

## **АНОТАЦІЯ**

дисертації на тему

### **«Використання надширокосмугових електромагнітних хвиль та штучного інтелекту для виявлення металевих та діелектричних підповерхневих об'єктів»**

здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії  
з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» кафедри прикладної електродинаміки факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

**Прищенко Олександра Андрійовича,**

Прищенко О. А. Використання надширокосмугових електромагнітних хвиль та штучного інтелекту для виявлення металевих та діелектричних підповерхневих об'єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (Фізико-математичні науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної проблеми – дослідженню експериментальних та теоретичних аспектів випромінювання та поширення нестационарних електромагнітних хвиль у середовищах зі складним просторовим розподілом. Також робота охоплює аналіз дифракції цих полів на об'єктах, розташованих у таких середовищах, застосування методів отримання та обробки відбитих сигналів, а також розробку алгоритмів розпізнавання прихованих об'єктів та визначення їхнього положення із застосуванням підходів штучного інтелекту.

Метою дисертаційної роботи є вивчення ключових фізичних процесів перетворення імпульсних надширокосмугових електромагнітних полів на межах розподілу матеріальних середовищ та прихованих об'єктах із складною структурою для надійного виявлення цих об'єктів по відбитому полю в умовах наявності шумових перешкод за допомогою підходів штучного інтелекту.

Перший розділ являє собою аналітичний огляд літератури. У ньому показано, що багато електромагнітних явищ, як природних, так і штучних, проявляють нестационарність як невід'ємну складову інформаційності оточуючого світу. Тому саме нестационарні електромагнітні поля є перспективними як для приймально-передавальних пристроїв, так і радарних систем, здатних зафіксувати суттєво більший обсяг даних про досліджуваний об'єкт шляхом аналізу відбитих хвиль. Важливою напрямком цих досліджень є застосування надширокосмугових радарів для зондування ґрунту з метою знаходження прихованих об'єктів, визначення їхнього типу та координат. Але досягнути цієї мети можливо шляхом використання спеціальних методів обробки інформації. Одним з таких, найбільш перспективних методів є підхід, що ґрунтується на використанні штучних нейронних мереж та штучного інтелекту. Їхньою рисою є слабка чутливість до похибок вимірювання, викривлень форми прийнятого сигналу через вплив шумів і неоднорідності середовища поширення хвилі. Але для з'ясування основних закономірностей перетворень нестационарних полів на границі середовища виникає необхідність аналітичного розв'язання у часовому просторі задачі падіння на неї нестационарної хвилі.

У другому розділі аналітично розв'язується нестационарна електродинамічна задача проникнення імпульсної електромагнітної хвилі із одного середовища в інше середовище без втрат. Для досягнення цієї мети з використанням граничних умов знаходяться невідомі коефіцієнти із загальних розв'язків рівнянь Клейна-Гордона, що є множниками в еволюційних коефіцієнтах. Задача поширення нестационарної імпульсної хвилі розв'язується методом еволюційних рівнянь. Загальний розв'язок рівнянь Клейна-Гордона отримується методом розділення змінних. Розв'язання неоднорідного рівняння Клейна-Гордона здійснюється методом функції Рімана. Пошук зв'язку між невідомими коефіцієнтами з розв'язаних рівнянь відбуватиметься з використанням граничних умов для тангенційних компонент полів згідно законів класичної електродинаміки.

Третій розділ присвячено застосуванню методу дискретної томографії для задач знаходження прихованих об'єктів у моделі ґрунту з використанням штучних нейронних мереж. Проводиться порівняння цього підходу з класичним методом кореляції. Було виявлено, що метод дискретної томографії забезпечує задовільні результати, часто перевершуючи метод кореляції у точності виявлення прихованих об'єктів. Завдяки цьому, подальші дослідження зосереджені саме на методі дискретної томографії. Проводиться дослідження впливу кроку сканування та часового вікна на якість розпізнавання різних об'єктів. Було встановлено, що зменшення кроку сканування покращує точність визначення координат об'єкта, але суттєво збільшує обчислювальні витрати. Також виявлено, що оптимальний розмір часового вікна залежить від характеристик об'єктів та властивостей ґрунту. Крім цього, проведено дослідження шумостійкості запропонованого алгоритму. Зокрема, було проаналізовано роботу алгоритму при наявності шуму в прийнятих сигналах. Продемонстрована важливість поєднання методів дискретної томографії з сучасними підходами машинного навчання, що дозволяє досягти значних успіхів у розпізнаванні прихованих об'єктів у складних умовах.

У четвертому розділі даного дисертаційного дослідження реалізовано максимальне наближення модельної задачі до реальних умов, що важливо для практичного застосування результатів дисертації. У якості прихованих об'єктів виступають точні моделі протипіхотних мін, що мають у своєму складі діелектрики з різними діелектричними проникностями та металеві частини різних розмірів. Це дозволяє дослідити ефективність вибраного підходу в умовах, що наближені до реальних, коли є потреба розрізнити приховані об'єкти зі схожими параметрами. Опромінювачем виступає модель реального працюючого надширокосмугового георадару, який формує з прийнятої електромагнітної хвилі сигнали, в яких мінімізований вплив відбиття хвилі від границі повітря-ґрунт, що не несе корисної для аналізу інформації. Наведені результати розпізнавання мін у неоднорідному ґрунті,

що є типовим ускладненням в роботі георадарів. Проводиться дослідження шумостійкості запропонованого підходу. Подальше покращення розпізнавання об'єктів досягнуто за допомогою сучасного підходу серед задач машинного навчання, який полягає у використанні ансамблю нейронних мереж зі структурами, які потенційно можуть дати покращення результатів класифікації.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у таких її результатах:

1. З використанням граничних умов класичної електродинаміки вперше знайдено зв'язок між еволюційними коефіцієнтами з рівнянь Клейна-Гордона, що описують падаючу, пройдену і відбиту нестационарні хвилі у першому наближенні.
2. Вперше встановлено, що за наявності гаусового шуму у прийнятих сигналах, кінцеві результати розпізнавання позицій об'єкта штучними нейронними мережами мають перевагу перед методом взаємної кореляції при малих рівнях шуму, але при значній зашумленості ці два підходи не демонструють помітні переваги один перед одним, за виключенням того, що штучні нейронні мережі функціонують на порядки швидше, особливо за умови їхньої реалізації у вигляді спеціалізованої мікросхеми.
3. Вперше за допомогою методу дискретної томографії продемонстровано підсилення інформаційних складових, відбитих від прихованого об'єкту електромагнітних хвиль, у наближенні променевого подання цих хвиль із врахуванням їх часової форми, діелектричних параметрів ґрунту, процесів на границі повітря-ґрунт та використання декількох, розподілених над ґрунтом приймальних антен.
4. Вперше визначені оптимальні параметри системи на основі методу дискретної томографії: часове вікно, кількість приймальних антен, аугментація вхідних даних і частка попередньо оброблених вхідних сигналів, за наявності шумів високих рівнів у вхідних трактах приймачів антен.
5. Вперше було оцінено якість розпізнавання методу штучних нейронних мереж для задачі виявлення різних протипіхотних мін, таких як ПМН-1, ПМН-

4 та ПФМ у неоднорідному середовищі при наявності білого шуму в прийнятих часових залежностях.

6. Вперше запропоновано новий підхід до визначення місцезнаходження прихованих об'єктів у ґрунті за допомогою колективного штучного інтелекту, що одночасно обробляє одні і ті ж часові залежності, отримані надширокосмуговим георадаром.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Встановлений зв'язок між невідомими коефіцієнтами з рівнянь Клейна-Гордона, які описують проходження нестационарних хвиль у середовище, демонструє можливість концентрації енергії електромагнітної хвилі у ґрунті, подібно до явища "електромагнітного снаряду", з метою збільшення енергії відбитої від прихованого об'єкту хвилі та, відповідно, покращення його розпізнавання.

2. Аналіз розпізнавання прихованих об'єктів штучними нейронними мережами та кореляційним підходом дозволяє суттєво покращити їх виявлення за умови їхнього одночасного застосування.

3. Застосування методу дискретної томографії для отримання додаткового набору вхідних даних для штучної нейронної мережі за рахунок використання особливостей фізичних процесів при поширенні імпульсних хвиль у ґрунті зменшує обсяг необхідних обчислювальних ресурсів без втрати точності розпізнавання прихованих об'єктів, що є корисним для нових радарів, здатних в реальному часі виявляти приховані небезпечні об'єкти.

4. Проведені дослідження з використання штучних нейронних мереж для виявлення протипіхотних мін, в тому числі в неоднорідному середовищі, дозволяє створити нові унікальні системи розмінування, спроможні виявляти приховані вибухові пристрої, що практично не мають у складі металевих частин.

5. Запропонований новий підхід до визначення місцезнаходження прихованих об'єктів у ґрунті за допомогою колективного штучного інтелекту з даних, отриманих надширокосмуговим георадаром, дозволяє підвищити не

тільки точність місця розташування об'єкту, але і якість його розпізнавання, що має практичне значення для геологічних досліджень, будівництва та військових застосувань.

**Ключові слова:** дифракція, метод кінцевих різниць (FDTD), нейронна мережа, електромагнітна хвиля, випромінювання, розсіювання електромагнітних хвиль, радіолокація, глибока нейронна мережа, глибоке навчання, штучний інтелект, розсіювання.

## ABSTRACT

Pryshchenko O. A. The use of ultra-wideband electromagnetic waves and artificial intelligence for detecting metal and dielectric subsurface objects.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 105 - Applied Physics and Nanomaterials (Physical and Mathematical Sciences) - V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving the actual issue of investigating the experimental and theoretical aspects of radiation and propagation of transient electromagnetic waves in the media with complex spatial distribution. The work also covers the analysis of diffraction of these fields on objects located in these media, the application of methods for obtaining and processing reflected signals, and the development of algorithms for recognizing hidden objects and determining their position using artificial intelligence approaches.

The purpose of the dissertation is to study the key physical processes of transforming impulse ultra-wideband electromagnetic fields at the boundaries of material media and hidden objects with complex structures for the reliable detection of these objects based on the reflected field in the presence of noise interference using artificial intelligence approaches.

The first chapter represents an analytical review of the literature. It demonstrates that many electromagnetic phenomena, both natural and artificial, exhibit non-stationarity as an integral component of the informational nature of the surrounding world. Therefore, transient electromagnetic fields are promising for both receiving-transmitting devices and radar systems capable of capturing significantly more data about the investigated object through the analysis of reflected waves. An important direction of these studies is the application of ultra-wideband radars for subsurface surveys to find hidden objects, determine their type and coordinates. However, achieving this goal is possible through the use of special information processing methods. One of the most promising methods is the approach based on the use of artificial neural networks and artificial intelligence. Their feature

is the low sensitivity to measurement errors, distortions in the shape of the received signal due to the influence of noise and the inhomogeneity of the wave propagation medium. However, to clarify the main peculiarities of transient field transformations at the boundary of the medium, it is necessary to analytically solve the problem of a transient wave falling on it in the time domain.

In the second chapter, the transient electrodynamic problem of the penetration of the impulse electromagnetic wave from one medium into another lossless medium is analytically solved. To achieve this goal, the unknown coefficients from the general solutions of the Klein-Gordon equations, which act as multipliers in the evolutionary coefficients, are found using boundary conditions. The problem of the propagation of a transient impulse wave is solved using the method of evolutionary equations. The general solution of the Klein-Gordon equations is obtained by the method of separation of variables. The solution of the inhomogeneous Klein-Gordon equation is obtained using the Riemann function method. The connection between the unknown coefficients from the solved equations is sought using the boundary conditions for the tangential components of the fields according to the laws of classical electrodynamics.

The third chapter is dedicated to the application of the discrete tomography method for the tasks of finding hidden objects in a soil model using artificial neural networks. This approach is compared with the classical correlation method. It was found that the discrete tomography method provides satisfactory results, often surpassing the correlation method in the accuracy of detecting hidden objects. Consequently, further research focuses on the discrete tomography method. The influence of the scanning step and time window on the quality of recognition of different objects is studied. It was found that reducing the scanning step improves the accuracy of determining the object's coordinates, but significantly increases computational costs. Additionally, it was discovered that the optimal size of the time window depends on the characteristics of the objects and the properties of the soil. Furthermore, the noise resistance of the proposed algorithm is studied. In particular, the performance of the algorithm in the presence of noise in the received signals is



analyzed. The importance of combining discrete tomography methods with modern machine learning approaches is demonstrated, allowing for significant advancements in recognizing hidden objects in complex conditions.

In the fourth chapter of this dissertation, the model problem approaches maximally to real conditions, which is crucial for the practical application of the dissertation's results. The hidden objects are precise models of anti-personnel mines, consisting of dielectrics with various dielectric permittivities and metal parts of different sizes. This allows the investigation of the chosen approach's effectiveness under conditions close to reality, where there is a need to distinguish hidden objects with similar parameters. The radiator is a model of real operating ultra-wideband ground-penetrating radar, which forms signals from the received electromagnetic wave that minimize the impact of wave reflection from the air-soil boundary, which does not carry useful information for analysis. The results of mine detection in heterogeneous soil, which is a typical complication in the operation of ground-penetrating radars, are presented. The noise resistance of the proposed approach is studied. Further improvement in object recognition is achieved using a modern approach within machine learning tasks, involving the use of an ensemble of neural networks with structures that have the potential to improve classification results.

The scientific novelty of the dissertation is in the following results:

1. Using the boundary conditions of classical electrodynamics, the relationship between the evolutionary coefficients from the Klein-Gordon equations, which describe the incident, transmitted, and reflected non-stationary waves in the first approximation, was found for the first time.
2. It was established for the first time that in the presence of Gaussian noise in the received signals, the final results of object position recognition by artificial neural networks have an advantage over the cross-correlation method at low noise levels. However, under significant noise presence, these two approaches do not show noticeable advantages over each other, except that artificial neural networks operate orders of magnitude faster, especially when implemented in specialized microchips.

3. For the first time, the approach of discrete tomography demonstrated the enhancement of the informational components of electromagnetic waves reflected from a hidden object, using the ray approximation of these waves while considering their temporal form, dielectric parameters of the soil, processes at the air-soil boundary, and the use of several distributed receiving antennas above the soil.
4. The optimal parameters of the system based on the discrete tomography method were determined for the first time: time window, number of receiving antennas, input data augmentation, and the proportion of pre-processed input signals, in the presence of high-level noise in the input tracts of the antenna receivers.
5. The quality of recognition by the artificial neural network method for detecting various anti-personnel mines, such as PMN-1, PMN-4, and PFM, in a heterogeneous environment with the presence of white noise in the received time dependencies was evaluated for the first time.
6. A new approach to determining the location of hidden objects in the soil using collective artificial intelligence, which simultaneously processes the same time dependencies obtained by ultra-wideband ground-penetrating radar, was proposed for the first time.

Practical significance of the results:

1. The relationship between the unknown coefficients from the Klein-Gordon equations is established, which describe the passage of transient waves into a medium, demonstrates the possibility of concentrating the energy of the electromagnetic wave in the soil, similar to the phenomenon of an “electromagnetic projectile,” to increase the energy of the wave reflected from the hidden object and, consequently, improve its recognition.
2. The analysis of recognizing hidden objects using artificial neural networks and the correlation approach allows a significant improvement in their detection when applied simultaneously.
3. The application of the discrete tomography approach to obtain the additional set of input data for the artificial neural network by utilizing the physical processes during the propagation of impulse waves in the soil reduces the necessary

computational resources without losing the accuracy of recognizing hidden objects. This is beneficial for new radars capable of detecting hidden dangerous objects in real time.

4. The carried out research on artificial neural networks for detecting anti-personnel mines, including in a heterogeneous environment, allows the creation of new unique demining systems capable of detecting hidden explosive devices that practically do not contain metal parts.

5. The new proposed approach to determining the location of hidden objects in the soil using collective artificial intelligence with data obtained from an ultra-wideband ground-penetrating radar not only increases the accuracy of the object's location, but also improves the quality of its recognition. This has practical significance for geological research, construction, and military applications.

**Keywords:** diffraction, finite-difference time-domain method (FDTD), neural network, electromagnetic wave, radiation, electromagnetic wave scattering, radiolocation, deep neural network, deep learning, artificial intelligence, scattering.

Аспірант

Олександр ПРИЩЕНКО

Науковий співробітник,  
Доцент по кафедрі прикладної електродинаміки  
Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна,  
доктор фізико-математичних наук,  
лауреат Державної премії в галузі  
науки і техніки

\_\_\_\_\_Олександр ДУМІН