

А.Г. Батракова, С.М. Урдзік

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОРАДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

У роботі наведено результати польових та лабораторних досліджень із визначення товщини конструктивних шарів автомобільної дороги. За результатами георадарної зйомки, з високою точністю встановлено товщину залізобетонної плити. Запропоновано методику дефектоскопії асфальтобетонних шарів дорожнього одягу, а також послідовність дій для вирішення завдання пошуку локальних включень та арматури в конструктивних шарах дорожнього одягу.

Ключові слова: георадар, радарограма, дорожній одяг, діелектрична проникність, дефектоскопія, товщинометрія, локальні включення.

Постановка проблеми

На етапі будівництва автомобільної дороги замовнику важливо мати можливість контролювати технологічні процеси, дотримання будівельниками вимог нормативних документів, відповідність будованого об'єкта проектним даним.

Наступним важливим етапом є експлуатація автомобільних доріг. Для організацій з утримання та експлуатації автомобільних доріг потрібною є інформація про поточний технічний стан як всієї дорожньої конструкції, так і її окремих складових. Здатність визначення ділянок, що містять підповерхневі дефекти, локальні включення, та встановлення фізико-механічних властивостей шарів дорожнього одягу неруйнівними методами дозволяє вчасно розробляти ремонтні заходи з метою недопущення появи дефектів та подальшого руйнування всієї дорожньої конструкції. У сучасних умовах це дозволяє значно заощадити фінансові ресурси через змогу прогнозувати розвиток деформацій на початковій стадії їх появи, розробляти проекти з поточного та капітального ремонту автомобільних доріг на основі повної та достовірної інформації про досліджуваній об'єкт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ця робота є продовженням дослідження з визначення можливості застосування георадарних технологій у дорожньо-будівельній галузі [1]. Як показали попередні експериментальні дослідження, використовуваний апаратний та програмний комплекс дозволяє з достатньо високою точністю встановлювати значення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу за показниками діелектричної проникності [2].

Актуальність та перспективність цього науко-

вого напрямку підтверджують численні закордонні дослідження [3–6]. Безумовною перевагою перед традиційними методами діагностики є оперативність, безперервність та висока достовірність отриманих даних.

Застосування георадарних технологій дозволяє значно знизити матеріаломісткість та фінансові витрати при проведенні вишукувальних робіт з визначення тримальної здатності дорожніх конструкцій.

Мета статті

Метою статті є розвиток теми залучення георадарного обладнання у технологію обстеження дорожнього одягу на етапах будівництва та експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Аналіз лабораторних досліджень показав, що розроблений алгоритм дій [1] дозволяє з достатньо високою точністю встановлювати значення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу. Для шарів з істинною товщиною 9 см, 15 см і 20 см відновлені за результатами обробки радарограм значення становили 9,1 см, 15,05 см і 20,15 см, відповідно.

Наступним етапом досліджень є апробація запропонованої схеми визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу на різних ділянках автомобільних доріг, що будуються. Розглянемо приклад визначення товщини тротуарних залізобетонних плит. Реальна товщина залізобетонної плити – 14 см. Рух трасою здійснювався з постійною швидкістю і виконувався на різних розгортках. На рис. 1 наведено загальний вигляд досліджуваної ділянки автомобільної дороги. На рис. 2 зображено радарограму, отриману за профілем досліджуваної структури при розгортці 10 нс. «Розмиті ділянки» радарограми відповідають стикам плит.



Рис. 1. Загальний вигляд досліджуваної ділянки автомобільної дороги

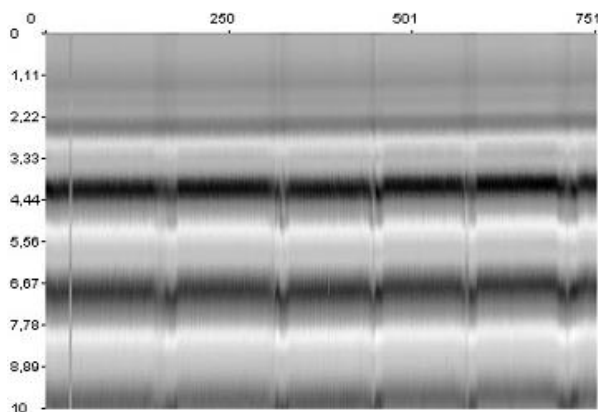


Рис. 2. Радарограма досліджуваної ділянки автомобільної дороги

Значення діелектричної проникності бетону коливається в межах від 5,5 до 9 [3, 7]. Воно насамперед залежить від складу цементобетонної суміші (фракції щебеню, піску та ін.) та значення вологості.

У нашому дослідженні діелектрична проникність цементобетону була прийнята рівною 7 [3, 7]. Обробка радарограми за допомогою алгоритму, заснованого на перетворенні Гільберта, дозволила визначити товщину тротуарної плити, яка становила 15 см, що свідчить про хорошу збіжність теоретичних розрахунків та результатів експериментальних досліджень. Передусім це стає можливим за рахунок наявності необхідної інформації про досліджуваний об'єкт та його фізико-механічні властивості. Також великий вплив на точність отриманих результатів має алгоритм, що закладений у відповідний профільний програмний комплекс.

Результати обробки радарограми представлені на рис. 3.

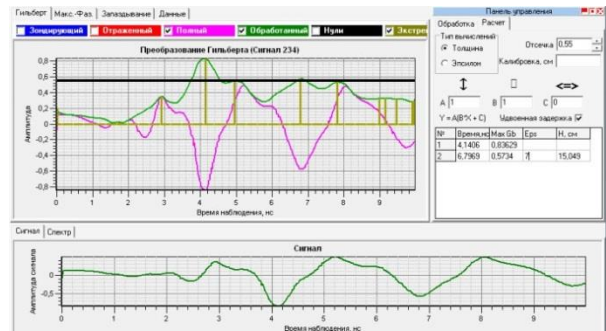


Рис. 3. Вікно обробки радарограми, отриманої при георадарному обстеженні тротуарних плит

Розробка методики дефектоскопії асфальто-бетонних шарів дорожнього одягу, а також вирішення завдання пошуку сторонніх включень та арматури в конструктивних шарах дорожнього одягу вимагають якісно іншого підходу. В основу вирішення задачі пошуку підповерхневих дефектів у конструктивних шарах дорожнього одягу покладено ідеї реєстрації крос-поляризаційної компоненти сигналу. Дослідження проводяться з використанням антенного блока, що реєструє крос-поляризаційну компоненту відбитого сигналу (рис. 4).



Рис. 4. Антенний блок та модель для пошуку підповерхневих тріщин

Обробка отриманих радарограм у такому разі зводиться до віднімання двох взаємно ортогональних компонентів сигналу, що дозволяє визначити ділянки середовища з анізотропними властивостями. У цьому випадку під ізотропним розуміється середовище з однаковими електрофізичними характеристиками за всіма напрямками та відсутністю дефектів (тріщин, сторонніх включень).

У такій постановці завдання результативний імпульс за відсутності дефектів матиме досить малу нормовану амплітуду, що наближається до «0» і може бути прийнятий як нормувальний або еталонний. За наявності дефектів у нижньому шарі покриття характер імпульсу буде істотно відрізнятися від еталонного. Проведення серії модельних експериментів дозволило підтвердити ефективність запропонованого алгоритму виявлення підповерхневих дефектів (рис. 5).

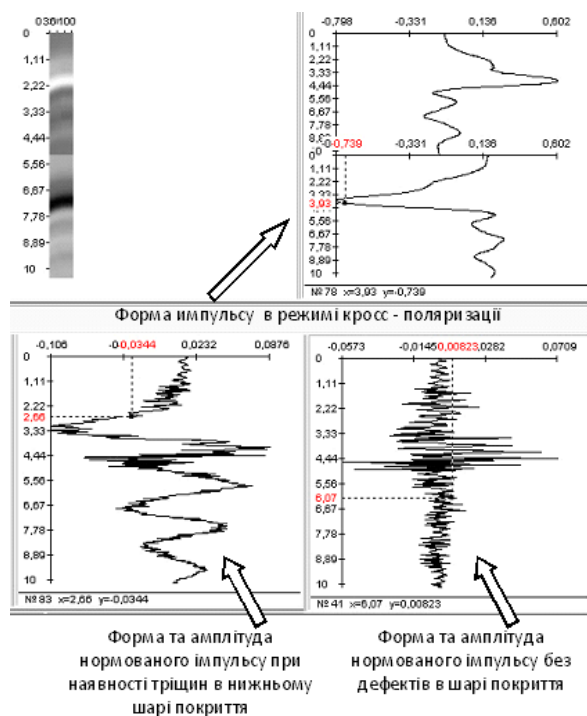


Рис. 5. Експериментальне визначення підповерхневих дефектів за допомогою антенного блока в режимі крос-поляризації

Відомо, що електрофізична контрастність підповерхневих дефектів може суттєво залежати не лише від характеру дефекту, а й від вологості [8, 9]. Це пов'язано з істотною різницею у величині діелектричної проникності повітря, матеріалу шару та води [9, 10]. Так, діелектрична проникність (її дійсна частина) повітря $\varepsilon = 1$, асфальтобетону – $\varepsilon = 7$, води – $\varepsilon = 80$. Відмінність у діелектричній проникності середовищ асфальтобетон – вода – асфальтобетон призводить до значної зміни амплітуди, форми і часу проходження зондувального імпульсу, що дає можливість виділення на радарограмах підповерх-

невих дефектів після відповідної обробки (рис. 6).



Рис. 6. Моделювання розповсюдження сигналу в нижньому шарі покриття:
сигнал 55 – нормувальний – відсутність дефектів;
сигнал 45 – наявність тріщини, що заповнена водою;
сигнал 25 – наявність тріщини, що заповнена повітрям

Водночас розв'язання задач дефектоскопії у дорожньому будівництві не вичерпується виявленням та позиціонуванням підповерхневих дефектів у вигляді локальних порушень цілісності та ділянок розшарування асфальтобетонних шарів. Досить актуальним є завдання виявлення та позиціонування сторонніх включень, пошуку комунікацій, визначення місця розташування арматури у конструкціях дорожнього одягу та мостів. Розв'язання цих завдань полягає у вивченні явища дифракції хвиль на сторонніх включеннях досліджуваних середовищ. На радарограмах, одержаних під час проведення лабораторних досліджень, досить чітко позиціонуються металеві включення різного діаметра (рис. 7).

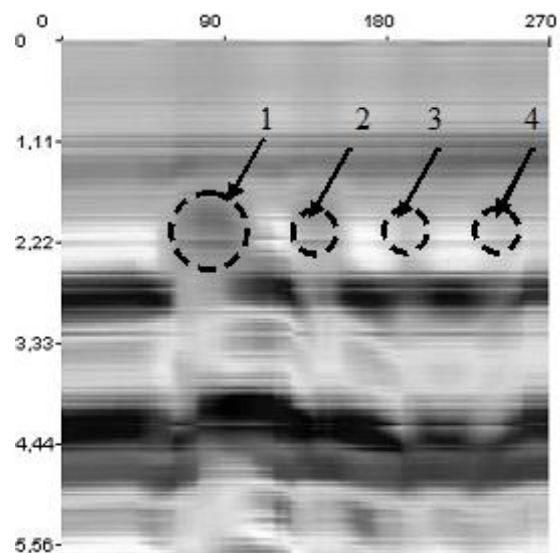


Рис. 7. Лабораторний експеримент з виявлення металевої арматури різного діаметра в шарі суглинку:
1 – пустотіла металева труба $d = 27$ мм; 2 – арматура $d = 11$ мм; 3 – металевий стрижень $d = 4$ мм;
4 – алюмінієва фольга $d = 45$ мм

Проведені лабораторні дослідження показали, що форма та характер гіперболи дифрагованої хвилі суттєво залежать від глибини залягання, діаметра та матеріалу об'єкта. Тому подальші дослідження в цьому напрямку повинні бути спрямовані на вивчення форми дифрагованої хвилі, що в кінцевому підсумку дозволяє судити про глибину залягання та діаметр локального стороннього включення.

Слід зазначити також, що при пошуку та ідентифікації арматури у конструктивних шарах дорожнього одягу та елементах мостів виникають труднощі, пов'язані з кроком арматурної сітки. При малому кроці арматурної сітки, у разі, коли довжина хвилі більша за крок арматурної сітки, відбиття від сусідніх стрижнів арматури зливаються у загальну суцільну границю і роблять практично нерозрізненими нижчі шари конструкції. Вирішення зазначених труднощів можливе шляхом удосконалення як приладової бази, так і алгоритмів з обробки та інтерпретації отриманих радарограм.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Отже, проведені теоретичні дослідження та обчислювальні експерименти дозволяють стверджувати, що розробка методик товщинометрії та дефектоскопії дорожнього одягу стане основою системи моніторингу дорожнього одягу з використанням методу підповерхневої георадіолокації. Для досягнення поставленої мети було вирішено низку наукових та практичних завдань, а саме:

- проаналізовано та адаптовано задачі товщинометрії плоскошаруватих середовищ з малою товщиною шарів моделі взаємодії електромагнітного випромінювання з плоскошаруватими середовищами;
- розроблено алгоритм обробки імпульсних сигналів, відбитих від плоскошаруватих середовищ, заснований на перетворенні Гільберта;
- відпрацьовано методику моделювання поширення електромагнітного імпульсу в конструктивних шарах дорожнього одягу, зокрема з малою товщиною шару;
- експериментально підтверджено відтворюваність результатів вимірювань та стабільність роботи алгоритму визначення товщини шарів дорожнього одягу за результатами георадарного зондування;
- запропоновано підхід до позиціонування підповерхневих дефектів у конструктивних шарах дорожнього одягу, заснований на аналізі крос-поляризаційної компоненти сигналу;
- ведуться роботи з ідентифікації підповерхневих дефектів;
- розпочато дослідження з формування бази даних електрофізичних характеристик матеріалів та ґрунтів з урахуванням їх дисперсійних властивостей, пов'язаних з вологістю та щільністю (залишковою

пористістю).

На думку авторів, перспективними напрямками досліджень у цій галузі є:

- визначення кількісної оцінки зв'язку щільності та вологості матеріалів і ґрунтів земляного полотна з їх електрофізичними характеристиками;
- розв'язання зворотної задачі відновлення профілю діелектричної проникності плоскошаруватого середовища за набором значень розсіяного нею електромагнітного поля;
- розробка алгоритмів та програм автоматизованого розрахунку товщини конструктивних шарів дорожнього одягу, ідентифікації та позиціонування підповерхневих дефектів за результатами георадарного зондування.

Література

1. Батракова А.Г., Урдзік С.М. Застосування георадарних технологій при обстеженні дорожнього одягу. // *Комунальне господарство міст: Технічні науки та архітектура*, 2023. том 3, вип. 177, с. 68-73.
2. Батракова А.Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.22.11 / ХНАДУ. Х., 2014. 390 с.
3. Josef Stryk. Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. *Intersections Journal*, 2008. Vol 5, No 1. 9 p.
4. Wong K.T., Urbaz E. Ground Penetrating Radar (GPR) – a Tool for Pavement Evaluation and Design. *Shaping the future: Linking policy, research and outcomes: 25th ARRB Conference. Perth, Australia: Proceedings. 2012. P. 1-13.*
5. Li Shengli, Wang Chaoqun, Sun Panxu, Wu Guangming, Wang Dongwei. A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar. 2016. № 8(12). P. 1-10.
6. M Miskiewicz, J Lachowicz, P Tysiac, P Jaskula, K Wilde. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 356. 8 p.
7. Головин Д.В., Греков С.В., Батракова А.Г. Алгоритм определения задержки импульсных сигналов, основанный на преобразовании Гильберта // *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна: Радіофізика та електроніка*, 2009. № 853, вип. 14, с. 68-73.
8. Процюк В.О. Експрес-метод оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Харків, ХНАДУ, 2019. 234 с.
9. Jol Harry M. *Ground penetrating radar, theory and applications*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 508 p.
10. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 43. PP. 119-138.

References

1. Batrakova A.G., Urdzik S.M. Application of ground-penetrating radar technologies in the examination of road clothing. // *Municipal management of cities: Technical sciences and architecture*, 2023. volume 3, issue 177, p. 68-73.
2. Batrakova A.G. Methodology for monitoring road traffic of a non-zhorsk type due to the stoppage of georadiolocation technologies: dis. ... Dr. tech. sciences: spec. 05.22.11 / KHNADU. H., 2014. 390 p.

3. Josef Stryk. Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. *Intersections Journal*, 2008. Vol 5, No 1. 9 p.
4. Wong K.T., Urbaz E. Ground Penetrating Radar (GPR) – a Tool for Pavement Evaluation and Design. Shaping the future: Linking policy, research and outcomes: 25th ARRB Conference. Perth, Australia: Proceedings. 2012. P. 1-13.
5. Li Shengli, Wang Chaoqun, Sun Panxu, Wu Guangming, Wang Dongwei. A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar. 2016. № 8(12). P. 1-10.
6. M Miskiewicz, J Lachowicz, P Tysiac, P Jaskula, K Wilde. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 356. 8 p.
7. Golovin D.V., Grekov S.V., Batrakova A.G. Algorithm for Determining the Delay of Pulse Signals Based on the Hilbert Transform // *Bulletin of KhNU im. V.N. Karazina: Radio-physics and Electronics*, 2009. No. 853, no. 14, p. 68-73.
8. Protsyuk V.O. An express method of estimating the calculated parameters of subsoil with the help of field georadar. Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences. Kharkiv, Khnadu, 2019. 234 p.
9. Jol Harry M. Ground penetrating radar, theory and applications. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 508 p.
10. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground

penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 43. PP. 119-138.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.О. Бугаєвський, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна.

Автор: БАТРАКОВА Анжеліка Геннадіївна
доктор технічних наук, професор кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – aqbatr@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

Автор: УРДЗІК Сергій Миколайович
кандидат технічних наук, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – urdzik@khadi.kharkov.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6914-1221>

USE OF GPR TECHNOLOGIES IN THE ROAD CONSTRUCTION INDUSTRY

A. Batrakova, S. Urdzik

Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

The article continues the study on determining the possibility of applying ground penetrating radar (GPR) technologies in the road construction industry. The authors conduct research using an antenna unit that registers the cross-polarisation component of the reflected signal. In this case, processing the obtained radar images comes down to subtracting two mutually orthogonal components of the signal, which allows the determination of areas of the environment with anisotropic properties.

Identifying and positioning extraneous inclusions, finding communications, and determining the location of reinforcement in roadway and bridge structures are relevant tasks. Their solution lies in studying the phenomenon of wave diffraction on extraneous inclusions of the investigated environment. Metal inclusions of different diameters are distinctly visible on radar images obtained during laboratory research.

The laboratory studies conducted by the authors showed that the shape and nature of the hyperbola of the diffracted wave significantly depend on the object's depth, diameter, and material. Therefore, further research in this direction should aim at studying the shape of the diffracted wave, which ultimately allows for judging the depth of occurrence and the diameter of a local extraneous inclusion. When finding and identifying reinforcement in structural layers of road surfaces and elements of bridges, difficulties arise due to the spacing of the reinforcing mesh. With a small reinforcing mesh spacing, when the wavelength is longer than the spacing, the reflections from the adjacent reinforcement bars merge into a common continuous boundary and make the lower layers of the structure almost indistinguishable. Solving the mentioned difficulties is possible by improving the equipment base and the algorithms for processing and interpreting the received radar images.

Completed theoretical studies and computational experiments allow us to state that the development of road surface thickness measurement and defect detection techniques will become the basis of the road surface monitoring system using the subsurface geolocation method.

Keywords: ground penetrating radar, radar image, road surface, dielectric constant, defect detection, thickness measurement, local inclusions.