

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-04>

УДК 537.86

## РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ПІД ПОВЕРХНЕЮ ҐРУНТА ЗА ДОПОМОГОЮ ІМПУЛЬСНОГО ОПРОМІНЮВАННЯ АНТЕНОЮ ТИПУ «МЕТЕЛИК» ТА ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

І. Д. Персанов<sup>1</sup>, О. М. Думін<sup>1</sup>, В. А. Плахтій<sup>1</sup>, Д. В. Широкопад<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: [hoveryingphoenix@gmail.com](mailto:hoveryingphoenix@gmail.com)

Надійшла до редакції 21 вересня 2018 р.

**Актуальність.** Задачі підповерхневої радіолокації займають важливе місце в сучасному світі, наприклад в геології, будівництві та гуманітарному розмінуванні. Складною проблемою, що перешкоджає широкому застосуванню підповерхневих радарів, є обробка та інтерпретація параметрів відбитого електромагнітного поля.

**Мета роботи.** Ця робота має на меті вирішити проблему розпізнавання об'єктів під поверхнею ґрунта за допомогою імпульсного опромінювання антеною типу «метелик» та штучної нейронної мережі (ШНМ).

**Матеріали та методи.** Задача розпізнавання циліндричного ідеальнопровідного об'єкта, який знаходиться під поверхнею землі, розв'язуються ШНМ. Межа розділу повітря-земля опромінюється антеною типу «метелик», яка збуджується імпульсним струмом наносекундної тривалості. Таке опромінення майже точковим джерелом, на відміну від падіння плоскої нестационарної електромагнітної хвилі, яке розглядалось у наших попередніх роботах, характеризується значним зниженням енергії поля, що досягає прихованого об'єкта, відбивається від нього і приймається антеною. Більше того, таке зниження енергії поля стає відчутнішим пропорційно віддаленню об'єкту від радару. Ці складнощі можуть ставити під сумнів можливість застосування підходу на основі ШНМ. Електродинамічна задача розв'язується шляхом числового моделювання за допомогою методу FDTD. В якості вихідних даних використовувались часові залежності амплітуд електричних компонентів поля різної поляризації, які були отримані у чотирьох точках над поверхнею землі, що, в свою чергу, утворювали форму квадрату. На основі отриманих даних була натренована ШНМ з метою визначення положення об'єкта під поверхнею ґрунта.

**Результати.** Якість розпізнавання ШНМ була перевірена тестовими даними з додаванням гаусового шуму та даними, отриманими для випадку, коли приймальна система зміщена відносно об'єкта на величину, на яку ШНМ не була натренована.

**Висновки.** Антена система такого типу в поєднанні з ШНМ показує гарні результати визначення відстані до об'єкту навіть за наявності шумів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** підповерхневий радіолокатор, імпульсна електромагнітна хвиля, антена «метелик», штучна нейронна мережа, виявлення об'єктів

## SUBSURFACE OBJECT RECOGNITION IN A SOIL USING UWB IRRADIATION BY BOW-TIE ANTENNA AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

<sup>1</sup>I. D. Persanov, <sup>1</sup>O.M. Dumin, <sup>1</sup>V. A. Plakhtii, <sup>2</sup>D. V. Shyrokorad

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

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

**Background:** Subsurface radiolocation problems have an important place in the modern world, such as in geology, building, and humanitarian demining. A complex problem that impedes the widespread use of subsurface radars is the processing and interpretation of the parameters of the reflected electromagnetic field.

**Objectives:** The main purpose of this work is to solve the problem of recognition of objects buried in a soil by bow-tie antenna and artificial neural network (ANN).

**Materials and methods:** The problem of recognition an ideally conducting cylindrical object that is situated below the earth's surface is solved by an ANN. The air-ground interface is irradiated by a bow-tie antenna, which is excited by means of a nanosecond impulse current. The irradiation by nearly point-like source in contrast to plane transient electromagnetic wave incidence considered in our previous works is characterized by the significant decrease of field energy reached a hidden object, reflected, and received by antenna. Moreover, the descent of the field energy becomes more sensible proportionally to the distance from the object to the radar. The complications can call into question the possibility the application of the approach on the base of ANN. The electromagnetic problem is solved numerically by using the FDTD method. The time dependences of amplitudes of differently polarized electric field components, which were obtained in four points above the earth's surface were used as the initial data. The points form the shape of a square. The ANN was trained by the obtained data to determine the position of the object beneath the ground.

**Results:** ANN recognition quality was tested by test data with the addition of Gaussian noise and data obtained when the receiving system is moved relative to the object by shift of the value that was absent in training set.

**Conclusion:** Such type of antenna system in combination with the ANN shows good results for determining the distance to the object even in the presence of noise.

**KEY WORDS:** ground penetrating radar, impulse electromagnetic wave, bow-tie antenna, artificial neural network, object recognition

## РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПОД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ОБЛУЧЕНИЯ АНТЕННОЙ ТИПА «БАБОЧКА» И ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

И. Д. Персанов<sup>1</sup>, А. Н. Думин<sup>1</sup>, В. А. Плахтий<sup>1</sup>, Д. В. Широкопад<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61000, г. Харьков, пл. Свободы, 4

<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет, 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64

**Актуальность.** Задачи подповерхностной радиолокации занимают важное место в современном мире, например в геологии, строительстве и гуманитарном разминировании. Сложной проблемой, препятствующей широкому применению подповерхностных радаров, является обработка и интерпретация параметров отраженного электромагнитного поля.

**Цель работы.** Целью этой работы является решение проблемы распознавания объектов под поверхностью земли с помощью импульсного облучения антенной типа «бабочка» и искусственной нейронной сети (ИНС).

**Материалы и методы.** Задача распознавания цилиндрического идеальнопроводящего объекта, который находится под землей, решается с помощью ИНС. Граница раздела воздух-земля облучается антенной типа «бабочка», которая возбуждается импульсным током наносекундной длительности. Такое облучение почти точечным источником, в отличие от падения плоской нестационарной волны, которое рассматривалось в наших предыдущих работах, характеризуется значительным снижением энергии поля, которое достигает спрятанного объекта, отражается от него и принимается антенной. Более того, такое снижение энергии поля стает более ощутимым пропорционально отдалению объекта от радара. Эти трудности могут поставить под сомнение возможность применения подхода на основе ИНС. Электродинамическая задача решается путем численного моделирования с помощью метода FDTD. В качестве исходных данных использовались временные зависимости амплитуд электрических компонент поля различной поляризации, которые были получены в четырех точках над поверхностью земли, которые, в свою очередь, образовывали форму квадрата. На основе полученных данных была натренирована ИНС с целью определения положения объекта под поверхностью земли.

**Результаты.** Качество распознавания ИНС было проверено тестовыми данными с добавлением гауссова шума и данными, полученными для случая, когда приемная система смещена относительно объекта на величину, на которую ИНС не была натренированная.

**Выводы.** Антенная система данного типа в сочетании с ИНС показывает хорошие результаты определения расстояния до объекта даже в присутствии шумов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** георадар, импульсная электромагнитная волна, антенна-«бабочка», искусственная нейронная сеть, распознавание объектов

### ВСТУП

Існує ціла низка задач виявлення підповерхневих об'єктів, які можна розв'язати за допомогою георадарів. Використання надширококутних електромагнітних хвиль в таких системах забезпечує кращу точність та глибше проникнення в середовище з втратами [1]. Наносекундні електромагнітні імпульсні радари можуть ефективно відстежувати стан та якість асфальтового покриття [2]. Такі системи дають можливість виконання безпечного гуманітарного розмінування навіть у випадку з неметалевими вибуховими пристроями [3]. Ще одним прикладом застосування надширококутних радарів є створення систем, здатних виявляти об'єкти, що знаходяться за стіною [4].

Для вирішення цих задач необхідно мати ефективний електромагнітний випромінювач наносекундних імпульсів. На даний момент вже існує багатий вибір надширококутних антен, що випромінюють неспотворену імпульсну електромагнітну хвилю, для яких має виконуватись умова збереження положення фазового центру в широкому діапазоні частот. Антенна система Вівальді широко використовується для отримання спрямованого випромінювання, наприклад, для виявлення мін [5]. Завдяки широкому діапазону робочих частот та гарній часовій формі випромінюваного імпульсу, набула великої популярності антенна типу «метелик» [6]. Узгодження в широкій робочій смузі частот не так просто забезпечити порівняно з вузькокутною антеною, але воно конче потрібне для мінімізації спотворень імпульсу [7–8].

Аналіз відбитих хвиль для визначення параметрів досліджуваного об'єкта ускладнюється їх багаторазовим перевідбиттям від різних розсіювачів. Використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для подібних задач є виправданим кроком через добре відомі властивості такого підходу, що дають можливість мати точно визначений вихідний сигнал або відповідь [9]. Даний метод використовувався для визначення геометричних параметрів структур, опромінених монохроматичними хвилями [10]. Також ШНМ може поєднувати і аналізувати інформацію, отриману з усіх наявних частот [11]. Таким же

чином ШНМ ефективно використовуються для обробки та візуалізації даних георадарів [12]. Це дозволяє цілеспрямовано відрізнити, наприклад, пустоти від інших неоднорідних геологічних структур [13]. В якості вхідних даних в представленому підході використовується масив дискретних часових точок амплітуди відбитого поля, як в роботі [14]. Це дозволило з високою точністю визначати геометричні параметри діелектричної структури порівняно з просторовою тривалістю падаючого імпульсу в ситуації перекриття відбиттів від різних шарів структури [15]. Відповідне тренування демонструє хороші апроксимуючі здібності ШНМ [16], які пояснюють хорошу завадостійкість ШНМ, що використовується в цій роботі. Використання згорткової ШНМ може підвищити її стійкість до масштабування геометрії задачі [17], але мета роботи полягає у визначенні положення об'єкта, тому ми будемо використовувати звичайну повноз'язну ШНМ.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Антенна «метелик» збуджується наносекундним гаусовим імпульсом з тривалістю 0,6 нс. Вона розміщена на висоті 32 см над досліджуваною поверхнею і опромінює ґрунт з проникністю  $\epsilon = 9$  та провідністю  $\sigma = 0,005$  См/м. Досліджуваний об'єкт змодельований у формі ідеально провідного циліндра та має радіус 5,5 см і висоту 5,3 см. Він може бути розташований на різних відстанях від центру проекції антени на межу розподілу повітря-земля, але на постійній глибині 3 см. Відбите поле різної поляризації реєструється у чотирьох точках на однаковій висоті 32 см, що імітує антенну систему, описану в [18]. Отже, на відміну від випадку опромінення плоскою хвилею, представленою в роботі [19], тут ми маємо майже точкове опромінення, що повинно ускладнити процес розпізнавання. Ми вимірюємо відбиту від тривимірного об'єкта електромагнітну хвилю в чотирьох точках простору, які знаходяться в одній площині. Це робить задачу складнішою та більш подібною до реальної ситуації, ніж у [20]. Чисельне моделювання електромагнітної задачі здійснюється безпосередньо у часовій області методом FDTD [21].

### РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Розв'язання задачі розпізнавання складного відбитого сигналу забезпечується ШНМ, тому немає необхідності в надмірній оптимізації опромінювача, бо недоліки його роботи скомпенсуються мережею. Модель антени представлена на Рис. 1, де  $L = 50$  мм,  $h = 3$  мм,  $D = 22$  мм. Вищезазначені параметри були отримані в ході оптимізації випромінювача, де головною ціллю було максимальне збереження форми випромінюваного імпульсу в усіх напрямках та малий КСХН в максимально широкому діапазоні частот. З цих міркувань на Рис. 2 зображено залежність КСХН від частоти для різних вихідних опорів генератора. Для подальших розрахунків був обраний кращий варіант, тобто 200 Ом. Для ілюстрації характеристик спрямованості антени на Рис. 3 представлені часові форми електричного поля в двох площинах  $\varphi = 0$  та  $\varphi = 90$  градусів для різних кутів  $\theta$ . Слід помітити слабку спрямованість антени в площині  $\varphi = 90$  градусів, що зручно для опромінення поверхні землі в напрямку руху антенної системи. Точки прийому відбитого поля утворюють квадрат, де вісь OX антени (див. Рис. 1) розташована в діагоналі квадрата, як описано в [18]. Поле в точках прийому розраховується за допомогою тривимірного моделювання FDTD [21].

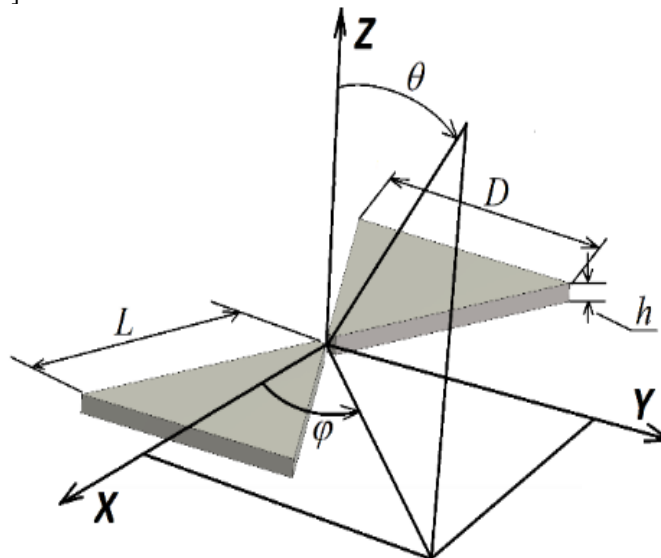


Рис. 1. Геометрія моделі антени-метелика

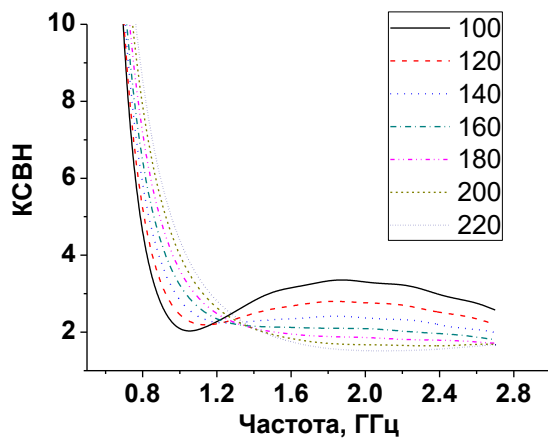


Рис. 2. КСВН антени в діапазоні робочих частот для різних вихідних опорів (Ом) збуджуючого генератора

### ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ШНМ

Отримані в чотирьох точках сигнали після дискретизації та комбінування, тобто розрахунку сумарних і різницевих сигналів, утворюють масив вхідних даних з розміром 3000 значень, який використовувався для тренування ШНМ зі структурою 3000-1000-200-100-7. Метою тренування було визначення наявності циліндра поблизу (вихід 1) та його положення у 6 дискретних точках (виходи 2-7), що відповідають відстаням відносно центру антенної системи 0, 50, 100, 150, 200 та 250 мм відповідно.

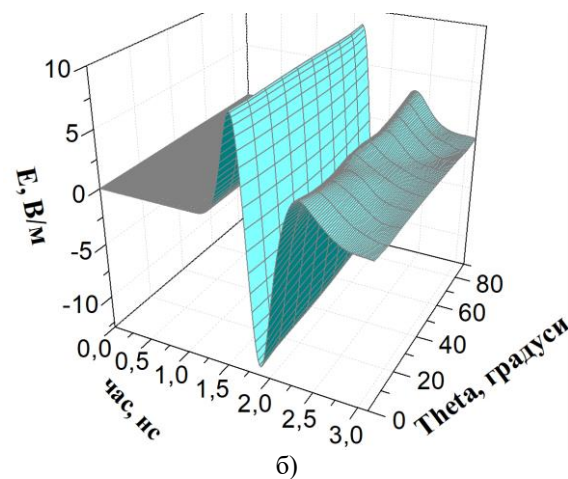
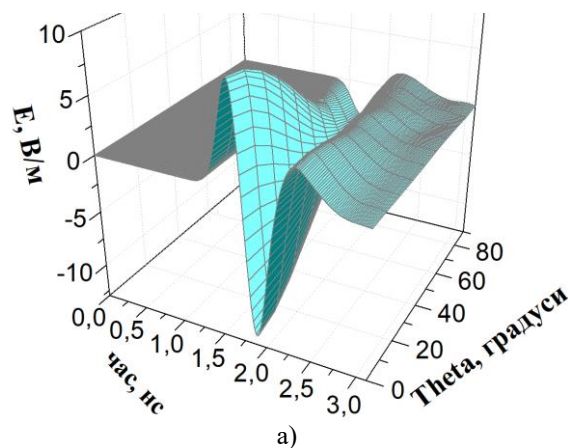


Рис. 3. Часові форми випромінюваних імпульсів для різних кутів  $\theta$  у двох площинах: а)  $\varphi = 0$  градусів та б)  $\varphi = 90$  градусів.

Перевірка роботи ШНМ проводиться на вхідному сигналі в точках прийому з додатковим гаусовим шумом з різним рівнем співвідношення сигнал/шум (ССШ). Візуалізація сигналів для ситуації, коли відстань до циліндра 100 мм, представлена на Рис. 4 для різних ССШ.

Реакція ШНМ на набір сигналів на Рис. 4 зображена на Рис. 5 для відстані до об'єкту 100 мм, де номери вихідних сигналів ШНМ пов'язані з відстанями до металевго об'єкта для різних рівнів шуму. Видно, що ШНМ чудово працює на ССШ = 11,6 дБ, але починаючи з ССШ = 8,4 дБ, вона робить помилку в 50 мм.

Іншим типом спотворення вхідних даних є переміщення об'єкта в поперечному напрямку до лінії руху антенної системи. Вихідні сигнали ШНМ в цьому випадку показані на Рис. 6 для зсуву 20 мм і 40 мм. Видно, що поперечний зсув не викликає суттєвих помилок у визначенні відстані до об'єкта.

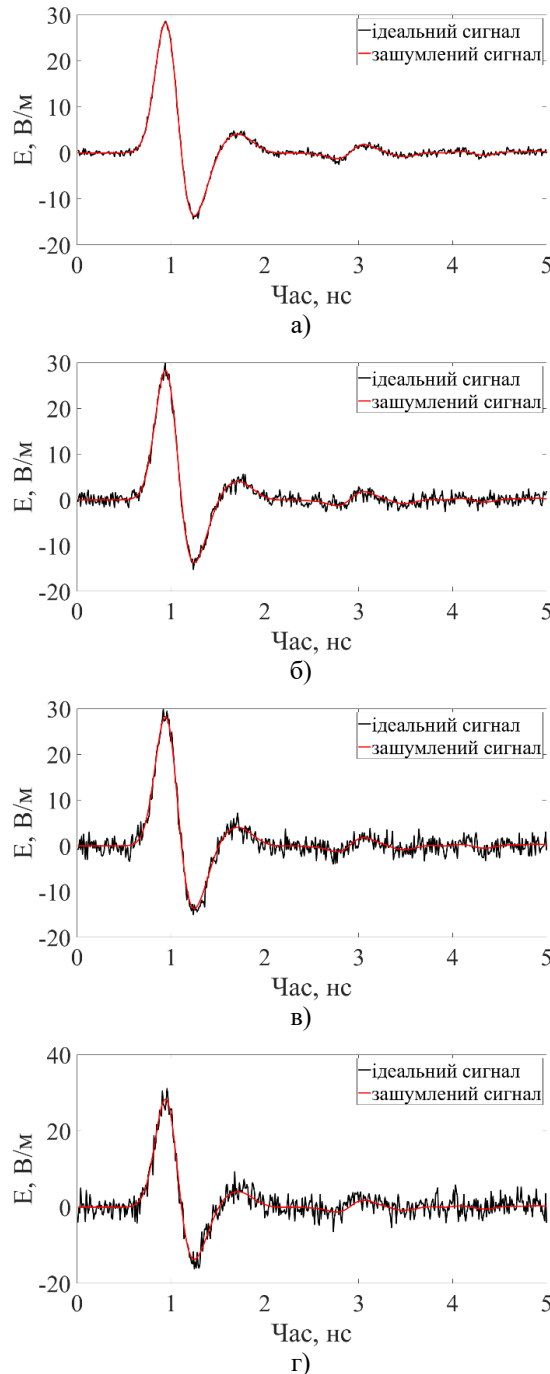


Рис. 4. Приклади зашумлених сигналів, відбитих від моделі ґрунту з металевим циліндром всередині  
 а) SNR = 17,5 дБ, б) SNR = 11,6 дБ, в) SNR = 8,4 дБ, г) SNR = 6,4 дБ.

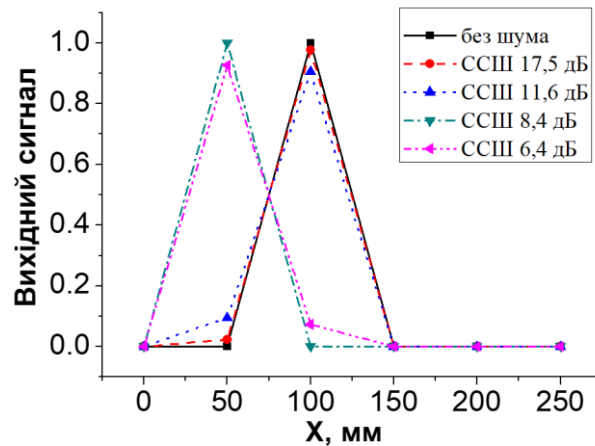
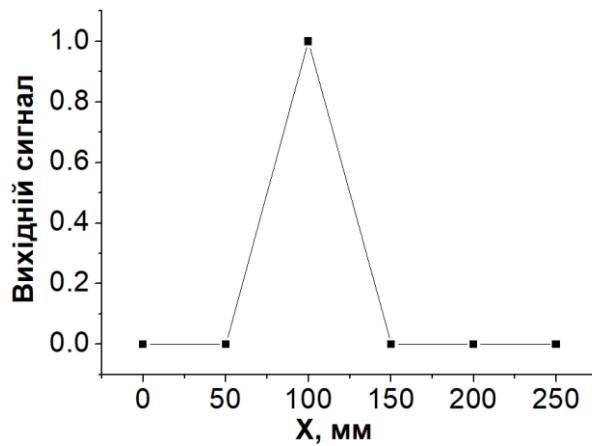
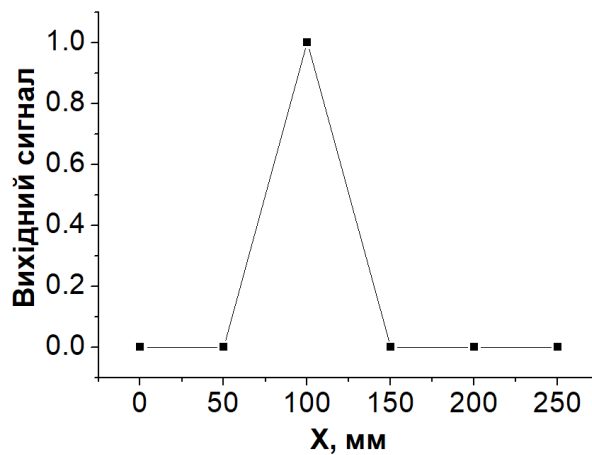


Рис. 5. Залежність вихідних сигналів ШНМ від відстані до металевого об'єкта для різних рівнів шуму сигналів для випадку реальної відстані 100 мм.



а)



б)

Рис. 6. Залежність вихідні сигналів ШНМ від відстані до металевого об'єкта для його зсуву в поперечному напрямку а) 20 мм і б) 40 мм при реальній відстані 100 мм.

Підтримувати висоту антенної системи постійною з хорошою точністю неможливо через хвилястість реальної земної поверхні. Отже, слід дослідити вплив зміни висоти на якість визначення відстані до об'єкта. Тренування ШНМ було виконано для випадку висоти 320 мм антенної системи над поверхнею ґрунту. І, щоб оцінити вплив неточності положення антенної системи по висоті, було проведено тестування ШНМ на даних, розрахованих для висот 300 мм і 340 мм (Рис. 7). Глибина об'єкта зберігалась постійною, а саме 3 см, а відстань від антенної системи до об'єкта складала 100 мм. Як результат, можемо бачити, що зменшення висоти на 20 мм призводить до помилки визначення положення об'єкта (50 мм) (Рис. 7а), при цьому збільшення висоти на додаткові 20 мм спричиняє

максимізацію виходу ШНМ (Рис. 7б), що відповідає відстані 200 мм. Важко пояснити значну помилку у визначенні відстані, але напрямок зміщення помилкової відповіді ШНМ можна передбачити.

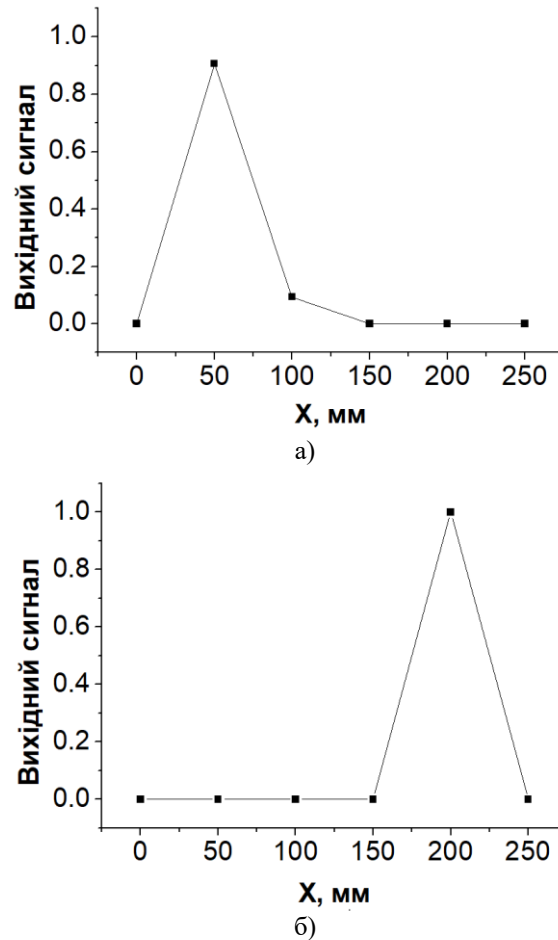


Рис. 7. Залежність вихідного сигналу ШНМ від відстані до об'єкта для різних значень висоти антенної системи а) 300 мм і б) 340 мм для реальної відстані до об'єкта 100 мм.

### ВИСНОВКИ

ШНМ демонструє хорошу стабільність визначення відстані до об'єкта за наявності шумів з ССШ до 8,4 дБ. Визначення позицій об'єкта за допомогою ШНМ ефективно навіть у випадку поперечного зсуву об'єкта. Маючи кращу роздільну здатність у вигляді більшої кількості відповідних виходів, можна було б краще оцінити цей вплив. Але для цього треба було б збільшити тренувальну вибірку, що в свою чергу призвело б до ще більшої кількості розрахунків та можливого ускладнення структури ШНМ. На даному етапі роботи отримані результати можна вважати задовільними. Також важливо відмітити суттєву чутливість ШНМ до зміни висоти антенної системи.

### ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку Почаніну Г.П. за корисну взаємодію 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

О. М. Dumín <http://orcid.org/0000-0001-5067-9689>

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

I. D. Persanov <http://orcid.org/0000-0002-7136-283X>

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



## REFERENCES

1. J. D. Taylor, *Ultrawideband radar: applications and design*, Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2012.
2. 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.
3. G. Pochanin, V. Ruban, T. Ogurtsova, O. Orlenko, I. Pochanina, P. Kholod, L. Capineri, P. Falorni, A. Bulletti, M. Dimitri, L. Bossi, T. Bechtel, F. Crawford, "Application of the Industry 4.0 Paradigm to the Design of a UWB Radiolocation System for Humanitarian Demining", *Proc. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018)*, Odessa, Ukraine, pp. 50-56. 4-7 September, 2018.
4. 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.
5. M. Sato, X. Feng, Y. Hamada, Z. Zeng, F. Guangyou, F. Kong, "GPR using an array antenna for landmine detection," *European Association of Geoscientists & Engineers, Near Surface Geophysics*. pp. 7-13, February 2004.
6. I. Liberal, D. Caratelli, A. Yarovoy, R. Cicchetti, M. Russo, "Conformal butterfly antennas for Ultra-Wideband Radio Direction finding applications," *The 40th European Microwave Conference*. Paris, pp. 846-849, 2010.
7. X. Gao,\* F. Podd, W. van Verre, D. J. Daniels, and A. J. Peyton, "Investigating the Performance of Bi-Static GPR Antennas for Near-Surface Object Detection," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 19,1 170, 5 Jan. 2019.
8. Qiubo Ye, Zhi Ning Chen, Terence S. P. See, "Characteristics of an Ultra-Wideband (UWB) Butterfly-Shaped Monopole Antenna," *Ultra Wideband Communications: Novel Trends - Antennas and Propagation*. August 2011.
9. S. Haykin, *Neural Networks*, 2nd ed., New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
10. O. Drobakhin, A. Doronin, "Estimation of thickness of subsurface air layer by neuron network technology application to reflected microwave signal", *Proc. XII Int. Conf. on MMET*, Odesa, pp. 150-152, 2008.
11. O. O. Drobakhin, A. V. Doronin, "Neural network application for dielectric structure parameter determination by multifrequency methods", *Proc. of Third International Conference of Ultrawideband and ultrashort impulse signals*, Sevastopol, Ukraine, pp. 358-360, 2006.
12. L. Travassosa, L. Avilab, N. Ida, "Artificial Neural Networks and Machine Learning techniques applied to Ground Penetrating Radar: A review," *Applied Computing and Informatics*. 29 June 2018.
13. S. Tomecka-Suchoń, P. Szymczyk, M. Szymczyk, "Neural Networks as a Tool for Georadar Data Processing," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* Vol. 25, No. 4, pp 955-960, 2015.
14. D. Shyrokorad, O. Dumin, O. Dumina, "Time domain analysis of reflected impulse fields by artificial neural network," *Proc. IV Conf. on UWBUSIS, Sevastopol*, 2008, pp. 124-126.
15. O. Dumin, O. Dumina, D. Shyrokorad, "Time domain analysis of fields reflected from model of human body surface using artificial neural network," in *Proc. EuCAP, Berlin, 2009*, pp. 235-238.
16. D. Shyrokorad, O. Dumin, O. Dumina, V. Katrich, V. Chebotarev "Approximating properties of artificial neural network in time domain for the analysis of electromagnetic fields reflected from model of human body surface," *Proc. MSMW, Kharkiv*, 2010.
17. D. Shyrokorad, O. Dumin, O. Dumina, V. Katrich, "Analysis of transient fields reflected from model of human body surface using convolutional neural network," *Proc. MMET, Kyiv*, 2010.
18. T. Ogurtsova, V. Ruban, A. Pojedinchuk, O. Pochanin, G. Pochanin, L. Capineri, P. Falorni, G. Borgioli, T. Bechtel, F. Crawford, "Criteria for Selecting Object Coordinates at Probing by the Impulse UWB GPR with the "1Tx + 4Rx" Antenna System", *Proc. 9th Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018)*, pp. 161-164. Odessa, Ukraine, September 4-7 (2018).
19. O. Dumin, O. Prishchenko, G. Pochanin, V. Plakhtii, D. Shyrokorad, "Subsurface Object Identification by Artificial Neural Networks and Impulse Radiolocation", *2018 IEEE Second Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (DSMP-2018)*, August 21-25, 2018, Lviv, Ukraine.- pp. 434-437.
20. O.M. Dumin, O. Prishchenko, D. Shyrokorad, V. Plakhtii "Application of UWB Electromagnetic Waves for Subsurface Object Location Classification by Artificial Neural Networks", *Proc. 9th Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018)*. – Odessa (Ukraine, September 4-7). – 2018. – pp. 290-293.
21. A. Taflove, S. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed., Boston, London: Artech House, 2005.