

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-03>

УДК 537.86

## МЕТОД ДИСКРЕТНОЇ ТОМОГРАФІЇ ПРИ ОБРОБЦІ ДАНИХ НАДШИРОКОСМУГОВОЇ ПІДПОВЕРХНЕВОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ ШТУЧНОЮ НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ

О. М. Думін<sup>1</sup>, В. А. Плахтій<sup>1</sup>, О. А. Прищенко<sup>1</sup>, Д. В. Широкоград<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

E-mail: [dumin@karazin.ua](mailto:dumin@karazin.ua)

<sup>2</sup>Запорізький національний технічний університет, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64

E-mail: [hoiveringphoenix@gmail.com](mailto:hoiveringphoenix@gmail.com)

Надійшла до редакції 27 вересня 2018 р.

**Актуальність.** Розпізнавання об'єктів під поверхнею землі набуло надзвичайної актуальності через низку практичних застосувань у будівництві, археології та енергетичній галузі. Перспективний напрямок розвитку підповерхневого зондування полягає у побудові систем виявлення вибухових речовин і предметів за допомогою надкоротких електромагнітних імпульсів, бо саме вони дозволяють виявляти об'єкти, що не мають металевих складових.

**Мета роботи.** Ця робота має на меті покращити роботу штучної нейронної мережі (ШНМ) для визначення глибини об'єкта, який знаходиться під землею, шляхом попередньої обробки вхідної інформації на основі підходу дискретної томографії.

**Матеріали та методи.** Запропоновано вирішити проблему визначення глибини розташування підповерхневого об'єкту шляхом опромінення поверхні плоскою імпульсною електромагнітною хвилею та аналізу часових залежностей амплітуди відбитої хвилі в еквідистантних точках над поверхнею землі. Аналіз прийнятих сигналів здійснюється ШНМ покращеної структури із використанням додаткових даних, що отримані завдяки знанням часових залежностей прийнятих сигналів та матеріальних параметрів діелектричної структури, що досліджується. Задача поширення плоскої хвилі із часовою залежністю у вигляді гаусового імпульсу в підповерхневому середовищі, що містить ідеальнопровідний об'єкт, розв'язана числовим методом скінченних різниць у часовому просторі. Амплітуди напруженості електричного поля над землею в заданих просторових точках та моментах часу утворюють першу частину набору вхідних даних для багатопарової ШНМ. Друга частина вхідних даних включає лінійну суперпозицію даних з першої частини набору з коефіцієнтами, що отримані на основі підходу дискретної томографії та променевого методу.

**Результати.** Робота ШНМ перевірена на прикладі опромінення імпульсною електромагнітною хвилею ідеально провідного циліндричного об'єкту, розташованого всередині землі на заданій глибині. Було досліджено точність визначення глибини об'єкту та вплив другої частини вхідних даних на точність розпізнавання глибини для декількох тестових випадків.

**Висновки.** Застосування методу дискретної томографії дає змогу зменшити обсяг вхідних даних при збереженні відмінних апроксимаційних характеристик ШНМ.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** штучна нейронна мережа, імпульсна електромагнітна хвиля, підповерхневий радар, класифікація об'єктів, томографія.

## DISCRETE TOMOGRAPHY METHOD FOR THE PROCESSING OF ULTRAWIDEBAND SUBSURFACE RADIOLOCATION BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

<sup>1</sup>O. M. Dumin, <sup>1</sup>V. A. Plakhtii, <sup>1</sup>O. A. Prishchenko, <sup>2</sup>D. V. Shyrokograd

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61000, Ukraine

<sup>2</sup>Zaporizhia National Technical University, 64, Zhukovskoho St, Zaporizhzhia, 69061, Ukraine

**Background:** Recognition of subsurface objects became of a great importance because of the number of practical approaches in construction, archeology and energy branch. A perspective direction for the development of subsurface radiolocation lays in the construction of systems of detection of explosives and objects using ultrashort electromagnetic impulses, since they are the ones that can detect objects without metal components.

**Objectives:** The main purpose of this work is to improve the work of artificial neural network (ANN) for the determination of subsurface object's depth by preliminary processing of input information on the basis of the discrete tomography method.

**Materials and methods:** The solving of a problem of determination of the location depth of subsurface object by means of irradiation by a plane electromagnetic wave and analysis of time dependences of amplitude of reflected wave at equidistant points above the ground surface is proposed. Analysis of received signals is carried out by artificial neural network of improved structure with the usage of additional data obtained due to knowledge of time dependences of received signals and material parameters of dielectric structure under investigation. The problem of Gaussian pulse propagation in the subsurface medium with objects is solved numerically by Finite Difference Time Domain method. Amplitudes of the electric field strength above the ground in given spatial points and time moments

form the first part of set of input data for multilayered artificial neural network. The second part of input data includes a special linear superposition of data from the first part with coefficients received on the basis of the discrete tomography approach and the ray tracing method.

**Results:** The work of the artificial neural network is verified by the problem of impulse electromagnetic wave irradiation of the cylindrical perfectly conducting object located inside the ground at given depth. The precision of the determination of the object depth and the influence of the second part of input data are investigated for test cases.

**Conclusion:** Application of discrete tomography method allows to decrease the volume of input data with saving the good approximative characteristics of ANN.

**KEY WORDS:** artificial neural network, impulse electromagnetic wave, subsurface radar, object classification, tomography

## МЕТОД ДИСКРЕТНОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

А. Н. Думин<sup>1</sup>, В. А. Плахтий<sup>1</sup>, А. А. Прищенко<sup>1</sup>, Д. В. Широкоград<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харьковський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61000, г. Харків, пл. Свободи, 4

<sup>2</sup> Запорізький національний технічний університет, 69063, г. Запоріжжя, ул. Жуковського, 64

**Актуальность.** Распознавание объектов под поверхностью земли приобрело большую актуальность благодаря целому ряду практических применений в строительстве, археологии и энергетической отрасли. Перспективное направление развития подповерхностного зондирования заключается в построении систем выявления взрывчатых веществ и предметов с помощью сверхкоротких электромагнитных импульсов, поскольку именно они позволяют обнаруживать объекты, не имеющие металлических составляющих.

**Цель работы.** Целью этой работы является улучшение работы искусственной нейронной сети (ИНС) для определения глубины объекта, который находится под землей путем предварительной обработки информации от входного сигнала на основе подхода дискретной томографии.

**Материалы и методы.** Предложено решить проблему определения глубины расположения подповерхностного объекта путем облучения поверхности плоской импульсной электромагнитной волной и анализа временных зависимостей амплитуды отраженной волны в эквидистантных точках над поверхностью земли. Анализ принятых сигналов осуществляется ИНС улучшенной структуры с использованием сведений, полученных благодаря знаниям временных зависимостей принятых сигналов и материальных параметров исследуемой диэлектрической структуры. Задача распространения плоской волны с временной зависимостью в виде гауссова импульса в подповерхностной среде, содержащей идеальнопроводящий объект, решена численным методом конечных разностей во временной области. Амплитуды напряженности электрического поля над землей в заданных пространственных точках и моментах времени образуют первую часть набора входных данных для многослойной ИНС. Вторая часть входных данных включает линейную суперпозицию данных из первой части набора с коэффициентами, полученные на основе подхода дискретной томографии и лучевого метода.

**Результаты.** Работа ИНС проверена на примере облучения импульсной электромагнитной волной идеально проводящего цилиндрического объекта, расположенного внутри земли на заданной глубине. Была исследована точность определения глубины объекта и влияние второй части входных данных на точность распознавания глубины для нескольких тестовых случаев.

**Выводы.** Применение метода дискретной томографии позволяет уменьшить объем входных данных при сохранении отличных аппроксимационных характеристик ИНС.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** искусственная нейронная сеть, импульсная электромагнитная волна, подповерхностный радар, классификация объектов, томография.

Надширокосмугові радары мають кілька переваг у порівнянні з традиційними, включаючи кращу просторову роздільну здатність та більш глибоке проникнення у середовище з втратами. Наприклад, георадари на основі ультракоротких імпульсів допомагають вирішити проблему неруйнівного контролю дорожнього покриття та інших будівельних конструкцій. Також важливим завданням підповерхневих радарів є ідентифікація підземних об'єктів та отримання їхнього зображення і точного положення. Цю задачу можна вирішити за допомогою спеціальних конструктивних особливостей приймальної антенної системи. Наприклад, у роботі [1] порівнюються дві диференціальні системи із симетричними приймальними антенами, розміщеними вздовж двох ортогональних напрямків відносно передавальної антени. Ще одна важлива проблема, що може бути вирішена застосуванням надширокосмугових радарів – виявлення живих об'єктів за непрозорою стіною. Представлено декілька підходів для вирішення цієї задачі, наприклад, у [2] продемонстрована діюча модель пристрою, що реалізує цей підхід.

Хороша чутливість надширокосмугових радарів до металевих та діелектричних об'єктів забезпечує його застосування для гуманітарного розмінування. Щороку понад 20000 цивільних осіб гинуть через сотні мільйонів вибухових пристроїв, залишених в зонах діючих і минулих військових конфліктів. В роботі [3] представлені вимоги, підходи та варіанти роботизованої радарної системи для пошуку мін. Варто також відзначити ефективність використання нейронних мереж для цього класу задач, як описано

в [4–6]. Щоб відрізнити корисний відбитий сигнал від завад, пропонується використовувати вейвлет-перетворення та інші методи обробки. Остаточний результат фільтрації отримують після процедури відбору ознак, із подальшою оптимізацією генетичним алгоритмом та штучною нейронною мережею (ШНМ) [4]. Імпульсна характеристика об'єкта, опроміненого коротким імпульсним сигналом, є його унікальним відбитком, підписом [5]. На цьому заснований ще один метод розпізнавання прихованих предметів. Хороші результати виявлення об'єктів були досягнуті у закритих приміщеннях за допомогою багатопарового перцептрона як нейронної мережі та надширококутного сигналу із дозволеного для імпульсів частотного діапазону (3-10 ГГц) [5]. Важливо зазначити, що зміна напрямку поляризації відбитого електромагнітного поля порівняно з падаючим може бути додатково використана як характерна особливість певних підповерхневих неоднорідностей [6].

Існує сучасна тенденція використання неметалевих ПВХ труб для прокладання комунікацій у містах, але це ускладнює задачу виявлення розташування подібних предметів традиційними засобами. Показано, що імпульсний георадар може успішно виявляти труби навіть у найскладнішому випадку підвищеної вологості ґрунту [7]. Візуалізація пластикових труб нейронною мережею була здійснена за вологості 20%.

Велика кількість відбиттів між частинами об'єкта обумовлює складний характер часової форми амплітуди електромагнітного поля над землею [8]. Для такої задачі підхід, заснований на ШНМ, є природним способом уникнути математичної складності для отримання необхідних результатів. Хоча робота справжнього нейрона дуже складна і залежить від низки причин, її найпростіша модель, запропонована Хеббом [9], дає хороші результати багатовимірної апроксимації реальних залежностей. Навіть узгодження антени та поверхні землі з різними електричними параметрами можна покращити за допомогою ШНМ. Зазвичай, поверхня землі розташована у ближній зоні антени, тому діелектричні характеристики ґрунту мають великий вплив на параметри антен. Існують динамічні антенні системи, які здатні адаптувати вхідний опір залежно від зміни висоти антени над землею та типу ґрунту [10]. Це дає змогу максимізувати передачу потужності від генератора до об'єкту, що збільшує ефективність випромінювання енергії антени в землю.

ШНМ має здатність отримувати необхідну інформацію в процесі навчання з усіх видів вхідних даних, але найбільш цінним в них є можливість швидкого отримання правильної відповіді через малу кількість математичних операцій, які можна виконувати паралельно в шарах ШНМ. Використання ШНМ інших структур, які краще відповідають особливостям задачі, впровадження більш глибоких мереж дають кращі результати в розпізнаванні параметрів об'єкту. Швидка робота ШНМ в задачі, що розглядається, забезпечується використанням амплітуди електричного поля в різні моменти часу в якості вхідних даних для ШНМ [11].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Плоска електромагнітна хвиля опромінює гауссовим імпульсом тривалістю 0.6 нс поверхню землі з металевими та діелектричними неоднорідностями всередині. Напруженість електричного поля вимірюється імпульсними антенами, що розташовані на висоті 250 мм над межею розподілу середовищ. Земля представлена однорідною речовиною з проникністю  $\epsilon = 9$  та провідністю  $\sigma = 0,005$  См/м. Кількість антен або просторових точок для прийому поля однією антеною, зміщених на 100 мм одна від одної паралельно площині розподілу середовищ, становить 15. Чисельний розрахунок проводиться для випадків без неоднорідностей всередині землі та з ідеально провідною трубою радіусу 25 мм. Глибина розміщення центру труби змінюється від 175 мм до 425 мм з просторовим кроком 25 мм. Поздовжня вісь труби орієнтована перпендикулярно напрямку руху антени або розташуванню антен.

Часова форма амплітуди напруженості електричного поля, прийнятої кожною антеною, дискретизована і представлена у вигляді 500 часових точок з кроком 30 пс. Таким чином, перша частина вхідних даних містить 7500 значень для 7500 елементів вхідного шару ШНМ. Друга частина вхідних даних обчислюється з першої частини за алгоритмом, що наведений нижче. Вихідний шар містить 12 нейронів, які формують одиничний вихідний сигнал, коли труба знаходиться на відповідній глибині в діапазоні від 175 до 425 мм з кроком 25 мм, крім останнього, дванадцятого, який сигналізує про відсутність труби. Як правило, нейрони в використаній ШНМ мають сигмоїдну функцію збудження. Задача вирішується в два етапи: прямий чисельний розрахунок електродинамічної задачі з метою отримати поля в усіх точках простору та класифікація отриманих часових залежностей нейронною мережею відповідно до обрахованих глибин розташування труби.

### РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ

Задача взаємодії плоскої імпульсної електромагнітної хвилі з землею та неоднорідностями всередині розв'язується числовим методом скінченних різниць у часовому просторі (FDTD) [13]. Цей підхід дозволяє отримати суттєве узгодження часових форм відповідної математичної моделі з реальними часовими формами, що отримуються експериментально, без серйозних проблем з описом неоднорідностей, об'єктом розпізнавання, його характеристиками, параметрами ґрунту тощо. Недолік методу – необхідність потужного процесора, великої кількості оперативної пам'яті та значного часу обчислення. Типові часо-просторові форми, отримані числовим обчисленням, продемонстровані в [14]. Основна особливість залежностей – наявність впливу об'єкта в прийнятих сигналах різних антен. Іншою особливістю залежностей є слабкий контраст об'єкту та велика просторова тривалість опроміненого імпульсу як наслідок необхідності досягнення значної глибини проникнення електромагнітної хвилі. Це показано на Рис. 1, де часова залежність нормованих амплітуд електричного поля над землею в різних точках по осі ОХ зображена для випадку металеві труби, зануреної на глибину 275 мм. Тут зображена збільшена область відбиття від труби для різних точок спостереження. Видно, що часові залежності у різних зондів на цьому часовому проміжку мають невеликі амплітуди порівняно з максимумом падаючої хвилі. Спостерігаються непередбачувані зміни форми прийнятого сигналу під різними кутами розсіювання. Для використаного тут співвідношення між діаметром труби та просторовою тривалістю падаючого імпульсу візуально важко визначити положення необхідного об'єкту з хорошою точністю.

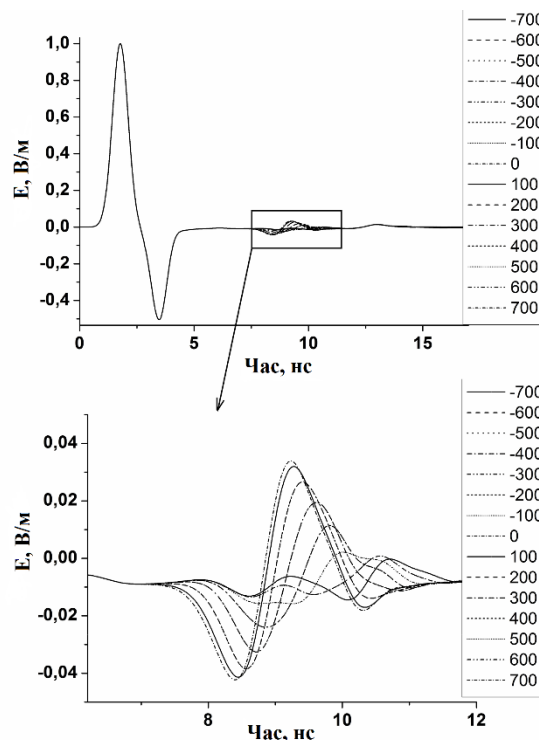


Рис. 1. Залежність нормованих амплітуд напруженості електричного поля над землею в різних точках вздовж осі ОХ, що розрахована для випадку однорідної речовини з проникністю  $\epsilon = 9$  та провідністю  $\sigma = 0,005$  См/м з металеві трубою, зануреної на 275 мм.

### ПОБУДОВА СТРУКТУРИ ШНМ

Для побудови кращої структури ШНМ, ніж використаної раніше [14], пропонується додати нові вхідні дані як другу частину набору вхідних даних. Ідея її побудови заснована на підході дискретної томографії [12]. Двовимірний переріз підземної області вздовж напрямку руху приймальної антени представлений у вигляді набору квадратів, які можуть розсіювати падаюче електромагнітне поле. На Рис. 2 зображено цей переріз, де середовище 1 – це повітря, середовище 2 – ґрунт,  $dR$  – відстань між приймальними антенами,  $h1$  – її висота над поверхнею землі,  $h20$  – глибина першого шару дискретних розсіювачів,  $dH$  та  $dS$  – відстані між ними в глибину та вздовж, відповідно,  $\theta_1$  і  $\theta_2$  є кутами заломлення

та падіння для розсіяного поля у променевому наближенні. Наша основна ідея підходу полягає в обробці даних з усіх антен таким чином, щоб кожен квадрат в перерізі отримував власний внесок з урахуванням затримки хвилі в часі та її згасання. Згасання вважається пропорційним довжині шляху як перше наближення до експоненціального закону. Отже, використовуючи променевий підхід, розсіювач у формі квадрата може бути замінений на точку в його центрі.

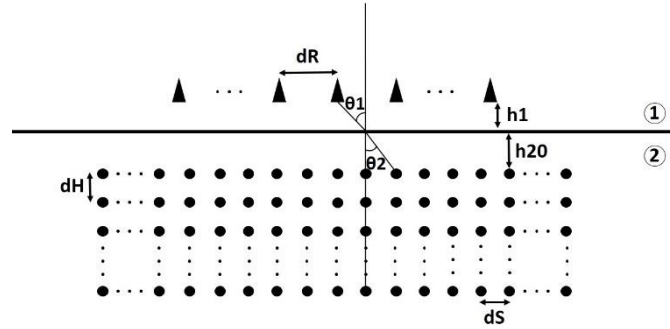


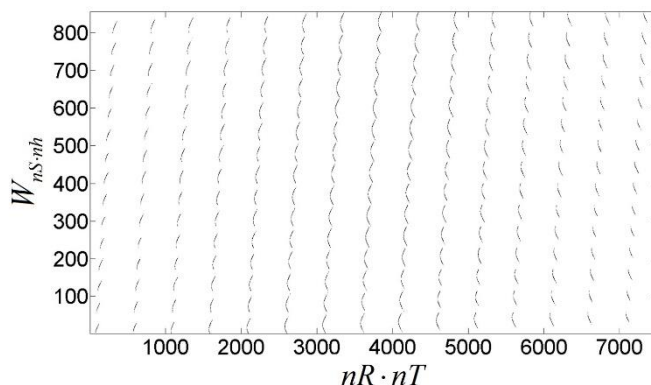
Рис. 2. Вертикальний переріз геометрії задачі, де середовище 1 – повітря, середовище 2 – ґрунт,  $dR$  – відстань між приймальними антенами,  $h1$  – її висота над поверхнею землі,  $h20$  – глибина першого шару дискретних розсіювачів,  $dH$  та  $dS$  – відстані між ними вглиб та вздовж, відповідно,  $\theta_1$  і  $\theta_2$  є кутами заломлення та падіння для розсіяного поля.

Гіпотеза щодо ефективності такого підходу ґрунтується на максимізації сигналів у просторових точках, де розміщені розсіювачі. Недоліки такого підходу, що полягають у нормуванні сигналів, незнанні точного згасання падаючої хвилі на різних глибинах, експоненційному зменшенні амплітуди в середовищах із втратами та різним індексом згасання для різної специфічної провідності речовин, компенсуються навчанням ШНМ та автоматичним регулюванням підсилення в антенних підсилювачах на практиці.

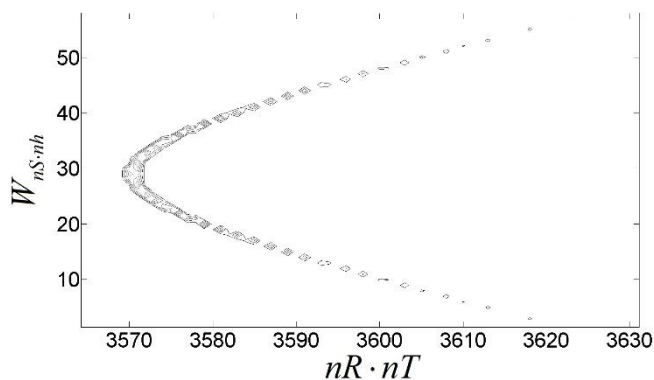
Нехай  $N_R$  – кількість приймачів,  $N_T$  – кількість часових точок амплітуди від кожного з них, тоді перша частина масиву вхідних даних  $I$  має розмір  $N_R N_T$ . Друга частина вхідних даних для ШНМ, що позначена як  $\tilde{I}$ , має розмір масиву  $N_S N_H$ , де  $N_S$  – кількість просторових точок у горизонтальному напрямку,  $N_H$  – кількість точок у вертикальному напрямку (див. Рис. 2). Перетворення  $I$  в  $\tilde{I}$  проводиться матрицею  $W$ :

$$\tilde{I} = \begin{pmatrix} \tilde{I}_1 \\ \vdots \\ \tilde{I}_{i_h \cdot N_s + i_t} \\ \vdots \\ \tilde{I}_{(N_s \cdot N_h)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11} & \cdots & \cdots & \cdots & W_{1(N_R \cdot N_T)} \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \cdot & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ W_{(N_s \cdot N_h)1} & \cdots & \cdots & \cdots & W_{(N_s \cdot N_h)(N_R \cdot N_T)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{i_r \cdot N_T + i_t} \\ \vdots \\ I_{(N_T \cdot N_R)} \end{pmatrix}$$

Елементи матриці  $W$  відображають зв'язок між прийнятими сигналами в антенах і просторовими точками з урахуванням шляху променя від точки розсіювання через границю розподілу до антени. Вказані сигнали згасають при розповсюдженні через загальну довжину шляху, довжину шляху в середовищі із втратами та їх зв'язку згідно закону Снелюса. Перетворення, здійснене матрицею  $W$ , може бути використаним додатковою частиною вхідних даних ШНМ. Отже, елементи  $W$  залежать від  $N_R$ ,  $N_T$ ,  $N_S$ ,  $N_H$ ,  $dR$ ,  $h1$ ,  $h20$ ,  $dH$ ,  $dS$ , електричних та магнітних параметрів носія та діаграми напрямленості антени. Оскільки ми використовуємо дискретний набір даних у просторі і часі, вплив яких неможливо точно врахувати, ми застосовуємо лінійну інтерполяцію для розрахунку  $\tilde{I}$  з  $I$ . Це проілюстровано на Рис. 3, де точки позначають існування зв'язку між цими масивами для випадку  $N_R = 15$ ,  $N_T = 500$ ,  $N_S = 57$ ,  $N_H = 12$ ,  $dR = 100$  мм,  $h1 = 250$  мм,  $h20 = 125$  мм,  $dH = dS = 25$  мм. Видно, що в нових даних  $\tilde{I}$  використовувалася дуже мала частина вхідних даних  $I$ .

Рис. 3. Ненульові елементи матриці  $W$ .

Для більш детальної ілюстрації характеру зв'язку, що відображають елементи матриці  $W$ , така ж залежність, як показано на Рис. 3, зображена на Рис. 4 у збільшеному вигляді. Відбувається зменшення значень  $W$  при змищенні від максимуму до кінцівок гілок. Отже, це повторює типову просторову картину радіолокаційного обстеження підземної поверхні [15], яка є природною. Більш віддалена антена від підземної точки надає слабший вплив, виражений у значеннях  $W$ , що нагадує принцип відомого методу оптимальної лінійної фільтрації сигналів.

Рис. 4. Елементи матриці  $W$  для одного шару підземних точок.

Як і очікувалось, застосування гаусової падаючої хвилі також дає плавне збільшення амплітуди поля в деякій просторовій точці, що проілюстровано на Рис. 5, де представлені значення  $\tilde{I}$ . Маючи лише 15 прийнятих сигналів і велику тривалість імпульсу, ми отримуємо помітний пік в одній точці і послаблюємо сигнали в сусідніх точках, де немає розсіювачів, як це відбувається в томографії. Хоча рисунок показує, що немає ідеального сумування внесків від різних антен, але ми припускаємо, що це дозволить ШНМ покращити результат розпізнавання, оскільки це буде його другою допоміжною частиною вхідних даних.

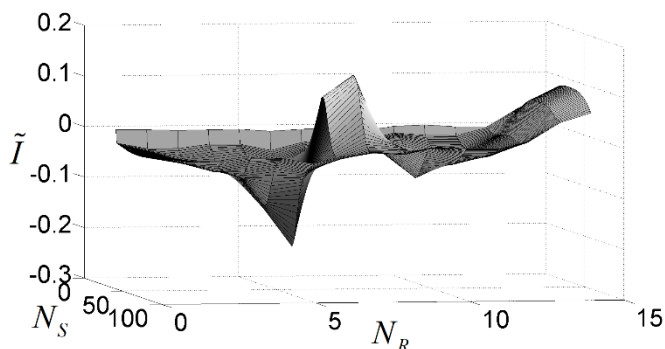


Рис. 5. Результат суперпозиції сигналів від різних антен в одній просторовій точці.

### ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ

Ми використаємо попередню структуру прихованих шарів 1000-200-100 ШНМ, досліджену раніше [14]. Після навчання ШНМ старої структури (для 7500 вхідних нейронів) та нової структури (з додатковими 855 вхідними нейронами) вони були перевірені на новому наборі даних, отриманому для труби, що закопана на глибину 260 мм. Вихідні сигнали ШНМ для цього випадку представлені на Рис. 6. Тут ШНМ нової структури дає дещо гірші результати класифікації відповідно до вихідного максимуму, але щодо рівнів інших виходів її результати виглядають більш впевненими.

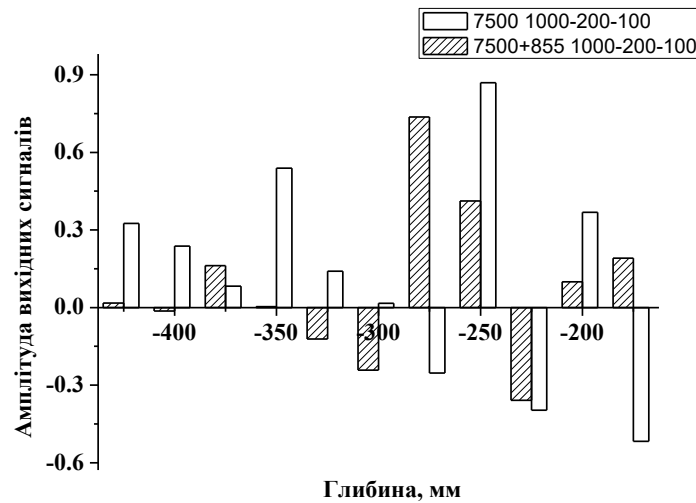


Рис. 6. Вихідні сигнали ШНМ структури 1000-200-100 прихованих шарів для тестового випадку глибини  $Z = -260$  мм для старих (7500) та нових структур (7500 + 855) ШНМ.

Аналогічне тестування було зроблено і для труб, закопаних на глибину 410 мм. Вихідні сигнали ШНМ для випадку, представленого на Рис. 7, показують, що стара ШНМ дає більш переконливий результат зі зменшенням амплітуд у більш правильному напрямку, але нова ШНМ також класифікує цей випадок настільки ж успішно, як і стара.

Цікаво проілюструвати, як друга частина даних, отримана променевим методом та підходом дискретної томографії, впливає на результат класифікації. Додатково до цього, функцію збудження останнього шару в структурі ШНМ було змінено за допомогою підходу SoftMax [16].

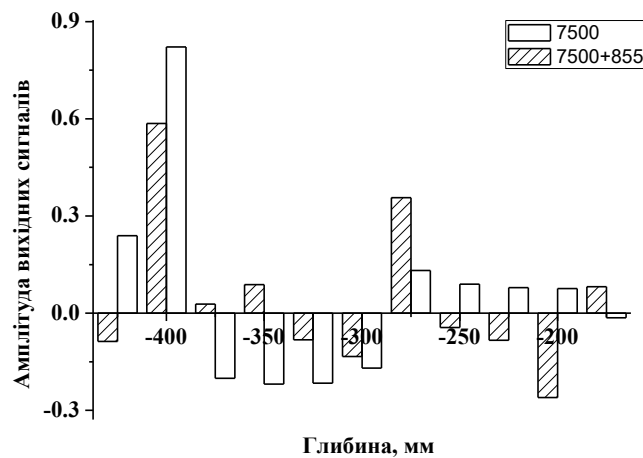


Рис. 7. Вихідні сигнали структури ШНМ для 1000-200-100 прихованих шарів для тестового випадку глибини  $Z = -410$  мм для старих (7500) та нових структур (7500 + 855) ШНМ.

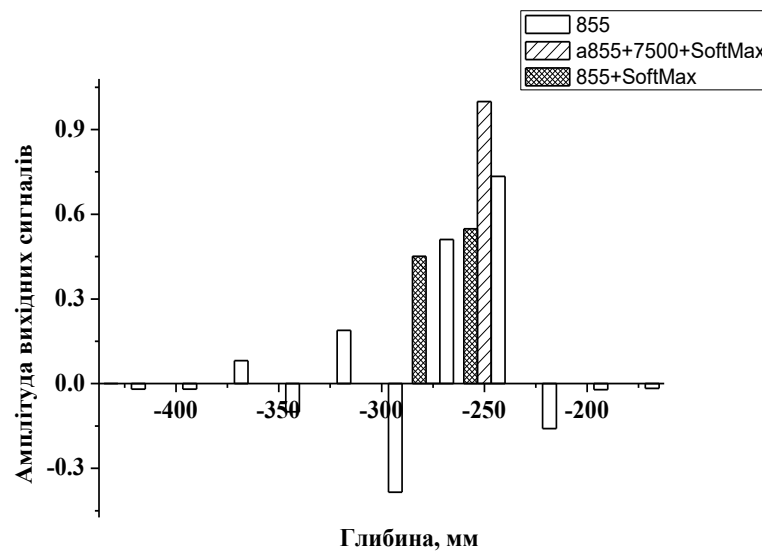


Рис. 8. Вихідні сигнали трьох структур ШНМ для 1000-200-100 прихованих шарів для тестового випадку глибини  $Z = -260$  мм, використовуючи лише другу частину даних (855), першу та другу частину даних (855 + 7500) з SoftMax і другу частину даних (855) з SoftMax.

Результати тестів для ШНМ запропонованих структур зображені на Рис. 8. Ми бачимо, що наш підхід до зменшення кількості вхідної інформації в 8 разів на основі процесів суперпозиції виправданий, оскільки використання лише зменшеної кількості інформації дозволяє успішно класифікувати прийняті сигнали. Це дає вигреш у часі навчання, розрахунків, продуктивності ШНМ та обсягу даних. Застосування SoftMax робить вихідні сигнали більш різкими, але контраст між найближчими виходами стає меншим, як видно для виходів -250 та -275. Початковий результат (855) є більш чітким у порівнянні з останнім, але містить більше зашумлених сигналів на інших виходах. Використання SoftMax для ШНМ з двома частинами вхідних даних дає однозначний правильний результат, але немає жодних ознак в інших виходах, які могли б сигналізувати про неідеальність цього тестового випадку, він визнає сам себе як правильний навчальний випадок, що не відповідає дійсності.

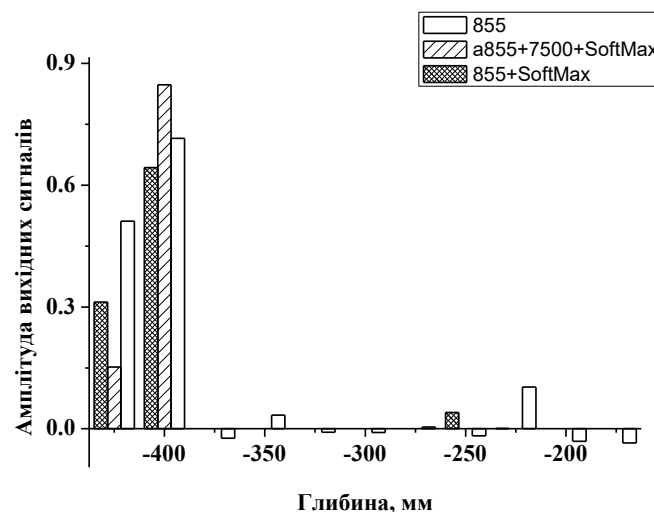


Рис. 9. Вихідні сигнали трьох ШНМ для структури 1000-200-100 прихованих шарів для тестового випадку глибини  $Z = -410$  мм, використовуючи лише другу частину даних (855), першу та другу частину даних (855 + 7500) з SoftMax, а друга частина даних (855) лише з SoftMax.

Другий приклад тесту ШНМ представлений на Рис. 9 для глибини залягання об'єкта 410 мм. Можна побачити, що всі ШНМ також дають правильні результати класифікації, але використання лише другої частини даних (855) показує найкращий результат, оскільки співвідношення між амплітудами -400 та -



425 на виході близьке до 1,4 (1,5 є ідеальне відношення), що відображає реальне положення труби. У той же час ШНМ 855 + SoftMax та ШНМ 855 + 7500 + SoftMax демонструють амплітуди співвідношення на рівні 2 та 5,5 відповідно, що є гіршими результатами порівняно з наведеними найпростішою ШНМ 855.

### ВИСНОВКИ

Проблема класифікації прийнятих імпульсних електромагнітних полів антенною системою відповідно до глибини розташування підповерхневих об'єктів, які породжують ці поля, була вирішена ШНМ, навченої за даними, отриманими методом FDTD.

Запропонована нова структура глибокої ШНМ з додатковими вхідними даними, обчисленими із звичайного набору вхідних даних за допомогою підходу дискретної томографії та променевого методу. Підхід повинен бути ефективнішим у разі більшої кількості прийнятих сигналів від різних антен та скорочення тривалості зондуючих імпульсів згідно ідеї класичної томографії. Навіть для імпульсів великої просторової тривалості, що є типовим випадком для надширокосмугової підповерхневої радіолокації, томографічний підхід дав хорошу чутливість детектування та прийнятний рівень дисперсії амплітуд сигналів на виходах ШНМ, незважаючи на застосування класичного променевого методу, що базується на наближенні нескінченно малої ширини хвильового пучка. Застосування нового набору даних не погіршило результат класифікації, однак заощадило час тренування ШНМ та її ресурси у вигляді кількості використаних нейронів.

Успішне застосування обмеженого обсягу даних демонструє відмінні апроксимаційні властивості ШНМ у тестових випадках. Вбудованість методу SoftMax в ШНМ дала більш різкі та контрастні коректні результати в розпізнаванні, але це призвело до втрати ознак того, що це проміжні випадки розташування об'єктів.

### ПОДЯКА


Автори висловлюють подяку Почаніну Г.П. за корисні обговорення в процесі виконання цієї роботи. Стаття містить результати досліджень НДР «Імпульсні та синусоїдальні поля у нелінійних і шаруватих електродинамічних структурах та наносистемах як перетворювачах полів і моделей елементів спінтроники» (№ держреєстрації 0117U004851, 2017–2019).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### Authors' ORCID ID

O. M. Dumin  <http://orcid.org/0000-0001-5067-9689>

V. A. Plakhtii  <http://orcid.org/0000-0002-0442-2716>

O. A. Prishchenko  <http://orcid.org/0000-0001-7143-9545>

D. V. Shyrokorad  <http://orcid.org/0000-0002-2784-4081>

### REFERENCES

1. L. A. Varyantsia-Roshchupkina and S. V. Roshchupkin, "Subsurface object imaging with two types of RTR-differential GPR system," 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), Odessa, 2016, pp. 145-147.
2. F. J. Yanovsky, V. E. Ivashchuk and V. P. Prokhorenko, "Through-the-wall surveillance technologies," 2012 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Sevastopol, 2012, pp. 30-33.
3. G. Pochanin, S. Masalov, I. Pochanina, L. Capineri, P. Falorni and T. Bechtel, "Modern trends in development and application of the UWB radar systems," 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), Odessa, 2016, pp. 7-11.
4. Huilin, Zhou & Wang, Wei-Ping & Wang, Yuhao, "Constructive neural network for landmine classification using ultra wideband GPR," Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Kunming, 12-15 July 2008.
5. Anthony Taok, Nahi Kandil, Sofiène Affes, "Neural Networks for Fingerprinting-Based Indoor Localization Using Ultra-Wideband, " 2nd International Conference on Wireless Communications in Underground and Confined Areas (ICWCUA'2008), Val-d'Or, Canada, August 25-27, 2008.
6. Chi-Chih Chen, M. B. Higgins, K. O'Neill and R. Detsch, "Ultrawide-bandwidth fully-polarimetric ground penetrating radar classification of subsurface unexploded ordnance," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 6, June 2001, pp. 1221-1230.
7. P. Sharma, B. Kumar, D. Singh and S. P. Gaba, "Non-metallic pipe detection using SF-GPR: A new approach using neural network," 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, 2016, pp. 6609-6612.

8. L. A. Varyanitsa-Roshchupkina, G. P. Pochanin, "Video Pulse Electromagnetic Wave Diffraction on Subsurface Objects," *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 66, N 5, 2007, pp. 391-414.
9. D. Hebb, *Organization of behaviour*, New York, J. Wiley, 1949.
10. I.V. Sruthi and P.R. Anurenjan, "A dynamic bow-tie antenna using soft computing methods," 2013 International Conference on Control Communication and Computing (ICCC), Thiruvananthapuram, 2013, pp. 113-118.
11. O. Dumin, S. Khmara, D. Shyrokorad, "Artificial neural networks in time domain electromagnetics", Proc. of 11th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2017), Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 118-121.
12. G. T. Herman, and A. Kuba, *Discrete Tomography: Foundations, Algorithms, and Applications*, Birkhäuser Boston, 1999.
13. A. Taflove, S. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed., Boston, London: Artech House, 2005.
14. O. M. Dumin, V. A. Plakhtii, O. A. Prishchenko, D. V. Shyrokorad Subsurface object recognition by ultrawideband radar and artificial neural networks // *Visnyk Kharkivskogo Natsionalnogo Universytetu imeni V. N. Karazina. Radiofizyka I elektronika.* – 2018. – Vyp. 28.– pp. 24–29.
15. G. P. Pochanin, V. P. Ruban, P. V. Kholod, O. A. Shuba, I. Ye. Pochanina, A. G. Batrakova, S. N. Urdzik, D. O. Batrakov, D. V. Golovin, "Advances in ground penetrating radars for road surveying", *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, Kharkiv, Ukraine, 15-19 September 2014, pp. 13-18.
16. M. Rimer and T. Martinez, "Softprop: softmax neural network backpropagation learning," 2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No.04CH37541), Budapest, 2004, pp. 979-983 vol.2.