

doi.org/10.29295/2311-7257-2021-104-2-165-171

УДК 625.7:535.361:535.555:535.573+577.3.0

Батракова А. Г.¹, Батраков Д. О.², Ковальов М. М.², Данієлян В. Р.¹, Урдзік С. М.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

(вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua;

orcid.org/0000-0002-4067-4371, orcid.org/0000-0002-6484-8559, orcid.org/0000-0001-6914-1221)

²Харківський національний університет ім. В.М. Каразіна

(майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна, e-mail: batrakov@karazin.ua;

orcid.org/0000-0002-6726-8162, orcid.org/0000-0003-0083-5000)

ГЕОРАДАРНІ ТА ГЕОДЕЗИЧНІ МЕТОДИ У ДІАГНОСТИЦІ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

Тема статті відноситься до проблеми розвитку і застосування сучасних засобів неруйнівної діагностики інженерних споруд – георадарів, а також до розроблення методів координатної прив'язки виявлених об'єктів. Такими об'єктами є деформації і руйнування конструктивних шарів дорожнього одягу. Метою роботи є розвиток запропонованих авторами технологій застосування георадарів для вирішення завдань неруйнівного контролю автомобільних доріг, що передбачають об'єднання можливостей сучасних імпульсних георадарів та геоінформаційних систем. Актуальність теми статті пов'язана з можливістю реалізації безперервного неруйнівного контролю автомобільних доріг, розробленням і застосуванням методів координатної прив'язки результатів георадарного зондування. Методологія дослідження спирається на суворі методи електродинаміки, теорії поля і математичного моделювання, а також можливості сучасних систем позиціонування та координатної прив'язки лінійних об'єктів. Основний результат у розвитку запропонованого авторами раніше підходу до зондування імпульсними сигналами. Наукова цінність отриманих результатів полягає у розвитку методів обробки імпульсних надширококутних сигналів георадару з метою підвищення надійності оцінки технічного стану інженерних споруд. Результати відносяться, в першу чергу, до автомобільних доріг з нежорстким дорожнім одягом. Практична значимість роботи пов'язана із можливостями сучасних георадарів та алгоритмів обробки даних, запропонованих авторами, які дозволяють отримувати кількісні оцінки таких параметрів, як товщина верхніх шарів дорожнього покриття на автомобільних дорогах з нежорстким дорожнім одягом, а також з можливістю виявлення і координатної прив'язки деформацій і руйнувань.

Ключові слова: георадар, імпульсні сигнали, нежорсткий дорожній одяг, позиціонування, координатна прив'язка.

Вступ. Розвиток нових технологій і засобів неруйнівного контролю відкриває нові можливості їх застосування. Зокрема, сучасні засоби контролю технічного стану інженерних споруд – георадари, набувають все більшого поширення під час вирішенні завдань неруйнівного контролю. Основні результати, що стосуються застосування георадарів для оцінювання стану інженерних споруд і, в першу чергу, автомобільних доріг, знайшли відображення у роботах [1-2]. Паралельно з розвитком методів дистанційного зондування відбувається розвиток геодезичних технологій. Результати, що отримані авторами у цьому напрямку, відображені у роботах [3].

Розглянемо деякі проблеми докладніше. Актуальність застосування георадарів під час обстеження автомобільних доріг обумовлена, в першу чергу, можливістю безперервного неруйнівного контролю ділянок значної протяжності [4-6]. Можливості сучасних георадарів дозволяють не тільки проводити візуальну оцінку радарограм оператором, але й отримувати кількісні оцінки таких параметрів як товщина верхніх шарів [1, 3]. Ще одним напрямком застосування георадарів є можливість виявлення таких небезпечних дефектів, як під поверхневі тріщини [7] й ділянки втрати міжшарового зчеплення [8]. Основними завданнями обробки георадарних даних є:

- оцінювання міцності як всієї конструкції в цілому, так і параметрів окремих шарів;
- отримання прогностичних оцінок змінювання стану автомобільної дороги в цілому та окремих її ділянок;
- оптимізація ресурсів на ремонт й утримання мережі автомобільних доріг за умови обмеженого фінансування [7].

Незважаючи на значні успіхи у вдосконаленні технічних характеристик георадарів та алгоритмів обробки результатів георадарного зондування, деякі актуальні проблеми

залишаються невирішеними. Однією з таких проблем є необхідність точної координатної прив'язки до виявлених дефектів для подальшого спостереження і прогнозування стану конструкції. Найбільш перспективними для вирішення цього завдання є геоінформаційні технології [9-13]. Тому основна мета даної статті – розвиток раніше запропонованих авторами технологій застосування георадарів для моніторингу автомобільних доріг та інших інженерних споруд з урахуванням нових можливостей геодезичних і геоінформаційних технологій. Внаслідок обмеженості обсягу, у даній статті основний акцент зроблений на застосуванні георадарних технологій під час пошуку та позиціонування тріщин у покритті нежорсткого дорожнього одягу. Геоінформаційні технології розглядаються як інструмент отримання геопросторових координат виявлених руйнувань у дорожньому покритті.

Постановка задачі виявлення підповерхневих тріщин у шарах покриття нежорсткого дорожнього одягу і метод розв'язку. У даному розділі будемо частково спиратися на раніше запропоновані авторами методи обробки первинних георадарних даних. Для реалізації алгоритму виявлення підповерхневих тріщин можливі кілька підходів, що спираються на дослідження поляризаційних властивостей відбитих імпульсних сигналів. Детально ці питання відображені у патентах України [14-18]. Тому наведемо лише основні дані і далі зупинимося на нових результатах. Ідея, запропонована раніше, складається з двох компонентів. На першому етапі проводиться визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу, на другому – пошук, ідентифікація і позиціонування тріщин.

Перший етап полягає в обчисленні значень товщини шарів. Він спирається на поетапне визначення відносної діелектричної проникності шарів, починаючи з верхнього шару, і подальшому обчисленні значень їх товщини. Основу підходу становить рішення допоміжної задачі про відбиття від границь плоскошаруватого середовища монохроматичної хвилі. Задачу зведено до обчислення значень коефіцієнтів відбиття і проходження хвиль на границях шарів. Для розрахунку коефіцієнтів відбиття і проходження через плоску границю розділу діелектриків існують основоположні формули [19]:

$$R_{n-1,n} = \frac{A_{n,n-1}}{A_{n-1,n}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} - \sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}}; \quad (1)$$

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

де $n - 1, n, n + 1$ – номери шарів; $A_{n-1,n}, A_{n,n-1}$ – амплітуди падаючого на границю між середовищем з ε_{n-1} і середовищем з ε_n та відбитого в $n - 1$ середовище сигналів відповідно; $A_{n-1,n} = A_0$; $T_{n-1,n}$ – коефіцієнт проходження з $n - 1$ шару в n ; $T_{n+1,n}$ – коефіцієнт проходження з $n + 1$ шару в n ; $R_{n,n-1}$ – коефіцієнт відбиття від границі $n - 1$ та n -го шарів в $n - 1$ шар; $B_{j,j+1}$ – проміжні параметри для скорочення запису.

Другий етап пошуку тріщин базується на залученні інформації про поляризаційний стан дифрагированих на неоднорідностях полів. Основу для запропонованої в [16-19] формалізації становить нелінійний зв'язок вимірюваних величин з інформативним параметром – станом поляризації сигналу, що реєструється. Цей зв'язок у загальному випадку у межах моделі плоскої хвилі дається відомими формулами Френеля [20]:

$$T_{\parallel} = \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_i}{(\cos \theta_i \cdot n_2 + n_1 \cdot \cos \theta_t)} A_{\parallel}; \quad T_{\perp} = \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_i}{(n_1 \cdot \cos \theta_i + n_2 \cdot \cos \theta_t)} \cdot A_{\perp}. \quad (3)$$

$$R_{\parallel} = \frac{(\cos \theta_t \cdot n_1 - n_2 \cdot \cos \theta_i)}{(n_2 \cdot \cos \theta_i + \cos \theta_t \cdot n_1)} \cdot A_{\parallel}; \quad R_{\perp} = \frac{(n_1 \cdot \cos \theta_i - n_2 \cdot \cos \theta_t)}{(n_2 \cdot \cos \theta_t + n_1 \cdot \cos \theta_i)} \cdot A_{\perp}. \quad (4)$$

Ці співвідношення (3, 4) можна переписати в альтернативній формі у разі залучення тільки кутових змінних і закону заломлення. Для зручності сприйняття часто, у такому випадку, застосовують також такі позначення ($n_{12} = n_2/n_1$) [20]:

$$T_{\parallel} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\left(\cos \theta_i \cdot n_{12} + \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} A_{\parallel} ; T_{\perp} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\left(\cos \theta_i + n_{12} \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} \cdot A_{\perp}. \quad (5)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\left(\sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} - n_{12} \cdot \cos \theta_i \right)}{\left(n_{12} \cdot \cos \theta_i + \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)} A_{\parallel} ; R_{\perp} = \frac{\left(\cos \theta_i - \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} \right)}{\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\sin \theta_i \frac{1}{n_{12}} \right)^2} + \cos \theta_i \right)} A_{\perp}. \quad (6)$$

Основний результат цих формул в тому, що у загальному вигляді, у разі похилого падіння, залежність коефіцієнтів відбиття і заломлення від кута падіння від співвідношення між ортогональними компонентами, зазначеними знаками \parallel та \perp , є нелінійною. Як впливає з (5, 6), за умови нормального падіння хвилі можна записати:

$$T_{\parallel} = \frac{2}{(n_{12} + 1)} A_{\parallel} ; T_{\perp} = \frac{2}{(1 + n_{12})} \cdot A_{\perp}; \quad (7)$$

$$R_{\parallel} = \frac{(1 - n_{12})}{(n_{12} + 1)} \cdot A_{\parallel} ; R_{\perp} = \frac{(1 - n_{12})}{(n_{12} + 1)} \cdot A_{\perp}; (n_{12} = n_2/n_1). \quad (8)$$

Тоді розглянута залежність є лінійною (через відсутність множників з тригонометричними функціями). Тому постановка задачі в такому вигляді є некоректною.

Підхід, що запропонований у роботах [16, 17], розвинений стосовно до зондування імпульсними сигналами. Для вирішення завдання ідентифікації, під якою розуміємо геометричні параметри тріщини, зроблено такі припущення:

- модель тріщини у плоскошаруватому середовищі являє собою прямокутний паралелепіпед – найпростіший випадок;
- змінювання товщини кожного шару по довжині ділянки є незначним, що дозволяє ним знехтувати (це підтверджується результатами числового моделювання так лабораторних експериментів);
- вплив нерівностей поверхні внутрішніх границь покриття на параметри відбитого сигналу незначний, тому їм також можна знехтувати;
- вирішення завдання у площині, що ортогональна напрямку руху георадара, дозволяє вважати задачу двовимірною.

Одним з ключових параметрів підповерхневих тріщин є глибина залягання. У роботі [7] запропонований алгоритм вирішення завдання визначення глибини залягання підповерхневих тріщин, що складається з декількох етапів:

- визначення значення діелектричної проникності (ϵ_1) шару, розташованого над тріщиною за формулою:

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 \frac{(1 - R_0)^2}{(1 + R_0)^2}, \quad (9)$$

де R_0 – коефіцієнт відбиття сигналу від верхньої границі дорожнього покриття, який визначається за співвідношенням $R_0 = \frac{A_0}{B_0}$;

- вимірювання часу затримки – часу проходження сигналу від антени до другої (нижньої) границі верхнього (першого) шару покриття (t_1);
- обчислення глибини залягання тріщини за формулою:

$$h_1 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_1}} \left(\frac{t_2}{2} - \frac{t_1}{2} \right). \quad (10)$$

Розрахунок здійснюється із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення [3]. Отже, сукупність описаних алгоритмів дозволяє визначати геометричні

параметри підповерхневих тріщин засобами програмної обробки результатів георадарного зондування.

Наступним етапом є прив'язка виявлених дефектів (тріщин) до певної системи координат. Вирішення цього завдання спирається на застосування можливостей геоінформаційних систем [21, 22]. Очевидно, що охопити всі особливості застосування цих технологій у рамках однієї статті не можливо, тому сформулюємо загальну мету і коротко опишемо принципний алгоритм координатної прив'язки, що пропонується застосовувати у системі георадарного моніторингу автомобільних доріг.

Визначення геопросторових координат підповерхневих тріщин у шарах покриття нежорсткого дорожнього одягу і метод вирішення. Одним з головних завдань під час моніторингу автомобільних доріг та оцінювання стану покриття із застосуванням георадару є створення системи оперативної та автономної прив'язки результатів зондування до місцевості. Очевидно, що найбільш точну прив'язку можна отримати методами геопозиціонування за допомогою геодезичного супутникового обладнання, що побудовано на основі GPS-приймача і системи обробки супутникових сигналів. Точність такої прив'язки досягає 0,5 см. Застосування систем ГНСС для вирішення завдань моніторингу автомобільних доріг стримується значною вартістю обладнання, складними алгоритмами обробки даних, отриманих у процесі руху пересувних дорожніх лабораторій, зниженням точності позиціонування.

З практичної точки зору для позиціонування деформацій і руйнувань у шарах дорожнього одягу, що визначені за результатами георадарного зондування у процесі моніторингу автомобільних доріг, достатньою є точність координатної прив'язки до електронних карт автомобільних доріг.

Із запровадженням державним агентством автомобільних доріг України «Укравтодор» бази геоданих автомобільних доріг, відкриваються нові можливості щодо удосконалення системи збору, позиціонування та ідентифікації інформації про стан автомобільних доріг. Наразі база даних API [23] сервісу постійно оновлюється, розширюються геодані по автомобільних дорогах загального користування державного значення, в тому числі по територіальних автомобільних дорогах. Конвертація лінійних прив'язок у геопросторові координати, що запроваджена в API сервісі, дозволяє з успіхом вирішувати завдання визначення геопросторових координат ділянок автомобільних доріг, що мають деформації, руйнування, в тому числі підповерхневі, змінювання геометричних параметрів шарів дорожнього одягу тощо. Тому пропонується здійснення лінійної прив'язки за даними датчика переміщень, встановленого на автомобілі, з наступним перерахунком лінійної прив'язки у геопросторові координати за допомогою API сервісу [23]. Для реалізації поставленого завдання запропоновано принципову схему датчика переміщень [24].

У пересувній лабораторії в якості датчика швидкості і одометра застосовано датчик, який при русі автомобіля формує на вихідному роз'ємі імпульси напруги амплітудою 12 В. Частота генерації імпульсів залежить від швидкості руху автомобіля. Цей зв'язок використаний для визначення довжини переміщення і прив'язки сигналів радарограми до ділянки дороги. Оцінки, що зроблені на попередньому етапі, довели, що з датчика швидкості можна отримувати імпульс синхронізації з пройденим шляхом через кожні $13 \pm 0,5$ см. Тоді, підраховуючи кількість імпульсів, визначають кутове переміщення диска датчика, а, отже, знаючи діаметр колеса автомобіля, обчислюють пройдений шлях.

Датчик переміщень закріплюється на автомобілі та підключений до апаратного блоку георадара. З огляду на те, що тиск у шинах автомобіля може змінюватися, перед початком георадарних вимірювань запропоновано виконувати калібрування датчика переміщення з метою встановлення кількості сигналів, що зареєстровані на пройденому

автомобілем маршруті. Калібрування датчику переміщень виконується із застосуванням програмного забезпечення «SignalProcessorEx» у такому порядку:

– після початку руху автомобіля-лабораторії, на якому встановлений датчик переміщення, активується лічильник кількості імпульсів, що надходять з датчика переміщення. Лічильник реєструє кількість імпульсів, що надійшли від датчика;

– автомобіль проїжджає певну фіксовану відстань, після чого на індикаторі відображається кількість імпульсів, що надійшли до апаратного блоку георадара від датчика під час руху автомобіля;

– визначається довжина переміщення автомобіля за час між двома найближчими імпульсами від датчика переміщення – крок переміщення.

Таким чином, у процесі діагностики реєструється кількість імпульсів від датчика переміщення та визначається крок переміщення, що дозволяє розрахувати довжину пройде-ного шляху.

На наступному етапі здійснюється лінійна прив'язка до певного кілометра автомобільної дороги, яка за допомогою AP сервісу конвертується у геопросторові координати. Застосування такого способу координатної прив'язки результатів георадарного зондування реалізується за допомогою досить простих програмних засобів. Слід зазначити, що за проведеними попередніми оцінками та результатами експериментальних вимірювань встановлено, що величина похибки лінійної прив'язки до маршруту зондування залежить від швидкості руху пересувної лабораторії та досягає максимального значення ± 10 см на швидкості руху 40 км/год. Така величина похибки є допустимою для вирішення завдань георадарного моніторингу автомобільних доріг.

Висновки. Отримані результати мають важливе прикладне і теоретичне значення. Моделі плоскошаруватих середовищ з неоднорідностями стимулювали розроблення та удосконалення технічних засобів неруйнівного контролю, розвиток алгоритмів обробки складних сигналів, які взаємодіють з неоднорідними шаруватими середовищами. Процес взаємодії імпульсних сигналів георадарів з шарувато-неоднорідними середовищами навіть у найпростіших моделях плоскошаруватих середовищ є досить складним фізичним процесом і вимагає детального вивчення всього багатства фізичних явищ, які супроводжують процеси дистанційного зондування і неруйнівного контролю будівельних конструкцій, об'єктів промислового та цивільного будівництва.

Накопичений практичний досвід застосування георадарів для вирішення завдання пошуку підповерхневих тріщин у шарах з монолітних матеріалів і результати обробки експериментальних даних, що отримані авторами на автомобільних дорогах загального користування, створили основу удосконалення технічних засобів, алгоритмів і програмного забезпечення щодо позиціонування та ідентифікації підповерхневих тріщин [14-18].

Запропонований спосіб координатної прив'язки із застосуванням датчику переміщень, що встановлений на пересувну лабораторію, та AP сервісу дозволяє з достатньою точністю вирішувати завдання моніторингу та наповнювати інформаційні бази даних щодо стану покриття автомобільних доріг загального користування.

Шляхи подальшого розвитку даного наукового напрямку мають бути пов'язані як з удосконаленням методів і алгоритмів обробки сигналів, так й з розробленням методів, що спрямовані на підвищення надійності реєстрації сигналів й достовірності прийнятих рішень. Ці питання будуть розглянуті у наступних наших роботах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Батракова А.Г., Урдзік С.М. Моделювання впливу заходів щодо посилення конструкцій дорожніх одягів з підповерхневими тріщинами. Науковий вісник будівництва, 2018. № 4(94). С. 110-116.

REFERENCES:

1. Batrakova A.G., Urgzik S.N. Modeling the impact of measures to strengthen the structures of pavements with subsurface cracks. Scientific Bulletin of Civil Engineering, 2018. № 4(94). P. 110-116.

2. Батракова А.Г. Моделі розповсюдження хвиль в системах аерокосмічної геодезії. Науковий вісник будівництва. №3(89). 2017. С. 117-121.
3. Батракова А.Г., Батраков Д.О. Георадарні та геодезичні технології в дорожній галузі. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018, 204 p.
4. Ground penetrating radar, theory and applications / [Jol Harry M. (Editor)]. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 508 p.
5. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics, 2000. Vol. 43. P. 119-138.
6. Cao Y., Guzina B.B., Labuz J.F. Pavement Evaluation using Ground Penetrating Radar: Final Report. Minnesota: Department of Civil Engineering, University of Minnesota, 2010. 102 p.
7. Batrakov D.O., Antyufeyeva M. S., Antyufeyev A. V., Batrakova A. G. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 9-th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR-2017): Conference Paper. Edinburgh, Scotland, 28-30 June. 2017. P. 1-6.
8. Sudyka J., Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. Int. J. Pavement Res. Technol., 2011. Vol. 4. № 3. P. 176-184.
9. Hong J. E. Promoting Teacher Adoption of GIS Using Teacher-Centered and Teacher-Friendly Design. Journal of Geography, 2014. Vol. 113 (4). P. 139-150.
10. Mohammed K.S., Elhadary Y., Samat N., Omar N. Q. GIS and Remote Sensing Techniques for Measuring Agriculture Land Loss in Balik Pulau Region of Penang State, Malaysia. Asian Journal of Agriculture and Rural Development, 2015. Vol. 5 (2). P. 30-41.
11. Van Westen C. J. Remote Sensing and GIS for Natural Hazards Assessment and Disaster Risk Management. Treatise on Geomorphology, 2013. № 3. P. 259-298.
12. Zacharopoulou D., Skopeliti A., Nakos B. Assessment and Visualization of OSM Consistency for European Cities. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 2021. № 10. P. 361.
13. Berg H., Mulokozi D., Udikas L. A GIS Assessment of the Suitability of Tilapia and Clarias Pond Farming in Tanzania. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 2021. № 10. P. 354.
14. Спосіб виявлення та визначення місць знаходження у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті: пат. 81296 Україна; заявл. 08.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12/2013.
15. Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному
2. Batrakova A.G. Modeli rozpovsyudzhennya hvil' v sistemah aerokosmichnoї geodezii. Scientific Bulletin of Civil Engineering, 2017. № 3(89). P. 117-121.
3. Batrakova A.G., Batrakov D.O. Georadar and geodetic technologies in the road industry. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 204 p.
4. Ground penetrating radar, theory and applications / Jol Harry M. (Editor). Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 508 p.
5. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics, 2000. Vol. 43. P. 119-138.
6. Cao Y., Guzina B.B., Labuz J.F. Pavement Evaluation using Ground Penetrating Radar: Final Report. Minnesota: Department of Civil Engineering, University of Minnesota, 2010. 102 p.
7. Batrakov D.O., Antyufeyeva M. S., Antyufeyev A. V., Batrakova A. G. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 9-th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR-2017): Conference Paper. Edinburgh, Scotland, 28-30 June. 2017. P. 1-6.
8. Sudyka J., Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. Int. J. Pavement Res. Technol., 2011. Vol. 4, № 3, P. 176-184.
9. Hong, J. E. Promoting Teacher Adoption of GIS Using Teacher-Centered and Teacher-Friendly Design. Journal of Geography, 2014. Vol. 113 (4). P. 139-150.
10. Mohammed, K.S., Elhadary Y., Samat N., Omar N Q. GIS and Remote Sensing Techniques for Measuring Agriculture Land Loss in Balik Pulau Region of Penang State, Malaysia. Asian Journal of Agriculture and Rural Development, 2015. Vol. 5 (2). P. 30-41.
11. Van Westen C. J. Remote Sensing and GIS for Natural Hazards Assessment and Disaster Risk Management. Treatise on Geomorphology, 2013 № 3. P. 259-298.
12. Zacharopoulou D., Skopeliti A., Nakos B. Assessment and Visualization of OSM Consistency for European Cities. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 2021. № 10. P. 361.
13. Berg H., Mulokozi D., Udikas L. A GIS Assessment of the Suitability of Tilapia and Clarias Pond Farming in Tanzania. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 2021. № 10. P. 354.
14. The method of detection and determination of locations, including subsurface cracks in the asphalt pavement: US Pat. 81296 Ukraine; declared 08.01.2013; publ. 25.06.2013, Bull. № 12/2013.
15. The method of detecting subsurface cracks in the asphalt pavement during the movement of the diagnostic laboratory in the traffic flow: US Pat.

- потоці: пат. 113916 Україна; заявл. 13.11.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6/2017.
16. Спосіб калібрування та видалення паразитних відбиттів при неруйнівному контролі верхнього шару асфальтобетону за допомогою георадара: пат. 121495 Україна; заявл. 02.06.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23/2017.
 17. Спосіб виявлення та визначення напрямку у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті: пат. 121483 Україна; заявл. 02.06.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23/2017.
 18. Спосіб спектральної ідентифікації та коригування параметрів сигналів георадарів при неруйнівному контролі товщини шарів нежорсткого дорожнього одягу: пат. 145990 Україна; заявл. 30.07.2020; опубл. 13.01.2021, Бюл. № 2/2021.
 19. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Москва: Наука, 1973. 343 с.
 20. Born M., Wolf E. Principles of optics. Pergamon press, 1968. 720 p.
 21. James Bao-Yen Tsui. Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. John Wiley & Sons, Inc., 2000. 255 p.
 22. Elliott D., Kaplan C., Hegarty J. Understanding GPS Principles and Applications. Artech House Inc., 2006. 723 p.
 23. Дорожній геокалькулятор. URL: <https://kmpplus.ukravtodor.gov.ua/?fbclid=IwAR30z4U%20rcUbCC2p-HG-2bq4quXV8wgQtqCyb0kF4HuhsAZ4Crtx3ffA3Gg>.
 24. Батракова А.Г. Метод геодезичної прив'язки при моніторингу автомобільних доріг. Комунальне господарство міст. Харків: ХНУМГ, 2017. № 137. С. 41-45.
 - 113916 Ukraine; declared 11/13/2015; publ. 27.03.2017, Bull. № 6/2017.
 16. The method of calibration and removal of parasitic reflections in non-destructive testing of the upper layer of asphalt concrete using georadar: US Pat. 121495 Ukraine; declared 02.06.2017; publ. 11.12.2017, Bull. № 23/2017.
 17. A method of detecting and determining the direction, including subsurface cracks in the asphalt pavement: US Pat. 121483 Ukraine; declared 02.06.2017; publ. 11.12.2017, Bull. № 23/2017.
 18. The method of spectral identification and adjustment of the parameters of georadar signals with non-destructive testing of the thickness of the layers of non-rigid pavement: US Pat. 145990 Ukraine; declared 30.07.2020; publ. 13.01.2021, Bull. № 2/2021.
 19. Brekhovskikh LM Waves in layered media. Moscow: Nauka, 1973. 343 p.
 20. Born M., Wolf E. Principles of optics. Pergamon press, 1968. 720 p.
 21. James Bao-Yen Tsui. Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. John Wiley & Sons, Inc., 2000. 255 p.
 22. Elliott D., Kaplan C., Hegarty J. Understanding GPS Principles and Applications. Artech House Inc., 2006. 723 p.
 23. Road geocalculator. URL: <https://kmpplus.ukravtodor.gov.ua/?fbclid=IwAR30z4U%20rcUbCC2p-HG-2bq4quXV8wgQtqCyb0kF4HuhsAZ4Crtx3ffA3Gg>.
 24. Batrakova A.G. Geodetic reference method for road monitoring. Municipal Economy of Cities. Kharkiv: KNUUE, 2017. № 137. P. 41-45.

Batrakova A.G., Batrakov D.O., Kovalev N.N., Danielyan V.R., Urdzik S.M. GEORADAR AND GEODESIC METHODS IN DIAGNOSTICS OF ROAD PAVEMENTS. The topic of the article relates to the problem of development and application of modern means of monitoring the technical condition of engineering structures – GPR, as well as the development of methods for registering the coordinates of detected objects. Such objects can be deformations and destructions of constructive layers of pavements. The aim of the work is to develop the technologies proposed by the authors for the use of GPR to solve the problems of non-destructive testing of roads while combining the capabilities of modern pulsed GPR and geographic information systems. The relevance of the topic of the article is related to the possibility of implementing continuous non-destructive testing of roads, the development and application of methods of coordinate reference of the results of GPR sounding. The research methodology is based on strict methods of electrodynamics, field theory and mathematical modeling, as well as the capabilities of modern systems of positioning and coordinate reference of linear objects. The main result is that the approach proposed earlier by the authors is extended to the case of probing with pulse signals. The scientific value of the obtained results lies in the development of methods for processing pulsed ultra-wideband GPR signals in order to increase the reliability of methods for assessing the technical condition of engineering structures. The results relate primarily to highways with non-rigid road pavements. The practical significance of the work is related to the capabilities of modern GPR and data processing algorithms proposed by the authors, which allow to obtain quantitative estimates of such parameters as the thickness of the upper layers of roads with non-rigid clothing, as well as the ability to detect and coordinate deformation and destruction.

Keywords: GPR, pulse signals, non-rigid pavement, positioning, coordinate reference.