

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-42-02>

УДК 537.86

В.А. ПЛАХТІЙ, доктор філософії, доцент

e-mail: plakhtii@karazin.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0442-2716>

Р.Д. АХМЕДОВ, к. ф.-м. наук, старший науковий співробітник

e-mail: rolan.akhmedov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3819-1282>

О.М. ДУМІН, д. ф.-м. наук, провідний науковий співробітник

e-mail: dumin@karazin.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5067-9689>

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

МЕТОД МІГРАЦІЇ КІРХГОФА В ЗАДАЧІ ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНИХ МЕТАЛЕВИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НАДШИРОКОСМУГОВОГО ГЕОРАДАРУ

Актуальність: Надширокосмугові (НШС) георадарні системи широко використовуються для виявлення прихованих об'єктів. Проте ефективна обробка даних, особливо у складних середовищах із неоднорідностями, залишається актуальною проблемою. Точність визначення глибини таких об'єктів значною мірою залежить від коректного застосування методів міграції та попередньої обробки сигналів.

Мета роботи: Розв'язання модельної задачі визначення глибини металеві труби в однорідному та неоднорідному середовищі з використанням методу міграції Кірхгофа для подальшого застосування підходу до реальних георадарних даних.

Матеріали та методи: Модель середовища включала однорідну область та область із траншеєю, що містить металеву трубу. Для моделювання поширення сигналу використовувався метод FDTD з гаусовим імпульсом тривалістю 0,6 нс. Було сформовано В-скани з 15 положень антени, а отримані дані піддавалися попередній обробці та міграції Кірхгофа. У випадку неоднорідного середовища враховувалась зміна діелектричної проникності.

Результати: Отримано чітке зображення труби після застосування методу міграції, яке співпадає з фактичною глибиною об'єкта як в однорідному, так і в неоднорідному середовищі. У разі ігнорування локальних змін діелектричної проникності спостерігається похибка, яка може досягати величини, близької до діаметра труби.

Висновки: Метод міграції Кірхгофа є ефективним для визначення глибини металевих об'єктів у модельному середовищі за умови правильної оцінки параметрів середовища. Необхідно враховувати неоднорідності, такі як траншеї, для зменшення похибок у розрахунках, що є критично важливим для практичних застосувань НШС георадарів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: підповерхневий об'єкт, георадар, надширокосмугові імпульсні електромагнітні хвилі, міграція Кірхгофа.

Як цитувати: Плахтій ВА, Ахмедов РД, Думін ОМ. Метод міграції Кірхгофа в задачі виявлення прихованих металевих об'єктів за допомогою надширокосмугового георадару. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2025;42:15-23. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-42-02>

In cites: Plakhtii VA, Akhmedov RD, Dumin OM. Kirchhoff migration method in the problem of detecting hidden metal objects using ultra-wideband GPR. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radiophysics and Electronics". 2025; 42:15-23. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-42-02>

ВСТУП

Підповерхневі георадари (GPR) сьогодні використовуються для широкого спектра задач, пов'язаних із вивченням внутрішньої структури ґрунтів та матеріалів без їхнього руйнування. Однією з найважливіших сфер застосування є будівництво, де георадар дозволяє до початку земляних робіт виявляти приховані інженерні комунікації — такі як труби [1], в тому числі не металеві [2], кабелі, включаючи оптоволоконні [3], чи дренажні системи. Це значно знижує ризик пошкодження інфраструктури та підвищує безпеку робіт. Також GPR активно використовують для обстеження бетонних конструкцій, зокрема для виявлення внутрішніх дефектів, армування або порожнин, що допомагає у визначенні технічного стану споруд [4].

У дорожньому та аеродромному будівництві георадари слугують інструментом контролю якості дорожнього полотна [5, 6]. Вони дозволяють визначати товщину шарів покриття, локалізувати зони розпушення або приховані порожнини, які з часом можуть спричинити просідання чи тріщини на

поверхні. Також у зимових умовах GPR дає змогу стежити за процесами промерзання та відтавання ґрунтів, що особливо актуально для доріг у північних регіонах [7].

Нарешті, георадар активно застосовується у військових і гуманітарних операціях [8], зокрема для виявлення мін, боєприпасів або тунелів. Його здатність бачити крізь ґрунт без фізичного втручання робить його незамінним інструментом у місіях розмінування та в операціях цивільного захисту.

Проте обробка отриманих з них даних залишається складним і актуальним завданням. Багато підходів допомагають вирішити цю проблему. Наприклад, узагальнене перетворення Хафа [9], час прольоту [10], [11], методи міграції [12]-[14], штучні нейронні мережі [15]-[16], томографія [17] та багато інших. Існують різні методи міграції, які використовуються для обробки георадарних сканувань. Наприклад, гіперболічне (дифракційне) підсумовування, міграція Кірхгофа, фазова міграція, f-k міграція Столта та міграція на основі зворотної проєкції [18]. Кожен з них має переваги, недоліки і деякі особливості застосування. У цій роботі ми використовували міграцію Кірхгофа [19]. Для коректної роботи методу міграції необхідно оцінити матеріальні параметри середовища. У роботі [20] автори навели приклад підходів, які допомагають це зробити. Оскільки енергія електромагнітного поля, відбитого від прихованого об'єкта, була меншою, ніж відбитого поля від поверхні та інших перешкод, необхідно ретельно виконувати попередню обробку отриманих сигналів. Ефект тремтіння часу під час запису сигналу підвищує рівень перешкод у результуючому сигналі, що може призвести до поганого відновлення профілю прихованого об'єкта або навіть до помилкових спрацьовувань [21]. Автори пропонують дві специфікації, які необхідно враховувати при проектуванні антен і систем для реалістичної оцінки цього ефекту. Якість отриманих відображень від прихованих об'єктів безпосередньо залежить від рівня сторонніх перешкод. З цією метою автори в [22] демонструють методи оцінки рівня впливу відбиттів від НШС антенної системи. Не менш важливо розробити антену, яка матиме мінімальний зв'язок між передавачем і приймачем, як показано в [23].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо задачу нормального падіння плоскої електромагнітної хвилі на модель середовища. Часова залежність має вигляд гаусового імпульсу тривалістю 0,6 нс. Середовище розглядалося у двох випадках, спочатку однорідне середовище з діелектричною проникністю $\epsilon_2 = 9$ і провідністю $\sigma = 0,005$ См/м із заглибленою металевією трубою на глибині Z (Рис. 1).

Другий випадок представляє модель середовища, яке містить траншею з діелектричною проникністю $\epsilon_3=12$ (Рис. 2). В обох випадках $\epsilon_1 = 1$. Траншея має глибину 0,6 м і ширину 0,6 м. Металева труба розташована в середині траншеї. Діаметр труби становить 0,05 м, а її глибина коливається від 0,175 м до 0,425 м з кроком 0,025 м. Загалом для отримання В-скану було використано 15 зондів. Відстань між кожним 0,1 м.

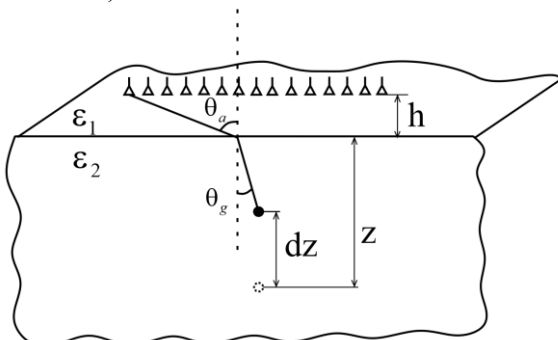


Рис. 1 Геометрія задачі з однорідним середовищем
Fig. 1 The geometry of the problem with a homogeneous medium

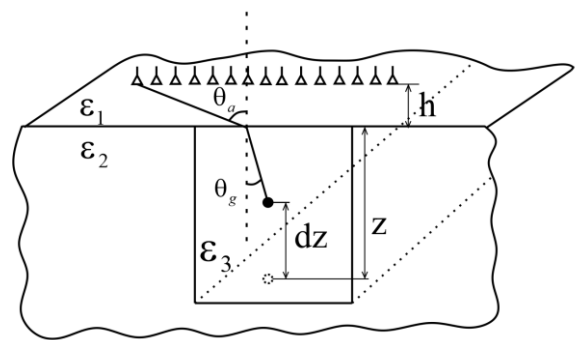


Рис. 2 Геометрія задачі з траншеєю
Fig. 2. The geometry of the problem with the trench

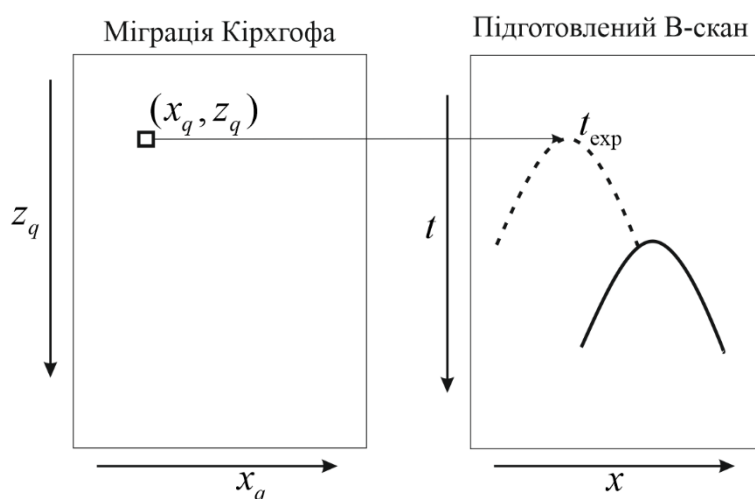


Рис. 3 Схематичне зображення процесу міграції Кірхгофа між простором зображення (x_q, z_q) та підготовленим В-сканом (x, t)

Fig. 3 Schematic illustration of the Kirchhoff migration process between the image space (x_q, z_q) and preprocessed B-scan (x, t)

У даній задачі для розрахунку часових залежностей електромагнітного поля використовувався метод FDTD. Для визначення глибини залягання металеві труби В-скани були попередньо оброблені та застосовано метод міграції Кірхгофа. Для розрахунку результуючого зображення були використані залежності (1) та (2).

$$I(x_q, z_q) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{|\bar{r}|}} \frac{\partial^{1/2} t}{\partial t^{1/2}} E(x_a, t = t_{\text{exp}}) dx_a, \quad (1)$$

$$t_{\text{exp}} = \frac{2h}{c} \sec(\theta_a) + \frac{2z_q \sec(\theta_g) \sqrt{\epsilon_2}}{c}, \quad (2)$$

де

θ - кут огляду цілі (θ_a, θ_g) ; θ_a - кут огляду в повітрі; θ_g - кут огляду в середовищі; \bar{r} - відстань від антени до точки на гіперболічній кривій; x_a - положення сканування антени; t_{exp} - очікуваний час появи гіперболи.

θ_a та θ_g можна отримати виходячи із закону Снеліуса. Результуюче зображення міграції було розраховане за алгоритмом, який описано в [24].

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО РОЗРАХУНКУ

Необроблений В-скан для моделі середовища (Рис. 1) представлений на Рис. 4. Компонента електричного поля нормована на максимальне значення електричного поля для кожного А-скану окремо. На Рис. 4 можна відзначити три важливі області: велика амплітуда падаючого Гаусового імпульсу, відбиття від межі двох середовищ з негативною амплітудою та низькоенергетичні відбиття від металеві трубки. Для кращого аналізу нам потрібно відокремити відображення від трубки. Ми віднімаємо в кожному А-скані середнє значення цієї амплітуди електричного поля протягом В-скану в кожному зворотному відліку. Слід зазначити, що такий підхід можливий лише за наявності гладкої поверхні, що не характерно для реальних даних. Інакше оброблене В-сканування матиме значні перешкоди.

Однак цього підходу достатньо для нашої модельної задачі. Результат попередньої обробки показаний на Рис. 5. Тут добре видно відбиття від трубки у вигляді параболи.

Після попередньої обробки необроблених даних ми можемо застосувати метод міграції Кірхгофа. Однак для коректної роботи методу необхідно правильно вказати всі параметри, а саме висоту приймальної системи, її крок у просторі i , головне, діелектричну проникність середовища.

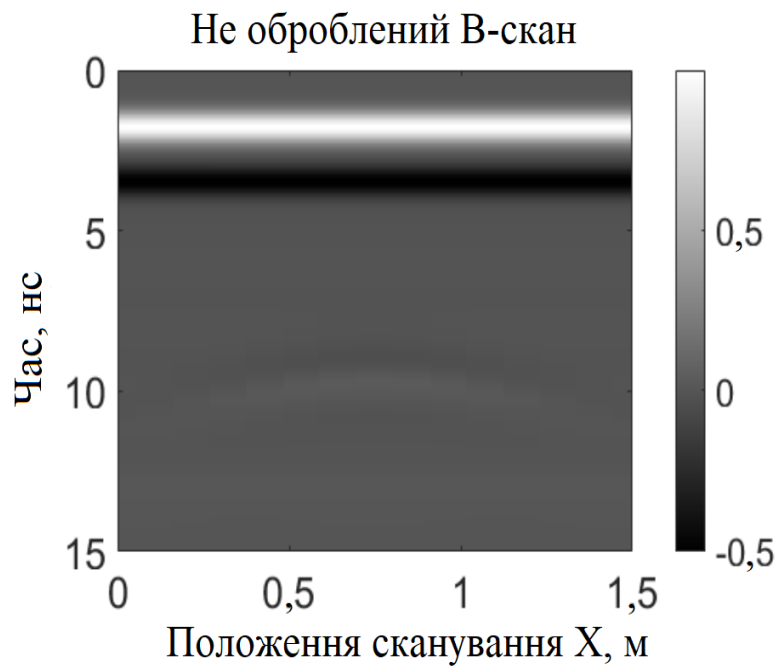
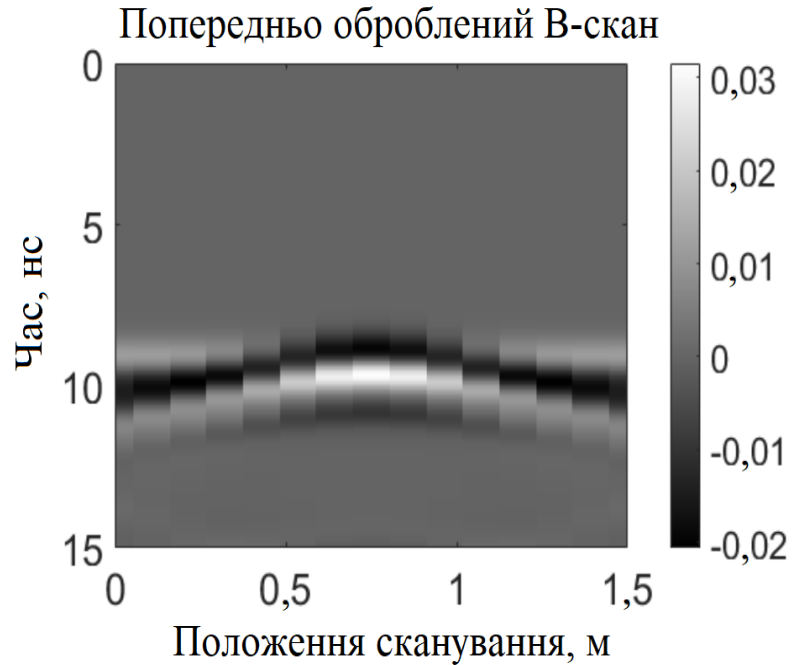


Рис. 4 Не оброблений В-скан для однорідного середовища

Fig. 4 Raw B-scan for a homogeneous medium

Рис. 5. Попередньо оброблений В-скан для однорідного середовища для глибини труби $z = 0,2$ мFig. 5 Pre-processed B-scan for a homogeneous medium for pipe depth $z = 0.2$ m

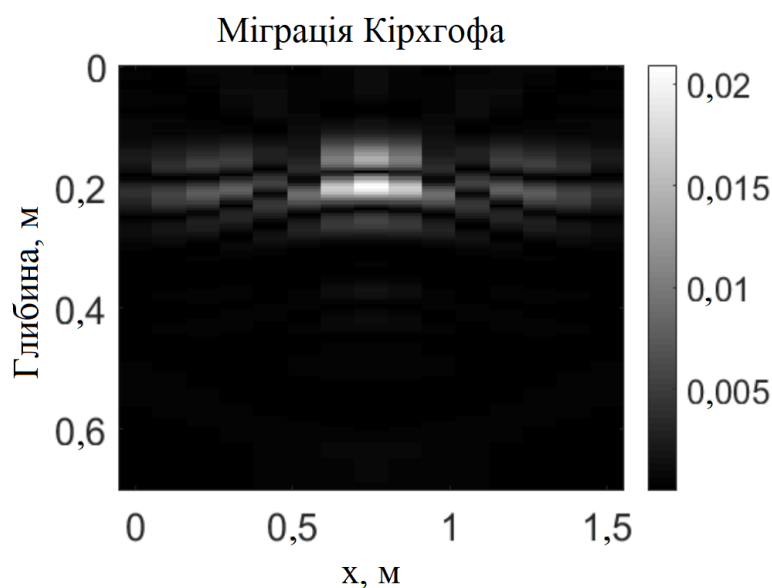


Рис. 6 Двовимірне зображення методу міграції Кірхгофа у часовій області для глибини труби $z = 0,2$ м
 Fig. 6 2D time-domain Kirchhoff migration method image for pipe depth $z = 0.2$ m

Ці параметри будуть впливати на точність визначення глибини прихованих об'єктів. На Рис. 6 наведено результат міграції для випадку однорідного середовища $\epsilon_2 = 9$ і глибини металеві труби $0,2$ м. Максимальне значення на отриманому зображенні точно відповідає координаті об'єкта.

У результаті розраховані глибини позначені на Рис. 7. Бачимо, що розраховані значення не відрізняються від фактичних. Це наслідок добре налаштованої моделі.

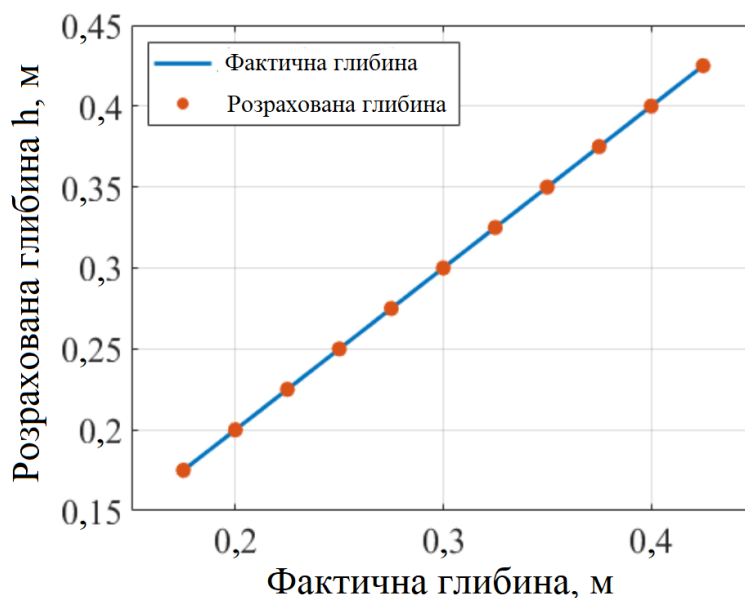


Рис. 7 Залежність розрахункової глибини труби від фактичної глибини

Fig. 7 Dependence of the calculated depth of the pipe on the actual depth

Цікавіше подивитися на роботу цього методу в разі наявної неоднорідності. Отже, ми побудували модель, яка показана на Рис. 2. Основна відмінність полягає в наявності траншеї у формі паралелепіпеда з трубою посередині. Наприклад, розраховано корпус з траншеєю $\epsilon_3 = 12$ глибиною і шириною $0,6$ м і трубою на глибині $0,3$ м. На необробленому В-скані (Рис. 8) особливих відмінностей від попередньої моделі (Рис. 4) на перший погляд не видно.

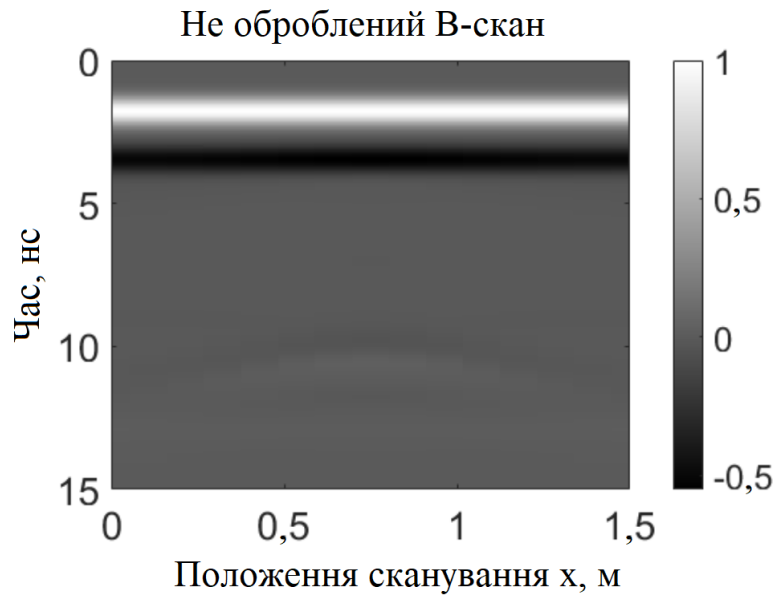


Рис. 8 Необроблений В-скан для середовища з траншеєю
Fig. 8 Raw B-scan for medium with trench

Однак після попередньої обробки (Рис. 9) ми можемо спостерігати значні флуктуації тривалістю від 2,5 нс до 5 нс. Цей проміжок часу відповідає у попередньому випадку відображенню від поверхні розділу двох середовищ.

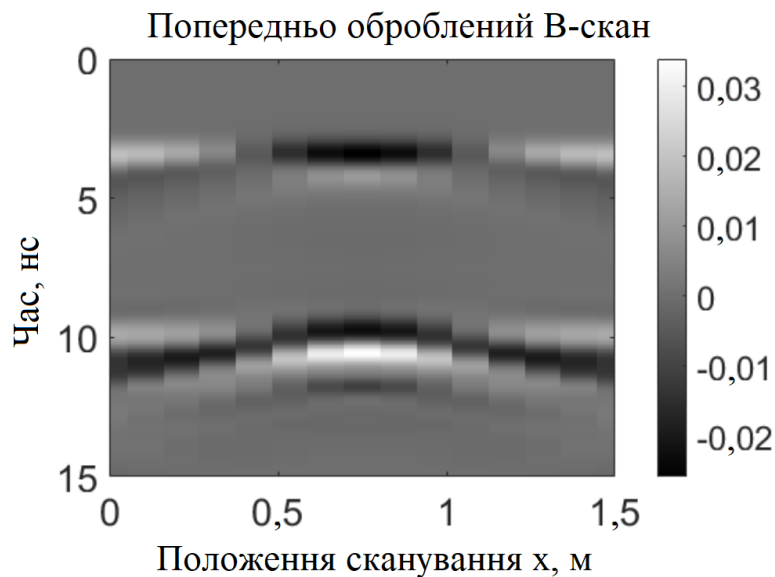


Рис. 9. Попередньо оброблений В-скан для середовища з траншеєю для глибини труби $z = 0,3$ м
Fig. 9. Pre-processed B-scan for medium with trench for pipe depth $z = 0.3$ m

Після застосування методу міграції Кірхгофа до цього В-скану ми отримали результат, представлений на Рис. 10. Важливо зазначити, що для розрахунку цього зображення параметр середовища в методі був обраний рівним діелектричній проникності траншеї $\epsilon = \epsilon_3 = 12$. Отже, максимальне значення на зображенні Рис. 10 відповідає фактичній глибині 0,3 м. Також можна відзначити наявність на зображенні Рис. 10 на невеликій глибині невеликого піку, який відноситься до траншеї. Однак завдяки відносно великій амплітуді та розміру гіперболи, утвореної трубою порівняно з траншеєю, їх можна розрізнити на отриманому зображенні. Наприклад, можна ввести поріг амплітуди, який буде вказувати на наявність прихованих металевих предметів і видалення помилкових спрацьовувань системи від наявних діелектричних неоднорідностей.

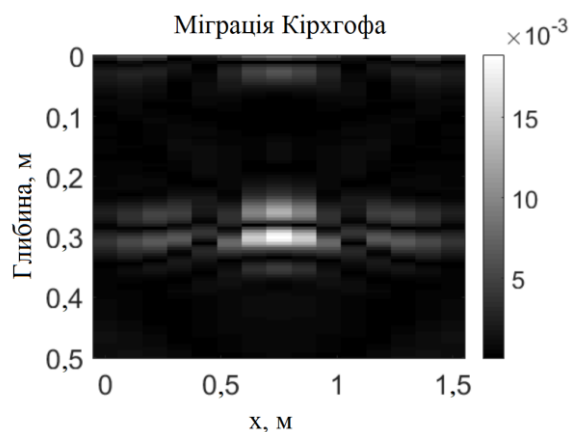


Рис. 10 Двовимірне зображення методу міграції Кірхгофа у часовій області для глибини труби $z = 0,3$ м
Fig. 10 2D time-domain Kirchhoff migration method image for pipe depth $z = 0.3$ m

Тепер буде корисно оцінити відхилення від фактичного значення глибини, якщо ми не беремо до уваги діелектричну проникність траншеї. Для цього на Рис. 11 показано розраховану залежність діелектричної проникності від глибини в методі міграції. Тут мова йде про випадок середовища $\epsilon_2 = 9$, $\epsilon_3 = 12$ і глибини металеві труби $0,3$ м. Синя крива відповідає розрахованим глибинам. Червоний ромб відповідає правильній глибині. Якби взяти значення середовища $\epsilon = 9$ без урахування траншеї, то похибка склала б $0,045$, майже діаметр труби.

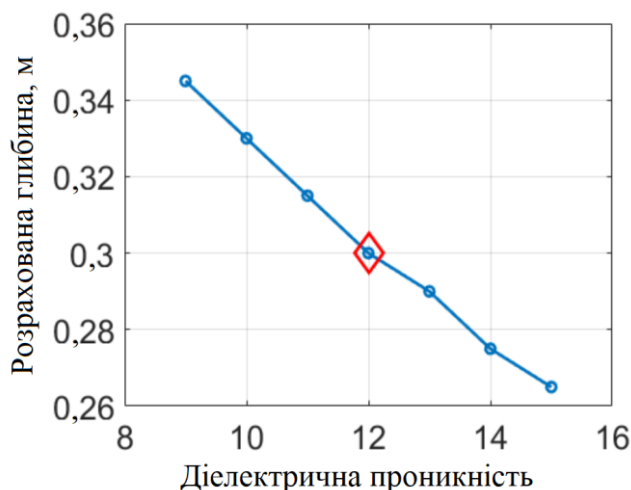


Рис. 11 Залежність розрахованої глибини для випадку з траншеєю від діелектричної проникності в розрахунку
Fig. 11 Dependence of the calculated depth for the case with a trench on the permittivity in the calculation

Дивлячись на ці результати, можна сказати, що точність визначення глибини буде прямо залежати від правильності оцінки діелектричної проникності середовища. Також зрозуміло, що відхилення від справжнього значення глибини буде тим більше, чим більше відношення реальної діелектричної проникності і закладеної в моделі.

ВИСНОВОК

У виконаній роботі було досліджено задачу виявлення та точного визначення глибини залягання металеві трубки в середовищі за допомогою методу FDTD і подальшого застосування міграції Кірхгофа до отриманих В-сканів. Було розглянуто два варіанти моделей: однорідне середовище з діелектричною проникністю $\epsilon_2 = 9$ та неоднорідне середовище, яке містить канавку з більшою діелектричною проникністю $\epsilon_3 = 12$. У першому випадку застосування методу міграції дало точне співпадіння розрахованої глибини з реальною, що свідчить про правильну реалізацію алгоритму та точне врахування параметрів середовища. У другому випадку наявність діелектричної неоднорідності вносить зміни в часові залежності сигналів, зокрема, спостерігаються флуктуації у часовому вікні від $2,5$ до 5 нс, які не дозволяють без додаткової обробки точно виділити сигнал від трубки.

Попередня обробка В-сканів, що включає видалення середньої амплітуди по кожному А-скану, дозволила ефективніше виділити корисні сигнали від металевих об'єктів. Після цього застосування методу міграції дало змогу точно локалізувати трубу навіть у складнішій конфігурації середовища. При цьому показано, що правильний вибір діелектричної проникності середовища є критично важливим для точного визначення глибини. Якщо ж не враховувати локальні зміни діелектричних властивостей, то похибка у визначенні глибини може сягати майже діаметра труби, що є неприпустимим у задачах високоточної георадарної діагностики.

Таким чином, результати роботи демонструють ефективність поєднання чисельного моделювання методом FDTD з подальшою обробкою сигналів методом міграції Кірхгофа для визначення глибини прихованих об'єктів. Водночас підкреслюється необхідність врахування неоднорідностей середовища для досягнення високої точності. Отримані результати можуть бути використані для покращення алгоритмів обробки георадарних даних, особливо у випадках складних геологічних умов.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Youn NH, Chen NC, Peter NL, Jr N. Automatic Pipe Detection Using Fully Polarimetric GPR. 2003, Las Vegas, NV July 27-30, 2003. 2003 Jan 1; <http://dx.doi.org/10.13031/2013.14036>
2. Li Y, Xu Y, Xiao X, Guan B, Ge L. Distorted Hyperbola Extraction of GPR Data using Edge Detection for Buried Non-Metallic Pipes. 2023 Jul 5;209:1–4. <https://doi.org/10.1109/IWAGPR57138.2023.10329239>
3. Utsi V. Detection of Fibre Optic cables using GPR. Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. 2014 Jun 1;465–8. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2014.6970467>
4. Liu S, Weng C, Jiao P, Wang F, Fu L, Meng X, et al. GPR signal analysis of post-tensioned prestressed concrete girder defects. Journal of Geophysics and Engineering. 2013 Jun 1;10(3):034005–5. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/10/3/034005>
5. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG, Ruban VP. Ground Penetrating Radar Application for Positioning Cracks in Non-rigid Road Pavements. Lecture notes in networks and systems. 2024 Jan 1;453–64. https://www.doi.org/10.1007/978-981-99-7569-3_37
6. Batrakov DO, Mykola Kovalov, Batrakov AG. GPR Technologies for Finding and Positioning Subsurface Cracks in Road Surfaces. 2022 Nov 14;2:686–90 <https://www.doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037078>
7. Eyoab Zegeye Teshale, Holzbauer M, Dai S. Using Ground Penetrating Radar to Monitor Seasonal Moisture Fluctuations in Base Layers of Existing Roads. Transportation Research Record. 2022 Feb 10;2676(6):371–86. <http://dx.doi.org/10.1177/03611981221074360>
8. Bechtel T, Capineri L, Pochanin G, Crawford F, Falorni P, Ruban V. Demining 4.0: Principles of the latest industrial revolution applied to humanitarian demining. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2021. 2021 Jun 11; <http://dx.doi.org/10.4133/sageep.33-159>
9. C. G. Windsor, L. Capineri, P. Falorni, "A Data Pair-Labeled Generalized Hough Transform for Radar Location of Buried Objects," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 124-127, Jan. 2014, doi: 10.1109/LGRS.2013.2248119
10. G. Borgioli, L. Capineri, P. Falorni, S. Matucci, C. G. Windsor, "The Detection of Buried Pipes From Time-of-Flight Radar Data," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 8, pp. 2254-2266, Aug. 2008, doi: 10.1109/TGRS.2008.917211.
11. G. P. Pochanin et al., "Measurement of Coordinates for a Cylindrical Target Using Times of Flight from a 1-Transmitter and 4-Receiver UWB Antenna System," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 2, pp. 1363-1372, Feb. 2020, doi: 10.1109/TGRS.2019.2946064.
12. J. Gazdag and P. Sguazzero, "Migration of seismic data," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 72, no. 10, pp. 1302-1315, Oct. 1984.
13. Caner Özdemir, Şevket Demirci, Enes Yiğit, and Betül Yılmaz, "A Review on Migration Methods in B-Scan Ground Penetrating Radar Imaging," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, Article ID 280738, 16 pages, 2014.
14. N. Smitha, D. R. Ullas Bharadwaj, S. Abilash, S. N. Sridhara and Vipula Singh, "Kirchhoff and F-K migration to focus ground penetrating radar images", Smitha et al. *Geo-Engineering* (2016) 7:4. DOI 10.1186/s40703-016-0019-6
15. O. Dumin, V. Plakhtii, O. Pryshchenko and G. Pochanin, "Comparison of ANN and Cross-Correlation Approaches for Ultra Short Pulse Subsurface Survey," 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235459.
16. I. Persanov, O. Dumin, V. Plakhtii and D. Shyrokorad, "Subsurface Object Recognition in a Soil Using UWB Irradiation by Butterfly Antenna," 2019 XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 2019, pp. 160-163, doi: 10.1109/DIPED.2019.8882577.

17. O. Dumin, V. Plakhtii, D. Shyrokograd, O. Prishchenko and G. Pochanin, "UWB Subsurface Radiolocation for Object Location Classification by Artificial Neural Networks Based on Discrete Tomography Approach," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 182-187, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879827.
18. C. Özdemir, F. Demirci, E. YiLit, B. Yilmaz, "A Review on Migration Methods in B-Scan Ground Penetrating Radar Imaging", *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2014, Article ID 280738, p. 16 <http://dx.doi.org/10.1155/2014/280738>
19. Vadym Plakhtii, Oleksandr Dumin, Oleksandr Pryshchenko. Kirchhoff Migration Method for Tube Detection with UWB GPR. 2021 Sep 8;181–4. Proceedings of International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED Volume 2021-September, Pages 181 - 1848 September 2021 26th IEEE International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED 2021 Tbilisi 8 September 2021 through 10 September 2021 Code 172372 <https://doi.org/10.1109/DIPED53165.2021.9552330>
20. T. Bechtel, S. Truskavetsky, G. Pochanin, L. Capineri, A. Sherstyuk, K. Viatkin, T. Byndych, V. Ruban, L. Varyanitzar-Roschupkina, O. Orlenko, P. Kholod, P. Falorni, A. Bulletti, L. Bossi, and F. Crawford, "Characterization of Electromagnetic Properties of In Situ Soils for the Design of Landmine Detection Sensors: Application in Donbass, Ukraine," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 10, p. 1232, May 2019.
21. S. Wagner, B. M. Worthmann and A. -V. Pham, "Minimizing Timing Jitter's Impact on Ground-Penetrating Radar Array Coupling Signals," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 6, pp. 4717-4724, June 2021, doi: 10.1109/TGRS.2020.3019976.
22. S. Wagner and A. Pham, "Structural Effect on Image Quality Degradation in Ground-Penetrating Radar Array," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019, pp. 1631-1632, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889120.
23. G. P. Pochanin, A. A. Orlenko, P. V. Kholod, S. A. Masalov and I. Y. Pochanina, "UWB antenna with high isolation between transmitting and receiving modules," 2013 IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, 2013, pp. 341-343, doi: 10.1109/ICATT.2013.6650771.
24. Sam Wagner, "2D Kirchhoff Migration for Ground Penetrating Radar Tutorial", YouTube, 3 July, 2020. [Video file]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=-Af9bwKNPfk&t=4347s&ab_channel=SamWagner

Стаття надійшла до редакції: 27 лютого 2025

Рекомендовано до друку: 8 квітня 2025

KIRCHHOFF MIGRATION METHOD IN THE PROBLEM OF DETECTING HIDDEN METAL OBJECTS USING ULTRA-WIDEBAND GPR

V.A. PLAKHTII, R.D. AKHMEDOV, O.M. DUMIN

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: Ultra-wideband (UWB) GPR systems are widely used to detect hidden objects. However, efficient data processing, especially in complex environments with heterogeneities, remains a pressing problem. The accuracy of determining the depth of such objects largely depends on the correct application of migration methods and signal preprocessing.

Objectives: To solve the model problem of determining the depth of a metal pipe in a homogeneous and heterogeneous environment using the Kirchhoff migration method for further application of the approach to real GPR data.

Materials and method: The environment model included a homogeneous region and a region with a trench containing a metal pipe. The FDTD method with a Gaussian pulse of 0.6 ns duration was used to model signal propagation. B-scan images were generated from 15 antenna positions, and the data were subjected to preprocessing and Kirchhoff migration. In the case of an inhomogeneous medium, the change in dielectric constant was taken into account.

Results: A clear image of the pipe was obtained after applying the migration method, which coincides with the actual depth of the object in both homogeneous and inhomogeneous media. In case of ignoring local changes in the dielectric constant, an error is observed that can reach a value close to the pipe diameter.

Conclusions: The Kirchhoff migration method is effective for determining the depth of metal objects in a model environment, provided that the parameters of the environment are correctly estimated

KEY WORDS: Subsurface object, georadar, ultra-wideband pulsed electromagnetic waves, Kirchhoff migration.

The article was received by the editors: February 27 2025

The article is recommended for printing: April 8 2025