

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра теоретичної радіофізики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. В. Хардіков

“ _____ ” _____ 2022 року

Кваліфікаційна робота магістра

на тему: **“Дослідження об'єктів за допомогою сучасних
надширокосмугових георадарів”**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-61
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Ковальов А. М.

Керівник

доктор фіз.-мат. наук,

професор

Батраков Д. О.

2022 рік

Анотація

Дипломна робота складається з 30 сторінки та з 23 бібліографічних посилань. Основна задача дослідження — розвиток технологій застосування георадарів для вирішення завдань неруйнівного контролю автомобільних доріг, що передбачають об'єднання можливостей сучасних імпульсних георадарів та геоінформаційних систем.

Abstract

The thesis consists of 30 pages and 23 bibliographic references. The main task of the research is the development of georadar application technologies to solve the problems of non-destructive control of highways, which involves combining the capabilities of modern pulse georadar and geoinformation systems.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень 5

Вступ 6

1. Георадар 8

1.1 Базові принципи 11

1.2 Принцип роботи георадара 15

2. Виявлення прихованих об'єктів, пустот і сингулярностей 17

3. Постановка та розв'язання задачі 21

Висновки 28

Посилання 29

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

GPR – Георадар;

ЕМ – електромагнітне випромінювання;

$\underline{\varepsilon}$ – діелектрична проникність

$\underline{\mu}$ – магнітна проникність

$\underline{E}$ – вектор напруженості електричного поля (В/м);

q – густина електричного заряду (Кл/м³);

$\underline{B}$ – вектор магнітної індукції (Т);

$\underline{J}$ – вектор густини електричного струму (А/м²);

$\underline{D}$ – вектор електричного зміщення (Кл/м²); t – час (с);

H – напруженість магнітного поля (А/м).

ВСТУП

Географічний радар (GPR) — це геофізичний метод визначення місцезнаходження, який використовує радіохвилі для захоплення зображень під поверхнею землі мінімально інвазивним способом. Величезною перевагою георадара є те, що він дозволяє точно визначати розташування підземних комунікацій, не зачіпаючи землю. Історично георадар був зосереджений на картографуванні структур у землі; та зараз георадар використовується для неруйнівного контролю неметалевих конструкцій. Діагностика ґрунтів під будівельні майданчики, дорожніх покриттів та злітно-посадкових смуг аеродромів, підземних комунікацій, локальних неоднорідностей в ґрунті, мін, витоків з підземних сховищ палива, рівня ґрунтових вод, а також проведення геофізичних, археологічних та інших досліджень є задачею актуальною і досить важливою. Для вирішення цих задач можуть застосовуватись георадари. Слід зазначити, що особливістю георадарів є застосування надширокосмугових сигналів (відеоімпульсних, з дискретним переналаштуванням частоти), що розповсюджуються у середовищах з ядро вираженим затуханням та дисперсією.

В цій роботі ми будемо більш говорити про оцінку дорожнього покриття. При оцінці стану конструкцій дорожнього покриття виникають проблеми позиціонування та виявлення пошкоджень в їх структурних шарах. При цьому тріщини, що виникають на поверхні, легко виявляються сучасними засобами відеодіагностики, що дозволяє автоматизовано оцінити їх вплив на поточний стан конструкції. Можливість дослідження приповерхневих дефектів і, зокрема, тріщин з'явилася порівняно недавно. Така можливість зумовлена появою та розвитком, перш за все, засобів дистанційного зондування плоскошарових середовищ, а саме георадарів. Георадарне зондування застосовне до широкого діапазону матеріалів, включаючи цементобетон, асфальтобетонні суміші, глину, мул, пісок тощо. Проникаюча

властивість електромагнітних хвиль георадару важлива для виявлення тріщин, оскільки електромагнітні хвилі повинні проходити через тріщину, в тому числі заповнену матеріалом. Також зазначимо, що неоднорідність покриття, наявність контрасту в діелектричній проникності матеріалів шару, здатність підповерхневих тріщин утворювати дифраговані хвилі та висока частота зондуючого імпульсу, випромінюваного георадарними антенами, є основою для вирішення проблеми пошуку, позиціонування та ідентифікації підповерхневих тріщин. Таким чином, георадар задовольняє основним вимогам до обладнання для виявлення, позиціонування та ідентифікації тріщин у нежорстких шарах дорожнього покриття. Сучасні можливості георадарів дозволили впритул наблизитися до вирішення проблем дефектоскопії дорожніх покриттів, пов'язаних із позиціонуванням та ідентифікацією підповерхневих тріщин. На даний час існує потенційна можливість виявлення тріщин, розташованих на глибині понад 50 мм. Водночас труднощі в аналізі та інтерпретації георадарних даних є однією з причин обмеженого використання транспортними компаніями георадарів як інструменту оцінки стану дорожнього покриття, тому зупинимося на більш детально про методи отримання та інтерпретації результатів георадарного зондування.

1.1. Георадар

Географічний радар (GPR) — це галузь, яка швидко розвивається, і за останні 15–20 років відбувся величезний прогрес у розвитку теорії, техніки, технології та діапазону застосувань. Георадар також став цінним методом, який використовують різні вчені, дослідники, інженери, консультанти та студенти університетів з багатьох дисциплін. Різноманітність застосувань георадара включає в себе різні сфери, такі як дослідження забруднення ґрунтових вод, геотехнічна інженерія, седиментологія, гляціологія та археологія. Цей досвід використання призвів до швидкого розвитку георадара та його переваги в геофізичному консультуванні та геотехнічній інженерії, а також надихнув на нові сфери міждисциплінарних досліджень в академічних колах і промисловості.

Зараз географічний радар (GPR) є загальноприйнятим геофізичним методом, що використовує радіохвилі для зондування «землі», тобто будь-якого діелектричного матеріалу з низькими втратами. Застосування георадара спершу було переважно до природних геологічних матеріалів. Та зараз георадар також добре застосовується до багатьох інших середовищ, таких як бетон, асфальт і дерево.

Оскільки існує багато діелектричних середовищ із втратами в поєднанні з широким радіочастотним спектром, то це призводить до широкого спектру застосувань георадара. Для гляціології та неруйнівного контролю бетонних конструкцій може бути застосована така ж сама технологія; просторовий масштаб застосування коливається від кілометрів до сантиметрів.

Щоб виявити відбиття від підповерхневих об'єктів, найпоширеніша форма георадарних вимірювань розгортає передавач і приймач у фіксованій геометрії, що переміщуються над поверхнею. Просвічування досліджуваного об'єму може бути більш корисним у деяких застосуваннях. Обидві концепції

зображені на малюнку 1.1. На малюнку 1.2 показано один з прикладів відповіді георадара.

Використання радіохвиль для зондування землі розглядалося десятиліттями до того, як результати були отримані в 1950-х роках [2]. Зондування льодовикового покриву за допомогою радіолокаційних висотомірів, що демонстрував Вейт, призводить до радіолуни в багатьох місцях по всьому світу. І з цього початку відбувся поступовий перехід концепцій до зондування ґрунтів і гірських порід, що почався в 1960-х роках і досі продовжується.

З перших днів програми почали рости як гриби, наші знання про основи фізики зросли не по днях, а по годинах, а природа матеріального розуміння розквітла [1]. Аннан (2002) дає стислий історичний підсумок. У Брістоу та Джола (2003)[3] можна знайти чудові обговорення використання георадара для геологічної стратиграфії можна знайти, а для гідрогеології у Рубіна та Хаббарда (2005)[4].

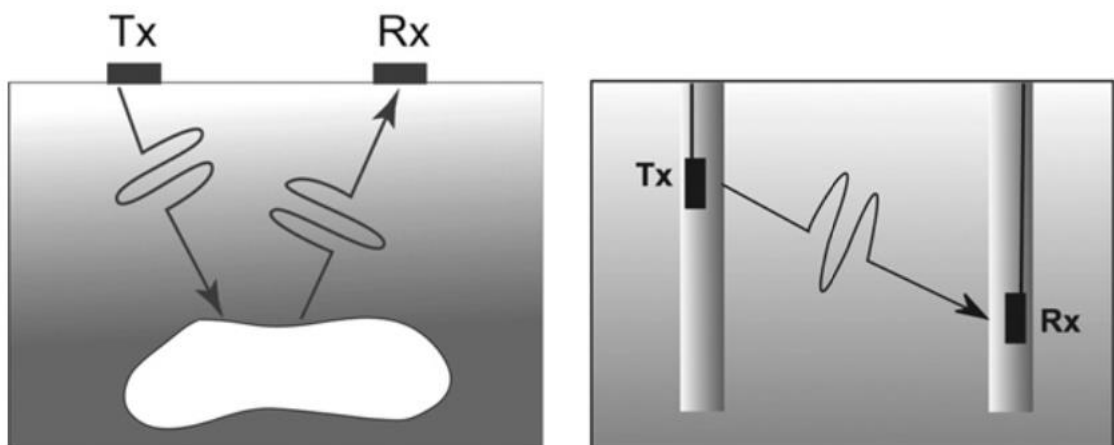


Рис 1. Георадар (GPR) використовує радіохвилі для дослідження підповерхневих діелектричних матеріалів із втратами. Поширені два способи вимірювання. У першому виявляється відбита або розсіяна енергія. У другому спостерігаються впливи на енергію, що передається через матеріал.

Географічний радар розвинув власний природний набір термінології, загального розуміння та процедур практичного застосування.

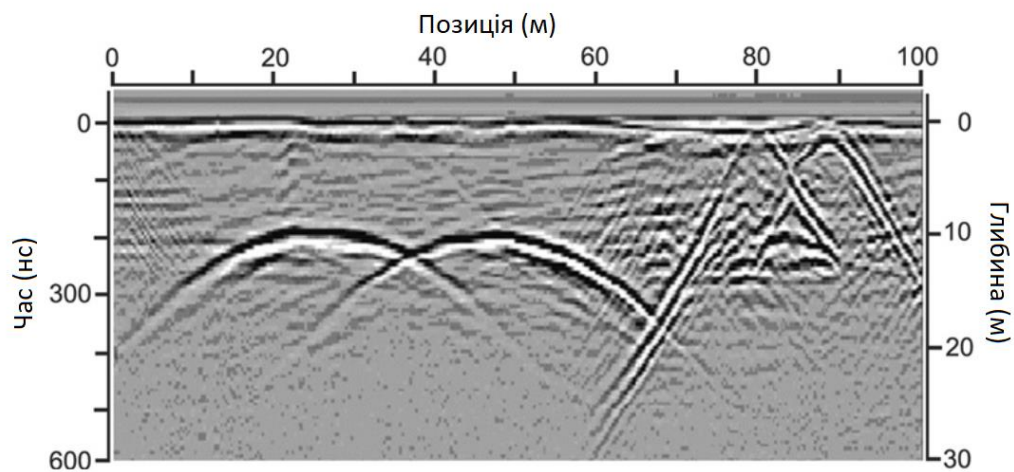
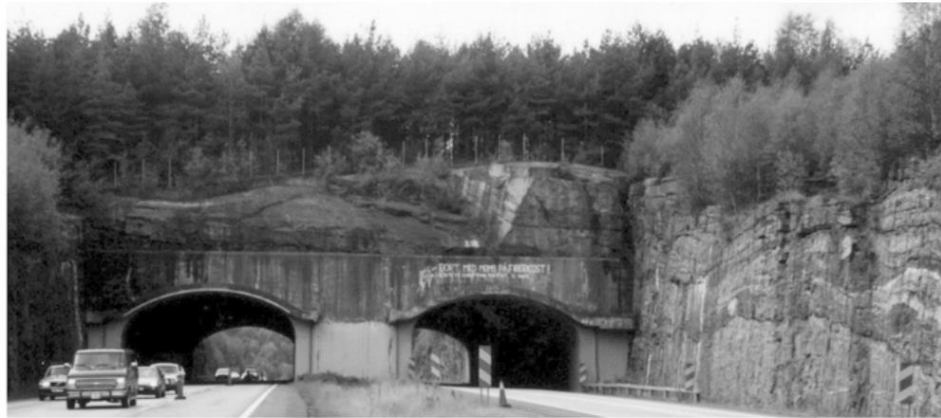


Рис 2. Поперечний переріз георадара, що проходить через два дорожні тунелі, отриманий за допомогою системи 50 МГц. Амплітуда сигналу георадара відображається як функція положення (горизонтальна вісь) і часу подорожі (вертикальна вісь).

1.2. Базові принципи

Основи георадара лежать в електромагнітній (ЕМ) теорії. Історія цієї галузі налічує більше двох століть і є предметом численних текстів, таких як Джексон (1962)[5] і Смайт (1989)[6].

Фізику електромагнітних полів математично описують Рівняння Максвелла, тоді як властивості матеріалу кількісно визначають конститутивні

співвідношення. Поєднання цих двох дає основу для кількісного опису сигналів георадару.

ЕМ поля та зв'язки у математичних термінах виражаються наступним чином:

$$\nabla \times \underline{E} = -\frac{\partial \underline{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \underline{H} = \underline{J} + \frac{\partial \underline{D}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \underline{D} = q \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \underline{B} = 0 \quad (1.4)$$

де $\underline{E}$ – вектор напруженості електричного поля (В/м);

q – густина електричного заряду (Кл/м³);

$\underline{B}$ – вектор магнітної індукції (Т);

$\underline{J}$ – вектор густини електричного струму (А/м²);

$\underline{D}$ – вектор електричного зміщення (Кл/м²); t – час (с);

$\underline{H}$ – напруженість магнітного поля (А/м).

Роботу багатьох дослідників Максвелл коротенько підсумував у такій компактній формі. Всі класичні ЕМ (радіохвилі, індукція, теорія ланцюгів, питомий опір, тощо) у поєднанні з формалізмом для характеристики електричних властивостей матеріалу можна вивести з цих співвідношень.

Засобом опису реакції матеріалу на електромагнітні поля є конститутивні співвідношення. Електричні та магнітні властивості є

важливими для георадару. А ці основні рівняння (рівняння (1.5), (1.6) і (1.7)) надають макроскопічний (або середній) опис того, як атоми, електрони та молекули масово реагують на застосування електромагнітного поля.

$$\bar{J} = \tilde{\sigma} \bar{E} \quad (1.5)$$

$$\bar{D} = \tilde{\varepsilon} \bar{E} \quad (1.6)$$

$$\bar{B} = \tilde{\mu} \bar{H} \quad (1.7)$$

Вільний рух заряду (створення електричного струму) за наявності електричного поля характеризується електропровідністю $\underline{\sigma}$. До розсіювання енергії призводить опір потоку заряду. А зсув заряду, обмежений у структурі матеріалу наявністю електричного поля, характеризується діелектричною проникністю $\underline{\varepsilon}$. Зміщення заряду призводить до накопичення енергії в матеріалі. В свою чергу магнітна проникність $\underline{\mu}$ описує, як на магнітне поле реагують внутрішні атомні та молекулярні магнітні моменти.

Історія падаючого поля може також впливати на властивості матеріалу. Цей вплив (залежність) від часу проявляється, коли електричні заряди в структурі мають кінцевий час відгуку, завдяки чому вони виглядають фіксованими для повільних темпів зміни поля та вільними для руху для швидших темпів зміни поля. Тому, щоб бути повністю правильними, рівняння (1.5), (1.6) і (1.7) повинні бути виражені в такій формі (лише рівняння (1.5) написано для стислості):

$$\bar{J}(t) = \int_0^{\infty} \tilde{\sigma}(\beta) \cdot \bar{E}(t - \beta) d\beta \quad (1.8)$$

І ця більш складна форма основних рівнянь повинна використовуватися, коли фізичні властивості дисперсійні. Припущення форми скалярної константи для ε, μ, σ достатньо з ε і σ є найважливішим для більшості застосувань георадару.

Діелектрична проникність є важливою величиною для георадара. Найчастіше використовуються терміни відносна діелектрична проникність або «діелектрична проникність» і визначаються наступним чином:

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1.9)$$

Тема електричних властивостей $(\varepsilon, \mu, \sigma)$ матеріалів є широкомасштабною темою. В Olhoeft (1981, 1987)[7-8] та Santamarina та ін. (2001)[9] можна знайти довідкову інформацію. Обговорення тут обмежується загальними основними питаннями. Варіації в ε і σ є найважливішими у більшості застосувань георадара, тоді як варіації в μ рідко викликають занепокоєння.

Географічний радар являється найбільш корисним для матеріалів з низькими електричними втратами. Георадар матиме дуже широке застосування при $\sigma = 0$, оскільки сигнали проникатимуть на велику глибину. На практиці умови з низькими електричними втратами не є поширеними. Ділянки солоних підземних вод або середовища, багаті глиною, можуть створювати умови, коли проникнення сигналу георадару дуже обмежене.

Земні матеріали незмінно складаються з багатьох інших матеріалів або компонентів. Лід та вода являють собою кілька випадків, коли в основному присутній один компонент. Простий пляжний пісок - це суміш частинок повітря, води, ґрунту та іонів, розчинених у воді. Зазвичай 60-80% доступного об'єму займають зерна ґрунту. Таким чином, розуміння фізичних властивостей сумішей є ключовим фактором у інтерпретації відгуку георадара.

1.3 Принцип роботи георадара

Георадар (GPR) працює шляхом передачі у досліджуваний матеріал електромагнітних хвиль (у діапазоні 10 ~ 1000 Гц) і отримання відбитих імпульсів, коли вони стикаються з розривами. Розрив може бути межею розділу між матеріалами з різними діелектриками або це може бути підповерхневий об'єкт, наприклад роз'єднання або відшарування (див. рис. 3). Відповідний час надходження і амплітуди отриманих відлунь можуть бути використані для визначення характеру та розташування розриву.

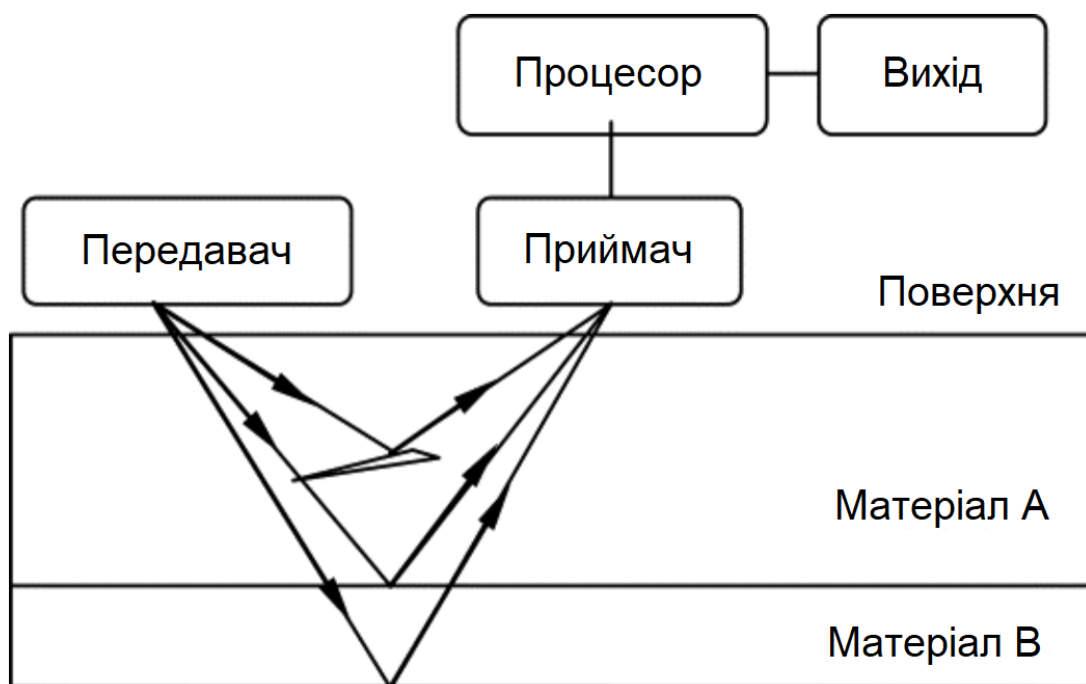


Рис. 3. Принцип тестування системою георадара

З удосконаленням технології георадара, особливо збільшенням частоти комерційно доступних антен для георадара та кращим програмним забезпеченням для обробки даних, георадар тепер можна використовувати для оцінки стану під поверхнею матеріалів, що складаються з тонких шарів, таких як композити FRP. Виявити підповерхневі роз'єднання між поверхнею, що зношується, і нижньою настилом FRP мосту, а також розшарування всередині

фланців настилу FRP потенційно може допомогти ретельний аналіз сигналів георадара .

Георадар пропонує більшу проникаючу здатність і тому може виявляти дефекти бетону або пошкодження на більшій глибині в порівнянні з іншими неруйнівними методами, такими як інфрачервона термографія, ультразвук або мікрохвильова піч. Результати перегляду літератури показують, що на відміну від високочастотної антени (2 ГГц), нижча частотна георадарна антена (1 ГГц) не може виявити неглибокі дефекти, такі як роз'єднання в елементах, обгорнутих FRP [10]. З іншого сторони, було встановлено, що пов'язана з землею антена 1,5 ГГц забезпечує більш високу проникаючу здатність, і це є вирішальним для тестування мостових настилів із FRP [11]. Для виявлення заповнених водою роз'єднань, георадар є чудовим інструментом, але для виявлення заповнених повітрям роз'єднань у бетонних циліндрах, загорнутих у FRP [13] і настилах мостів із FRP [12] його ефективність не є задовільною .

2. Виявлення прихованих об'єктів, пустот і сингулярностей

Використовується георадар зазвичай для виявлення об'єктів або окремих елементів, прихованих в квазіоднорідному або однорідному середовищі. Відповідно до теорії розсіювання, електромагнітні хвилі, що передаються георадарною антеною, відбиваються будь-якою діелектричною сингулярністю, розміри якої перевищують довжину хвилі відповідно до

принципів геометричної оптики. Віддзеркалення від такого типу цілі створюють додаткові піки в прийнятому сигналі на антену георадара. На малюнку 4 показано порівняння отриманого сигналу від багат шарового шару та сигналу від того самого багат шарового шару, коли циліндричний об'єкт закопаний у другому шарі зверху [14].

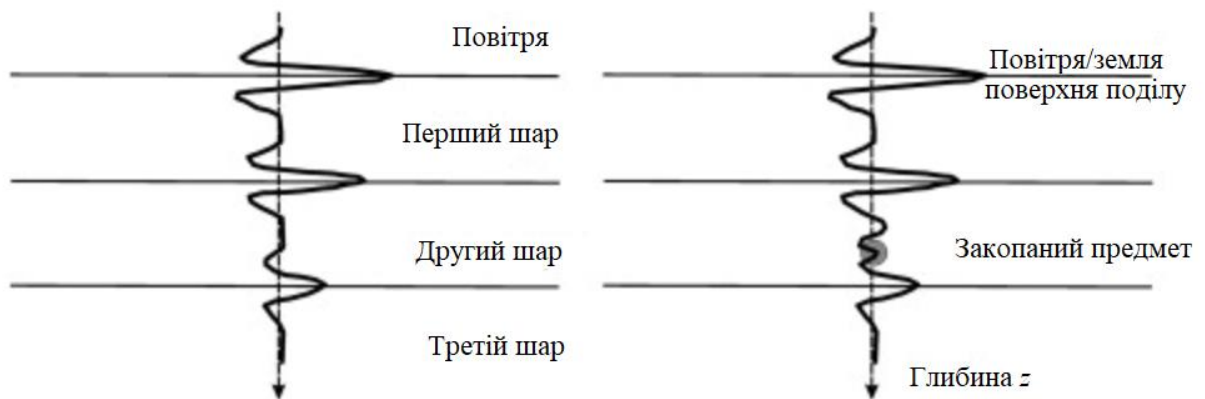


Рис. 4. Вплив заглибленого предмета на відбиття радіолокаційного сигналу

Зазвичай дані георадара записуються з кількох просторових позицій шляхом перетягування антен уздовж поверхні стін або землі. Прийом та передача відбуваються на кожній з точок спостереження. І далі вже записані дані об'єднуються, щоб сформувати зображення, радарграму. На малюнку 5 показані радарграми, що відповідають малюнку 4 [15].

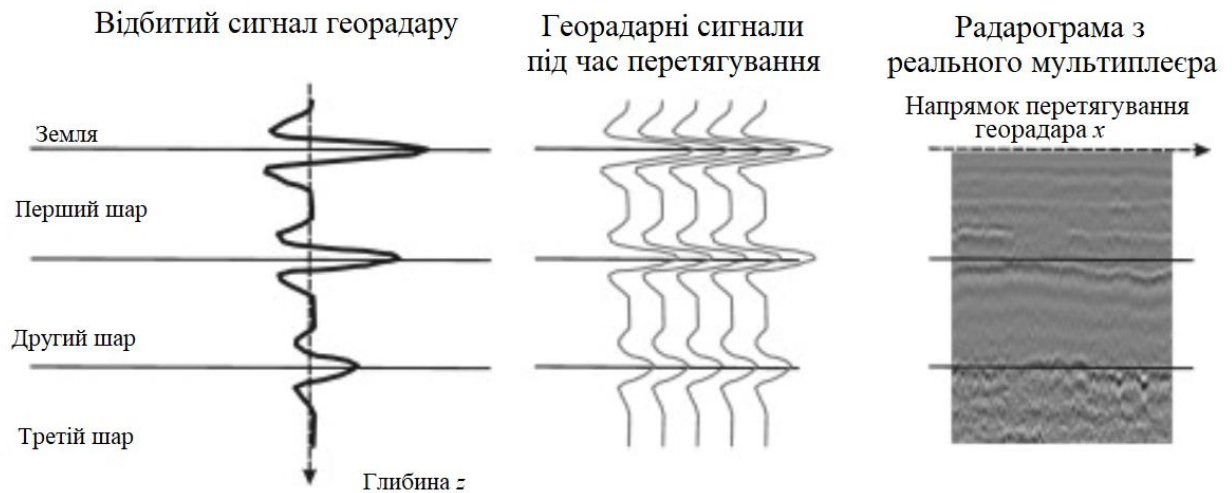


Рис. 5. Від одного сигналу георадару до радарної програми.

В цивільному будівництві такими сингулярностями, які виявляються за допомогою георадару, є закопані об'єкти (наприклад, інженерні комунікації та шахти, решітки), тріщини, порожнечі та розділення поверхонь.

Використовуючи георадар, можна досліджувати за допомогою обробки сигналу форму та природу сингулярності. Зокрема, форма впливає на часову затримку кожного відбиття під час переміщення георадару [16]. Наприклад, якщо розглядати трубу з круглим поперечним перерізом, коли час поширення сигналу відкладено на графіку горизонтальної відстані, гіпербола утворюється додатковими відбиттями, створеними трубою, коли георадар рухається над трубою. Записаний час відстані стає найшвидшим, коли георадарна антена рухається прямо над трубою. Час подорожі збільшується, коли георадарна антена віддаляється від труби. Отриманий графік часу проходження є гіперболою, вершина якої збігається з горизонтальним положенням труби. На малюнку 6 показано гіперболи, створені з круглої труби різного діаметру.

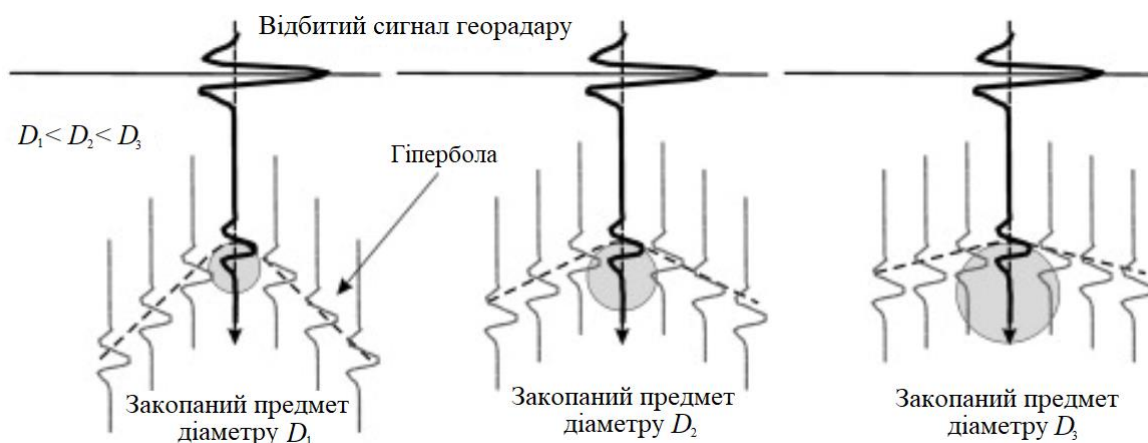


Рис. 6. Вплив діаметра заглиблених об'єктів на відбиття георадара.

Геометрія, видякую ми бачимо на радаграмі, не є симетричною, і в деяких випадках це може сильно відрізнятися від гіперболи, якщо виявлений об'єкт не симетричний. Наприклад, на малюнку 7 показана радарограма, згенерована циліндром, захованим в діелектричному середовищі з еліптичним поперечним перерізом.

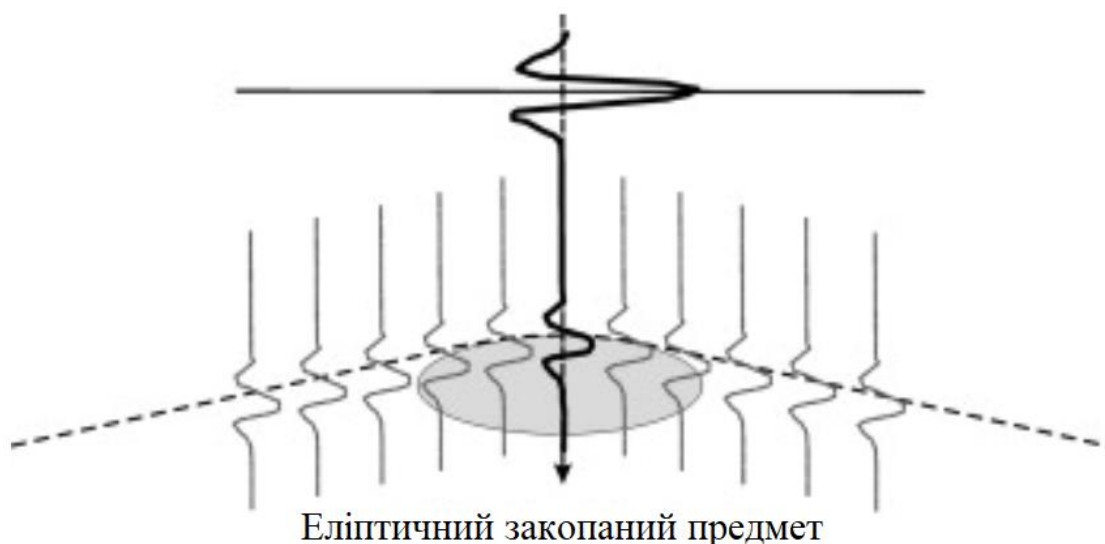


Рис. 7. Відбиття сигналу георадара від еліптичного заглибленого об'єкта.

Апертура гіперболи залежить від діаметра труби та від коефіцієнта діелектричної проникності матеріалу труби та середовища, в якому розташована труба, що досліджується.

Оскільки на межі розділу між ґрунтом і повітрям і на межі розділу між повітрям і ґрунтом генеруються два додаткових відбиття, наявність порожнечі в однорідному шарі виявляється георадаром. Та оскільки електромагнітна хвиля двічі відбивається, отриманий сигнал характеризується двома додатковими піками, як показано на малюнку 8.

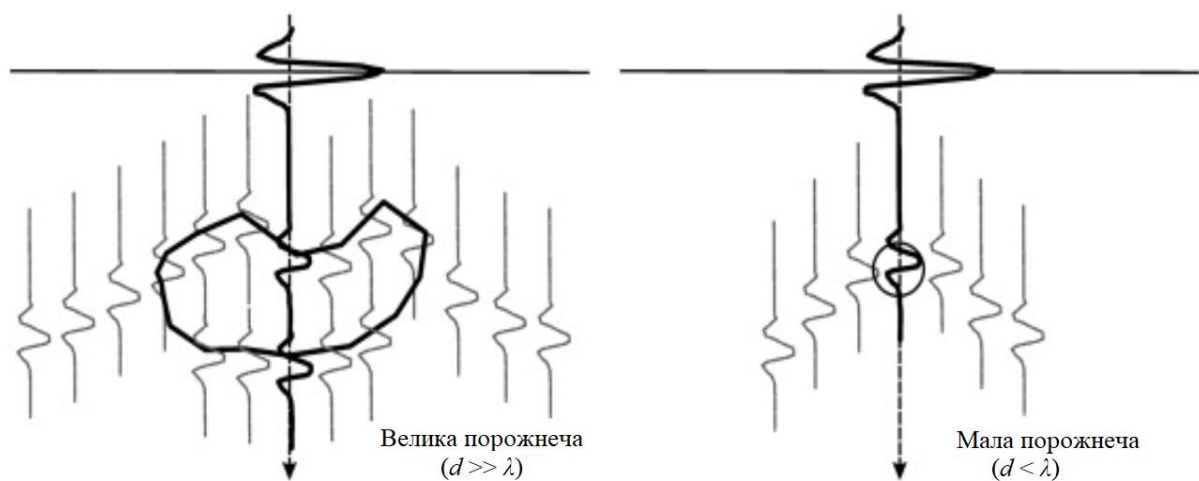


Рис. 8. Виявлення порожнеч: великих і малих.

За часовою відстанню між піками, що утворюються на межах розділу, враховуючи, що відносна діелектрична проникність повітря дорівнює 1 можна оцінити розмір пустот. І якщо розмір пустот менший за довжину хвилі, то очікується лише одне відбиття.

3. Постановка та розв'язання задачі

Відповідно до логіки вирішення задачі виявлення, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах дорожнього одягу та армованої основи, дослідження спрямовані на оцінку впливу параметрів, що забезпечують точність інтерпретації радарограм:

- методи та алгоритми обробки зображень і хвильових даних;
- характеристики георадара: тип передавача, тип антени і частота;
- спрямованість антени георадара та напрямок зламу відносно напрямку сканування під час зйомки;
- геометричні параметри тріщини та її розташування в покритті;
- методи візуалізації (двовимірні та тривимірні зображення);
- діелектричні властивості шарових матеріалів і матеріалу для заповнення тріщин.

В основі підходу до інтерпретації даних георадарного зондування лежить обробка надширококутних імпульсних сигналів.[17] На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень для обробки результатів реєстрації крос-поляризаційної складової зонduючого імпульсу розроблено практичний алгоритм позиціонування та ідентифікації підповерхневих тріщин, що складається з:

1) калібрування антенних блоків для обґрунтованого вибору еталонної ділянки без тріщин та інших підповерхневих дефектів з наступною реєстрацією та записом відповідних (еталонних) радарограм;

2) отримання первинних даних та їх обробка з метою підвищення в першу чергу якості отриманої інформації, тобто видалення завад, фільтрація;

3) віднімання прямого сигналу з ехо-профілю для того, щоб підвищити достовірність результатів подальшої обробки сигналу в деяких випадках;

4) оцінки глибини центру (осі) неоднорідності, тобто тріщини. На цьому етапі використовуються дані сканування з дипольної матриці для визначення товщини шару конструкції дорожнього покриття та діелектричної проникності. При наявності тріщин, що мають ширину більше 0,2 см в шарах з товщиною 4 см і діелектричною проникністю матеріалу більше 5 можна оцінити координати верхньої і нижньої межі тріщини;

5) оцінки геометричних параметрів, а саме ширини розкриття тріщини. Цей крок ґрунтується на використанні алгоритму порівняння. У межах фізичних обмежень методу георадару основними результатами алгоритму є ширина розкриття тріщин, а також - координати розташування, глибина залягання та координати розташування.[18,19]

Для перевірки запропонованого методу деякими авторами були проведено експериментальні дослідження на дорогах загального користування. Для георадарного зондування дорожнього покриття використовувалися блоки дипольних антен із центральною частотою зонduючого імпульсу 1,2 ГГц, блок щільних антен. Глибина зондування становила до 1,2 м. Паспортна роздільна здатність георадару по глибині становила $\pm 0,5$ см.[20]

Під час обстеження покриття дороги сканували вздовж осі смуги руху ділянками довжиною 200 м та в поперечному напрямку (рис. 9). Антенні блоки переміщалися вручну. Загальний порядок проведення експериментальних досліджень:

- 1) перевірка працездатності георадара;
- 2) прийом опорних сигналів георадара на початку маршруту зондування, та в кінці;
- 3) георадарне сканування конструкції дорожнього покриття;
- 4) обробка радарограм, отриманих за результатами георадарного сканування дорожнього одягу з метою пошуку прихованих тріщин у шарах

монолітного покриття та шарах армованої основи, визначення їх геометричних параметрів;

5) відбір кернів з конструкції дорожнього одягу з метою визначення наявності тріщин або інших неоднорідностей у шарах дорожнього одягу, а також глибини їх розташування;

6) порівняння результатів обробки радарограмм (розрахункових значень глибини тріщини) з фактичними даними про наявність тріщин і глибину їх розташування.

Первинна обробка радарограмм проводилась за допомогою програми GPR Proview. Аналіз та обробку імпульсних сигналів георадара автори проводили в програмі GeoVisy-2, яка реалізує алгоритм аналізу імпульсних сигналів георадара під час дефектоскопії нежорсткого покриття. У процесі аналізу георадарних сигналів вирішувалися наступні задачі:

- пошук і позиціонування тріщини в шарах дорожнього покриття;
- оцінка параметрів тріщин - висоти і ширини розкриття;
- визначення верхньої та нижньої меж тріщини за допомогою методів відновлення діелектричної проникності, або товщини шару.

За результатами обробки сигналів оцінено глибину прихованих тріщин в шарах дорожнього покриття. Адекватність отриманих результатів фактичному стану конструкції дорожнього одягу оцінювалася шляхом їх порівняння з кернами, що були відібрані на ділянках проведення георадарної зйомки.



a)

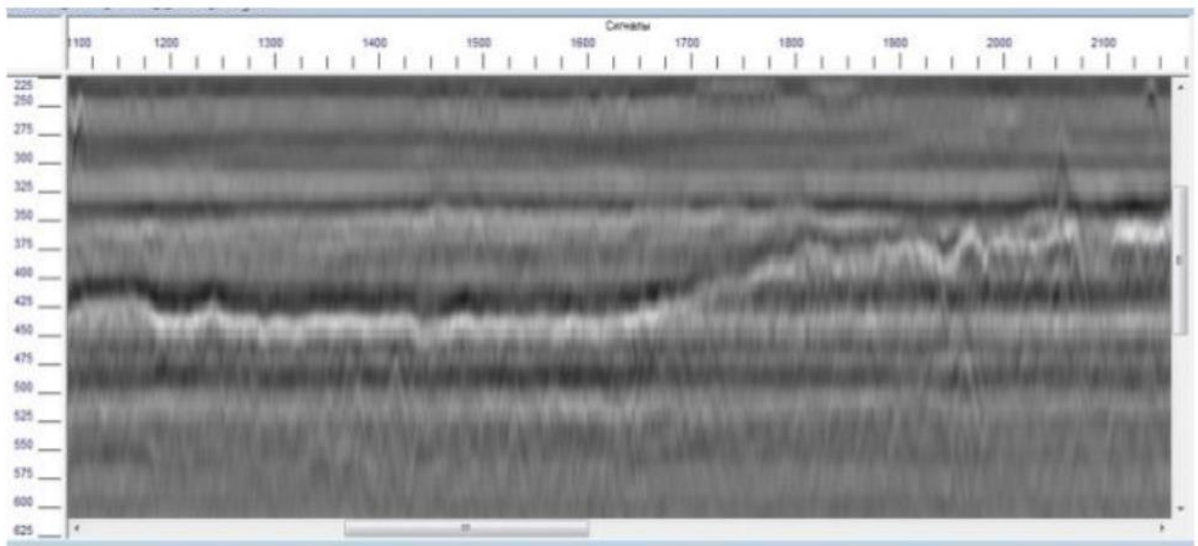


b)

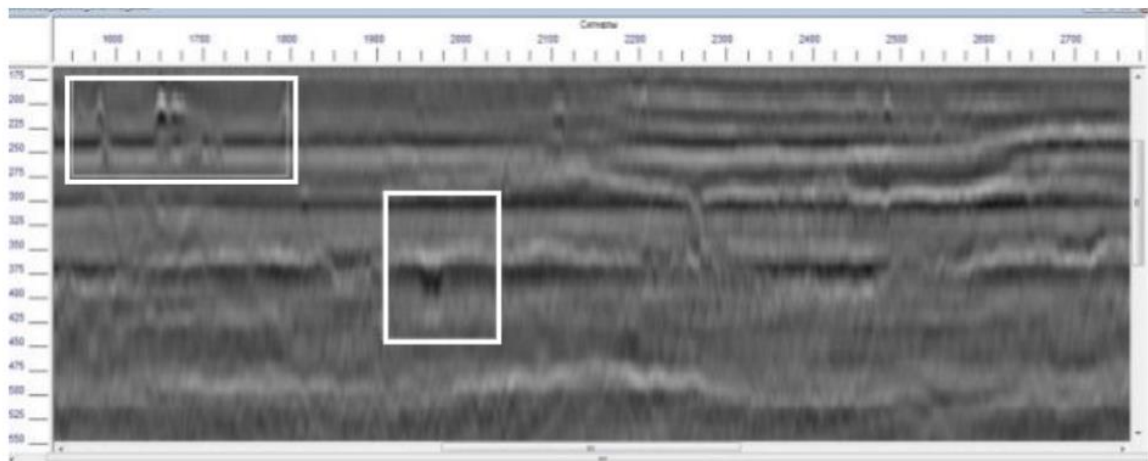
Рис. 9. Обстеження дорожнього одягу на ділянці від ПК 33+00 до ПК 39+00:
а) обстеження на ділянці з тріщиною; б) ядро на ПК 38+60

За результатами візуальної оцінки стан досліджуваної території характеризується як відмінний. Разом з тим, за результатами сканування дорожнього одягу (рис. 9) та обробки радіорадарограм, у структурних шарах дорожнього одягу виявлено підповерхневі неоднорідності та проведено їх попередню оцінку.[21-23]

Визначення типу прихованої неоднорідності проводили методом обробки імпульсних сигналів георадара та методом детального аналізу радарограмм (рис. 10). Зображення підповерхневих тріщин на радарограмі після первинної обробки показано на рис. 10.



а)



б)

Рис. 10. Приклад радарограм, отриманих за результатами георадарного сканування: а) з незначними неоднорідностями; в) з прихованими і наскрізними тріщинами

Обробка радарограм за запропонованими алгоритмами дозволила вирішити задачі ідентифікації та позиціонування підповерхневих неоднорідностей, виявлених за результатами георадарного зондування споруди на досліджуваній території (табл. 1)

Проводилась перевірка даних шляхом порівняння радіолокаційних грам, отриманих під час зондування в різних діапазонах у різний час. За результатами порівняння радарограм отримано хороше узгодження даних (стикування прихованих тріщин по різних смугах), що дозволяє зробити висновок про адекватність отриманих даних фактичному стану конструкції.

Відбір керн з конструкції дорожнього одягу (рис. 9) підтвердив наявність прихованих тріщин у шарах основи та дорожньому покритті, що дозволяє зробити висновок про адекватність результатів георадарних досліджень фактичному стану конструкції дорожнього одягу.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що максимальна відносна похибка вимірювання змінюється в залежності від глибини тріщини в шарах дорожнього одягу, товщини шару дорожнього одягу над тріщиною і зростає зі збільшенням вологості шарів. конструкції дорожнього одягу, що пов'язано із загасанням імпульсних сигналів надширокосмугових сигналів георадарів по глибині.

За стандартних умов (сухе чисте покриття, температура повітря 20 °С) відносна похибка вимірювань становила до 10%, що знаходиться в межах допустимих відхилень товщини шарів конструкції дорожнього одягу та свідчить про високу порівнянність результати обробки імпульсних сигналів георадарів до фактичних геометричних параметрів тріщин, визначених за результатами відбору кернів з конструкції дорожнього одягу.

ТАБЛИЦЯ 1. РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ РАДАРАГРАМ НА ДІЛЯНЦІ ВІД ПК 33+00 ДО ПК 39+00, СМУГА РУХУ ПРАВА ПО НАПРЯМКУ РУХУ.

Пікети	Сигнал	Тип неоднорідності	Підрахунок сигналів	Розташування неоднорідності конструкції дорожнього одягу
33+03,50	82	субповерхня	625-225	в шарах існуючої конструкції і в шарах покриття
33+50,57	1400	субповерхня	525-225	в шарах існуючої конструкції і в шарах покриття
33+67,68	1646	вздовж	450-225	в шарах існуючої конструкції і в шарах покриття

33+93,50	2274	вздовж	-	в шарах існуючої конструкції і в шарах покриття
34+12,66	2740	вздовж	-	в шарах існуючої конструкції і в шарах покриття
34+40,63	3420	вздовж	-	в шарах існуючої конструкції і в шарах покриття
37+46,88	1115	субповерхня	456-275	в шарах існуючої конструкції та в шарі грубого асфальтобетонного покриття
37+54,60	1287	вздовж	-	в шарах існуючої конструкції і в шарах покриття
38+23,04	2900	вздовж	-	в шарах існуючої конструкції та в шарі грубого асфальтобетонного покриття
38+60,48	3971	субповерхня	467-285	в шарах існуючої конструкції та в шарі грубого асфальтобетонного покриття

ВИСНОВКИ

В процесі моєї роботи було розглянуто принцип роботи надширокосмугових георадарів, а також методів дослідження підповерхневих пошкоджень дорожніх покриттів. Результати георадарного зондування дозволяють виявити ділянки, які характеризуються значною структурною неоднорідністю у вигляді прихованих лінійних неоднорідностей, тобто тріщин. Проведені експериментальні дослідження на дорогах загального користування дозволили підтвердити адекватність розроблених теоретичних моделей, а також алгоритмів обробки імпульсних сигналів георадарів. Окремо слід зазначити, що на даний момент накопичено значний досвід використання георадарів для вирішення задач виявлення, позиціонування, а також ідентифікації наскрізних тріщин у шарах нежорсткого покриття, а дослідження в області георадарної діагностики прихованих тріщин поки що має деякі обмеження.

ПОСИЛАННЯ

1. Annan, A.P. and Davis, J.L., 1978, Methodology for radar transillumination experiments: Report of activities, Geological Survey of Canada, Paper, 78-1B, pp. 107-110.
2. Archie, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, Vol. 146, pp. 54-62.
3. Bristow, C.S. and Jol, H.M., 2003, Ground Penetrating Radar in Sediments, Geological Society, London, Special Publications, 211.
4. Rubin, Y and Hubbard, S.S. (eds), 2005, Hydrogeophysics, Springer, Dordrecht, The Netherlands. Klewer. Santamarina, J.C., Klein, K. and Fam, A., 2001, Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring, John Wiley & Sons, Sussex, England, 508 pp.
5. Radar. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology. Wait, J.R., 1962, Electromagnetic Waves in Stratified Media, Pergamon Press, Oxford, pp 85-95.
6. Smythe, W.R., 1989, Static & Dynamic Electricity, Taylor & Francis, A SUMMA book
7. Olhoeft, G.R., 1981, Electrical properties of rocks, in Touloukian, Y.S., Judd, W.R. and Roy, R.F. (eds), Physical Properties of Rocks and Minerals, Vol. II, McGraw-Hill, New York, 548 p.
8. Olhoeft, G.R., 1987, Electrical properties from 10^{-3} to 10^9 Hz – Physics and chemistry. Proceedings of the 2nd International Symposium on the Physics and Chemistry of Porous Media, American Institute of Physics Conference Proceedings, Vol. 154, pp. 281-298.
9. Santamarina, J.C., Klein, K. and Fam, A., 2001, Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring, John Wiley & Sons, Sussex, England, 508 pp.

10. jackson d, islam m and alampalli s (2000), 'Feasibility of Evaluating the Performance of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Wrapped Reinforced Concrete Columns using Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography Techniques', Structural Materials Technology – An NDT Conference, Feb. 28–Mar. 3, Atlantic City, NJ, 390–395.
11. halabe u b, hing c l, klinkachorn p and gangarao h v s (2006), 'Subsurface Defect Detection in FRP Bridge Decks using Ground Penetrating Radar', Proceedings of the 33rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 26 (American Institute of Physics – Vol. CP894), Portland, Oregon, July 30–August 4, 1443–1450.
12. hing c l (2006), Nondestructive Evaluation of Fiber Reinforced Polymer Bridge Decks using Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV.
13. dutta s s (2006), Nondestructive Evaluation of FRP Wrapped Concrete Cylinders using Infrared Thermography and Ground Penetrating Radar, M.S. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV.
14. Standard Branches of Ukraine. 45.2-00018112-080:2011. Automobile roads. Evaluation and registration of the state of road surfaces and technical means of highways by automated video diagnostic systems. [Effective from 2012-03-01]. K.: State Highway Service of Ukraine (Ukravtodor), 2012. 45 [In Ukrainian]
15. Kiyashko I.V., Smolyanyuk R.V. The use of video diagnostic systems to assess the condition of the surface of coatings and road construction elements. Autoshlyahovyk Ukraine, 2008. No. 6. P. 23 - 30. [In Ukrainian]
16. 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.

17. Ground penetrating radar, theory and applications, Harry M. Jol Ed., Amsterdam: Elsevier B.V., 2009.
18. Batrakov, D.O., Antyufeyeva, M.S., Antyufeyev, A.V., Batrakova, A.G. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2017 - Proceedings, 2017, 7996072
19. Batrakov, D.O., Batrakova, A.G., Golovin, D.V. Numerical simulation of UWB impulse response of plane layered media with 2D inclusion. 2012 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, UWBUSIS 2012 - Conference Proceedings, 2012, PP. 153–155, 6379763
20. Batrakov, D.O., Antyufeyeva, M.S., Antyufeyev, A.V., Batrakova, A.G. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2017 - Proceedings, 2017, 7996072
21. D. O. Batrakov, K. S. Beloshenko M. S. Antyufeyeva, A. G. Batrakova, S. N. Urdzik. Comparative Study of Signal Processing of Two UWB GPR Antenna Units. Electronic Systems, Micro- and Nanosystem Technique, and IoT Electronic Technology Symposium October10-12, 2018, Kiev, Ukraine, P. 1-5.
22. Batrakov, D.O. Quality and efficiency of information monitoring at radio wave testing of inhomogeneous dielectric layers by using a multifrequency method. Defektoskopiya, 1998, (8), PP. 68–76.
23. 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.