

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-05>

УДК 537.86

## ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ КОРЕЛЯЦІЇ ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НАДШИРОКОСМУГОВИХ ПОЛІВ

І. Д. Персанов, О. М. Думін, В. А. Плахтій, О. А. Прищенко, П. Г. Фомін

*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4,*

*м. Харків, 61022, Україна*

*E-mail: dumin@karazin.ua*

Надійшла до редакції 24 березня 2021 р.

**Актуальність.** Системи глобального та локального позиціонування мають широкий спектр цивільних та військових застосувань. Транспорт, логістика, точне землеробство, промислові технології, системи безпеки потребують точного визначення положення об'єктів на площині та в об'ємі. Існуючі сучасні системи позиціонування мають певні недоліки експлуатації і обмеження в користуванні.

**Мета роботи.** Вдосконалити систему локального позиціонування на площині, що не потребує часової синхронізації, шляхом використання імпульсного надширокосмугового електромагнітного поля двох рознесених антен типу «метелик» та аналізу і розпізнавання часових форм прийнятих хвиль штучними нейронними мережами та методом взаємної кореляції. Провести дослідження стійкості роботи системи визначення положення об'єкта за наявності завади у вигляді адитивного білого шуму.

**Матеріали та методи.** Електродинамічне моделювання збудження та випромінювання антен проводиться методом кінцевих різниць у часовому просторі (FDTD). Класифікація форм прийнятих імпульсів за відомими зразками реалізується двома альтернативними методами: кореляційним підходом та штучними нейронними мережами.

**Результати.** Використання методу кореляції та штучних нейронних мереж (ШНМ) дозволило реалізувати систему позиціонування із кутовою роздільною здатністю 1 градус. Отримані імовірнісні розподіли кутів розпізнавання для різних рівнів адитивного шуму в прийнятих сигналах для цих двох методів.

**Висновки.** Порівняння ШНМ та методів кореляції для розпізнавання кутів показує, що штучні нейронні мережі можуть продемонструвати кращу точність, ніж кореляційний підхід. Навіть для співвідношення сигнал/шум 0 дБ ШНМ дає коректне розпізнавання кутів після статистичного усереднення результатів класифікації. ШНМ в числовому моделюванні демонструє час розрахунку на три порядки менший, ніж нам потрібно для розрахунку функції взаємної кореляції. Використання коротшого електромагнітного імпульсу підвищує якість класифікації кутів за наявності шуму для обох представлених методів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** надширокосмугові імпульсні електромагнітні хвилі, антена типу «метелик», штучна нейронна мережа, метод кореляції, система позиціонування

## COMPARISON OF CORELLATION METHOD AND ARTIFITIAL NEURAL NETWORKS FOR DETERMINING OF OBJECT POSITION BY ULTRAWIDEBAND FIELDS

I. D. Persanov, O.M. Dumin, V. A. Plakhtii, O. A. Pryshchenko, F. G. Fomin

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

**Background:** Global and local positioning systems have a wide area of civil and military applications. Transport, logistics, precise agriculture, industrial technologies, safety systems need a strict definition of objects position on plane or in space. Existing modern positioning systems have some drawbacks in utilization and restrictions in application.

**Objectives:** To improve a system of local positioning on a plane that does not need a time synchronization using the impulse ultrawideband electromagnetic field of two spaced bow-tie antennas and analysis and recognition of time forms of received waves by artificial neural networks and cross correlation method. To carried out the investigation of stability of the positioning system operation in presence of an interference in the form of additive white noise.

**Materials and methods:** The electromagnetic simulation of excitation and radiation of the antennas is carried out by finite difference time domain method. The classification of received impulse form by known samples is realized by two alternative method, i.e. correlation approach and artificial neural networks.

**Results:** The utilization of correlation method and artificial neural networks permitted to realize the positioning system with angular resolution of 1 degree. The probability distributions of recognized angles for different levels of additive noise in received signals for these two techniques are obtained.

**Conclusion:** The comparison of artificial neural network application and correlation method for angle recognition shows that artificial neural networks can demonstrate a better precision than correlation approach. artificial neural network gives a correct angle recognition after statistical averaging of classification results even for the signal to noise ratio 0 dB. Artificial neural networks demonstrate a in three times shorter time of numerical simulation than we

need for cross correlation function calculation. The application of shorter electromagnetic impulse increases the quality of angle classification in presence of the noise for both presented methods.

**KEY WORDS:** ultrashort impulse electromagnetic wave, bow-tie antenna, artificial neural network, correlation method, positioning system

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИИ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОЛЕЙ

И. Д. Персанов, А. Н. Думин, В. А. Плахтий, А. А. Прищенко, Ф. Г. Фомин

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

**Актуальность.** Системы глобального и локального позиционирования имеют широкий спектр гражданских и военных применений. Транспорт, логистика, точное земледелие, промышленные технологии, системы безопасности требуют точного определения положения объектов на плоскости и в объеме. Существующие современные системы позиционирования имеют определенные недостатки эксплуатации и ограничения в использовании.

**Цель работы.** Усовершенствовать систему локального позиционирования на плоскости, которая не требует временной синхронизации, путем использования импульсного сверхширокополосного электромагнитного поля двух разнесенных антенн типа «бабочка», а также анализа и распознавания временных форм принимаемых волн искусственными нейронными сетями и методом взаимной корреляции. Провести исследования устойчивости работы системы определения положения объекта при наличии помехи в виде аддитивного белого шума.

**Материалы и методы.** Электродинамическое моделирование возбуждения и излучения антенн проводится методом конечных разностей во временной области (FDTD). Классификация форм принятых импульсов по известным образцам реализуется двумя альтернативными методами: корреляционным подходом и искусственными нейронными сетями.

**Результаты.** Использование метода корреляции и искусственных нейронных сетей (ИНС) позволило реализовать систему позиционирования с угловой разрешающей способностью 1 градус. Получены вероятностные распределения углов распознавания для различных уровней аддитивного шума в принятых сигналах для этих двух методов

**Выводы.** Сравнение ИНС и метода корреляции для распознавания углов показывает, что искусственные нейронные сети могут продемонстрировать лучшую точность, чем корреляционный подход. Даже для соотношения сигнал/шум 0 дБ ИНС дает корректное распознавание углов после статистического усреднения результатов классификации. ИНС в численном моделировании демонстрирует время расчета на три порядка меньше, чем нам нужно для вычисления функции взаимной корреляции. Использование более короткого электромагнитного импульса повышает качество классификации углов при наличии шума для обоих представленных методов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сверхширокополосные импульсные электромагнитные волны, антенна типа «бабочка», искусственная нейронная сеть, метод корреляции, система позиционирования

### ВСТУП

Існуючі системи глобального позиціонування (GPS) можуть задовольнити більшу частину своїх користувачів, але при певних природних умовах або в закритих приміщеннях його використання сильно ускладнено [1]. Визначення положення об'єктів конче потрібне в різних сферах діяльності людини: у сільському господарстві [2], для безпеки дорожнього руху [3], для різних видів спорту [4], в сферах промислового виробництва, логістики товарів тощо.

Зміна діаграми спрямованості антени на різних частотах призводить до зміни часової форми електромагнітного поля, що випромінюється під різними кутами, на що свого часу звернув увагу Хармут [5]. Часова форма також суттєво змінюється у ближній зоні антени, що використана в спеціальній системі позиціонування [6], [7]. Чим більше напрямленість антени, тим помітніші зміни часової форми випроміненого імпульсу в дальній зоні. Цей ефект можна використати для визначення кута падіння хвилі з метою створення системи позиціонування [8] з використанням двох ширококугових антен, наприклад, типу «метелик». На відміну від системи GPS та інших, нова система не потребує синхронізації за часом та є стійкою для існуючих вузькокугових електромагнітних завад.

В цій статті наведено два методи визначення кутів випромінювання антен: за допомогою штучної нейронної мережі (ШНМ) та методу кореляції. Перший підхід потребує навчання ШНМ за відомими даними шляхом знаходження вагових коефіцієнтів проходження сигналів між шарами ШНМ. Процес навчання ШНМ приводить до винаходу унікального методу обробки даних будь-якої форми та природи, включаючи часові точки амплітуд електромагнітного поля [9]. Ці два підходи для визначення положення об'єкту, що були попередньо використані для задач підповерхневого зондування [10], порівнюються в цій статті та аналізуються щодо їхньої стійкості до шумів.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Дві антени типу «метелик» випромінюють електромагнітні імпульси в секторі прямого кута та у випадкові моменти часу. Ці імпульси породжуються струмом гаусової форми з тривалістю 0,2 та 0,15 нс відповідно. Область визначення місця розташування об'єкта зображена на Рис.1.

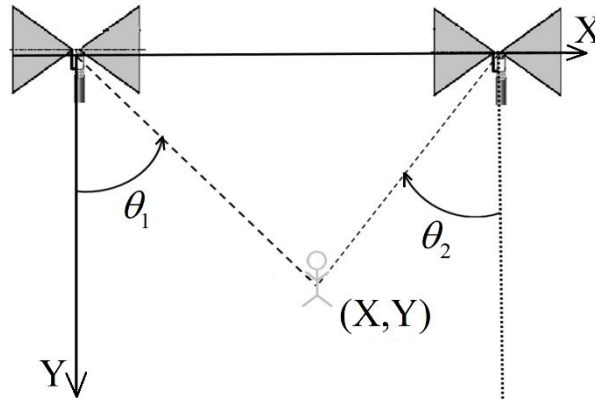


Рис. 1. Геометрія задачі  
Fig. 1. Geometry of the problem

Для визначення невідомої координати об'єкта (X, Y) вимірюється X компонента електричного поля. Електродинамічна задача розв'язується методом скінчених різниць в часовому просторі (FDTD) [11]. Проводячи класифікацію часових форм отриманих імпульсів за кутами падіння  $\theta_1$  і  $\theta_2$  та знаючи координати випромінюючих антен, ми можемо визначити координати об'єкта (X, Y). Розпізнавання імпульсів за кутами здійснюється ШНМ і кореляційним методом. Структура ШНМ схожа на описану в [12]. Кореляційний підхід заснований на розрахунку взаємно-кореляційної функції прийнятого сигналу та відомих сигналів, що кожна антена випромінює під різними кутами,

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(t)dt \tag{1}$$

де  $f(t)$  – залежність прийнятого сигналу від часу,  $g(t)$  – часова форма для кожного табульованого кута випромінювання кожної антени,  $\tau$  – часове зміщення. Для дискретних подань сигналів вищезазначена формула набуває вигляду:

$$B_k = \frac{\sum_{(n)} f_n g_{n-k}}{\sqrt{\sum_{(n)} (f_n)^2 \sum_{(n)} (g_n)^2}}, \tag{2}$$

де  $n$  позначає кількість часових точок,  $k$  – вказує на часове зміщення.

### ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Ми навчили повнозв'язну ШНМ зі структурою 540–1000–500–200–SoftMax–182 з функцією лінійного збудження (ReLU) [12] для розпізнавання часової форми амплітуди електричної компоненти випромінюваного поля від кожної антени з кутовим кроком в один градус. Таким чином, навчальний набір складається з 182 часових залежностей для 182 кутів двох антен з кроком часової дискретизації 0,01 нс та з часовим вікном 5,4 нс. Відповідно, масив, що описує часову залежність одного імпульсу, становить 540 точок. ШНМ містить 182 виходи, де кути випромінювання першої антени  $\theta_1$  ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ) позначаються як 1-91 виходи, а другої антени  $\theta_2$  ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ) – виходи 92-182.

Класифікація прийнятих сигналів також проводиться шляхом розрахунку функції взаємної кореляції зі зразками прийнятих сигналів для всіх кутів кожної антени з кроком в один градус та для всіх можливих часових зсувів  $\tau$ . Максимальне значення кореляційної функції вказує на правильно визначений кут напрямку випромінювання антени. Стійкість розпізнавання перевіряється додаванням до сигналу моделі білого шуму із заданим значенням співвідношення сигнал/шум (ССШ). Приклади прийнятих сигналів із додаванням шуму різних рівнів зображені на Рис. 2.

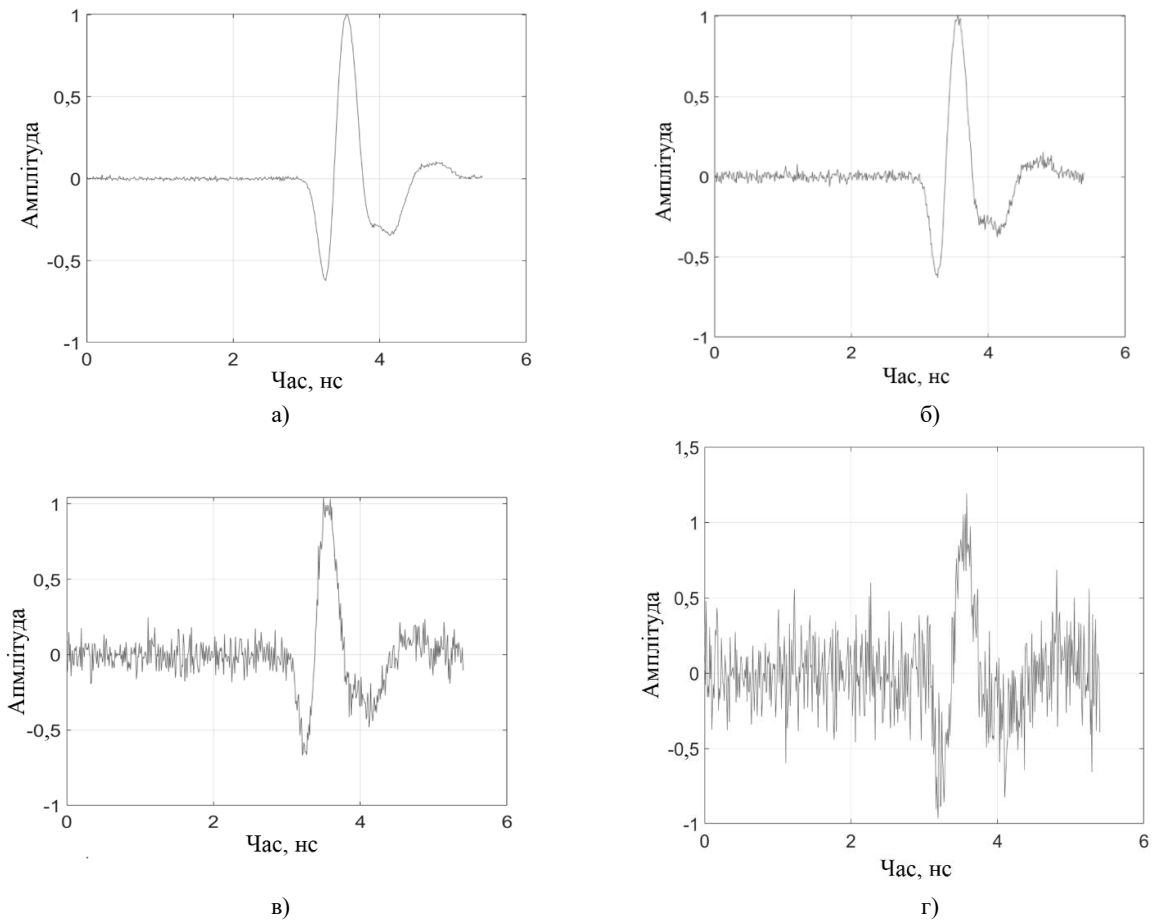


Рис. 2. Приклад прийнятих сигналів з різним рівнем ССШ: а) 30 дБ, б) 20 дБ, в) 10 дБ, г) 0 дБ.  
 Fig. 2. Example of received signals with different levels SNR: a) 30 dB, b) 20 dB, c) 10 dB, d) 0 dB.

### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Оскільки генерація шуму є непередбачуваним процесом, обробка сигналів методом ШНМ та методом взаємної кореляції може дати випадковий нехарактерний результат розпізнавання, пропонується повторити генерацію адитивного шуму 1000 разів і показати статистичний розподіл класифікації за нашими методами для всіх цих реалізацій шуму. Розподіл розпізнаних кутів для сигналу із шумом ССШ = 30 дБ від першої випромінюючої антени під кутом 40 градусів, який в процесі навчання був визнаний як нестабільний для ШНМ, представлено на Рис. 3. Можна переконатись, що ШНМ не допускає помилок у класифікації, а метод взаємної кореляції забезпечує абсолютно правильне розпізнавання в 24% випадків.

Результат успішної класифікації ШНМ зображено на Рис. 4 для сигналу від другої антени для аналогічного кута випромінювання 40 градусів. Тут кут 40 градусів відповідає номеру виходу 131 ШНМ. Зручно показати сигнали з усіх виходів ШНМ, тому що це допомагає контролювати хибне розпізнавання номеру антени. Взаємна кореляція класифікує 31% сигналів абсолютно правильно. Краще розпізнавання коротшого імпульсу також було помічено ще у роботі [8]. Збільшення потужності шуму до ССШ = 20 дБ призводить до погіршення якості розпізнавання, що проілюстровано на Рис. 5. Відсоток правильної класифікації падає з 24% до 13% для взаємної методу кореляції та від 100% до 87% для ШНМ. Що стосується другої антени, як показано на Рис. 6, результати також виявляються кращими із падінням відсотку правильних розпізнавань з 31% до 17% та зі 100% до 91% для тих же ж випадків.

Подальше збільшення потужності шуму до ССШ = 10 дБ, як представлено на Рис. 7 та 8, викликає менш точне розпізнавання та появу помилок у класифікації антен для методу кореляції, більш того, відсоток хибних розпізнавань сигналів як таких, що прийшли з іншої антени, зростає. Та сама тенденція посилюється, як видно на Рис. 9 та 10 для ССШ = 0 дБ, що унеможливує розпізнавання. Частка хибних розпізнавань антени ШНМ стає подібною до методу взаємної кореляції при ССШ = 10 дБ. Із Рис. 10 слідує, що ШНМ забезпечує в чотири рази більшу кількість правильних класифікацій у порівнянні з кореляційним підходом.

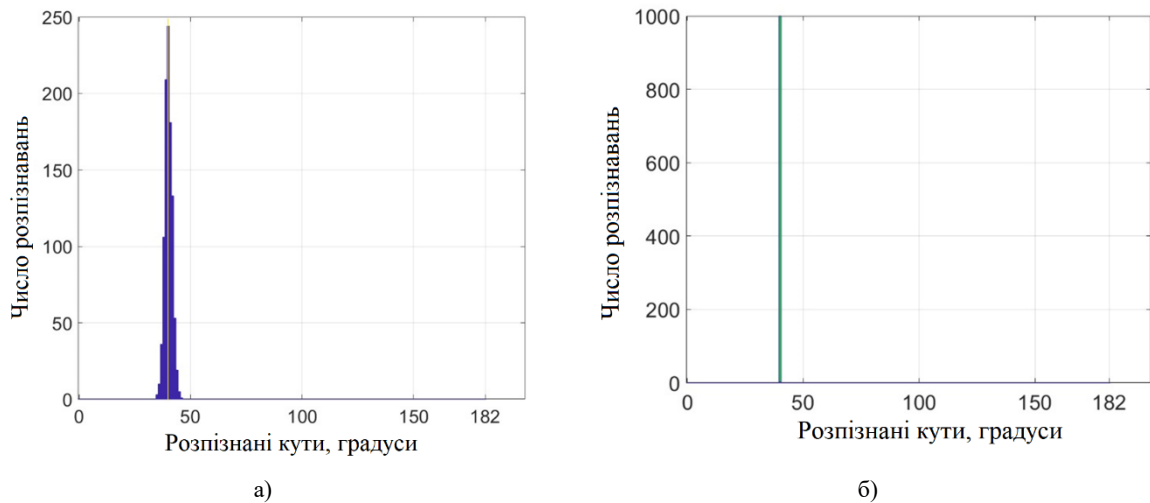


Рис. 3. Розподіл розпізнаних кутів для різних реалізацій шуму для взаємної кореляції (а) та для ШНМ (б) обробки прийнятого сигналу від першої антени під кутом  $40^\circ$  з ССШ = 30 дБ.

Fig. 3. Distribution of recognized angles for different noise realizations for cross-correlation (a) and for ANN (b) processing of the received signal from the first antenna at an angle of  $40^\circ$  with SNR = 30 dB.

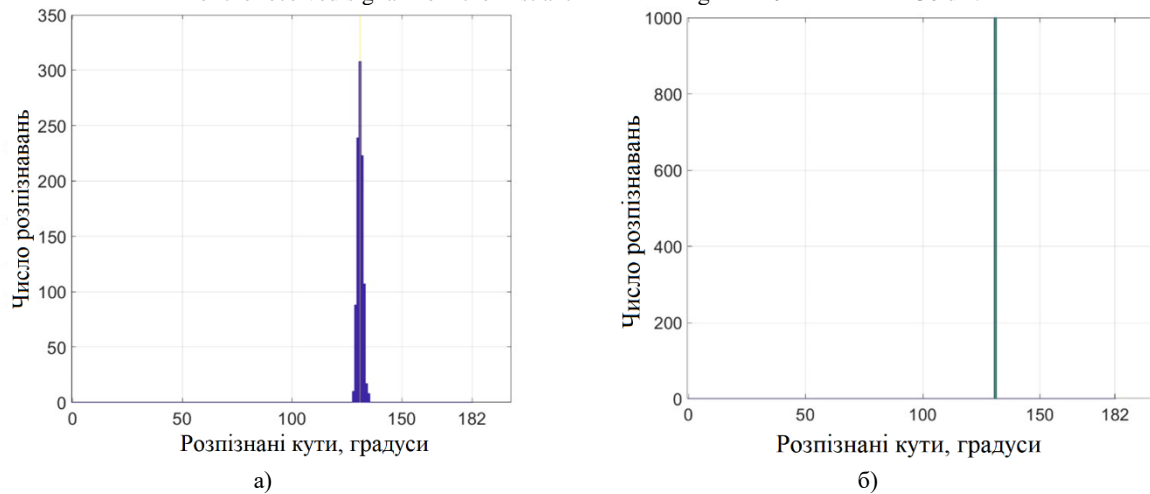


Рис. 4. Розподіл розпізнаних кутів для різних реалізацій шуму для взаємної кореляції (а) та для ШНМ (б) обробки прийнятого сигналу від другої антени під кутом  $40^\circ$  з ССШ = 30 дБ.

Fig. 4. Distribution of recognized angles for different noise realizations for cross-correlation (a) and for ANN (b) processing of the received signal from the second antenna at an angle of  $40^\circ$  with SNR = 30 dB.

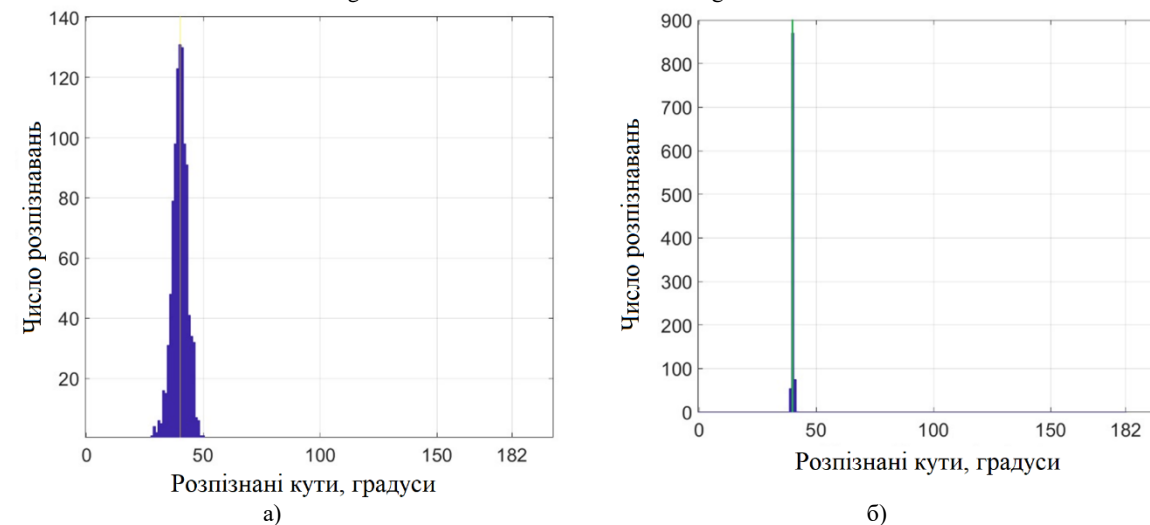


Рис. 5. Розподіл розпізнаних кутів для різних реалізацій шуму для взаємної кореляції (а) та для ШНМ (б) обробки прийнятого сигналу від першої антени під кутом  $40^\circ$  з ССШ = 20 дБ.

Fig. 5. Distribution of recognized angles for different noise realizations for cross-correlation (a) and for ANN (b) processing of the received signal from the first antenna at an angle of  $40^\circ$  with SNR = 20 dB.

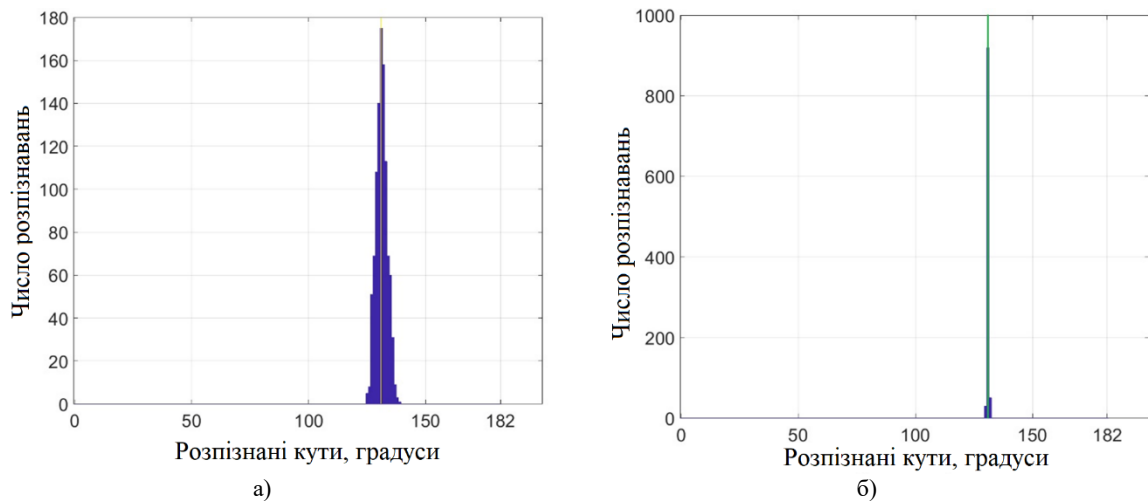


Рис. 6. Розподіл розпізнаних кутів для різних реалізацій шуму для взаємної кореляції (а) та для ШНМ (б) обробки прийнятого сигналу від другої антени під кутом  $40^\circ$  з ССШ = 20 дБ.

Fig. 6. Distribution of recognized angles for different noise realizations for cross-correlation (a) and for ANN (b) processing of the received signal from the second antenna at an angle of  $40^\circ$  with SNR = 20 dB.

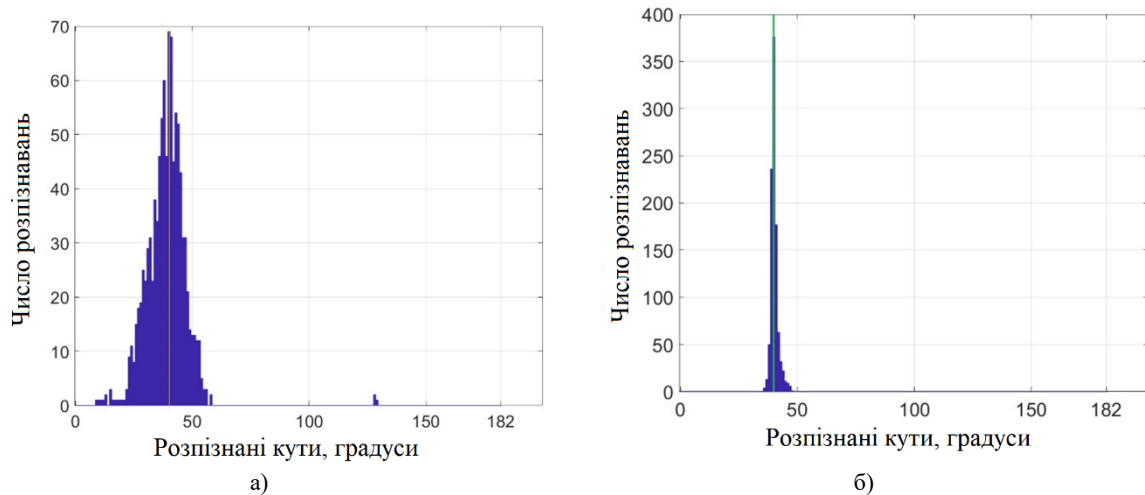


Рис. 7. Розподіл розпізнаних кутів для різних реалізацій шуму для взаємної кореляції (а) та для ШНМ (б) обробки прийнятого сигналу від першої антени під кутом  $40^\circ$  з ССШ = 10 дБ.

Fig. 7. Distribution of recognized angles for different noise realizations for cross-correlation (a) and for ANN (b) processing of the received signal from the first antenna at an angle of  $40^\circ$  with SNR = 10 dB.

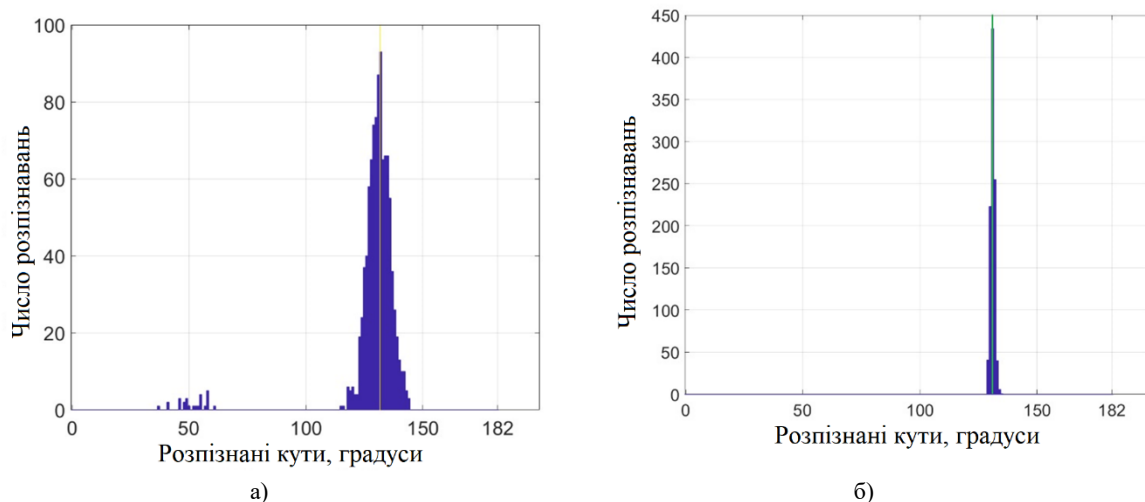


Рис. 8. Розподіл розпізнаних кутів для різних реалізацій шуму для взаємної кореляції (а) та для ШНМ (б) обробки прийнятого сигналу від другої антени під кутом  $40^\circ$  з ССШ = 10 дБ.

Fig. 8. Distribution of recognized angles for different noise realizations for cross-correlation (a) and for ANN (b) processing of the received signal from the second antenna at an angle of  $40^\circ$  with SNR = 10 dB.

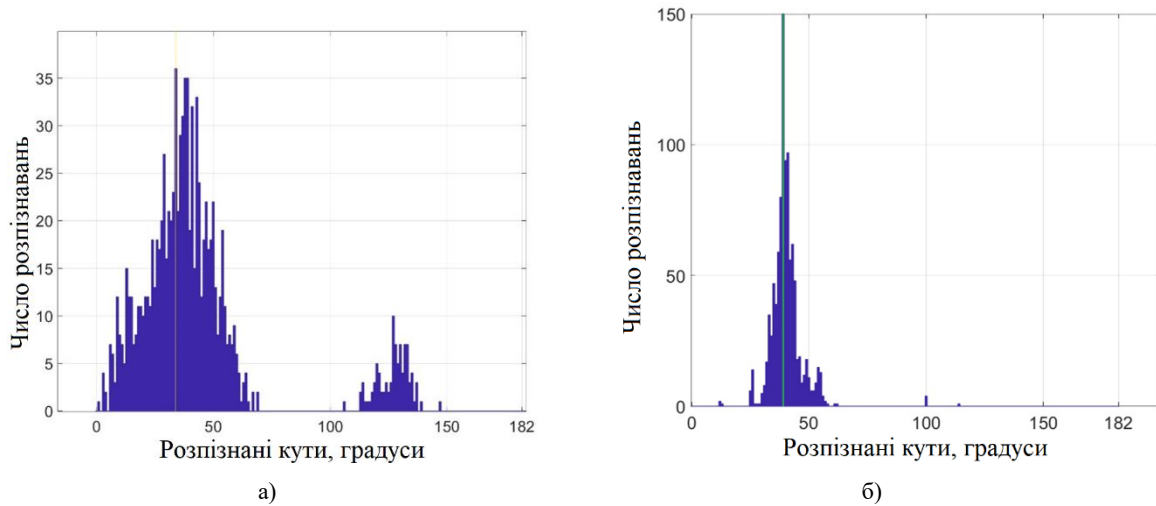


Рис. 9. Розподіл розпізнаних кутів для різних реалізацій шуму для взаємної кореляції (а) та для ШНМ (б) обробки прийнятого сигналу від першої антени під кутом 40° з ССШ = 0 дБ.

Fig. 9. Distribution of recognized angles for different noise realizations for cross-correlation (a) and for ANN (b) processing of the received signal from the first antenna at an angle of 40° with SNR = 0 dB.

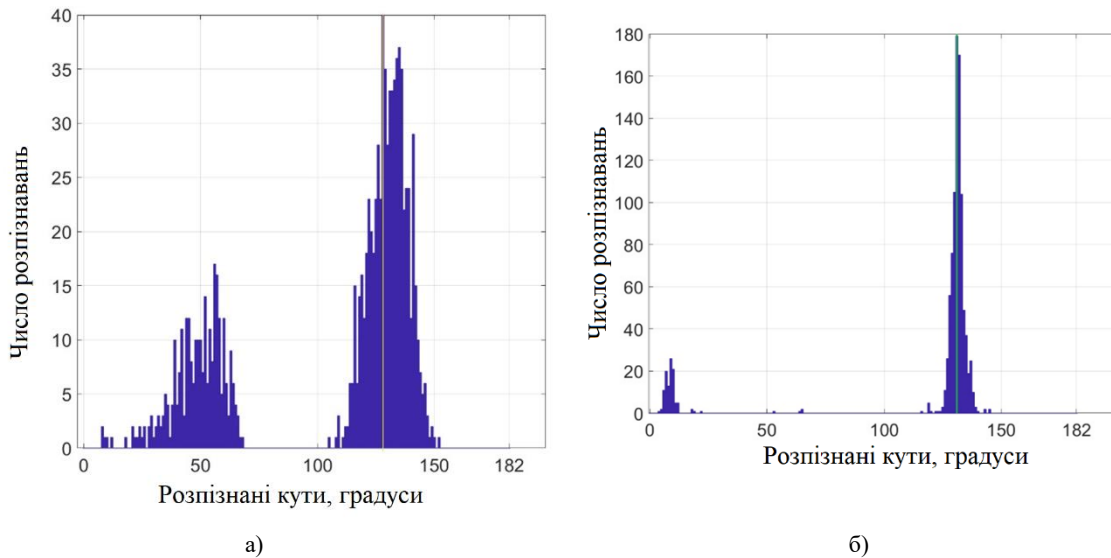


Рис. 10. Розподіл розпізнаних кутів для різних реалізацій шуму для взаємної кореляції (а) та для ШНМ (б) обробки прийнятого сигналу від другої антени під кутом 40° з ССШ = 0 дБ.

Fig. 10. Distribution of recognized angles for different noise realizations for cross-correlation (a) and for ANN (b) processing of the received signal from the second antenna at an angle of 40° with SNR = 0 dB.

### ВИСНОВКИ

Описана в роботі двовимірна система позиціонування не вимагає синхронізації по часу. Невеликих змін часової форми випроміненого імпульсу достатньо, щоб визначити кут об'єкта щодо випромінювача з точністю в один градус, але, можливо, кутову точність можна збільшити. Порівняння ШНМ та методів кореляції для розпізнавання кутів показує, що штучні нейронні мережі можуть продемонструвати кращу точність, ніж кореляційний підхід. Надійним є використання ШНМ до значення ССШ = 10 дБ та вище і методу взаємної кореляції для ССШ = 20 дБ та вище. Але навіть для ССШ = 0 дБ ШНМ дає коректне розпізнавання кутів після статистичного усереднення результатів класифікації. ШНМ в числовому моделюванні демонструє час розрахунку на три порядки менший, ніж нам потрібно для розрахунку функції взаємної кореляції. Можна відзначити, що використання коротшого електромагнітного імпульсу підвищує якість класифікації кутів за наявності шуму для обох представлених методів. Ймовірно, збільшення кількості імпульсних випромінювачів може покращити точність і стабільність визначення положення об'єкта і забезпечить тривимірність позиціонування з використанням однієї нейронної мережі для обробки всіх отриманих сигналів від усіх джерел електромагнітних імпульсів.

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

**Authors' ORCID ID**

- I. D. Persanov  <http://orcid.org/0000-0002-7136-283X>  
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>  
P. G. Fomin  <https://orcid.org/0000-0002-6346-4270>

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

- [1] Brena RF, García-Vázquez JP, Galván-Tejada CE, Muñoz- Rodríguez D, Vargas-Rosales C, Fangmeyer J. Evolution of indoor positioning technologies: a survey. *Journal of Sensors*. 2017;6:359. <https://doi.org/10.1155/2017/2630413>
- [2] Gangshan Wu, Chiyuan Chen, Ning Yang, Haifang Hui, Peifeng Xu. Design of differential GPS system based on BP neural network error correction for precision agriculture. *Proceedings of 2019 Chinese Intelligent Automation Conference (CIAC-2019)*; 20-22 September, 2019; Jiangsu, China; LNEE 586, p. 426-438. [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9050-1\\_49](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9050-1_49)
- [3] Xuerong Cui, Jingzhen Li, Juan Li, Jianhang Liu, Tingpei Huang, Haihua Chen, Research on autocorrelation and cross-correlation analyses in vehicular nodes positioning. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2019;15(4). <https://doi.org/10.1177/1550147719843864>
- [4] Martinelli A, Dolfi M, Morosi S, Mucchi L, Paoli M, Agili A. Ultra-wide Band Positioning in Sport: How the Relative Height Between the Transmitting and the Receiving Antenna Affects the System Performance. *International Journal of Wireless Information Networks*. 2019;27:18-29. <https://doi.org/10.1007/s10776-019-00470-7>
- [5] Harmuth HF. *Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communication*. New York: Academic Press. 1981.
- [6] Schantz HG, DePierre RE. System and method for near-field electromagnetic ranging. US Patent No.: US 6,963,301 B2, November 8, 2005.
- [7] Schantz HG, Weil C, Uden AH. Characterization of error in a Near-Field Electromagnetic Ranging (NFER) Real-Time Location System (RTLs). *2011 IEEE Radio and Wireless Symposium*. 2011. p. 379-382. <https://doi.org/10.1109/RWS.2011.5725491>
- [8] Думін ОМ, Плахтій ВА, Персанов ІД, Као Ш. Система позиціонування на імпульсних надширококутових полях. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н.КаразінаСерія «Радіофізика та електроніка»*, 2019;31:36-46. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-04>.
- [9] Shirokorad DV, Dumin AN, Dumina OA, Katrich VA. Анализ импульсных полей, отраженных от слоистой среды с потерями, с помощью искусственной нейронной сети. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н.КаразінаСерія «Радіофізика та електроніка»*. 2009;15(883):35-40.
- [10] Dumin O, Plakhtii V, Prishchenko 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)*; Ukraine, February 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235459>
- [11] Taflove A, Hagness S. *Computational Electrodynamics: The Finite- Difference Time-Domain Method*. 3rd ed. Boston, London: Artech House, 2005.
- [12] Dumin O, Plakhtii V, Persanov I, Shuaishuai C. Positioning System Using Classification of Ultra Short Electromagnetic Pulse Forms by ANN. *15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020)*, Ukraine, February 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235460>.

**REFERENCES**

- [1] Brena RF, García-Vázquez JP, Galván-Tejada CE, Muñoz- Rodríguez D, Vargas-Rosales C, Fangmeyer J. Evolution of indoor positioning technologies: a survey. *Journal of Sensors*. 2017;6:359. <https://doi.org/10.1155/2017/2630413>
- [2] Gangshan Wu, Chiyuan Chen, Ning Yang, Haifang Hui, Peifeng Xu. Design of differential GPS system based on BP neural network error correction for precision agriculture. *Proceedings of 2019 Chinese Intelligent Automation Conference (CIAC-2019)*; 20-22 September, 2019; Jiangsu, China; LNEE 586, p. 426-438. [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9050-1\\_49](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9050-1_49)



- [3] Xuerong Cui, Jingzhen Li, Juan Li, Jianhang Liu, Tingpei Huang, Haihua Chen, Research on autocorrelation and cross-correlation analyses in vehicular nodes positioning. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2019;15(4). <https://doi.org/10.1177/1550147719843864>
- [4] Martinelli A, Dolfi M, Morosi S, Mucchi L, Paoli M, Agili A. Ultra-wide Band Positioning in Sport: How the Relative Height Between the Transmitting and the Receiving Antenna Affects the System Performance. *International Journal of Wireless Information Networks*. 2019;27:18-29. <https://doi.org/10.1007/s10776-019-00470-7>
- [5] Harmuth HF. *Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communication*. New York: Academic Press. 1981.
- [6] Schantz HG, DePierre RE. System and method for near-field electromagnetic ranging. US Patent No.: US 6,963,301 B2, November 8, 2005.
- [7] Schantz HG, Weil C, Uden AH. Characterization of error in a Near-Field Electromagnetic Ranging (NFER) Real-Time Location System (RTLs). 2011 IEEE Radio and Wireless Symposium. 2011. p. 379-382, <https://doi.org/10.1109/RWS.2011.5725491>
- [8] Dumin OM, Plakhtii VA, Persanov ID, Kao Sh. Positioning system on pulsed ultra-wideband fields. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics"* 2019;31:36-46. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-04> [In Ukrainian].
- [9] Shirokorad DV, Dumin AN, Dumina OA, Katrich VA. Analysis of impulse fields reflected from a layered medium with losses using an artificial neural network. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics"*. 2009;15(883):35-40. [In Russian].
- [10] Dumin O, Plakhtii V, Prishchenko 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); Ukraine, February 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235459>
- [11] Taflove A, Hagness S. *Computational Electrodynamics: The Finite- Difference Time-Domain Method*. 3rd ed. Boston, London: Artech House, 2005.
- [12] Dumin O, Plakhtii V, Persanov I, Shuaishuai C. Positioning System Using Classification of Ultra Short Electromagnetic Pulse Forms by ANN. 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020), Ukraine, February 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235460>.