

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-08>

УДК 537.87

В. А. ПЛАХТІЙ, м.н.с

e-mail: plakhtii@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0442-2716>

О. М. ДУМІН, д. ф.-м. наук, доц.

e-mail: dumin@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5067-9689>

Є. С. ХОДАЧОК, студент.

e-mail: ehodacek@gmail.com

О. А. ПРИЩЕНКО, аспірант.

e-mail: pryshchenko@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7143-9545>

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

НАДШИРОКОСМУГОВА СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ БЕЗ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

Актуальність. Сьогодні не можна уявити без широкого використання позиціонування рухомих об'єктів. Глобальні системи позиціонування увійшли практично в усі сфери сучасного життя. Але ці системи також мають свої недоліки, в першу чергу неефективність в умовах щільної забудови, в приміщеннях, при швидкому переміщенні приймачів та чутливість до навмисних завад. Також найбільш поширені системи позиціонування потребують коштовної часової синхронізації найвищої якості усіх передавальних систем. Окрім загальновідомих традиційних вузькосмугових систем, активно розроблюються і вважаються перспективними надширокосмугові системи позиціонування.

Мета роботи. Метою роботи є побудова ефективної та незалежної від часової синхронізації системи позиціонування, яка ґрунтується на кутовій залежності часової форми випроміненої хвилі для імпульсних надширокосмугових антен. Відсутність потреби у жорсткій часовій синхронізації базується на явищі зміни діаграми спрямованості антен від частоти та, відповідно, зміни часової форми випроміненої хвилі. Ці зміни запропоновано виявляти за допомогою штучних нейронних мереж. В даній роботі, на відміну від попередніх, пропонується вирішення проблеми невизначеності часу приходу імпульсу від базової станції.

Матеріали та методи. Електродинамічна частина поставленої задачі розв'язується за допомогою прямого числового методу моделювання у часовому просторі (FDTD). Це дозволяє отримати точні часові форми випромінених антенами хвиль під різними кутами при їх збудженні надкороткими імпульсами. Розпізнавання імпульсів в точці прийому реалізується штучною нейронною мережею в реальному часі без попередньої спектральної обробки, що забезпечує високу швидкість роботи системи.

Результати. Побудована та натренована нова штучна нейронна мережа, яка має можливість надійно розпізнавати прийняті імпульси, навіть якщо точний час їх приходу невідомий. Ця мережа протестована на штучно зашумлених прийнятих сигналах. Знайдений пороговий рівень зашумленості, перевищення якого призводить до суттєвих помилок у визначенні координат приймача.

Висновки. Система позиціонування на імпульсних надширокосмугових хвилях була покращена за рахунок розширеного навчання, що дозволяє набагато менше залежати від часу приходу імпульсу, який теоретично може бути довільний. Таким чином показано, що запропонована система може не потребувати часової синхронізації передавальних і приймальних пристроїв. Була показана стабільність роботи системи позиціонування до рівня співвідношення енергії сигналу до енергії шуму 20 дБ. Результати розпізнавання можуть бути покращені шляхом використання принципово різних часових залежностей збуджуваних імпульсних сигналів для кожної антени.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: глибока нейронна мережа, надширокосмугове поле, система позиціонування, антена типу "Метелик".

Як цитувати: Плахтій ВА, Думін ОМ, Ходачок ЄС, Прищенко ОА. Надширокосмугова система позиціонування без використання часової синхронізації. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023;38:74-81.
<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-08>

In cites: Plakhtii VA, Dumin OM, Khodachok YS, Pryshchenko OA. UWB positioning system without the use of time synchronization. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radiophysics and Electronics"*. 2023;38:74-81. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-08>

ВСТУП

Сучасне життя не можна уявити без широкого використання позиціонування рухомих об'єктів. Такі системи можна грубо поділити на глобальні та локальні системи позиціонування. Хоча загальновідомими системами є саме глобальні системи, для багатьох завдань такі системи позиціонування дуже неефективні. Існує ціла низка принципів, згідно яких можна визначати положення об'єктів за допомогою електромагнітних хвиль, наприклад, time of arrival (TOA) – за часом приходу сигналу та time difference of arrival (TDOA) – за різницею у часі приходу сигналу. TOA метод базується на вимірюванні часу затримки поширення радіосигналу між позицією з відомими координатами (Node) і позицією з невідомими координатами (Tag). TDOA метод використовує різницю у часі прийняття радіосигналу від Node і Tag. Але усі складові системи повинні бути синхронізовані по часу [1-4]. Окрім загальновідомих традиційних вузькосмугових систем позиціонування, активно розробляються надширокопосмугові (НШС) системи позиціонування. Наприклад, система визначення координат перехожого на перехресті [5]. Ця система працює відповідно до TOA алгоритму. Датчики розміщуються на світлофорах (Node), а координати перехожих визначаються (Tag). Були проведені експерименти для успішного визначення координат перехожих із використанням різної кількості датчиків (Node) і перехожих (Tag). Відстань до перехожого від конкретного вузла оцінюється методом найменших квадратів (LSM). Однак, слід зазначити, що всі ці системи потребують високоякісної часової синхронізації.

В попередніх наших роботах [6-7] побудована незалежна від часової синхронізації система позиціонування, яка ґрунтується на кутовій залежності часової форми випроміненої хвилі для імпульсних НШС антен. Підґрунтям цього явища є загальновідома зміна діаграми напрямленості переважної більшості антен від частоти. Таким чином, ця система відноситься до класу систем розпізнавання по куту приходу хвилі – angle of arrival (AOA). Залишається тільки розробити підхід, який був би чутливим до найменших змін у часовій формі амплітуди прийнятої хвилі для різних кутів прийому. Таким підходом може бути застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) [8], які можуть класифікувати сигнали навіть при малих змінах їхньої часової форми. Також варто зазначити, що ШНМ мають апроксимаційні властивості, які дозволяють для проміжних значень кутів більш точно його розпізнати за пропорційним співвідношенням амплітуд на виходах мережі, які відповідають двом сусіднім дискретним значенням кутам прийому, між якими знаходиться справжній кут приходу хвилі. Існує можливість використати кореляційний підхід [9-10] для розпізнавання цих сигналів, який простіший у застосуванні за ШНМ та не потребує значних витрат часу для тренування мереж. Однак, класифікація сигналів цим методом проводиться значно довше у порівнянні з ШНМ.

У даній роботі використовуються антени типу "Метелик" як випромінювачі імпульсних електромагнітних полів. Це пов'язано із простотою виготовлення та високою ефективністю випромінювання НШС сигналів таким типом антен [11-12].

Головною відмінністю між системою позиціонування на НШС сигналах у порівнянні з системами GPS [13], [14] є можливість уникнути гострої потреби у часовій синхронізації усіх пристроїв. Однак, для роботи штучної нейронної мережі потрібно виконати умову достатньо точного позиціонування отриманого імпульсу відносно відповідних входів ШНМ. Тому метою нашої роботи є вирішення проблеми розпізнавання отриманих імпульсів ШНМ у різні моменти часу прибуття сигналів на її вхід, що дозволить скористатись перевагою ШНМ у швидкості обробки інформації.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Головні параметри задачі подібні до описаних в попередніх роботах [8-9]. Ми маємо дві антени типу "Метелик" на відстані $d = 50$ м між ними, які випромінюють імпульсне електромагнітне поле. Перша антена випромінює імпульси тривалістю 0,2 нс, друга антена – 0,15 нс відповідно. Приймач реєструє електричне поле у Е-площині цих двох антен. Тривалість запису кожного сигналу становить 5,4 нс, що і є нашим часовим вікном. Крок часової дискретизації – 0,01 нс. Для кожної антени часові залежності випромінених електричних імпульсів під різними кутами спостереження від 0 до 90 градусів з кроком в 1 градус були промодельовані методом FDTD. Ці часові залежності були даними для тренування глибокої штучної нейронної мережі (ШНМ) зі структурою 540-1000-1000-1000-1000-182. Для усіх нейронів була використана функція активації у вигляді гіперболічного тангенсу. На виході ШНМ додатково був використаний нормалізаційний шар SoftMax. 182 вихідних нейрони відповідають кутам випромінювання для першої антени в межах 0-90 градусів і кутам для другої антени в межах 0-90 градусів. Можна відзначити, що ця система миттєво розпізнає сигнали від обох антен одночасно.

ОПИС ПІДХОДУ

Щоб виключити вплив на розпізнавання ШНМ часу затримки від кожного прийнятого сигналу, було запропоновано розширити набір даних для навчання ШНМ. Дивлячись на часову залежність прийнятого сигналу під певним кутом, представлену на Рис. 1 і позначену блакитним кольором, можемо побачити, що уся інформація про кут прийому зосереджена у маленькому проміжку часу праворуч (позначено на блакитній ділянці). Новий набір тренувальних даних містить для кожного кута не одну часову залежність, як в попередніх роботах, а набір її зміщених копій. У нашому випадку з часовим вікном у 540 відліків ми можемо отримати 286 копій цього сигналу, зміщених у часі, які в собі несуть усю необхідну нам інформацію. Наприклад, одна така копія, продемонстрована на Рис.1 – це червона пунктирна лінія, що виділена червоними вертикальними пунктирними лініями.

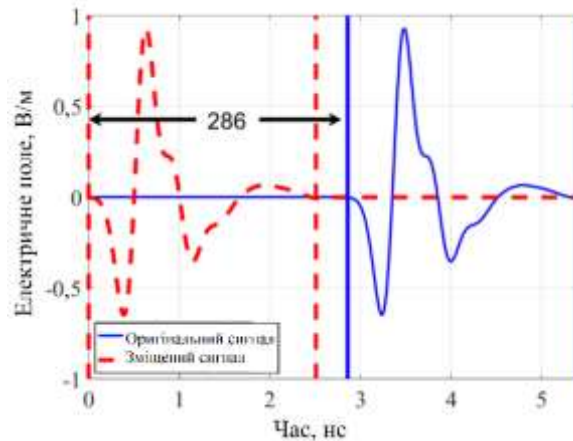


Рис. 1. Ілюстрація принципу створення масиву зміщених сигналів
Fig. 1. Illustration of the principle of creating an array of shifted signals

У результаті ми отримуємо масив даних з розмірами 182x286x540. Перше число назви масиву вказує на кути прийому, друге – на кількість зміщених сигналів для кожного кута і останнє – на моменти часу в масиві даних. Було проведено тестування на часових залежностях з різними рівнями адитивного Гаусового шуму. Наприклад, Рис. 2 демонструє типову часову залежність з рівнем шуму 30 дБ. Отримані часові форми випроміненого поля нормуються на максимальне значення імпульсу. Співвідношення сигнал-шум (ССШ) розраховано окремо для кожної часової залежності сигналів відповідно до їхніх енергій. В результаті на Рис. 3 представлені усереднені відповіді глибокої ШНМ по усіх часових зміщеннях для кожного індивідуального кута для першої антени, оскільки тестування повинно відбуватися для усіх 286 часових зсувів. На Рис. 4 представлений неусереднений результат, який дозволяє прослідкувати, наскільки успішно розпізнається кожен окремий часовий зсув для заданого кута. На осях відкладено: часові зсуви сигналів, кути випромінювання та розпізнані кути у межах 0-90 градусів як кінцевий результат роботи ШНМ. В ідеальному випадку ми повинні отримати пласку площину, але ми спостерігаємо невеликі відхилення в межах одного градуса для малих кутів.

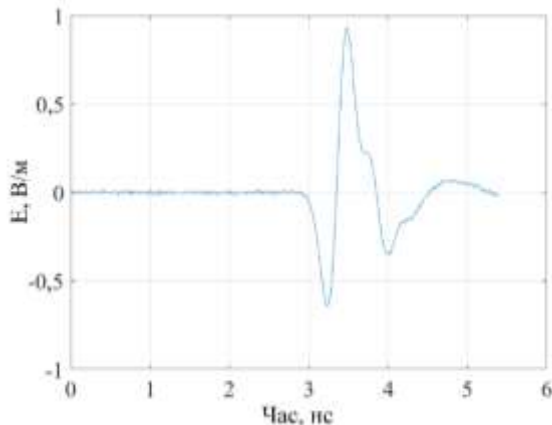


Рис. 2. Приклад вхідного сигналу з доданим шумом до рівня ССШ = 30 дБ

Fig. 2. An example of an input signal with added noise up to the SNR = 30 dB

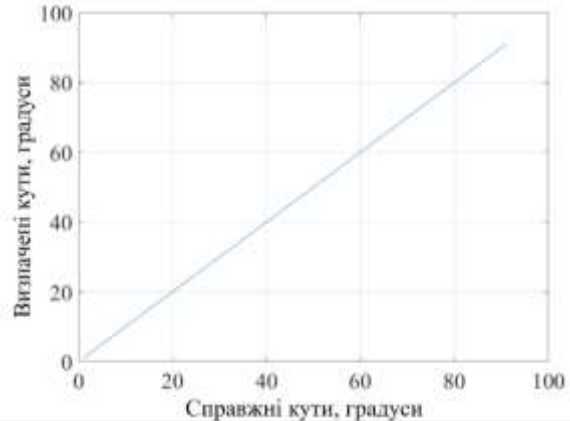


Рис. 3. Усереднені по часових зсувах розпізнані кути для першої антени з ССШ = 30 дБ.

Fig. 3. Recognized angles averaged over time offsets for the first antenna with SNR = 30 dB.

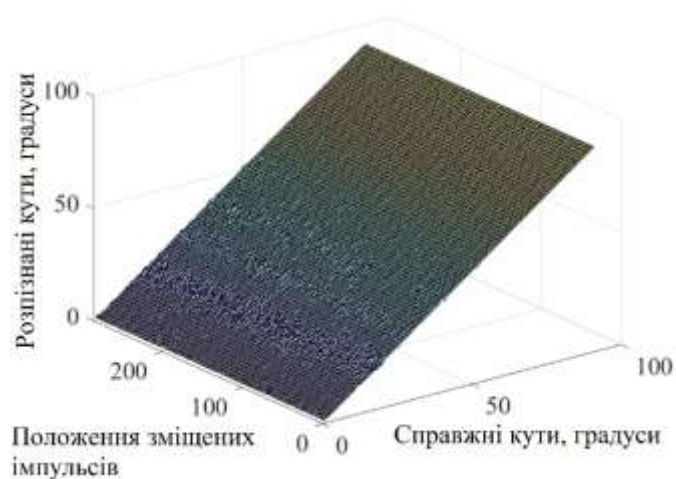


Рис. 4. Розпізнані кути для усіх часових зсувів для різних кутів випромінення першої антени з ССШ = 30 дБ
 Fig. 4. Recognized angles for all time shifts for different radiation angles of the first antenna with SNR = 30 dB

Подібні результати для другої антени і рівня шуму у ССШ = 30 дБ представлені на Рис. 5 і Рис. 6. Також можна помітити невеликі відхилення. Малі відхилення у частках градуса пояснюються малими відмінностями навчального набору.

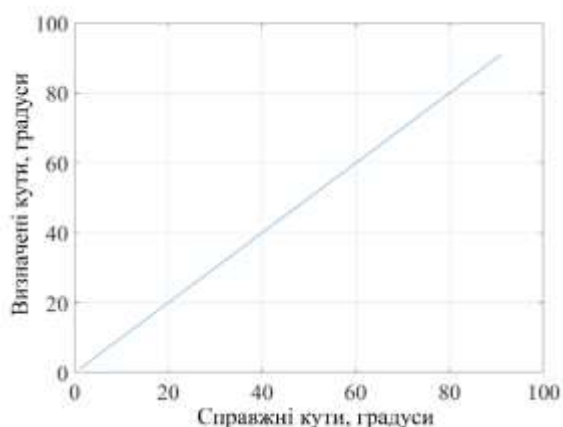


Рис. 5. Усереднені по часових зсувах розпізнані кути для другої антени з ССШ = 30 дБ
 Fig. 5. Recognized angles averaged over time shifts for the second antenna with SNR = 30 dB

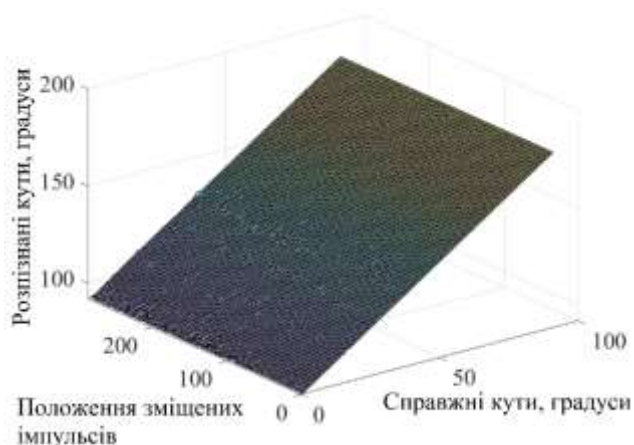


Рис. 6. Розпізнані кути для усіх часових зсувів для різних кутів випромінення другої антени з ССШ = 30 дБ
 Fig. 6. Recognized angles for all time shifts for different radiation angles of the second antenna with SNR = 30 dB

Для перевірки стабільності розпізнавання ШНМ в більш жорстких умовах зашумленості, збільшимо рівень адитивного шуму до ССШ = 20 дБ, після чого вхідний сигнал набуває характерного вигляду, наведеного на Рис. 7.

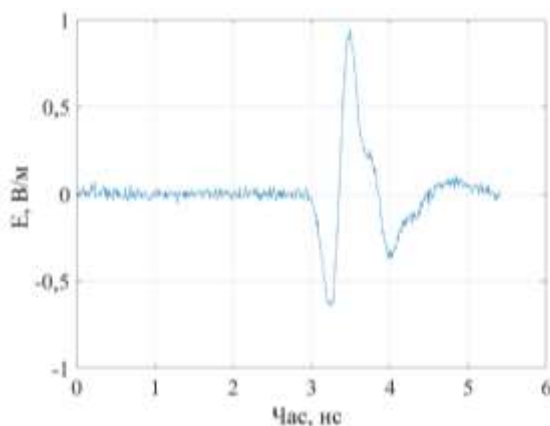


Рис. 7. Приклад вхідного сигналу з доданим шумом до рівня ССШ = 20 дБ
 Fig. 7. An example of an input signal with added noise up to the SNR = 20 dB

Усереднені розпізнані кути для першої і другої антен з рівнем шуму ССШ = 20 дБ представлено на Рис. 8 і Рис. 10 відповідно, на яких ми тепер можемо спостерігати помилково розпізнані кути зі зміщенням в один градус. Цей результат є наслідком менш якісного розпізнавання для кожного зміщення окремо, що проілюстровано на Рис. 9 і Рис. 11 для обох антен. На цих рисунках в деяких випадках помилка в розпізнаванні кута перевищує 90 градусів. Це стається тому, що ми намагаємось одночасно обробити два типи даних від двох однакових антен, збуджених імпульсами однакової часової форми, але дещо різної тривалості. Тому інколи ШНМ робить помилки не тільки у визначенні кута певної антени, а й у класифікації номера антени. У майбутньому цього можливо уникнути, наприклад, шляхом збудження антени сигналом не тільки іншої тривалості, а й іншої часової залежності.

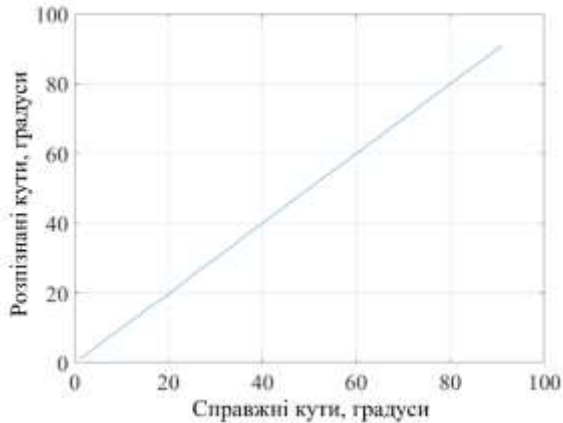


Рис. 8. Усереднені розпізнані кути для першої антени з SNR = 20 дБ.

Fig. 8. Average recognized angles for the first antenna with SNR = 20 dB.

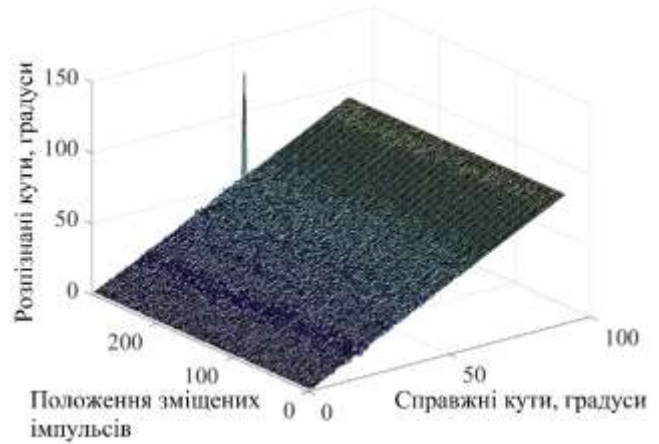


Рис. 9. Відхилення для усіх часових зсувів для першої антени з SNR = 20 дБ.

Fig. 9. Deviation for all time shifts for the first antenna with SNR = 20 dB.

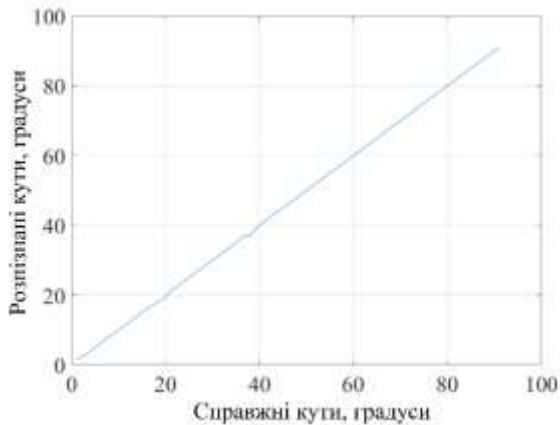


Рис. 10. Усереднені розпізнані кути для другої антени з SNR = 20 дБ.

Fig. 10. Average recognized angles for the second antenna with SNR = 20 dB.

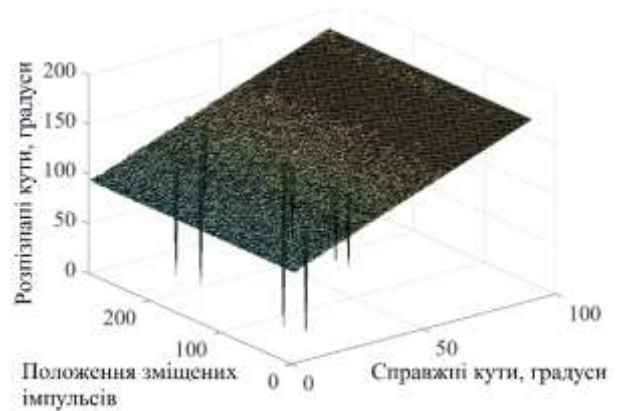


Рис. 11. Відхилення для усіх часових зсувів для другої антени з SNR = 20 дБ.

Fig. 11. Deviation for all time shifts for the second antenna with SNR = 20 dB.

Далі на Рис. 12-16 представлені результати з екстремально високим адитивним шумом, де система вже робить грубі помилки. Це відповідає ССШ = 10 дБ. У цьому випадку ми бачимо, що система не здатна впоратися із розпізнаванням. Значні відхилення від істинного кута є результатом помилкового розпізнавання сигналів від однієї антени.

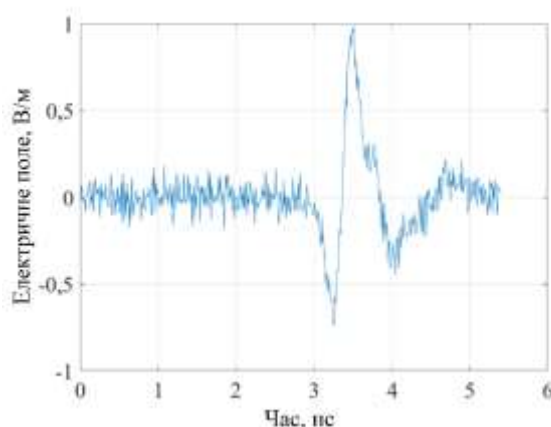


Рис. 12. Приклад вхідного сигналу з додатковим шумом з SNR = 10 дБ.
Fig. 12. An example of an input signal with additional noise with SNR = 10 dB.

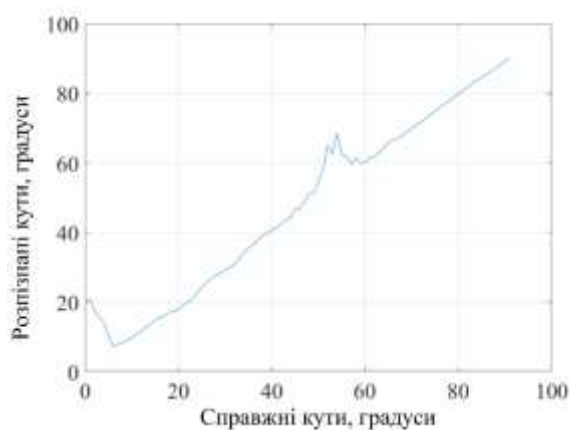


Рис. 13. Усереднені розпізнані кути для першої антени з SNR = 10 дБ.

Fig. 13. Average recognized angles for the first antenna with SNR = 10 dB.

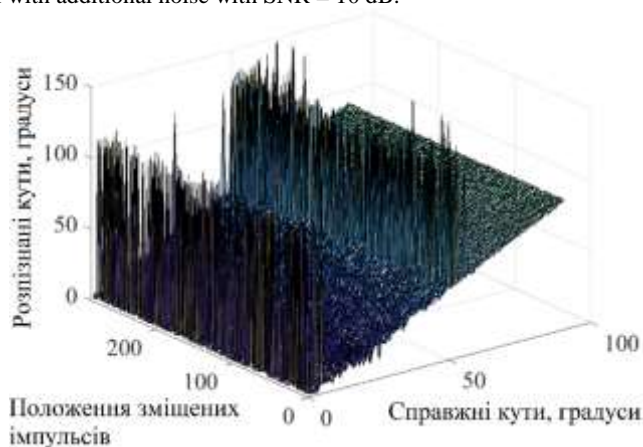


Рис. 14. Відхилення для усіх часових зсувів для першої антени з SNR = 10 дБ.

Fig. 14. Deviation for all time shifts for the first antenna with SNR = 10 dB.

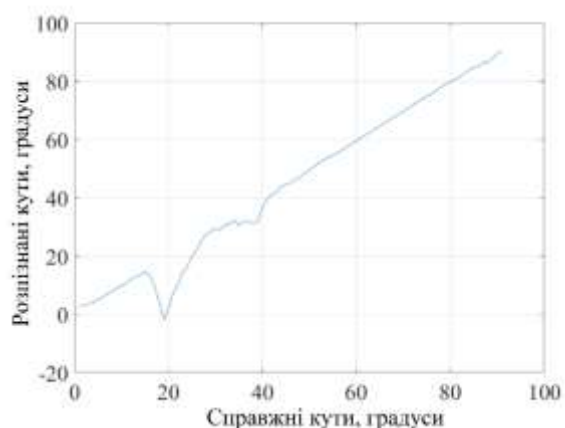


Рис. 15. Усереднені розпізнані кути для другої антени з SNR = 10 дБ.

Fig. 15. Average recognized angles for the second antenna with SNR = 10 dB.

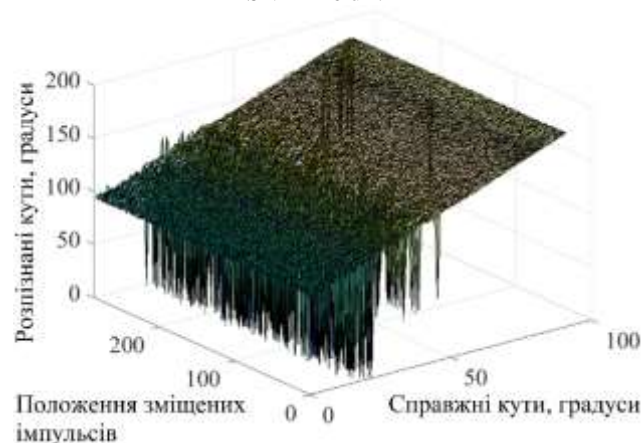


Рис. 16. Відхилення для усіх часових зсувів для другої антени з SNR = 10 дБ.

Fig. 16. Deviation for all time shifts for the second antenna with SNR = 10 dB.

Приклад роботи системи позиціонування для специфічних випадків $d = 50$ м, кут 1 = 45 градусів, кут 2 = 45 градусів проілюстрований для ССШ = 100 дБ (відсутність шуму) на Рис. 17 і для ССШ = 10 дБ (екстремально високий рівень шуму) на Рис. 18. Важливо відзначити, що з самого початку для даної моделі закладена мінімальна помилка визначення кута у 0,5 градусів. Саме тому навчання було реалізоване для кроку в 1 градус. Отже, Рис. 17. демонструє добрі результати для вибраних умов. У

випадку ССШ = 10 дБ була обрана комбінація кутів з усередненими результатами, і ми тут бачимо деякі відхилення у визначенні дійсної позиції приймача, які можемо вважати прийнятними.

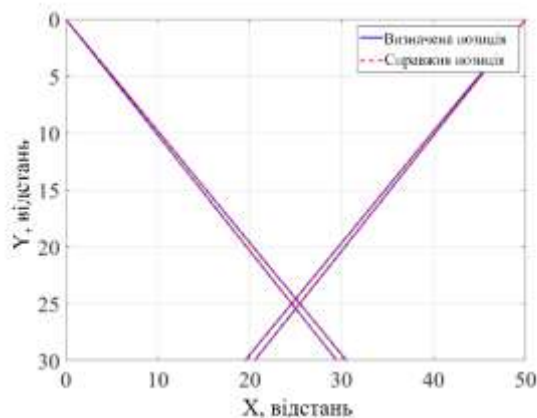


Рис. 17. Ілюстрація можливого розташування приймача для $d = 50$ м, ССШ=100 дБ, кута 1 = 45 градусів, кута 2 = 45 градусів.

Fig. 17. Illustration of a possible receiver location for $d = 50$ m, SNR = 100 dB, angle 1 = 45 degrees, angle 2 = 45 degrees.

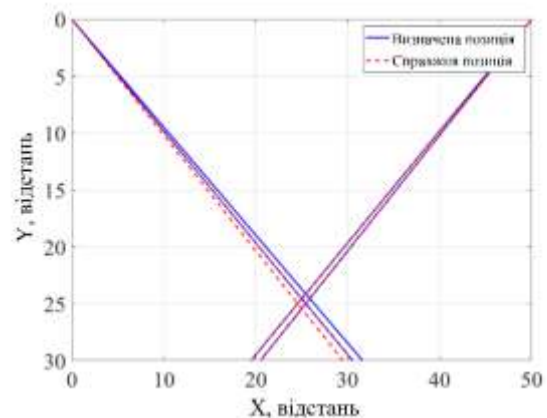


Рис. 18. Ілюстрація можливого розташування приймача для $d = 50$ м, ССШ=10 дБ, кута 1 = 45 градусів, кута 2 = 45 градусів.

Fig. 18. Illustration of a possible receiver location for $d = 50$ m, SNR = 10 dB, angle 1 = 45 degrees, angle 2 = 45 degrees.

ВИСНОВОК

Система позиціонування на імпульсних надширококуткових хвилях була покращена за рахунок розширеного навчання, що дозволяє набагато менше залежати від часу приходу імпульсу, який теоретично може бути довільний. Таким чином показано, що запропонована система може не потребувати часової синхронізації передавальних і приймальних пристроїв. Була показана стабільність роботи системи позиціонування до рівня співвідношення енергії сигналу до енергії шуму 20 дБ. Результати розпізнавання можуть бути покращені шляхом використання принципово різних часових залежностей збуджувачих імпульсних сигналів для кожної антени.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Fujii A, Sekiguchi H, Asai M, Kurashima S, Ochiai H, R. Kohno. Impulse Radio UWB Positioning System. 2007 Jan 1; <https://doi.org/10.1109/RWS.2007.351756>
2. Lin KH, Chen HM, Li GJ, Huang SS. Analysis and Reduction of the Localization Error of the UWB Indoor Positioning System. 2020 Sep 28; <https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan49838.2020.9258017>
3. Kian Meng Tan, Choi Look Law. GPS and UWB Integration for indoor positioning. 2007 Jan 1; <https://doi.org/10.1109/ICICS.2007.4449630>
4. Schroerer G. A Real-Time UWB Multi-Channel Indoor Positioning System for Industrial Scenarios [Internet]. IEEE Xplore. 2018 [cited 2023 Apr 21]. p. 1–5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8533792> <https://doi.org/10.1109/IPIN.2018.8533792>
5. Nakamura A, Shimada N, Itami M. Performance Analysis of UWB Positioning System at the Crossing. 2018 Nov 1; <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569309>
6. H. F. Harmuth, "Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communication," New York: Academic Press, 1981.
7. Pochanin GP, Orlenko OA, Ruban VP, Korzh VG, Andreev MV, Drobakhin OO. Antenna pattern measurements: UWB impulse and multifrequency signals comparison. 2017 May 1; <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972581>
8. Dumin O, Plakhtii V, Persanov I, Cao S. Positioning System Using Classification of Ultra Short Electromagnetic Pulse Forms by ANN. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020 Feb; <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235460>
9. Persanov I, Plakhtii V, Pryshchenko O, Dumin O, Fomin P. Noise Immunity of UWB Positioning System on ANN. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). 2020 Sep 21; <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252637>
10. Dumin O, Plakhtii V, Pryshchenko O, Pochanin G. Comparison of ANN and Cross-Correlation Approaches for Ultra Short Pulse Subsurface Survey. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020 Feb; <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235459>

11. Persanov I, Dumin O, Plakhtii V, Shyrokorad D. Subsurface Object Recognition in a Soil Using UWB Irradiation by Butterfly Antenna. 2019 XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). 2019 Sep; <https://doi.org/10.1109/DIPED.2019.8882577>
12. Wang J, Su Y, Huang C, Lü M, Liu Y. Design of bow-tie antenna with high radiating efficiency for impulse GPR. 2012 Jul 1; <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351524>
13. Ahmed El-Rabbany, Introduction to GPS: The Global Positioning System, Second Edition , Artech, 2006.
14. Elliott Kaplan; Christopher Hegarty, Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition , Artech, 2017.

Стаття надійшла до редакції: 3 березня 2023

Рекомендовано до друку: 6 квітня 2023

UWB POSITIONING SYSTEM WITHOUT THE USE OF TIME SYNCHRONIZATION

V. A. Plakhtii, O. M. Dumin, Y.S. Khodachok, O. A. Pryshchenko

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

Relevance. The present day cannot be imagined without the widespread use of positioning of moving objects. Global positioning systems have entered almost all areas of modern life. However, these systems also have their drawbacks, primarily inefficiency in dense buildings, indoors, with rapid movement of receivers, and sensitivity to intentional interference. In addition, the most common positioning systems require costly time synchronization of the highest quality of all transmission systems. In addition to the well-known traditional narrowband systems, ultra-wideband positioning systems are being actively developed and are considered promising.

Purpose of the work. The aim of this work is to build an efficient and time-synchronization-independent positioning system based on the angular dependence of the radiated waveform for pulsed ultra-wideband antennas. The absence of the need for rigid time synchronization is based on the phenomenon of changes in the antenna pattern with frequency and, accordingly, changes in the time shape of the radiated wave. It is proposed to detect these changes using artificial neural networks. In this paper, unlike the previous ones, we propose a solution to the problem of uncertainty in the time of arrival of the pulse from the base station.

Materials and Methods. The electrodynamic part of the problem is solved using the direct numerical method of time-domain modeling (FDTD). This makes it possible to obtain accurate time shapes of waves radiated by antennas at different angles when they are excited by ultrashort pulses. The pulse recognition at the receiving point is realized by an artificial neural network in real time without preliminary spectral analysis, which ensures high system speed processing.

Results. A new artificial neural network has been built and trained that can reliably recognize received pulses, even if the exact time of their arrival is unknown. This network was tested on artificially noisy received signals. A threshold noise level was found, exceeding which leads to significant errors in determining the receiver's coordinates.

Conclusions. The positioning system based on pulsed ultra-wideband waves has been improved by extended training, which makes it much less dependent on the pulse arrival time, which can be theoretically arbitrary. Thus, it is shown that the proposed system may not require time synchronization of transmitting and receiving devices. The stability of the positioning system up to a signal-to-noise ratio of 20 dB was shown. The recognition results can be improved by using fundamentally different time dependencies of the excitation pulse signals for each antenna.

KEY WORDS: deep neural network, ultrawideband field, positioning system, Bow-Tie antenna

The article was received by the editors: 3 March 2023

The article is recommended for printing: 6 April 2023