

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-04>

УДК 537.86

СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ІМПУЛЬСНИХ НАДШИРОКОСМУГОВИХ ПОЛЯХ

О. М. Думін¹, В. А. Плахтій¹, І. Д. Персанов¹, Ш. Као²

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

E-mail: dumin@karazin.ua

²Університет Ціньдао, Китайська народна республіка, 266071, провінція Шандунь, м. Ціньдао, шосе Нінь Ся, 308

E-mail: 1240805801@qq.com

Надійшла до редакції 11 жовтня 2019 р.

Актуальність. Системи позиціонування на основі радіохвиль широко застосовуються як у глобальному масштабі, так і для точного визначення положення об'єктів у закритих приміщеннях. Глобальні системи позиціонування, як правило, потребують коштовної високоякісної часової синхронізації, допускають суттєві похибки за неналежних погодних умов, при падінні радіохвиль на земну поверхню під малими кутами, затінюванні приймачів великогабаритними перешкодами та за наявності радіоелектронних завод різної природи.

Мета роботи. Пропонується дослідження принципово нової системи позиціонування із використанням надширокосмугових імпульсних електромагнітних полів та їхнього аналізу штучною нейронною мережею.

Матеріали та методи. Для визначення положення приймача надширокосмугових хвиль використовується явище зміни форми імпульсу від кута, під яким він випромінюється антеною. Для початку, розглядається двовимірний випадок цієї задачі. Збуджуючи різними імпульсними сигналами дві антени, що рознесені на відому відстань одна від одної, можна визначити місце розташування приймача за умови знання кутів приходу імпульсів від кожної антени. В якості опромінювачів використовуються надширокосмугові антени типу «метелик», які збуджуються гаусовими імпульсами різної тривалості. Форми прийнятих імпульсів розраховуються методом кінцевих різниць у часовому просторі (FDTD). Класифікація часових форм прийнятих електромагнітних хвиль від різних антен під різними кутами випромінювання здійснюється глибокою нейронною мережею.

Результати. Показано, що штучна нейронна мережа для проведення класифікації особливу увагу приділяє проміжкам часу, де прийнятий імпульс змінюється найшвидше. Чотиришарова мережа безпомилково розрізняє прийняті сигнали від різних антен. Числове моделювання електродинамічної задачі та навчання штучної нейронної мережі показало можливість визначення кутів випромінювання штучною нейронною мережею з точністю до одного градуса за деякими непринциповими винятками. Використовуючи базу між антенами в 50 метрів, досягнута точність визначення положення приймача не гірше 62 см в квадраті 50 на 50 метрів за винятком деяких кутів, для яких точність падає до 2 метрів.

Висновки. Властивість антен змінювати форму випромінених надширокосмугових імпульсів від кута може бути використана для побудови нової системи позиціонування, яка не потребує часової синхронізації із передавачем. Запропонована система може бути ефективно використана у закритих приміщеннях. Відмінною особливістю системи позиціонування на імпульсних електромагнітних хвилях є її висока завадостійкість до існуючих вузькосмугових електромагнітних хвиль.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: система позиціонування, штучна нейронна мережа, імпульсна електромагнітна хвиля, класифікація сигналів, надширокосмугові антени.

POSITIONING SYSTEM ON IMPULSE ULTRAWIDEBAND FIELDS

¹O. M. Dumin, ¹V. A. Plakhtii, ¹I. D. Persanov, ²S. Cao

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

²School of Electronic Information Qing Dao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, Shandong, 266071, China

Background: The systems of positioning on the base of radiowaves are widely used both in a global scale and for the exact position-finding of objects indoors. Global systems of positioning usually need valuable high-quality time synchronization, assume substantial errors at improper weather, at falling of radio waves on the earth surface at small angles, shading of transceivers by large obstacles, and at presence of radio electronic interferences of different nature.

Objectives Investigation of the new system of positioning on the ultrawideband impulse electromagnetic fields and their analysis by an artificial neural network is proposed.

Materials and methods: The phenomenon of the pulse form change on angle of radiation by antenna is used for the determination of the position of ultrawideband receiver. At first, the two-dimensional case of the problem is considered. Exciting two antennas separated at known distance by means of different impulse signals it is possible to define the

place of location of receiver if we know the angles of arrival of impulses from each antenna. The ultrawideband bow-tie antennas excited by the Gaussian impulses of different durations are used as irradiators. The forms of the received impulses are calculated by method of Finite Differences in Time Domain (FDTD). The classification of the time forms of the received electromagnetic waves from different antennas at different angles of radiation is carried out by a deep neural network.

Results: It is shown that for the classification the artificial neural network pays special attention to the intervals of time where the received impulse changes quickly. The four-layer network faultlessly distinguishes the obtained signals from different antennas. The numerical calculation of the electromagnetic problem and artificial neural network training show the possibility of determination of angles of radiation by the network with the accuracy of one degree excepting some cases. Using the basis between antennas of 50 meters the precision of receiver position determination is not worse than 62 cm in the square domain of 50 meter size eliminating some angles where the accuracy falls to 2 meters.

Conclusion: Property of antennas to change the form of radiated ultrawideband impulses for different angles can be used for the construction of the new system of positioning that does not need the time synchronization with transmitters. The proposed system can be effectively employed indoors. The distinctive feature of the impulse electromagnetic wave positioning system is its immunity to the existent narrowband electromagnetic waves.

KEY WORDS: positioning system, artificial neural network, impulse electromagnetic wave, classification of signals, ultrawideband antennas.

СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПОЛЯХ

А. Н. Думин¹, В. А. Плахтій¹, И. Д. Персанов¹, Ш. Као²

¹ Харьковський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, г. Харків, пл. Свободи, 4

² Університет Циньдао, Китайська народна республіка, 266071, провінція Шандунь, г. Циньдао, шосе Нинь Ся, 308

Актуальность. Системы позиционирования на основе радиоволн широко применяются как в глобальном масштабе, так и для точного определения положения объектов в закрытых помещениях. Глобальные системы позиционирования, как правило, нуждаются в дорогостоящей высококачественной временной синхронизации, допускают существенные погрешности при ненадлежащих погодных условиях, при падении радиоволн на земную поверхность под малыми углами, затенении приемников крупногабаритными препятствиями и при наличии радиоэлектронных помех различной природы.

Цель работы. Предлагается исследование принципиально новой системы позиционирования с использованием сверхширокополосных импульсных электромагнитных полей и их анализа искусственной нейронной сетью.

Материалы и методы. Для определения положения приемника сверхширокополосных волн используется явление изменения формы импульса от угла, под которым он излучается антенной. Для начала, рассматривается двумерный случай этой задачи. Возбуждая разными импульсными сигналами две антенны, которые разнесены на известное расстояние одна от другой, можно определить месторасположение приемника при условии знания углов прихода импульсов от каждой антенны. В качестве облучателей используются сверхширокополосные антенны типа "бабочка", которые возбуждаются гауссовыми импульсами разной длительности. Формы принятых импульсов рассчитываются методом конечных разностей во временной области (FDTD). Классификация временных форм принятых электромагнитных волн от разных антенн под разными углами излучения осуществляется глубокой нейронной сетью.

Результаты. Показано, что искусственная нейронная сеть для проведения классификации особое внимание уделяет промежуткам времени, где принятый импульс изменяется быстрее всего. Четырехслойная сеть безошибочно различает принятые сигналы от разных антенн. Численное моделирование электродинамической задачи и обучение искусственной нейронной сети показало возможность определения углов излучения искусственной нейронной сетью с точностью до одного градуса за некоторыми непринципиальными исключениями. Используя базу между антеннами в 50 метров, достигнута точность определения положения приемника не хуже 62 см в квадрате 50 на 50 метров за исключением некоторых углов, для которых точность падает до 2 метров.

Выводы. Свойство антенн изменять форму излучаемых сверхширокополосных импульсов от угла может быть использовано для построения новой системы позиционирования, которая не нуждается во временной синхронизации с передатчиком. Предложенная система может быть эффективно использована в закрытых помещениях. Отличительной особенностью системы позиционирования на импульсных электромагнитных волнах является ее высокая стойкость к существующим узкополосным электромагнитным волнам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система позиционирования, искусственная нейронная сеть, импульсная электромагнитная волна, классификация сигналов, сверхширокополосные антенны.

В теперішній час системи позиціонування широко використовуються і мають цілу низку різноманітних застосувань. У існуючих систем на точність визначення координат впливає затінення та багатопроменеве поширення електромагнітної хвилі, що випромінюється супутниками. Наприклад, такий популярний напрямок як точне землеробство вимагає такої точності позиціонування, яку не можна забезпечити традиційною Глобальною Системою Позиціонування (GPS) [1]. Щоб вдосконалити цю систему широко використовуються нейронні мережі для прогнозування та виправлення їхніх помилок.

На відміну від класичних вузькосмугових антен, надширокосмугові антени мають цінну властивість випромінювати імпульси різних часових форм у різних напрямках [2]. Ймовірно, на це явище вперше було звернено увагу в роботах Хармута [3]. Це є природним для антен, беручи до уваги зміну їхніх діаграм напрямленості при зміні робочої частоти. В даній роботі пропонується і досліджується нова система позиціонування, яка заснована на використанні залежності часової форми хвиль, що випромінюються під різними кутами. Так система, згідно існуючої класифікації [4], є системою на основі знання кута прийому. Така система не потребує часової синхронізації [5], що її суттєво здешевлює у порівнянні з відомими системами із використанням атомних годинників. Заради простоти ми не будемо враховувати зміну часової форми випромінюваної хвилі при переході із ближньої в дальню зону антени. Хоча не можна відкидати можливість її використання для додаткового підвищення точності визначення координат у майбутніх дослідженнях.

Визначення кута випромінювання вимагає дуже чутливого методу розрізнення форми імпульсу. Для цього ми пропонуємо використовувати штучну нейронну мережу (ШНМ). Вони відомі тим, що допомагають швидко розпізнавати об'єкти на малюнках, фотографіях та в текстах. Можна помітити, що цей підхід демонструє хорошу чутливість та швидкість розпізнавання. Можливість знайти оптимальний алгоритм обробки даних в навчанні ШНМ була наочно проілюстрована для фізичної проблеми з повторенням умов навчання для періодичної структури [6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Плоска прямокутна область опромінюється двома імпульсними антенами типу «метелик», розташованими у її верхніх кутах, як показано на Рис. 1. Дана конструкція антен вибрана через їхню простоту, надширокий діапазон робочих частот та можливість випромінювання надкороткої імпульсної хвилі з несуттєвими спотвореннями часової форми [7]. Кожна антена збуджується імпульсною напругою з гаусовою часовою формою з тривалостями 0,2 та 0,15 нс. Приймач у точці з невідомими координатами (X, Y) реєструє X -складову електричного поля, що є зручним через відсутність необхідності змінювати орієнтацію поляризації приймальної антени при переміщенні приймача. Якщо нам відомі кути надходження імпульсних хвиль від кожної антени θ_1 та θ_2 та база d (Рис. 1), то положення спостерігача можна легко обчислити не вимагаючи часової синхронізації між передавачем та приймачем. Отримання кутів випромінювання може бути реалізовано ШНМ, яка повинна зробити класифікацію прийнятих імпульсів за часовими формами для низки кутів з постійним кроком і для кожної антени після її попереднього навчання.

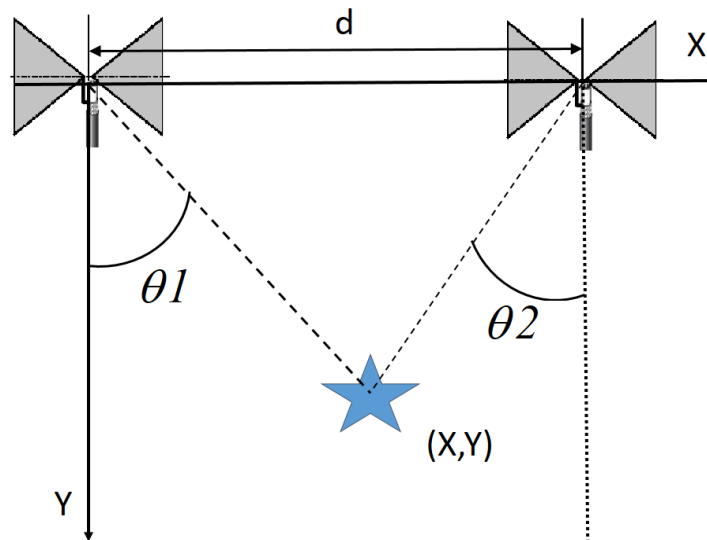


Рис. 1. Геометрія задачі.

Вважаємо, що розрізнення антен може здійснюватися однією ШНМ через різну тривалість їхніх імпульсів збудження. Очікується, що ШНМ не зробить великих помилок при аналізі сигналів, отриманих під довільними кутами через хороші апроксимаційні властивості ШНМ для таких випадків. Дані для навчання ШНМ отримуються шляхом числового моделювання задачі випромінювання антен методом FDTD. Отримані залежності амплітуди електричної компоненти поля від часу під заданими кутами нормуються, дискретизуються та інтерполюються, і цей набір амплітуд направляється до ШНМ для її навчання.

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ТА ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Для числового моделювання вибираємо крок по куту в 1 градус, крок по часу – 0,01 нс, відстань між антенами $d = 50$ м. Нормовані часові та кутові залежності амплітуди електричної складової випромінюваної хвилі представлені на Рис. 2 та Рис. 3, які побудовані для збудження імпульсами з тривалістю 0,2 та 0,15 нс відповідно. Видно, що зміна часової форми поля є плавною, тому ШНМ повинна бути дуже чутливою до таких малих змін.

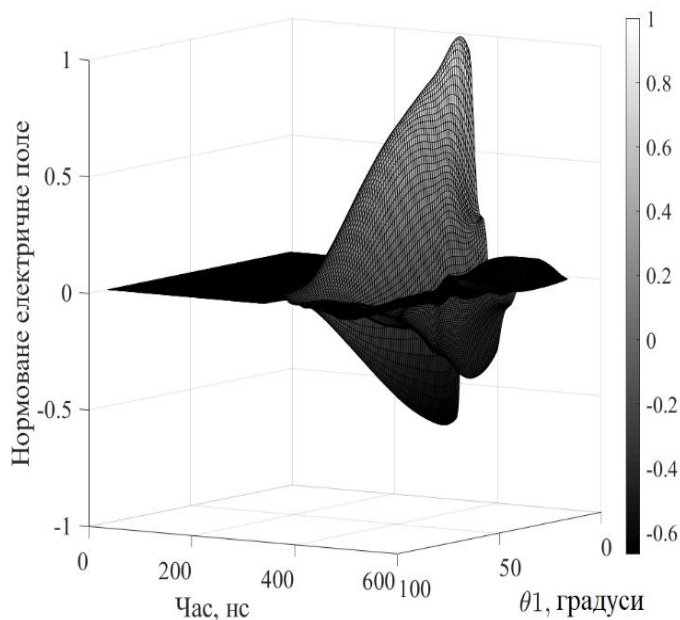


Рис. 2. Нормовані значення амплітуди випромінюваного першою антеною поля від часу при збудженні імпульсом з тривалістю 0,2 нс.

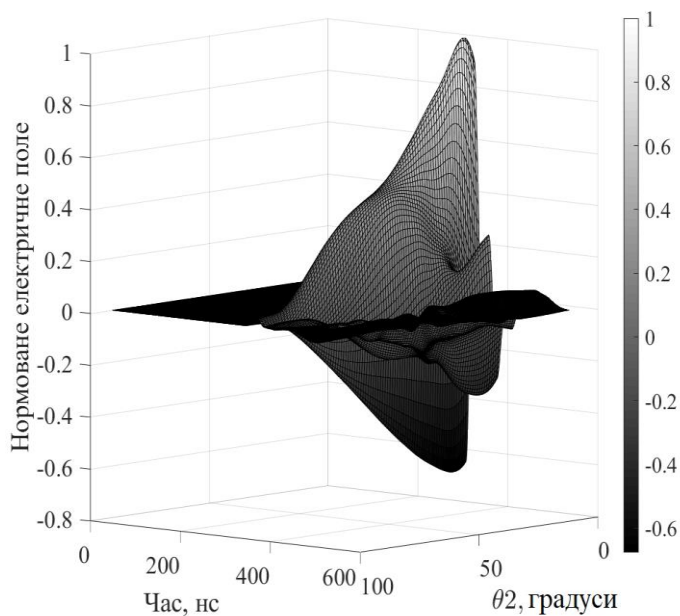


Рис. 3. Нормовані значення амплітуди випромінюваного першою антеною поля від часу при збудженні імпульсом з тривалістю 0,15 нс.

Глибока ШНМ структури, яка зображена на Рис. 4, використовується для вирішення задачі класифікації кута випромінювання та антени, яка його здійснила. У ШНМ використовується обмежена функція лінійного збудження (ReLU). ШНМ має 540 вхідних нейронів для всіх 540 амплітуд прийнятого

імпульсу та 182 вихідних нейронів, що відповідають діапазону кутів (0° - 90°) для θ_1 (вихід 1-91) і такому ж діапазону кутів для θ_2 (вихід 92-182).

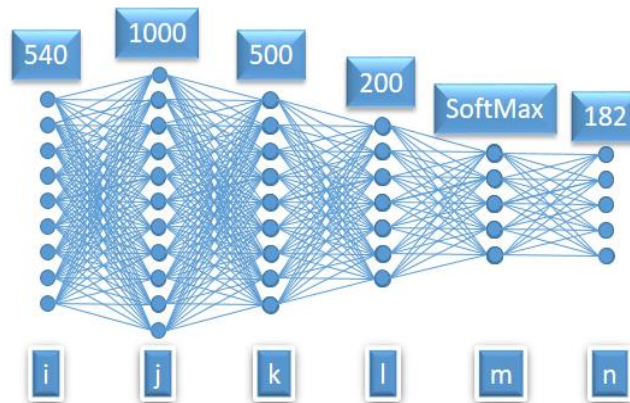


Рис. 4. Структура штучної нейронної мережі.

Результат тренування ШНМ полягає у визначенні вагових коефіцієнтів на всіх шарах ШНМ. Значення коефіцієнтів першого прихованого шару (див. Рис. 4) представлені на Рис. 5. У попередніх роботах було показано, що ШНМ може знайти свій власний оптимальний метод обробки даних [6]. Очікується, що майже нульові значення вагових коефіцієнтів мають відповідати вхідним даним, які не містять жодної інформації, наприклад, поки електромагнітна хвиля не надійде до точки спостереження. З часових форм імпульсів на Рис. 2 і 3 видно, цьому відповідають точки до $i = 300$. На Рис. 5 показано, що саме значення для $i > 300$ беруть участь у розпізнаванні форми імпульсу. Велике відхилення значень коефіцієнта спостерігається в моменти швидкої зміни амплітуд. Для успішної роботи ШНМ необхідно забезпечити відповідність вхідних даних ШНМ та амплітуд прийнятого імпульсу у визначені моменти часу. Синхронізація прийнятого сигналу з дискретизацією для ШНМ може бути реалізована на практиці кореляційними методами.

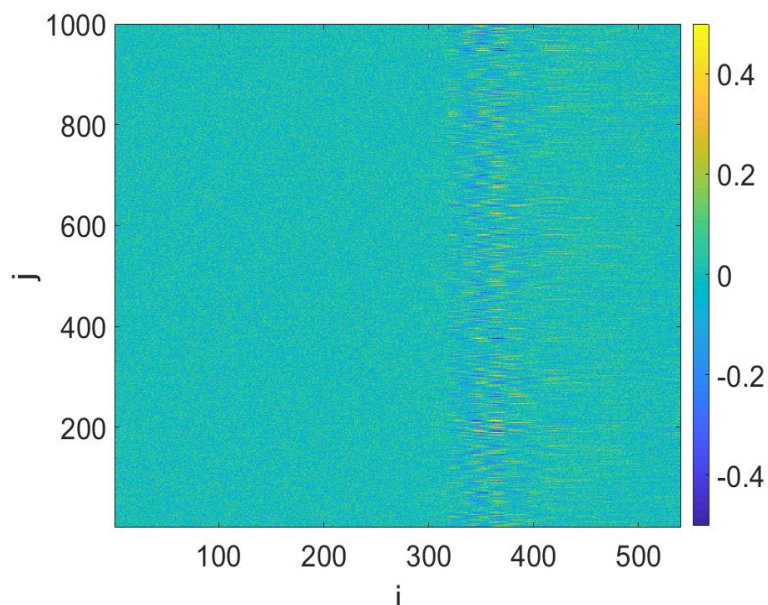


Рис. 5. Значення вагових коефіцієнтів перед першим прихованим шаром ШНМ.

Ймовірно, завдяки подібності часових форм сигналів для близьких кутів, ШНМ запропонованої структури не може бути повністю навчена для всіх кутів однаково успішно. Для перевірки результатів навчання ШНМ його вихідні значення побудовані на Рис. 6 для ідеальних вхідних сигналів. Можна

оцінити роботу ШНМ як задовільну навіть для малих кутів. Зменшення значень амплітуд виходів не має вирішального значення для класифікації, оскільки інші, неправильні виходи мають помітно менші вихідні значення.

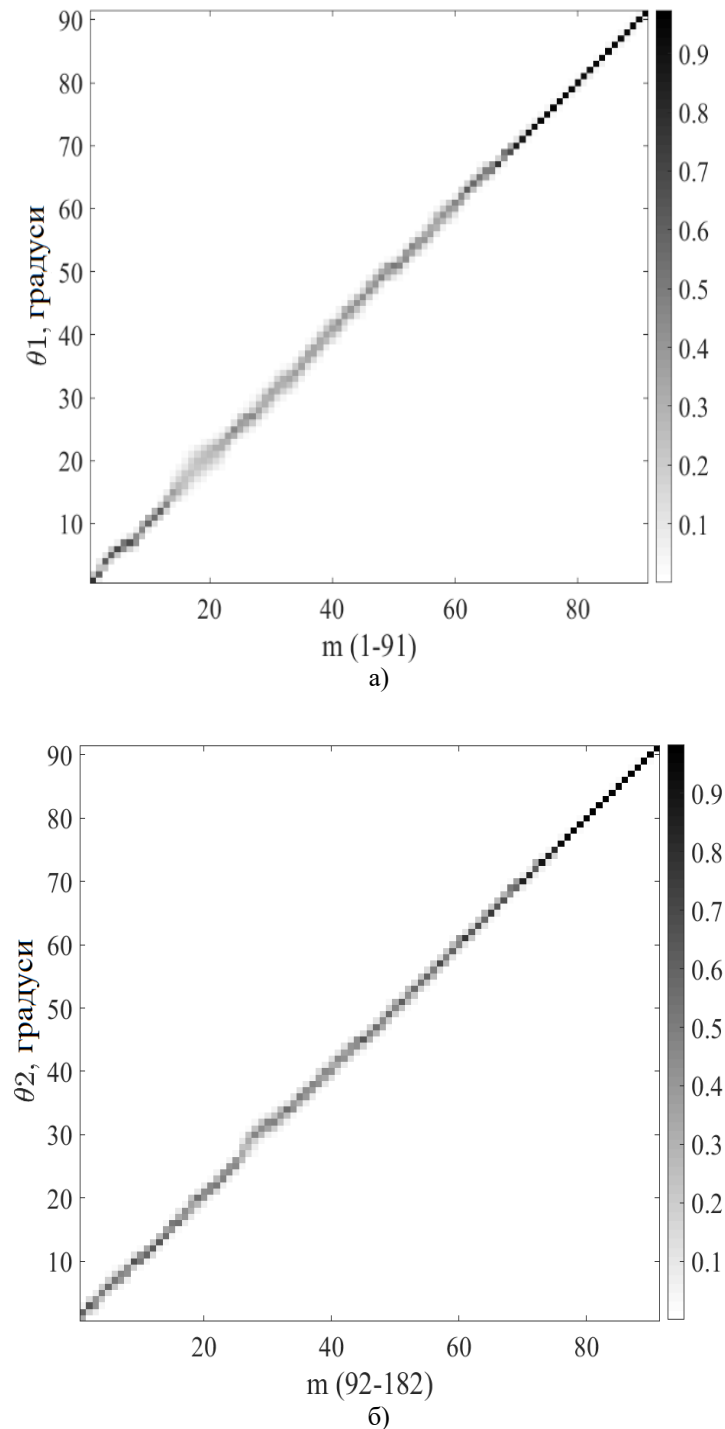
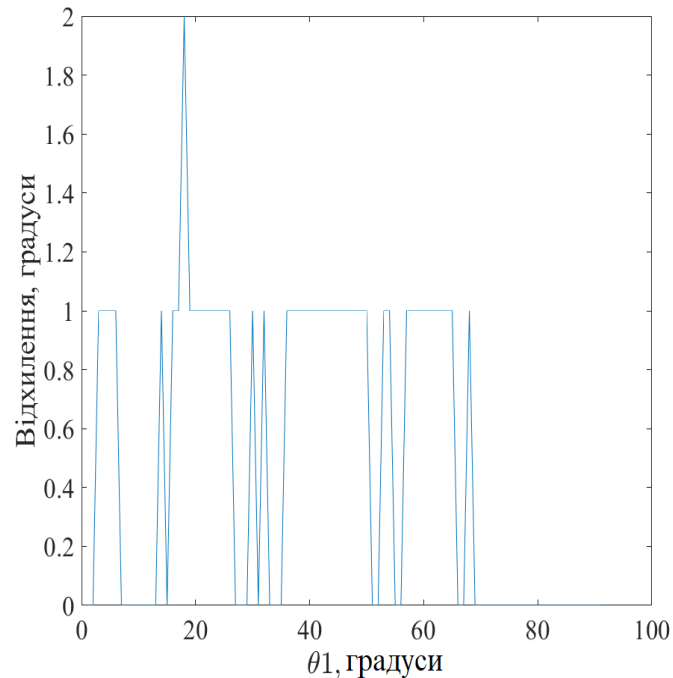


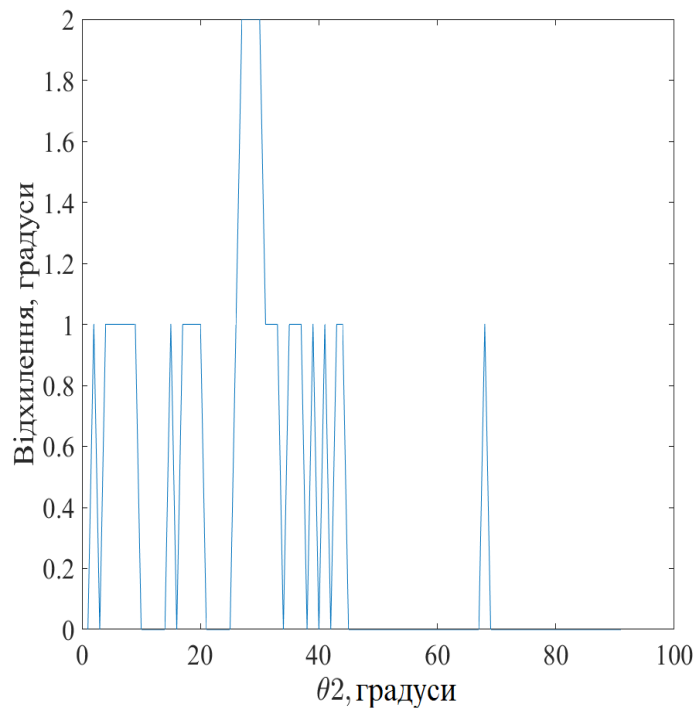
Рис. 6. Вихідні значення ШНМ (у градусах кутів випромінювання) при розпізнаванні відповідних модельних випромінених імпульсів першою (а) та другою антеною (б).

На жаль, Рис. 6 не дозволяє чітко оцінити величини помилок розпізнавання кутів, тому ці помилки побудовані на Рис. 7. Видно, що точність класифікації при малих кутах інколи нижче запланованої. Важко пояснити причину цього явища, особливо враховуючи чудове розрізнення імпульсів від різних антен, тобто ШНМ не плутає поля, що випромінюються антенами при їхньому збудженні імпульсами з

тривалостями 0,2 нс і 0,15 нс. Більш широкий діапазон точного розпізнавання кута для другої антени із збудженням 0,15 нс можна пояснити більш швидкими змінами амплітуди в часі для даної конструкції антени.



а)



б)

Рис. 7. Помилки у визначенні ШНМ кута випромінювання першої (а) та другої антени (б).

Крок кута, обраний для числового моделювання, дозволяє визначати кожен кут випромінювання з максимальною точністю $\pm 0,5$ градуса за умови, що ШНМ не перенавчена. Для цього випадку невизначеність положення приймача проілюстрована на Рис. 8. Помилки у визначенні кута через недоліки у навчанні ШНМ додатково зменшують загальну точність системи. На Рис. 9 показана загальна точність для випадку, коли у визначенні обох кутів маємо помилки в 1 градус. Один з найгірших випадків помилок

у 2 градуси для θ_1 та 1 градуси для θ_2 зображений на Рис. 10. Можна зробити висновок, що за умови успішного тренування ШНМ система позиціонування вибраного розміру бази може забезпечити точність кращу за $\pm 0,62$ м, тоді як на даному етапі точність поки що краща ніж ± 2 м.

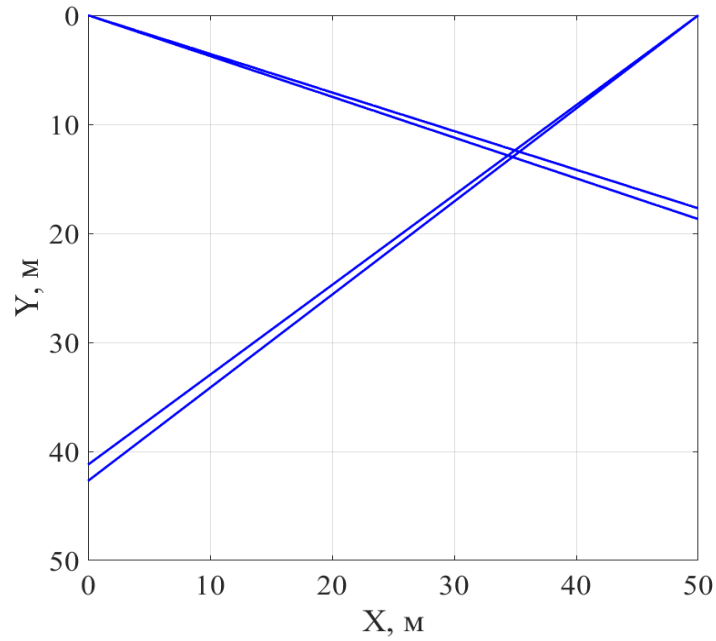


Рис.8. Типова невизначеність положення приймача ($\theta_1 = 70$ град., $\theta_2 = 50$ град.).

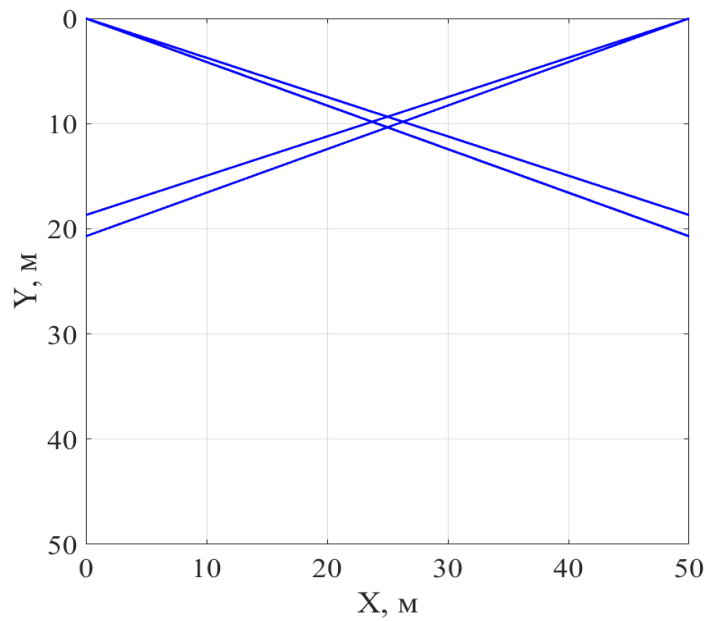


Рис. 9. Невизначеність положення приймача при похибці в 1 градус ($\theta_1 = 68$ град., $\theta_2 = 68$ град.).

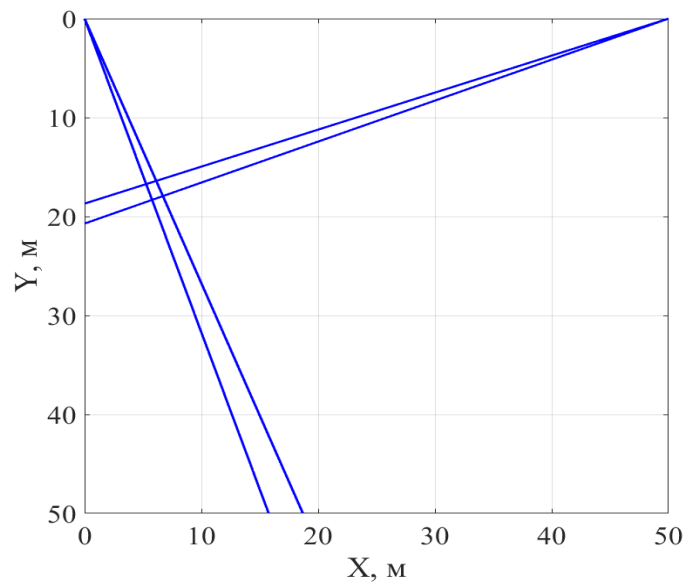


Рис. 10 Невизначеність положення приймача для однієї з найгірших комбінацій кутів ($\theta_1 = 18$ град., $\theta_2 = 68$ град.).

На відміну від випадку обмеженої квадратної області, зображеної на Рис. 8-10, є можливість проілюструвати точність позиціонування для довільної комбінації кутів. Абсолютні відхилення вздовж осі OX представлені на Рис. 11 для всіх можливих комбінацій значень кутів. Очевидно, що величини абсолютної похибки будуть наближатися до нескінченності під невеликими кутами. Помітно менші похибки вздовж OY, викликані ШНМ, зображені на Рис. 12. Абсолютні значення сумарних відхилень представлені на Рис. 13. Легко бачити, що відхилення вздовж осі OX майже повністю визначають величини абсолютних помилок. Можливо, підвищення точності системи позиціонування при малих кутах може бути досягнуто за допомогою додаткового третього випромінювача зі своїм унікальним імпульсним збудженням.

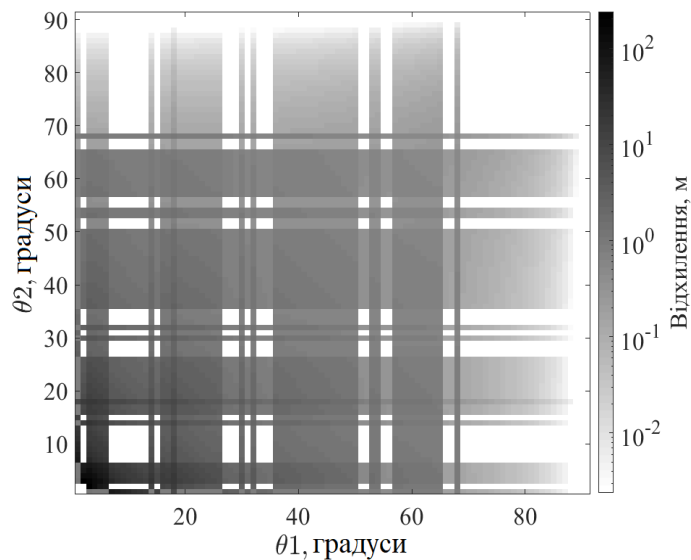


Рис.11. Абсолютні відхилення від істинного положення приймача вздовж осі OX для різних комбінацій кутів.

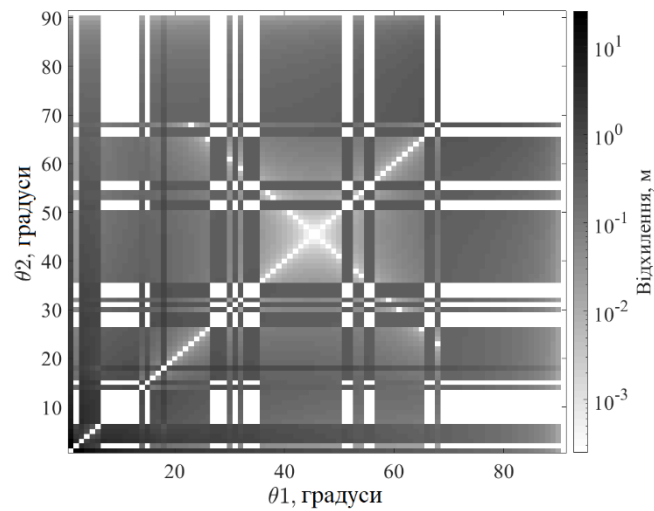


Рис.12. Абсолютні відхилення від істинного положення приймача вздовж осі OY для різних комбінацій кутів.

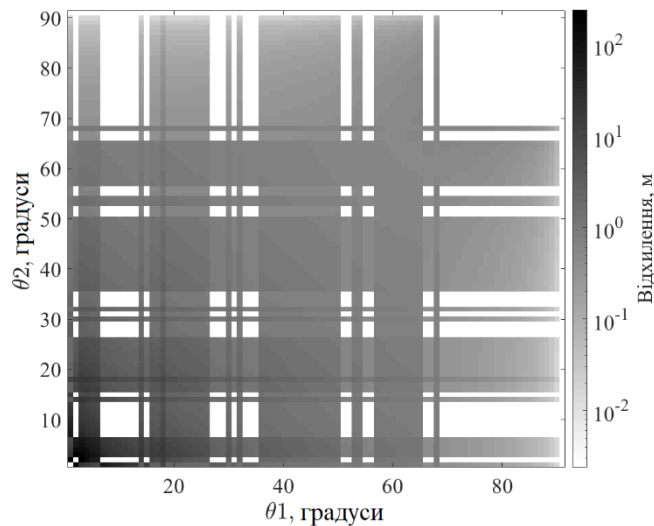


Рис.13. Сумарні абсолютні відхилення від істинного положення приймача для різних комбінацій кутів.

ВИСНОВКИ

Властивість антен змінювати форму випромінених надширококутних імпульсів від кута може бути використана для побудови нової системи позиціонування, яка не потребує часової синхронізації із передавачем. Запропонована система може бути ефективно використана у закритих приміщеннях. Відмінною особливістю позиціонування на імпульсних електромагнітних хвилях є її висока завадостійкість до існуючих вузькосмугових електромагнітних хвиль.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

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

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

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

S. Cao  <https://orcid.org/0000-0002-0156-9181>

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gangshan W, Chiyuan C, Ning Y, Haifang H, Peifeng X. Design of differential GPS system based on BP neural network error correction for precision agriculture. In Proceedings of 2019 Chinese Intelligent Automation Conference (CIAC-2019); 2019 Sep 20-22; Jiangsu, China. LNEE 586. P . 426–438.
2. Pochanin GP, Pochanina IE, Kholod PV, Masalov SO. The Experiments on Radiation of Short Pulse Signals by the Large Current Radiators of Dr. H. F. Harmuth. Radio Physics and Radio Astronomy. 2002;7(4):379–384.
3. Harmuth HF. Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communication. New York:Academic Press; 1981.
4. 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). doi: 10.1155/2017/2630413
5. Exel R. Receiver Design for Time-Based Ranging with IEEE 802.11b Signals. International Journal of Navigation and Observation. 2012;2012:15.
6. Dumin O, Prishchenko O, Pochanin G, Plakhtii V, Shyrokora D. Subsurface Object Identification by Artificial Neural Networks and Impulse Radiolocation. 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP-2018); 2018 Aug 21-25; Lviv, Ukraine. p. 434–437.
7. Persanov I, Dumin O, Plakhtii V, Shyrokora 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; Lviv, Ukraine. p. 160–163.