

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-01>

УДК 537.86

ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ НАЗЕМНИХ МІН ЗА ДОПОМОГОЮ НАДШИРОКОСМУГОВОГО РАДАРУ ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

О. М. Думін¹, О. А. Прищенко¹, В. А. Плахтій¹, Г. П. Почанін²

¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: dumin@karazin.ua

² Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України, вул. Акад. Проскури 12, м. Харків, 61085, Україна

E-mail: gpp@ire.kharkov.ua

Надійшла до редакції 17 листопада 2020 р.

Актуальність. У сучасному світі задача виявлення підземних об'єктів зустрічається у багатьох галузях діяльності людини: швидкий огляд території на предмет наявності підземних інженерних комунікацій для проведення земельних робіт, знаходження розташування конструкцій заземлення, обриву кабелю або його замикання, дистанційне зондування для виявлення та картографування археологічних об'єктів. Також в Україні є важливим питання гуманітарного розмінування в Донецькій та Луганській областях. Новітні пристрої дистанційного обстеження землі, такі як надширокопasmовий підповерхневий радар, вже стали на поміч військовим саперам у розвинених країнах, щоб зробити процес розмінування безпечнішим.

Мета роботи. Метою даної роботи є покращення розпізнавання підповерхневих об'єктів шляхом використання штучної нейронної мережі (ШНМ) для обробки сигналів, перевірка впливу завад у сигналах, що надходять від надширокопasmової антенної системи, на надійність визначення положення об'єкта в досліджуваній області та його типу.

Матеріали та методи. В даній роботі використаний метод ШНМ для розпізнавання прихованих об'єктів надширокопasmовим підповерхневим радаром. Процес поширення електромагнітного поля моделюється методом скінченних різниць у часовому просторі (FDTD). Тестування нейронної мережі проводиться шляхом додавання до вхідного сигналу Гаусового шуму різних рівнів. Для виключення випадковості розпізнавання для різних реалізацій шуму моделювання задачі проводиться 1000 разів.

Результати. Отримані гістограми розпізнавання об'єктів для двох типів мін та шести різновидів бляшанок. Великий набір хибних об'єктів для тренування нейронної мережі дав гарні результати розпізнавання протипіхотних мін, що відобразилося на чудовій стійкості визначення положення та типу об'єкту навіть за наявності завад із високим рівнем співвідношення сигнал-шум.

Висновки. Задача підповерхневого зондування може бути розв'язана використанням повнозв'язної нейронної мережі з п'ятьма прихованими шарами нейронів. Визначено, що використання штучного інтелекту дає гарні результати розпізнавання підземних об'єктів, якщо попередньо підготувати якісний навчальний набір даних для штучної нейронної мережі. Показана задовільна стійкість до роботи із зашумленими сигналами, що є перспективним для подальшого тестування розробленого методу у застосуванні до підповерхневого радара в умовах реального експерименту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: підповерхневий радар, надкороткий електромагнітний імпульс, штучна нейронна мережа, надширокопasmова антена, розпізнавання об'єктів, гуманітарне розмінування.

DETECTION AND CLASSIFICATION OF LANDMINES USING UWB ANTENNA SYSTEM AND ANN ANALYSIS

O. M. Dumin¹, O. A. Pryshchenko¹, V. A. Plakhtii¹, G. P. Pochanin²

¹ V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

² O.Ya.Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Ac. Proskura st., Kharkiv, 61085, Ukraine

Background: The problem of detecting underground objects is found in many areas of human activity in the modern world, for example, a quick survey of the territory for the presence of underground utilities for earthworks, finding the location of grounding structures, cable breakage or short circuit, remote sensing for detecting and mapping of archaeological objects. The issue of humanitarian demining in Donetsk and Lugansk regions is also important in Ukraine. The latest ground surveying devices, such as ultrawideband subsurface radar, have already come to the aid for military sappers in developed countries to make the demining process safer.

Objectives: The goal of this work is to improve the recognition of subsurface objects by using an artificial neural network (ANN) for signal processing, to test the influence of interference in signals coming from ultrawideband antenna system on the reliability of determining the object in the observation area, its type and distance to subsurface radar.

Materials and methods: In this work, the ANN method is used to recognize the hidden objects by ultrawideband subsurface radar. The process of electromagnetic field propagation is simulated by finite time difference method

(FDTD). Neural network testing is performed by adding Gaussian noise of different levels in the input signal. Simulation of the problem is performed 1000 times to exclude the randomness of recognition for different realizations of a noise.

Results: Histograms of objects recognition for two types of mines and six types of cans were obtained. A large set of false objects for neural network training gave good results in the detection of antipersonnel mines, which was reflected in the excellent stability of determining the position and type of object, even in the presence of interference with a high signal-to-noise ratio.

Conclusions: The problem of subsurface survey can be solved by using a fully connected neural network with five hidden layers of neurons. It has been determined that the use of artificial intelligence gives good results in the recognition of underground objects, if a high-quality learning data set for ANN will be prepared. Satisfactory stability of noisy signal operation is shown, which gives prospects for further testing of the developed method in application to a subsurface radar in the conditions of a real experiment.

KEY WORDS: subsurface radar, ultrashort electromagnetic impulse, artificial neural network; ultrawideband antenna, object recognition, humanitarian demining.

ОБНАРУЖЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ НАЗЕМНЫХ МИН С ПОМОЩЬЮ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО РАДАРА И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. Н. Думин¹, А. А. Прищенко¹, В. А. Плахтий¹, Г. П. Почанин²

¹Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, 61022, г. Харьков, Украина

²Институт радиофизики и электроники им. О.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, ул. Акад. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина

Актуальность. В современном мире задача обнаружения подземных объектов встречается во многих областях деятельности человека: быстрый осмотр территории на предмет наличия подземных инженерных коммуникаций для проведения земляных работ, нахождение расположения конструкций заземления, обрыва кабеля или его замыкания, дистанционное зондирование для выявления и картографирования археологических объектов. Также для Украины важен вопрос гуманитарного разминирования в Донецкой и Луганской областях. Новейшие устройства дистанционного обследования земли, такие как сверхширокополосный подповерхностный радар, уже стали на помощь военным саперам в развитых странах, чтобы сделать процесс разминирования безопаснее.

Цель работы. Целью данной работы является улучшение распознавания подповерхностных объектов путем использования искусственной нейронной сети (ИНС) для обработки сигналов, проверка влияния помех в сигналах, поступающих от сверхширокополосной антенной системы, на надежность определения объекта в исследуемой области и его типа.

Материалы и методы. В данной работе использован метод ИНС для распознавания скрытых объектов сверхширокополосным подповерхностным радаром. Процесс распространения электромагнитного поля моделируется методом конечных разностей во временной области (FDTD). Тестирование нейронной сети производится путем добавления Гауссова шума различных уровней к входному сигналу. Для исключения случайности распознавания для различных реализаций шума моделирование задачи проводится 1000 раз.

Результаты. Получены гистограммы распознавания объектов в виде двух типов мин и шести разновидностей банок. Большой набор ложных объектов для тренировки нейронной сети дал хорошие результаты распознавания противопехотных мин, что отразилось на прекрасной устойчивости определения положения и типа объекта даже при наличии помех с высоким уровнем соотношения сигнал-шум.

Выводы. Задача подповерхностного зондирования может быть решена использованием полносвязной нейронной сети с пятью скрытыми слоями нейронов. Определено, что использование искусственного интеллекта дает хорошие результаты распознавания подземных объектов, если предварительно подготовить качественный набор данных для обучения искусственной нейронной сети. Показана удовлетворительная устойчивость к работе с зашумленными сигналами, что перспективно для дальнейшего тестирования разработанного метода применительно к подповерхностному радару в условиях реального эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подповерхностный радар, сверхкороткий электромагнитный импульс, искусственная нейронная сеть, сверхширокополосная антенна, распознавание объектов, гуманитарное разминирование.

У наш час в Україні в Донецькій та Луганській областях встановлено різноманітні вибухонебезпечні предмети на території близько 7000 квадратних кілометрів [1]. Серед цих об'єктів найбільш небезпечними є наземні міни. Зазвичай розмінування території виконують військові сапери, але ідея виготовлення спеціального роботизованого обладнання для виявлення мин є привабливою альтернативою [2]. Найбільш перспективним пристроєм для сканування підземного простору для різних цілей є надширококустовий (НШС) підповерхневий радар [3]. Завдяки використанню надкоротких наносекундних імпульсів забезпечується висока роздільна здатність сканування [4]. Спектр застосування імпульсних електромагнітних хвиль досить широкий: виявлення людей за непрозорими перешкодами [5], аналіз ґрунту для інспекції ліній метро [6], гуманітарне розмінування [7] тощо.

Для будь-якого з можливих застосувань НШС радару слід використовувати технологію обробки сигналів, що відповідає цій конкретній задачі. Наприклад, напіваналітичний алгоритм узгодження режимів [8], узагальнене перетворення Хафа [9], метод кореляції [10]. В останні роки високу популярність набирають підходи розпізнавання на основі ШНМ [11]. Суттєвою перевагою застосування останнього метода є висока швидкість розпізнавання об'єкта за допомогою нейропроцесора [12].

Для навчання ШНМ слід збирати та готувати заздалегідь відому інформацію про зв'язок між вхідними даними та вихідними результатами розпізнавання. Це дозволяє отримувати правильні результати класифікації об'єктів для вхідних даних, які нейронна мережа раніше не бачила. Наприклад, вхідними даними можуть бути амплітуди поля, що сформовані відбитим імпульсом [13]. Чим складніший об'єкт, який потрібно розпізнати, тим складніша ШНМ нам потрібна. Крім того, застосування ШНМ дозволяє зробити класифікацію об'єктів менш чутливою до впливу шуму в прийнятих сигналах [14].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

НШС антена опромінює поверхню землі з діелектричною проникністю ґрунту $\varepsilon = 9$ та провідністю $\sigma = 0,005 \text{ См/м}$ імпульсною електромагнітною хвилею з тривалістю 0,23 нс [14]. Хвиля, відбита від компонентів приймальної антенної системи, наземних та підземних об'єктів, приймається чотирма антенами з різною орієнтацією поляризації. Особливе просторове розташування однакових антен дозволяє фіксувати відбиття хвилі від об'єктів, що досягають кожної антени в різні моменти часу, що вказує на напрямок приходу хвилі. Крім того, чим більше незалежних каналів прийому, тим стійкішим є процес класифікації [15]. НШС антенна система "1Tx + 4Rx" [16] зображена на Рис 1, де 1Tx (центральна антена) є випромінювачем електромагнітних полів, а 4Rx (антени на краях) є приймачами відбитих хвиль.

Для врахування всіх особливостей антенної системи, електрофізичних параметрів ґрунту та складних конструкцій об'єктів дослідження, електромагнітна задача моделюється методом скінченних різниць в часовому просторі (FDTD).

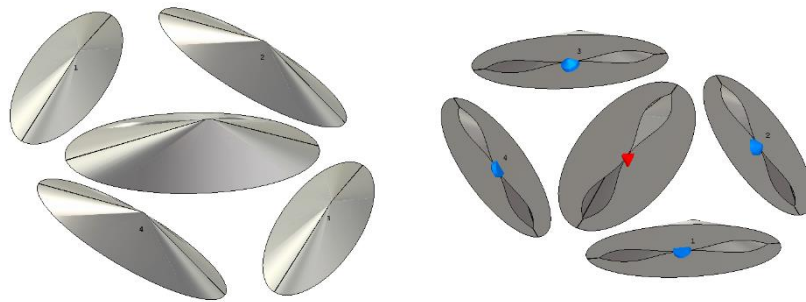


Рис. 1 НШС антенна система. Центральна антена – випромінювач електромагнітних полів, антени на краях – приймачі відбитого сигналу.

Fig. 1 UWB antenna system. The central antenna is a transmitter of electromagnetic fields, the antennas on the edges are receivers of the reflected signal.

ОБРОБКА СИГНАЛІВ ДЛЯ НАВЧАННЯ ШНМ

Чотири сигнали, отримані під час зондування земної поверхні, потребують попередньої обробки перед подачею на вхід ШНМ. Потрібно провести їх дискретизацію для отримання чотирьох часових залежностей із постійним кроком у часі, нормувати їх на квадратні корені від їхньої енергії E та сформувати єдиний сигнал, що складається з шести зшитих різницевих сигналів, про які піде мова далі. Цей результуючий сигнал – вхідний масив даних для навчання або тренування ШНМ. На Рис. 2 показані нормовані амплітуди A чотирьох сигналів, прийнятих НШС антенною системою під час зондування. Слід зазначити, що антени мають різну орієнтацію площини поляризації, що допомагає отримати більше інформації від відбитої хвилі та дізнатись про напрямок приходу сигналу.

Кожен із цих чотирьох сигналів можна умовно розділити на 2 частини: перша – перевідбиття між всіма елементами антенної системи та відбиття від земної поверхні, друга – та, що несе інформацію про прихований об'єкт. Бачимо, що амплітуда другої, потрібної нам частини сигналу, значно менша за амплітуду завад у першій частині. І це можна сказати про всі сигнали цих чотирьох приймачів. Це може дуже ускладнити розпізнавання, так як досліджуваний об'єкт може знаходитись на різній відстані від приймальної антени, але в той же час відбитий від нього імпульс під час руху антенної системи буде змінюватись незначним чином за рахунок змін тільки у малоамплітудній частині часової залежності. Крім цього, скоріш за все, малоамплітудні зміни будуть ігноруватись нейронною мережею під час роботи, особливо, якщо прийнятий сигнал буде зашумленим.

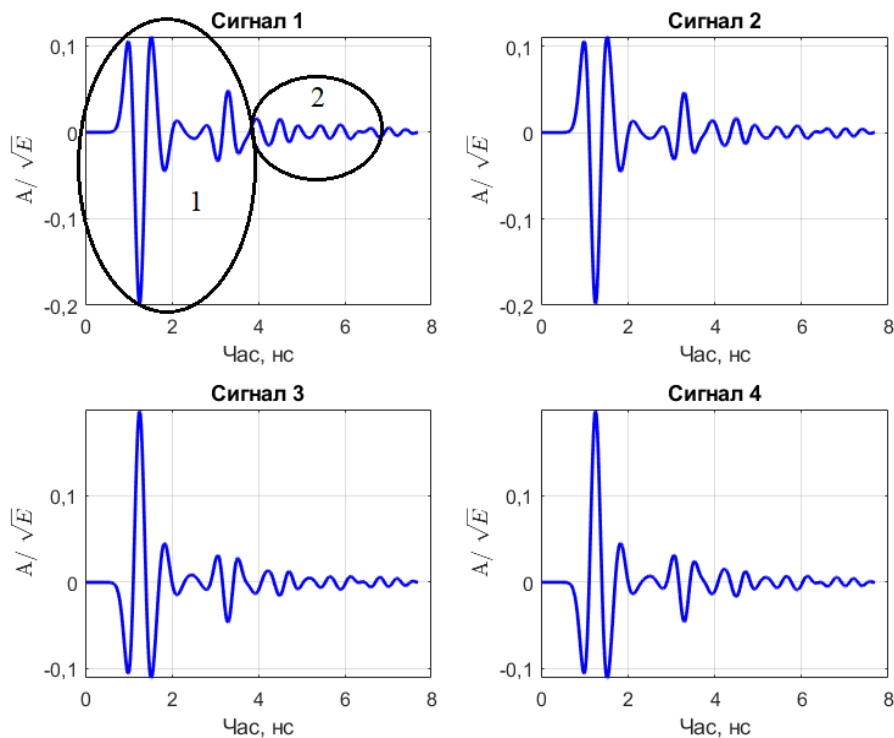


Рис. 2. Приклади сигналів, отриманих ШНС антенною системою, де 1 - взаємні відбиття від антенної системи, 2 - корисна частина сигналу, що містить інформацію про прихований об'єкт.
 Fig. 2. Examples of signals received by the UWB antenna system, where 1 - mutual reflections from the antenna system, 2 - useful part of the signal containing information about the hidden object.

Тому для зменшення взаємного впливу антен пропонується використати різницеві сигнали, що являють собою сумування та віднімання сигналів, отриманих приймачами. Вибір операцій зумовлений нашим бажанням збільшити вищезазначені низькоамплітудні компоненти отриманих даних. На Рис. 3 показані шість необхідних комбінацій віднімання та додавання початкових сигналів, де S1, S2, S3 та S4, відповідно є першим, другим, третім та четвертим прийнятими сигналами із Рис. 2. Можна помітити, що було виконано віднімання сигналів із однаковими знаками початкових моноімпульсів та додавання сигналів із протилежними знаками початкових моноімпульсів. Таким чином, отримано усі 6 можливих комбінацій. Результати операцій послідовно об'єднуються в єдиний масив даних, який посилається на вхідний шар ШНМ. Було вирішено використовувати повнозв'язну ШНМ, що має 7 шарів, де перший шар містить 4614 вхідних нейронів, що відповідає розмірності масиву зшитих даних (див. вісь абсцис на Рис. 3). Наступні п'ять прихованих шарів мають по 4000 нейронів у кожному шарі. Вихідний шар має 65 нейронів, що відповідають всім об'єктам на всіх можливих змодельованих відстанях від опромінюючої установки, а також додатковий вихід для виявлення присутності або відсутності об'єкта в даній області.

ДОСЛІДЖУВАНІ ОБ'ЄКТИ

У даній роботі для моделювання було використано дві найбільш поширені та небезпечні міни, що трапляються у місцях проведення збройних конфліктів у Донецькій та Луганській областях: ПМН-1 та ПМН-4. Модель міни ПМН-1 має висоту 53 мм і діаметр 110 мм (див. Рис. 4). Її корпус показаний оранжевим кольором, матеріалом якого є бакеліт. Зверху міна обладнана каучуковим ковпаком, що помічений сірим кольором. В середині міна має проміжний шар з повітрям, металевий механізм детонації та вибухову речовину з електричними характеристиками $\varepsilon = 3$ та $\sigma = 0,0044$ См/м [17], [18].

Міна ПМН-4 зображена на Рис. 5. Вона має висоту 42 мм і діаметр 95 мм. ПМН-4 має схожу внутрішню конструкцію, як у ПМН-1, але її металевий механізм детонації більш масивний, що даватиме більше відбиття електромагнітного імпульсу, і як наслідок можливо більш стабільне виявлення. Матеріали корпусу та електричні характеристики вибухової речовини у ПМН-4 такі ж, як і у ПМН-1.

Для вирішення задачі гуманітарного розмінування важливо точно класифікувати об'єкт за відбитою хвилею, до того ж в режимі реального часу [19]. Крім того, пристрій для проведення розмінування має забезпечити мінімальну кількість помилкових спрацювань. Під ними мається на увазі визначення небезпечної міни у якості, наприклад, сміття чи використаних бляшанок. Територія проведення військових

конфліктів вдалося переповнена подібними об'єктами, тому, щоб наблизити задачу до реальних умов, було вирішено врахувати можливість присутності у обстежуваному просторі використаної металеві банки в різних станах у якості хибного об'єкту.

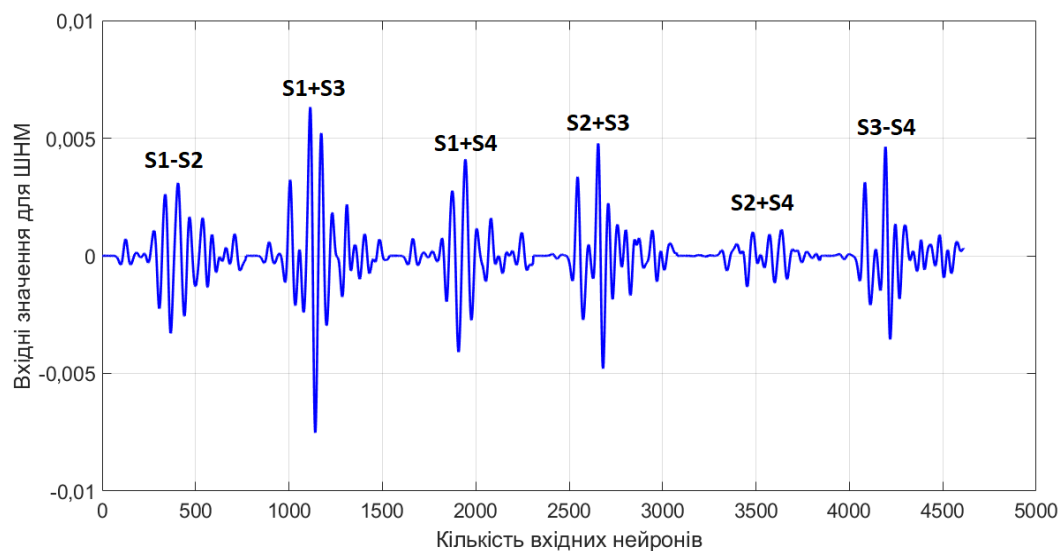


Рис. 3. Приклад сигналу для навчання ШНМ, який містить результати операцій додавання та віднімання чотирьох прийнятих сигналів.

Fig. 3. An example of a signal for learning ANN, which contains the results of operations of addition and subtraction of four received signals.

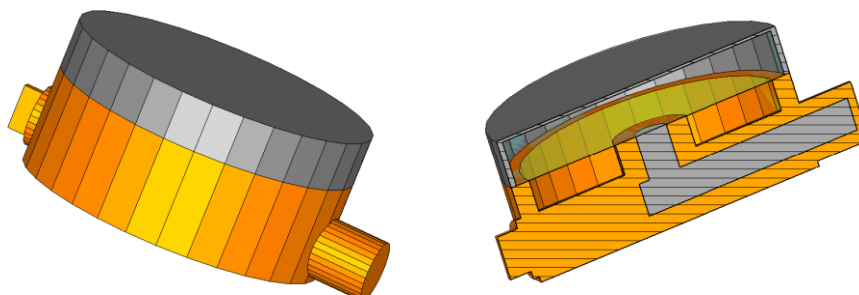


Рис. 4. Модель міни ПМН-1.

Fig. 4. Model of PMN-1 mine.

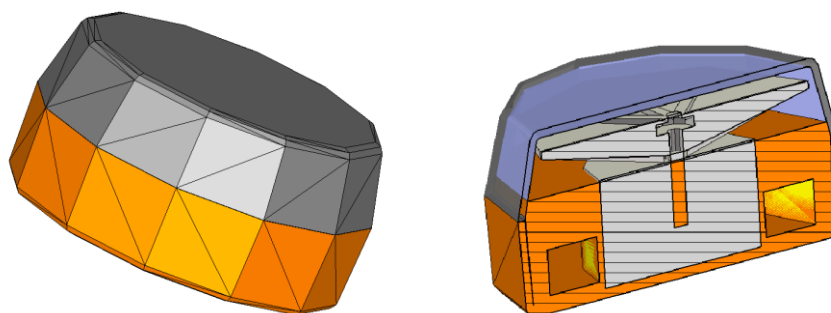


Рис. 5. Модель міни ПМН-4.

Fig. 5. Model of PMN-4 mine.

В свою чергу, навчання ШНМ на розпізнавання як мін, так і інших предметів забезпечить якість підповерхневого зондування. Для числового моделювання були обрані найбільш поширені типи банок в Україні. Перша типова форма має діаметр 10 см і висоту 3,5 см. Вона може знаходитись у 3 можливих станах, позначених як cap1 – відкрита бляшанка без кришки, cap2 – бляшанка з відкритою кришкою, cap3 – порожниста бляшанка із закритою кришкою, яка утворює майже кільцеву щілину (див. Рис. 6). Друга конструкція банки має діаметр 8,5 см і висоту 5 см. Вона відповідно може бути в тих самих станах як і

попередня, які вже позначені як can4, can5 та can6 (див. Рис.8-13). Таким чином, ШНМ повинна навчитися відрізняти протипіхотну міну від подібного сміття, яке може гальмувати процес розмінювання та взагалі робити його вкрай небезпечним.

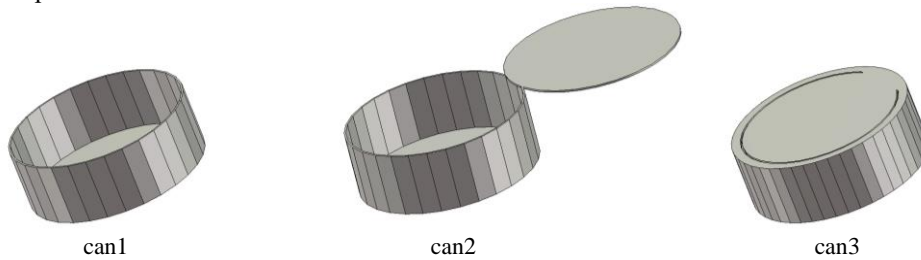


Рис. 6. Три стани бляшанки, де can1 – бляшанка без кришки, can2 – бляшанка з відкритою кришкою, can3 – бляшанка із закритою кришкою, що формує щілину.

Fig. 6. Three states of a can, where can1 is a can without a lid, can2 is a can with an open lid, can3 is a can with a closed lid that forms a slot.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗПІЗНАВАННЯ

Далі, щоб наблизити задачу до реальних умов експериментальних досліджень, вхідні сигнали повинні містити шум, який, нажаль, присутній у НШС радіолокаційних дослідженнях [16]. Гаусовий шум додається до початкових чотирьох сигналів і лише після цього застосовується їх віднімання та додавання. Такий порядок операцій значно погіршує якість результуючого сигналу навіть для невеликих співвідношень сигнал-шум у початкових прийнятих сигналах, але в свою чергу це відповідає реальним умовам підповерхневого зондування, так як ми приймаємо вже зашумлені сигнали і після цього маємо можливість виконувати над ними певні операції. Ефект погіршення рівню сигнал-шум відбувається тому, що відокремлення низькоенергетичної частини сигналу, що містить інформацію про об'єкт, значно зменшує початковий максимум сигналу до якого було застосовано певний шум, тим самим погіршуючи співвідношення корисного сигналу до шуму.

Цей ефект проілюстрований на Рис. 7. На верхніх рисунках зображено порівняння часової форми сигналу, що приймається однією з чотирьох антен (Signal1), і різницевого сигналу. На нижніх графіках задіяно масштабування для отримання більш детальної картини. Для вибраного рівня сигнал-шум 25 дБ, коли початковий прийнятий сигнал несуттєво змінює свою часову форму, різницевий сигнал, що надходить до ШНМ, серйозно пошкоджений завадами, як видно на нижніх графіках на Рис. 7, і де співвідношення сигнал-шум вже складає -7,4 дБ. Таким чином, перед нейронною мережею стоїть складне завдання вилучення корисної інформації із більш зашумлених даних, отриманих з різницевого сигналу.

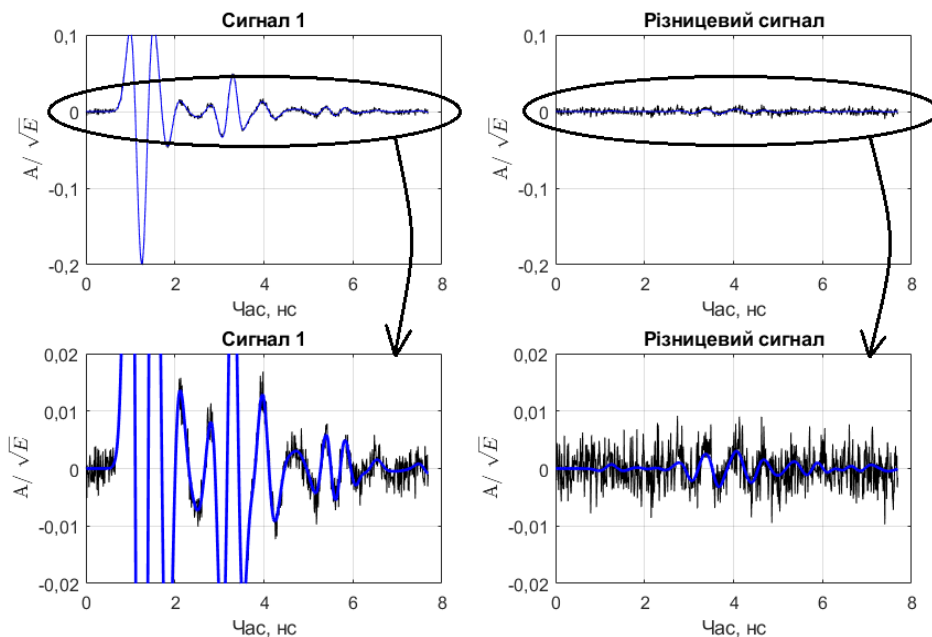


Рис. 7. Ілюстрація зміни рівня сигнал-шум у прийнятому нормованому сигналі та різницевому сигналі для співвідношення сигнал-шум 25 дБ у прийнятому сигналі.

Fig. 7. Illustration of the change of signal-to-noise level in the received normalized signal and the difference signal for the signal-to-noise ratio of 25 dB in the received signal.

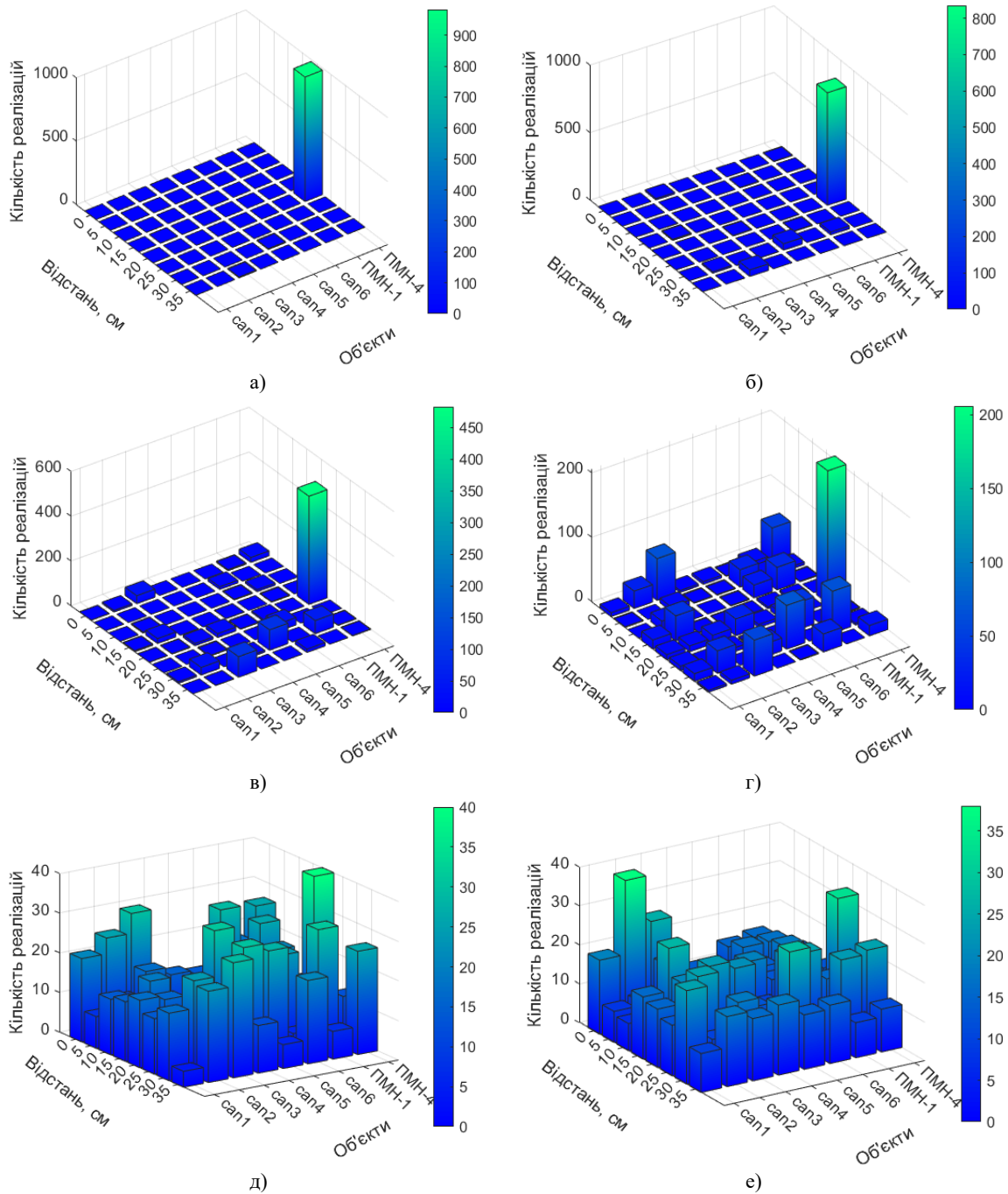


Рис. 8. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-4 на відстані 20 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 35 дБ, б) 30 дБ, в) 25 дБ, г) 20 дБ, д) 10 дБ, е) 5 дБ.

Fig. 8. Statistical distribution of neural network responses for PMN-4 mine recognition at a distance of 20 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: а) 35 dB, б) 30 dB, в) 25 dB, г) 20 dB, д) 10 dB, е) 5 dB.

Те саме моделювання, але для міни ПМН-1, проілюстровано на Рис. 9, де ми бачимо, що результати класифікації об'єкта та визначення відстані менш стабільні за наявності шуму рівнів, аналогічних до попередніх. Тут розпізнавання стає неможливим вже на рівні сигнал-шум 10 дБ. Однак така стійкість до шуму також є прийнятною. Також слід нагадати, що ПМН-1 має менш масивний металічний механізм детонації, ніж ПМН-4, що дає гірше відбиття електромагнітної імпульсної хвилі. І це, в свою чергу, як ми і припускали, ускладнило розпізнавання.

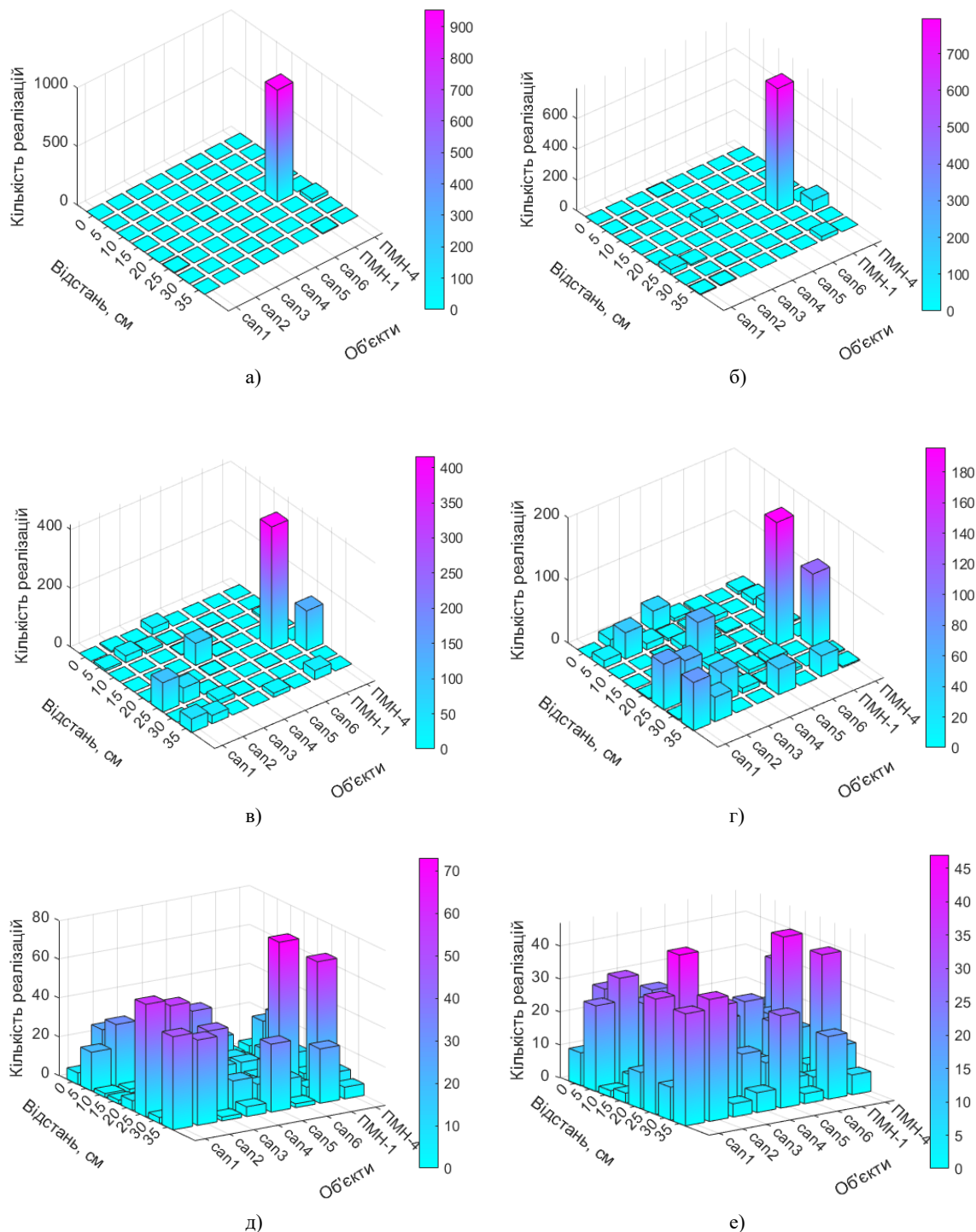


Рис. 9. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-1 на відстані 20 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 35 дБ, б) 30 дБ, в) 25 дБ, г) 20 дБ, д) 15 дБ, е) 10 дБ.

Fig. 9. Statistical distribution of neural network responses for PMN-1 mine recognition at a distance of 20 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: а) 35 dB, б) 30 dB, в) 25 dB, г) 20 dB, д) 15 dB, е) 10 dB.

Із Рис.9в – д можна помітити, що із додаванням шуму ШНМ починає плутати ПМН-1 та ПМН-4 і відстань (20 та 25 см). Для гуманітарного розмінування така помилка у класифікації міни не є принциповою, бо принаймні до рівня сигнал-шум 15 дБ ми маємо чітку вказівку на міну, а не на бляшанку. Також із Рис.8-9 ми бачимо, що вище рівня сигнал-шум 35 дБ, ШНМ видає безпомилковий результат розпізнавання для обох мін.

Далі розглянемо, як нейронна мережа розпізнає граничні положення об'єктів, а саме, коли об'єкт знаходиться над антенною системою, тобто відстань 0 см, і на максимально віддаленій змодельованій відстані від приймачів – 35 см.

Ми бачимо, що якщо ПМН-1 (Рис. 10) або ПМН-4 (Рис. 11) знаходиться під антенною, то при високих значеннях шуму ШНМ буде спрацьовувати краще для ПМН-1, однак, в обох випадках спостерігається стабільна класифікація. Це відбувається завдяки попередньому розширенню тренувальної вибірки як корисними, так і хибними об'єктами.

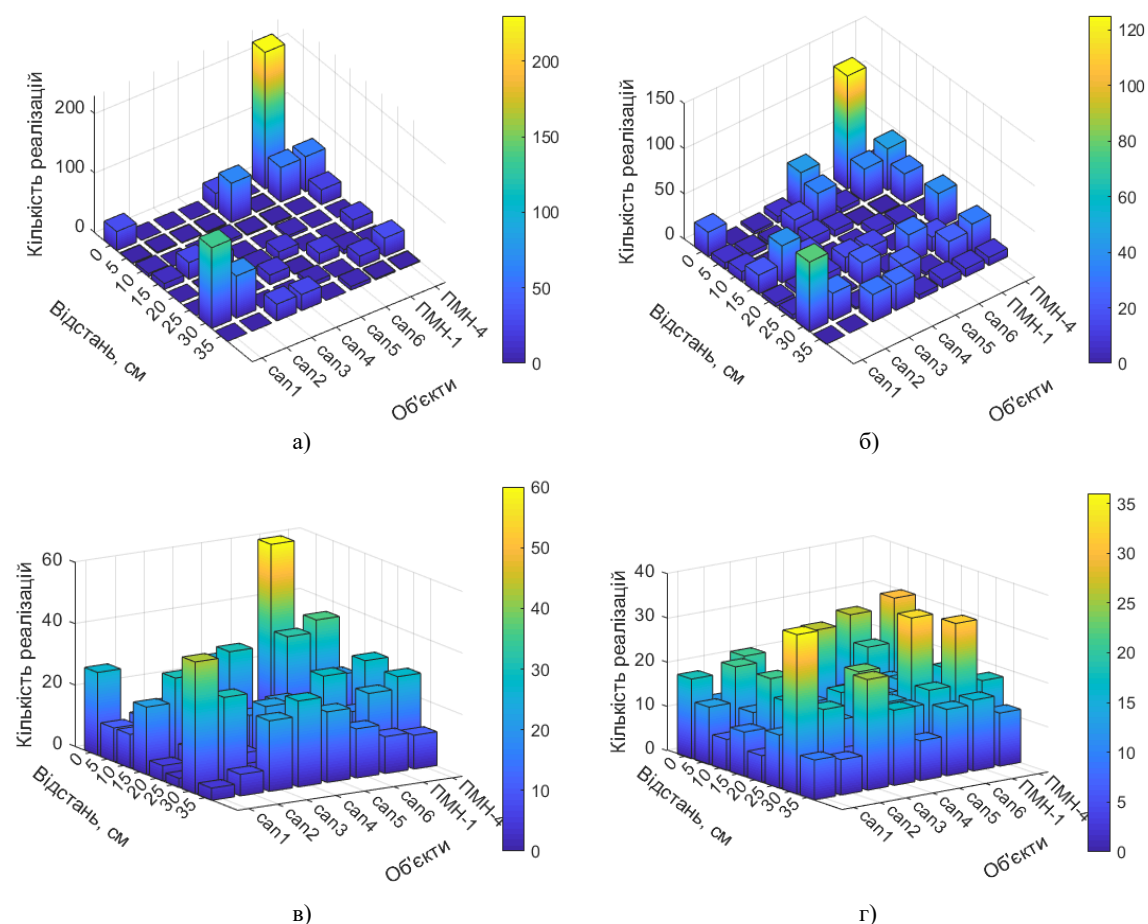


Рис. 10. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-1 на відстані 0 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 25 дБ, б) 20 дБ, в) 15 дБ, г) 10 дБ.

Fig. 10. Statistical distribution of neural network responses for PMN-1 mine recognition at a distance of 0 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: a) 25 dB, б) 20 dB, в) 15 dB, г) 10 dB.

Далі розглянемо найбільш віддалене положення ПМН-1 та ПМН-4. Результати його розпізнавання зображені на Рис. 12 та Рис. 13.

З Рис. 12-13 ми бачимо впевнену класифікацію за високих рівнів сигнал-шум. Для обох мін було отримано подібний результат щодо стабільності розпізнавання, але тут ПМН-4 визначається краще [20].

За результатами моделювання можна сказати, що нейронна мережа у поєднанні з підповерхневим радаром краще розпізнає середнє положення об'єкту у досліджуваному просторі із врахуванням вибраної дискретизації сектору обстеження. Це, можливо, обумовлено відсутністю навчальних зразків за межами використання ШНМ. Для вирішення даної проблеми досліджувану область можна подовжити та удосконалити із врахуванням фізичних особливостей задачі підповерхневого зондування.

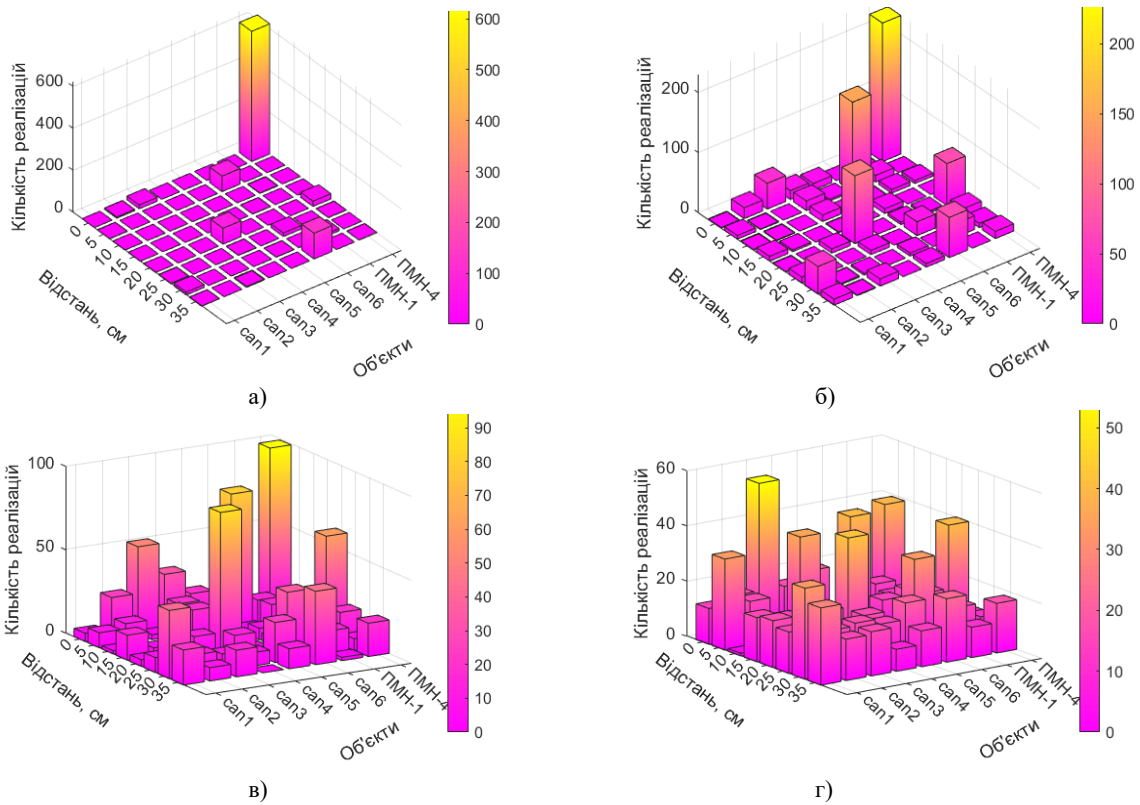


Рис. 11. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-4 на відстані 0 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 35 дБ, б) 30 дБ, в) 25 дБ, г) 20 дБ.

Fig. 11. Statistical distribution of neural network responses for PMN-4 mine recognition at a distance of 0 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: а) 35 dB, б) 30 dB, в) 25 dB, г) 20 dB.

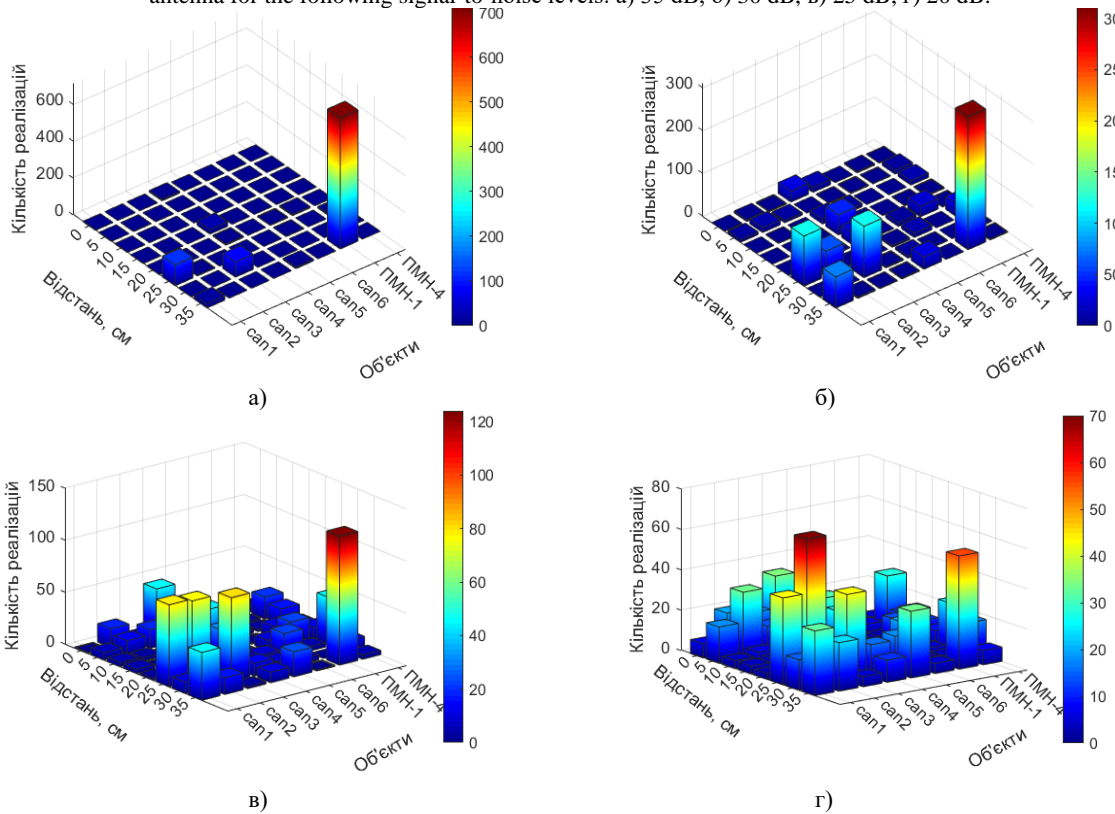


Рис. 12. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-1 на відстані 35 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 35 дБ, б) 30 дБ, в) 25 дБ, г) 20 дБ.

Fig. 12. Statistical distribution of neural network responses for PMN-1 mine recognition at a distance of 35 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: а) 35 dB, б) 30 dB, в) 25 dB, г) 20 dB.

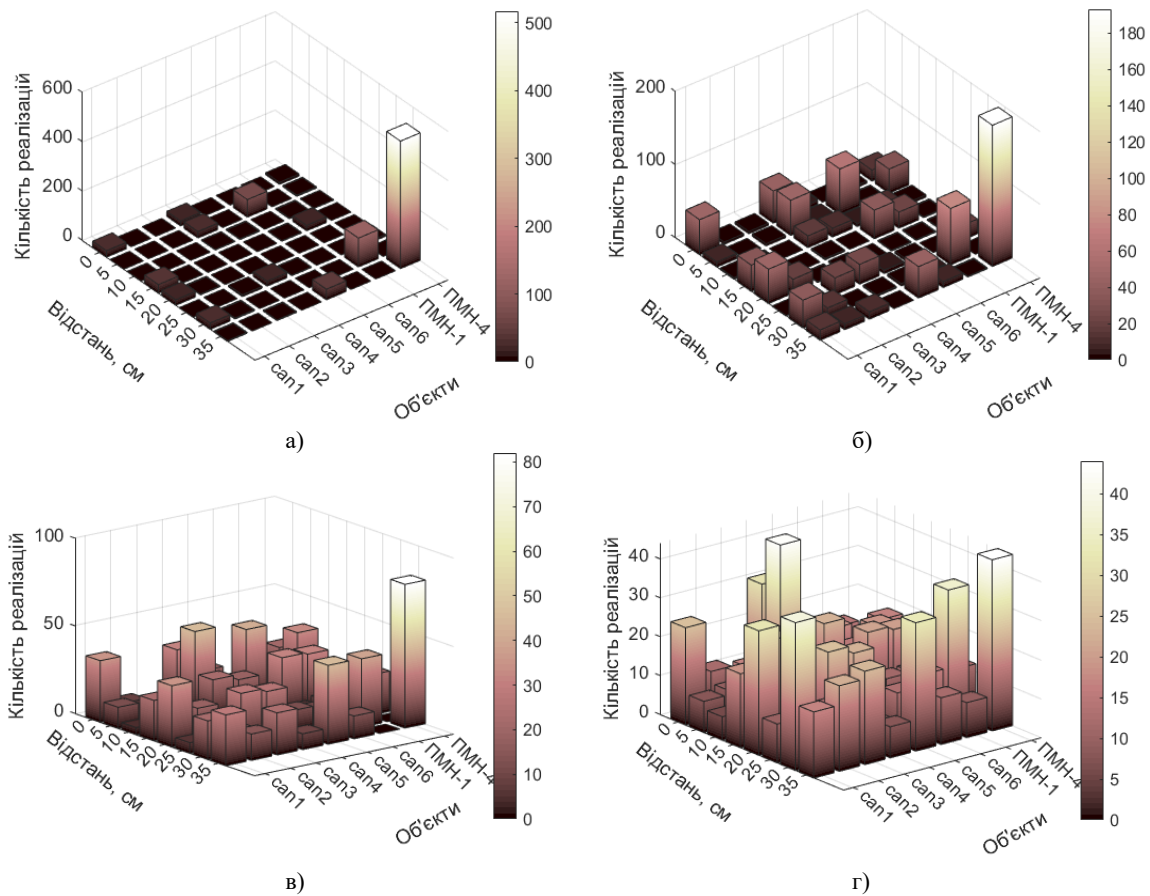


Рис. 13. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-4 на відстані 35 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 30 дБ, б) 25 дБ, в) 20 дБ, г) 15 дБ.

Fig. 13. Statistical distribution of neural network responses for PMN-4 mine recognition at a distance of 35 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: a) 30 dB, б) 25 dB, в) 20 dB, г) 15 dB.

ВИСНОВОК

Використання повнозв'язної штучної нейронної мережі з п'ятьма прихованими шарами нейронів для обробки сигналів в системах підповерхневого зондування дає успішні результати виявлення та класифікації об'єктів. Була продемонстрована задовільна стійкість до шуму на різних відстанях від системи опромінення. Виправдане використання різницевих сигналів у якості тренувальних даних для нейронної мережі. ШНМ забезпечує стабільні результати розпізнавання протитипотних мін, незважаючи на сильну зашумленість вхідних сигналів.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

О. М. Dumin [id http://orcid.org/0000-0001-5067-9689](http://orcid.org/0000-0001-5067-9689)

О. А. Pryshchenko [id http://orcid.org/0000-0001-7143-9545](http://orcid.org/0000-0001-7143-9545)

V. A. Plakhtii [id http://orcid.org/0000-0002-0442-2716](http://orcid.org/0000-0002-0442-2716)

G. P. Pochanin [id https://orcid.org/0000-0002-1977-2217](https://orcid.org/0000-0002-1977-2217)

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. NATO supports humanitarian demining in Ukraine [Internet]. NATO News. 27 May 2016. Available from: https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_131607.htm?selectedLocale=en
2. Maki KH. Development of robot and navigation techniques for humanitarian demining. 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics; 2008 13-16 July Daejeon, South Korea; 2008. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2008.4618135>

3. Earp SL, Hughes ES, Elkins TJ, Vickers R. Ultra-wideband ground-penetrating radar for the detection of buried metallic mines. Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference; 1996 13-16 May; USA, Ann Arbor, MI.; 1996. <https://doi.org/10.1109/NRC.1996.510648>
4. Taylor JD. Ultrawideband radar: applications and design. Boca Raton, London, New York: CRC Press; 2012.
5. Millot P, Castanet L, Casadebaig L, Maaref N, Gaugue A, Ménard M, Khamlichi J, Louis G, Fortino N, Dauvignac J-Y, Clementi G, Schortgen M, Quellec L, Laroche V. An UWB Through-The-Wall radar with 3D imaging, detection and tracking capabilities. European Radar Conference (EuRAD); 2015 9-11 September; Paris, France; 2015. <https://doi.org/10.1109/EuRAD.2015.7346281>
6. Hai-zhong Y, Yu-feng O, Hong C. Application of ground penetrating radar to inspect the metro tunnel. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR); 2012 4-8 June, Shanghai, China; 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254963>
7. Hölbling Z, Mihaldinec H, Ambruš D, Džapo H, Bilas V, Vasić D. UWB localization for discrimination-enabled metal detectors in humanitarian demining. IEEE Sensors Applications Symposium (SAS); 2017 13-15 March; USA, Glassboro, NJ; 2017. <https://doi.org/10.1109/SAS.2017.7894073>
8. Morgenthaler A, Rappaport C. Fast GPR underground shape anomaly detection using the Semi-Analytic Mode Matching (SAMM) algorithm. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS; 2013 21-26 July; Australia, Melbourne, VIC; 2013. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723051>
9. Li W, Zhou H, Wan X. Generalized Hough Transform and ANN for subsurface cylindrical object location and parameters inversion from GPR data. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR); 2012 4-8 June; China, Shanghai; 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254874>
10. O Dumin, Plakhtii V, Pryshchenko O, Pochanin G. Comparison of ANN and Cross-Correlation Approaches for Ultra Short Pulse Subsurface Survey. 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020); 2020 February 25-29; Ukraine, Lviv-Slavske; 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235459>
11. Sharma P, Kumar B, Singh D, Gaba SP. Metallic Pipe Detection using SF -GPR: A New Approach using Neural Network. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS); 2016 10-15 July; China, Beijing; 2016. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730726>
12. Callan R. The essence of neural networks. New York: Prentice Hall Europe; 1999.
13. Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА, Широкоград ДВ. Розпізнавання об'єктів під поверхнею землі при надширокосмуговій радіоінтроскопії за допомогою штучних нейронних мереж. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2018;28:24-29.
14. Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА, Широкоград ДВ, Вольвач ЯС. Вплив зменшення шуму вхідного сигналу на класифікацію місцезнаходження об'єкту штучною нейронною мережею при надширокосмуговій радіоінтроскопії. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2019;31:27–35. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-03>
15. Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА, Широкоград ДВ. Метод дискретної томографії при обробці даних надширокосмугової підповерхневої радіолокації штучною нейронною мережею. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2018;29:17-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-03>
16. Pochanin G, Capineri L, Bechtel T, Falorni P, Borgioli G, Ruban V, Orlenko O, Ogurtsova T, Pochanin O, Crawford F, Kholod P, Bossi L. Measurement of Coordinates for a Cylindrical Target Using Times of Flight from a 1-Transmitter and 4-Receiver UWB Antenna System. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020;58(2):1363-1372. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2946064>
17. Duque A, Perry W, Anderson-Cook C. Complex Microwave Permittivity of Secondary High Explosives. Propellants Explosives Pyrotechnics. 2013;39(2):275-283. <https://doi.org/10.1002/prop.201300032>
18. Vander Gaasta B, McFeeb J, Russella K, Fausta A. Design and validation of inert homemade explosive simulants for Ground Penetrating Radar. Proc. SPIE 9454, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XX; 2015 20-24 April; USA, Baltimore, Maryland; 2015 21 May. 945412 <https://doi.org/10.1117/12.2175586>
19. Zafir H, Bregman Y, Wolf D, Hershler S. Super-sensitive, real time and wide coverage, all terrain ground robotic and hand held systems for mine and UXO detection and mapping. 1998 Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines; 1998 12-14 October; UK, Edinburgh; IEE Conf. Publ. No. 458; 1998. <https://doi.org/10.1049/cp:19980721>
20. Dumin O, Pryshchenko O, Plakhtii V, Pochanin G. Landmine detection and classification using UWB antenna system and ANN analysis. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW); 2020 September 21-25; Ukraine, Kharkiv; 2020. p. 1030–1035. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252574>

REFERENCES

1. NATO supports humanitarian demining in Ukraine [Internet]. NATO News. 27 May 2016. Available from:

- https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_131607.htm?selectedLocale=en
2. Maki KH. Development of robot and navigation techniques for humanitarian demining. 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics; 2008 13-16 July Daejeon, South Korea; 2008. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2008.4618135>
 3. Earp SL, Hughes ES, Elkins TJ, Vickers R. Ultra-wideband ground-penetrating radar for the detection of buried metallic mines. Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference; 1996 13-16 May; USA, Ann Arbor, MI.; 1996. <https://doi.org/10.1109/NRC.1996.510648>
 4. Taylor JD. Ultrawideband radar: applications and design. Boca Raton, London, New York: CRC Press; 2012.
 5. Millot P, Castanet L, Casadebaig L, Maaref N, Gaugue A, Ménard M, Khamlichi J, Louis G, Fortino N, Dauvignac J-Y, Clementi G, Schortgen M, Quellec L, Laroche V. An UWB Through-The-Wall radar with 3D imaging, detection and tracking capabilities. European Radar Conference (EuRAD); 2015 9-11 September; Paris, France; 2015. <https://doi.org/10.1109/EuRAD.2015.7346281>
 6. Hai-zhong Y, Yu-feng O, Hong C. Application of ground penetrating radar to inspect the metro tunnel. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR); 2012 4-8 June, Shanghai, China; 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254963>
 7. Hölbling Z, Mihaldinec H, Ambruš D, Džapo H, Bilas V, Vasić D. UWB localization for discrimination-enabled metal detectors in humanitarian demining. IEEE Sensors Applications Symposium (SAS); 2017 13-15 March; USA, Glassboro, NJ; 2017. <https://doi.org/10.1109/SAS.2017.7894073>
 8. Morgenthaler A, Rappaport C. Fast GPR underground shape anomaly detection using the Semi-Analytic Mode Matching (SAMM) algorithm. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS; 2013 21-26 July; Australia, Melbourne, VIC; 2013. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723051>
 9. Li W, Zhou H, Wan X. Generalized Hough Transform and ANN for subsurface cylindrical object location and parameters inversion from GPR data. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR); 2012 4-8 June; China, Shanghai; 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254874>
 10. O Dumin, Plakhtii V, Pryshchenko O, Pochanin G. Comparison of ANN and Cross-Correlation Approaches for Ultra Short Pulse Subsurface Survey. 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020); 2020 February 25-29; Ukraine, Lviv-Slavske; 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235459>
 11. Sharma P, Kumar B, Singh D, Gaba SP. Metallic Pipe Detection using SF -GPR: A New Approach using Neural Network. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS); 2016 10-15 July; China, Beijing; 2016. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730726>
 12. Callan R. The essence of neural networks. New York: Prentice Hall Europe; 1999.
 13. Dumin OM, Plakhtii VA, Pryshchenko OA, Shyrokorad DV. Recognition of objects under the earth's surface by ultra-wideband radio introscopy using artificial neural networks. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2018;28:24–29. [In Ukrainian].
 14. Dumin OM, Plakhtii VA, Pryshchenko OA, Shyrokorad DV, Volvach YaS. The effect of reducing the noise of the input signal on the classification of the location of the object by an artificial neural network in ultra-wideband radio introscopy. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2019;31:27–35 [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-03>
 15. Dumin OM, Plakhtii VA, Pryshchenko OA, Shyrokorad DV. Discrete tomography method in data processing of ultra-wideband subsurface radar by artificial neural network. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2018;29:17–26. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-03>
 16. Pochanin G, Capineri L, Bechtel T, Falorni P, Borgioli G, Ruban V, Orlenko O, Ogurtsova T, Pochanin O, Crawford F, Kholod P, Bossi L. Measurement of Coordinates for a Cylindrical Target Using Times of Flight from a 1-Transmitter and 4-Receiver UWB Antenna System. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020;58(2):1363-1372. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2946064>
 17. Duque A, Perry W, Anderson-Cook C. Complex Microwave Permittivity of Secondary High Explosives. Propellants Explosives Pyrotechnics. 2013;39(2):275-283. <https://doi.org/10.1002/prop.201300032>
 18. Vander Gaasta B, McFeeb J, Russella K, Fausta A. Design and validation of inert homemade explosive simulants for Ground Penetrating Radar. Proc. SPIE 9454, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XX; 2015 20-24 April; USA, Baltimore, Maryland; 2015 21 May. 945412 <https://doi.org/10.1117/12.2175586>
 19. Zafirir H, Bregman Y, Wolf D, Hershler S. Super-sensitive, real time and wide coverage, all terrain ground robotic and hand held systems for mine and UXO detection and mapping. 1998 Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines; 1998 12-14 October; UK, Edinburgh; IEE Conf. Publ. No. 458; 1998. <https://doi.org/10.1049/cp:19980721>
 20. Dumin O, Pryshchenko O, Plakhtii V, Pochanin G. Landmine detection and classification using UWB antenna system and ANN analysis. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW); 2020 September 21-25; Ukraine, Kharkiv; 2020. p. 1030–1035. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252574>