначається рівнянням [15]:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \mathbf{s} \times \mathbf{E}, \quad (1)$$

де:  $\mathbf{s}$  – одиничний вектор у напрямку поширення хвилі.

Для подальшого просування необхідно обрати модель. Більшість авторів [16-23] застосовують модель плоскої хвилі. У загальному випадку така модель передбачає так зване похиле падіння, яке описується формулами Френеля [15] для загального випадку. Виходячи з [15, 24], напишемо їх у вигляді:

$$T_{\parallel} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\frac{n_2}{n_1} \cdot \cos \theta_i + \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} A_{\parallel}. \quad (2)$$

$$T_{\perp} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} A_{\perp}. \quad (3)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\frac{n_2}{n_1} \cdot \cos \theta_i - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{\frac{n_2}{n_1} \cdot \cos \theta_i + n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} A_{\parallel}. \quad (4)$$

$$R_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{\cos \theta_i + \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} A_{\perp}. \quad (5)$$

Як зазначено в [24], у разі похилого падіння залежність коефіцієнтів відбиття / заломлення від кута падіння і від співвідношення між ортогональними компонентами є нелінійною.

Раніше також пропонувалося виконувати вимірювання з невеликим кутом нахилу антенної системи георадару TRF-1 [24]. Загальний вигляд приладу Одяг-4.2 під час проведення вимірювань-відбиття від листа металу наведений на Рис. 4.



Рис. 4. Проведення калібрування для георадару Одяг-4.2.

Також були проведені лабораторні експерименти з вимірюваннями в умовах нахилу антенного блоку георадару Одяг-4.2, (Рис. 5). Аналіз отриманих даних свідчить, що для георадару Одяг-4.2 нахил антен істотно менше впливає на точність результатів вимірювань, ніж для георадару TRF-1. У більшості випадків впливом нахилу антенної системи можна знехтувати без значного зменшення точності оцінок. Водночас, як свідчать проведені серії вимірювань, проблема наявності вторинних відбитків (перевідбиттів) вимагає більш детального аналізу.



Рис. 5. Проведення лабораторних досліджень при нахиленому розташуванні антенного блоку георадару Одяг-4.2.

Для досягнення більш ясного викладу матеріалу наведемо деякі результати з роботи [1]. Основна ідея даного підходу спирається на застосування до аналізу імпульсних сигналів двох інтегральних перетворень – перетворення Гілберта [25-28] і пов'язаного з ним поняття аналітичного сигналу, а також інтегрального перетворення, запропонованого в [20, 21].

Перетворення Гілберта спирається на поняття ортогонального доповнення сигналу  $s(t)$ . Ортогональним доповненням у такому випадку називають сигнал  $s_{od}(t)$ , що задовольняє співвідношенню:

$$\int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s_{od}(t) dt = 0. \quad (6)$$

Тоді робиться природне припущення, що  $s_{od}(t)$  не дорівнює нулю тотожно. Перетворення Гілберта спирається на процедуру розрахунку так званого ортогонального доповнення сигналу  $s(t)$ :

$$s_{od}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{\pi \cdot (t - \tau)} d\tau. \quad (7)$$

З виразу (7) випливає, що перетворення Гілберта по суті є результатом операції згортки сигналу  $s(t)$  і функції  $h(t) = 1/\pi t$ . Цю функцію називають ядром перетворення Гілберта. Фактично ядро перетворення Гілберта є імпульсною характеристикою лінійного фільтра, на виході якого формується ортогональне доповнення вхідного сигналу. Відповідно фільтр з імпульсною характеристикою  $h(t) = 1/\pi t$  прийнято називати фільтром Гілберта. Перетворення Гілберта у частотній області можна записати у наступному вигляді:

$$s_{od}(\omega) = H(\omega) \cdot S(\omega). \quad (8)$$

З аналізу властивостей перетворення Гілберта випливає, що фільтр Гілберта – ідеальний фазообертач, і як будь-який ідеальний фільтр, фільтр Гілберта, на жаль, не може бути реалізований фізично. При цьому необхідно зазначити, що крім повороту фази, фільтр Гілберта усуває постійну складову сигналу.

Друге перетворення, запропоноване в [20, 21] і далі у декілька зміненому вигляді розглянуте в [29], передбачає виконання однократного інтегрування вихідного сигналу за часом із змінною верхньою межею для прийняття не максимумів обвідної, як у випадку перетворення Гілберта, а нулів. Основу

цього підходу становить припущення, що в ідеальному випадку вихідний сигнал являє собою функцію Гауса, яка описується відомим виразом:

$$S(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (9)$$

Відповідно перша похідна такого сигналу представляється формулою:

$$S'(t) = -t \exp\left(\frac{t^2}{2}\right). \quad (10)$$

На Рис. 6 наведено графіки модельного (віртуально синтезованого) сигналу та його перетворень – Гілберта й інтегрального за [20, 21], що були отримані за формулою.

$$S(t) = A_1 \cdot \exp\left(-M \cdot \left(\frac{t^2}{2}\right)\right), \quad (11)$$

де:  $A_1 = 1$ , а параметр  $M$  забезпечує максимум у точці 1,7 нс на графіку.

Як видно на Рис. 6, сигнал, що штучно синтезований за допомогою комп'ютерної програми «GeoVizu», має форму, яка дуже нагадує перевернутий мексиканський капелюх – Сомбреро. Природно, що для такого, штучно згенерованого сигналу, перетворення Гілберта має чітко виражений максимум. Інтегральне ж перетворення має чітко виражене нульове значення у точці, де перетворення Гілберта має максимальне значення.

Таким чином, наочно продемонстрована можливість ефективної обробки сигналів імпульсних георадарів за допомогою розробленого раніше програмного забезпечення «GeoVizu». Очевидно, що це далеко не вичерпані можливості програмного забезпечення «GeoVizu», що стосуються обробки первинних даних дистанційного зондування і подальшої інтерпретації отриманих результатів. Деякі можливості розробленого програмного забезпечення наведено також у роботах [4, 5, 14, 17].

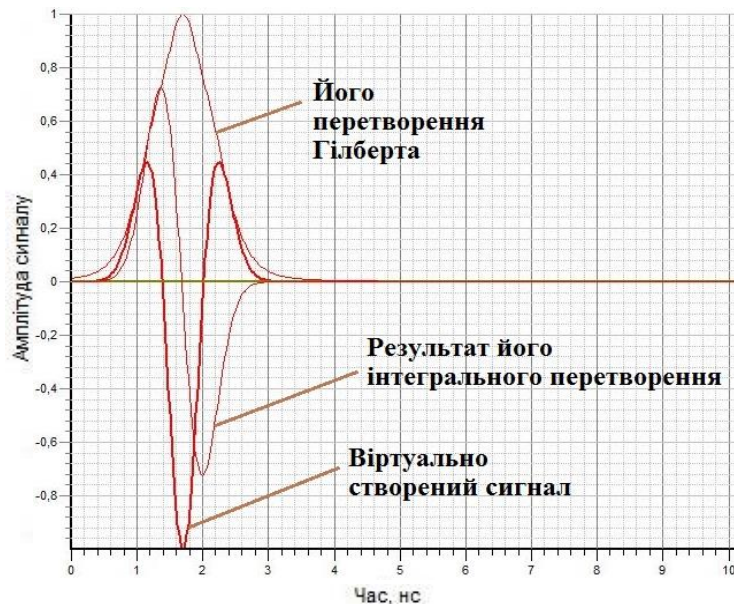


Рис. 6. Зображення віртуально змодельованого вихідного сигналу (що відбитий від листа металу), та результати його перетворення – Гілберта та інтегральне.

## ВИСНОВКИ

У роботі досліджені можливості застосування імпульсних георадарів для вирішення актуальних завдань неруйнівного контролю покриттів автомобільних доріг і дистанційного зондування. Виконано аналіз можливостей обробки первинних наборів даних, отриманих за допомогою двох георадарів TRF-1 і Одяг-4.2, що мають не тільки різні значення центральної частоти, але й принципові відмінності у конструкції антенних блоків. При виконанні роботи були проведені не тільки лабораторні експерименти на модельних конструкціях, але й аналіз отриманих даних за допомогою розробленого програмного забезпечення GeoVizu. Проведений теоретичний аналіз отриманих даних спирався на використання сучасних методів обробки цифрових сигналів – перетворення Гілберта і інтегральне перетворення, що ґрунтується на процедурі одноразового інтегрування із змінною верхньою границею. У результаті проаналізовані різні фактори, які визначають основні відмінності і характерні особливості імпульсних сигналів георадарів, і можуть бути застосовані для виявлення такого небезпечного дефекту як втрата

міжшарового зчеплення у шарах з монолітних матеріалів конструкції нежорсткого дорожнього одягу або для виявлення наявності тонких шарів у структурі багатошарового середовища. Отже, розглянутий підхід до постановки задачі та проведений теоретичний аналіз спільно з результатами чисельного моделювання дозволили у підсумку обґрунтувати можливість підвищення надійності результатів обробки результатів георадарної діагностики та виявлення дефектів у плоскошаруватих конструкціях за допомогою методів сучасної георадіолокації та обробки цифрових сигналів.

Зрозуміло, що з огляду на обмежений обсяг даної публікації, дати повний опис всіх особливостей отримання первинних даних, наступних алгоритмів їх обробки і залучених на кінцевому етапі методів інтерпретації отриманих результатів, не є можливим. Тому в даній роботі наведені лише нові дані, що стосуються в першу чергу етапів отримання первинних даних і підходу до їх обробки. Автори сподіваються опублікувати результати наступних етапів обробки в майбутніх публікаціях.

#### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### Authors' ORCID ID

Д.О. Батраков  <http://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

М.С. Антюфеева  <http://orcid.org/0000-0002-6654-4794>

А.Г. Батракова  <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG, Urdzik SN. The Effect of Secondary Reflections on the Quality of Layers Thickness Assessment Using UWB GPR Signals, 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020. p. 1132-1135, Available from: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252812>
2. Loizos A, Plati C. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. NDT E Int. 2007;40:147-157. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.09.001>
3. Tarefder RA, Ahmed MU. Ground penetrating radar for measuring thickness of an unbound layer of a pavement. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018;598:160-167. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6_16)
4. Pochanin GP, Masalov SA, Ruban VP, Kholod PV, Batrakov DO, Batrakov AG, Urdzik SN, Pochanin OG. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying. In: Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. London: CRC Press - Taylor & Francis Group; 2016. p. 20-65. DOI: [10.1201/9781315374130-3](https://doi.org/10.1201/9781315374130-3)
5. Батраков ДО, Иян Ло, Антюфеева МС, Шульга СН, Батракова АГ. Обнаружение нарушения контакта между плоскими слоями с помощью импульсных георадаров. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. (Серія: «Радіофізика та електроніка»). Харків: ХНУ; 2019;30:27-37.
6. Hanif S, Ahmed A, Saeed TU, Bai Q. Estimation of Pavement Damage Cost for Establishing Equitable Road Use Fee for Commercial Vehicles – An Exploratory Empirical Analysis. July 2016 DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. Conference: ICTIM 2016. Available from: <https://doi.org/10.12783/dtetr/ictim2016/5530>,
7. Saarenketo T. Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys [dissertation]. Oulu: University of Oulu; 2006, 125p. Available from: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf>
8. Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar J. of Appl. Geophys. 2000;43:119-138.
9. Alqadhi S, Ghahari S, Woldemariam W. Costs and Benefits of Highway Pavement Resurfacing: Interstate 465 Case Study. Infrastructure Asset Management. March 2018;5(2):1-40. Available from: <https://doi.org/10.1680/jinam.17.00036>
10. Oliveira DB, Vieira DAG, Lisboa AC, Goulart F. A well posed inverse problem for automatic pavement parameter estimation based on GPR data. NDT E Int. 2014;65:22-27.
11. Dong Z, Ye S, Gao Y, Fang G, Zhang X, Xue Z, Zhang T. Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System. Sensors. 2016;16(12):2067. Available from: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2067> doi: 10.3390/s16122067.
12. Відомчі будівельні норми України. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. ВБН В.2.3-218-186-2004. Київ : УКРАВТОДОР; 2004, с. 1-137.
13. A Guide to the Visual Assessment of Pavement Condition. Available from: <http://www.lgam.info/a-guide-to-the-visual-assessment-of-pavement-condition>
14. Батраков ДО. Обработка импульсных сигналов при толщинометрии биологических тканей и



- незрушающем контроле. Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. (Серія: «Радіофізика та електроніка»). Харків : ХНУ; 2016. 25: с. 48-52.
15. Борн М, Вольф Э. Основы оптики Москва: Наука, 1973. 720 с.
  16. Sudyka J, Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2011;4(3):176-184. Available from: [http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3\\_176-184.pdf](http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3_176-184.pdf)
  17. Батраков Д.О. Інформаційні технології та обробка георадарних сигналів у системі моніторингу транспортних споруд. У кн.: Батракової АГ, редактор. Інформаційні технології та інженерія транспортних і промислових споруд, Харків: ФОП Панов А. М.; 2019. с. 66-108.
  18. Krysiński L, 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. *Nondestruct. Test. Eval.* 2012;27(3):219-227. Available from: [www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012).
  19. Astanin LY. Ultra Wideband Signals—A New Step in Radar Development. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine.* March, 1992, p. 12-15.
  20. Astanin LY, Kostylev AA. *Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing.* By: The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 1997.
  21. Astanin LY, Kipke MV, Kostyleva VV. The structural features of ultrawideband signals. 2008 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2008, p. 180 – 182.
  22. Ivashchuk VE, Prokhorenko VP, Pitertsev AA, Yanovsky F J. Evaluation of Combined Ground Penetrating and Through-the-Wall Surveillance UWB Technology. *Proceedings of the 43rd European Microwave Conference.* 7-10 Oct 2013, Nuremberg, Germany, 978-2-87487-031-6 2013 EuMA, p. 384-387.
  23. Lahouar S. *Development of Data Analysis Algorithms for Interpretation of Ground Penetrating Radar Data.* [dissertation] Blacksburg, Virginia, October 3, 2003, 253 p.
  24. Батраков Д.О, Белошенко КС, Батракова АГ, Антюфеева МС. Использование поляризационных параметров георадара для контроля плоскостойких сред. Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. (Серія: «Радіофізика та електроніка»). Харків : ХНУ; 2017. 26. с. 10-16.
  25. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Москва : Мир; 1982, 592 с.
  26. Batrakov DO, Batrakova AG, Golovin DV, Simachev AA. Hilbert transform application to the impulse signal processing. *Proceedings of the 2010 5th International Conference on: International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2010),* 2010 September 6-10; Sevastopol, Ukraine. IEEE. p. 113–115. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5609110>
  27. Опенгейм А, Шаффер Р. Цифровая обработка сигналов. Москва : Техносфера; 2012. 1048 с. ISBN 978-5-94836-329-5
  28. Batrakova AG, Batrakov DO, Antyufeyeva MS. Pavement deterioration model based on GPR datasets. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty.* mar. 2018;17(1):55-71, ISSN 2449-769X. Available from: <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.018.004>.
  29. Batrakov DO, Batrakova AG, Antyufeyeva MS. Combined GPR data analysis technique for diagnostics of structures with thin near-surface layers. *Diagnostyka.* 2018;19(3):11–20. Available from: <https://doi.org/10.29354/diag/91489>.

#### REFERENCES

1. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Urdzik SN. The Effect of Secondary Reflections on the Quality of Layers Thickness Assessment Using UWB GPR Signals, 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020. p. 1132-1135, Available from: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252812>
2. Loizos A, Plati C. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. *NDT E Int.* 2007;40:147-157. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.09.001>
3. Tarefder RA, Ahmed MU. Ground penetrating radar for measuring thickness of an unbound layer of a pavement. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2018;598:160-167. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6_16)
4. Pochanin GP, Masalov SA, Ruban VP, Kholod PV, Batrakov DO, Batrakova AG, Urdzik SN, Pochanin OG. *Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying.* In: *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications.* London: CRC Press - Taylor & Francis Group; 2016. p. 20-65.
5. Batrakov DO, Iyan Lo, Antyufeeva MS, Shulga SN, Batrakova AG. Detection of contact breakdown between flat layers using impulse GPR. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”.* Kharkiv: KhNU; 2019;30:27-37. (Russian).
6. Hanif S, Ahmed A, Saeed TU, Bai Q. Estimation of Pavement Damage Cost for Establishing Equitable Road Use Fee for Commercial Vehicles – An Exploratory Empirical Analysis. July 2016 DEStech

- Transactions on Engineering and Technology Research. Conference: ICTIM 2016. Available from: <https://doi.org/10.12783/dtetr/ictim2016/5530>.
7. Saarenketo T. Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys [dissertation]. Oulu: University of Oulu; 2006, 125p. Available from: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf>
  8. Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar J. of Appl. Geophys. 2000;43:119-138.
  9. Alqadhi S, Ghahari S, Woldemariam W. Costs and Benefits of Highway Pavement Resurfacing: Interstate 465 Case Study. Infrastructure Asset Management. March 2018;5(2):1-40. Available from: <https://doi.org/10.1680/jinam.17.00036>
  10. Oliveira DB, Vieira DAG, Lisboa AC, Goulart F. A well posed inverse problem for automatic pavement parameter estimation based on GPR data. NDT E Int. 2014;65:22-27.
  11. Dong Z, Ye S, Gao Y, Fang G, Zhang X, Xue Z, Zhang T. Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System. Sensors. 2016;16(12):2067. Available from: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2067> doi: 10.3390/s16122067.
  12. Departmental building codes of Ukraine. Transport facilities. Non-rigid road clothes. VBN B.2.3-218-186-2004. Kyiv: UKRAVTODOR; 2004, c. 1-137. (Ukrainian).
  13. A Guide to the Visual Assessment of Pavement Condition. Available from: <http://www.lgam.info/a-guide-to-the-visual-assessment-of-pavement-condition>
  14. Batrakov DO. Processing of pulse signals for thickness measurement of biological tissues and non-destructive control. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". Kharkiv: KhNU. 2016;25:48-52. (Russian).
  15. Born M, Wolf E. Osnovy optiki Moscow: Nauka, 1973.720 p. (Russian).
  16. Sudyka J, Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. Int. J. Pavement Res. Technol. 2011;4(3):176-184. Available from: [http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3\\_176-184.pdf](http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3_176-184.pdf)
  17. Batrakov DO. Information technologies and processing of georadar signals in the monitoring system of transport facilities. In the book: Batrakov AG, editor. Information technologies and engineering of transport and industrial constructions, Kharkiv: FOP Panov AM; 2019. p. 66-108. [In Ukrainian].
  18. Krysiński L, 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. Nondestruct. Test. Eval. 2012;27(3):219-227. Available from: [www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012).
  19. Astanin LYu. Ultra Wideband Signals—A New Step in Radar Development. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. March, 1992, p. 12-15.
  20. Astanin LY, Kostylev AA. Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing. By: The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 1997.
  21. Astanin LYu, Kipke MV, Kostyleva VV. The structural features of ultrawideband signals. 2008 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2008, p. 180 – 182.
  22. Ivashchuk VE, Prokhorenko VP, Pitertsev AA, Yanovsky F J. Evaluation of Combined Ground Penetrating and Through-the-Wall Surveillance UWB Technology. Proceedings of the 43rd European Microwave Conference. 7-10 Oct 2013, Nuremberg, Germany, 978-2-87487-031-6 2013 EuMA, p. 384-387.
  23. Lahouar S. Development of Data Analysis Algorithms for Interpretation of Ground Penetrating Radar Data. [dissertation] Blacksburg, Virginia, October 3, 2003, 253 p.
  24. Batrakov DO, Beloshenko KS, Batrakov AG, Antyufeyeva MS. Use of polarization parameters of georadar for control of flat-layered media. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". Kharkiv: KhNU. 2017;26:10-16. (Russian).
  25. Lem G. Analog and digital filters. Moskov : Mir; 1982, 592 p. (Russian).
  26. Batrakov DO, Batrakov AG, Golovin DV, Simachev AA. Hilbert transform application to the impulse signal processing. Proceedings of the 2010 5th International Conference on: International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2010), 2010 September 6-10; Sevastopol, Ukraine. IEEE. p. 113–115. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5609110>
  27. Oppengym A, Shaffer R. Digital signal processing. Moskov : Tehnosfera; 2012. 1048 s. ISBN 978-5-94836-329-5. (Russian).
  28. Batrakov AG, Batrakov DO, Antyufeyeva MS. Pavement deterioration model based on GPR datasets. Roads and Bridges - Drogi i Mosty. mar. 2018;17(1):55-71, ISSN 2449-769X. Available from: <http://dx.doi.org/10.7409/rabd.018.004>.
  29. Batrakov DO, Batrakov AG, Antyufeyeva MS. Combined GPR data analysis technique for diagnostics of structures with thin near-surface layers. Diagnostyka. 2018;19(3):11–20. Available from: <https://doi.org/10.29354/diag/91489>.