

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки і комп'ютерних систем
Кафедра прикладної електродинаміки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Микола ГОРОБЕЦЬ

«___» _____ 20__ року

Кваліфікаційна робота магістра

на тему: СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ В ПРОСТОРІ НА ОСНОВІ
НАДШИРОКОСМУГОВИХ ХВИЛЬ

Виконав: студент VI курсу, групи РР-67
Спеціальності
105 – прикладна фізика та наноматеріали



Євген ГРИШИН

Керівник: доцент кафедри прикладної
електродинаміки



Вадим ПЛАХТІЙ

Харків – 2024 рік

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить 29 рисунків, 43 сторінки, 34 бібліографічних посилань.

Проведене моделювання надширокосмугової антени логоперіодичного типу з метою отримання часових залежностей електричної компоненти електромагнітного поля в частині простору в дальній зоні випромінювача.

Розроблений алгоритм обробки часових залежностей для подальшого тренування глибокої повнозв'язної штучної нейронної мережі. Побудована структура штучної нейронної мережі для класифікації часових залежностей за прийнятим кутом спотереження для трьох надширокосмугових антен з різними тривалостями збуджуючого гаусового наносекундного сигналу.

Продемонстрована можливість визначення області простору, де може знаходитись приймальна система.

НАДШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ,
ПОЗИЦІОНУВАННЯ, НЕСТАЦІОНАРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ШТУЧНІ
НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, ЛОГОПЕРІОДИЧНА АНТЕНА

ABSTRACT

The diploma project contains 29 figures, 43 pages, and 34 bibliographic references.

A simulation of an ultra-wideband antenna of the log-periodic type was carried out in order to obtain the time dependences of the electric component of the electromagnetic field in a part of space in the far zone of the emitter.

An algorithm for processing time dependences was developed for further training of a deep fully connected artificial neural network. An artificial neural network structure was constructed for classifying time dependences by the adopted observation angle for three ultra-wideband antennas with different durations of the exciting Gaussian nanosecond signal.

The possibility of determining the region of space where the receiving system can be located is demonstrated.

ULTRA-WIDEBAND ANTENNA, ELECTROMAGNETIC FIELD, POSITIONING, NON-STATIONARY RADIATION, ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS, LOGOPERIOUS ANTENNA.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
1. Вступ	5
2. Моделювання надширокосмугового випромінювача	15
2.1. Постановка задачі	15
2.2. Моделювання часових залежностей для системи позиціонування	17
3. Класифікація часових залежностей за формою сигналу	24
3.1. Постановка задачі	24
3.2. Послідовність підготовки даних та тренування штучної нейронної мережі	25
3.3. Тестування натренованої штучної нейронної мережі	32
4. Позиціонування приймальної системи за допомогою надширокосмугових сигналів	34
4.1. Постановка задачі	34
4.2. Візуалізація отриманих результатів	35
5. Висновки	37
ЛІТЕРАТУРА	39

1. ВСТУП

Надширокосмугові системи позиціонування (UWB) розпочали свій розвиток у 1960–70-х роках, коли технологія вперше використовувалася у військових цілях, зокрема в радіолокації [1],[2]. У 1980-х роках було формалізовано концепцію UWB як передачі сигналів через широкий частотний спектр [1]. У 1990-х роках технологія почала знаходити застосування в цивільному секторі завдяки прогресу в мікроелектроніці, що дозволило створювати компактні пристрої [1],[2].

Комерційний прорив стався у 2002 році, коли Федеральна комісія зв'язку США (FCC) дозволила використання UWB для цивільних потреб [3]. Це дало поштовх розвитку технології в таких галузях, як трекінг, бездротовий зв'язок і точне позиціонування [4]. Сьогодні UWB активно інтегрується в споживчі пристрої [5], зокрема смартфони, та використовується в логістиці, медицині [6]

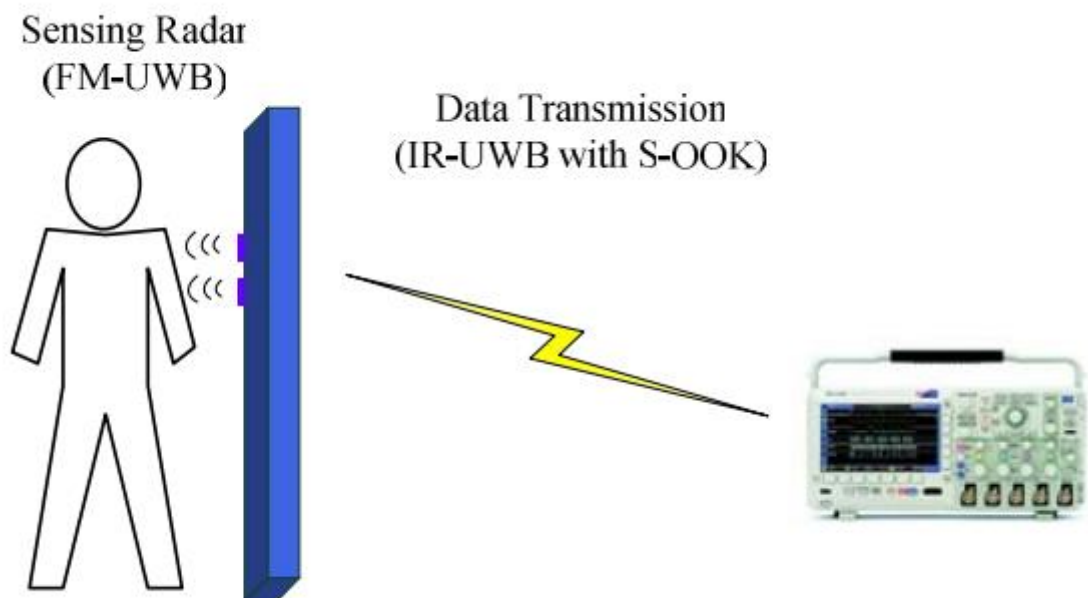


Рисунок 1 – Безконтактна система моніторингу серця з технологією UWB [6]

й автомобільній індустрії [7].

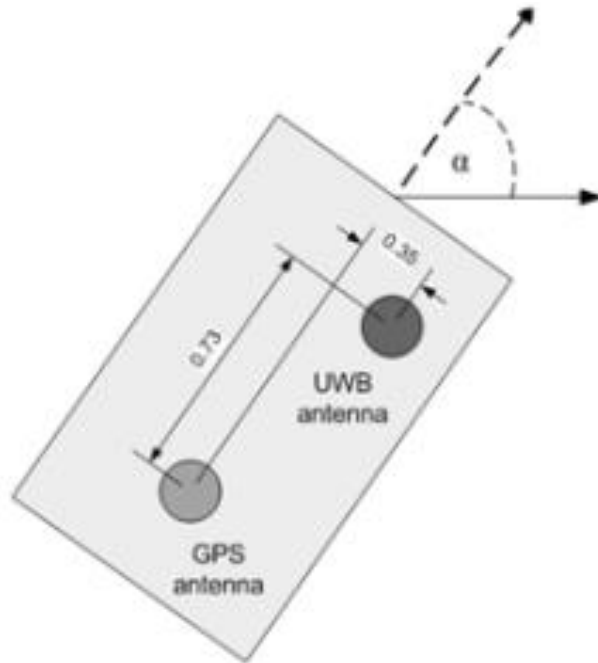


Рисунок 2 – Розташування антен GPS і UWB на даху автомобіля. [7]

Надширокосмугові системи позиціонування (UWB, Ultra-Wideband) — це технологія для точного визначення місцезнаходження об'єктів у просторі, яка базується на передачі імпульсів дуже короткої тривалості (порядку наносекунд) через широкий частотний спектр. Існує декілька систем позиціонування: визначають позицію об'єкта шляхом вимірювання часу, за який сигнал проходить від передавача до приймача [8],

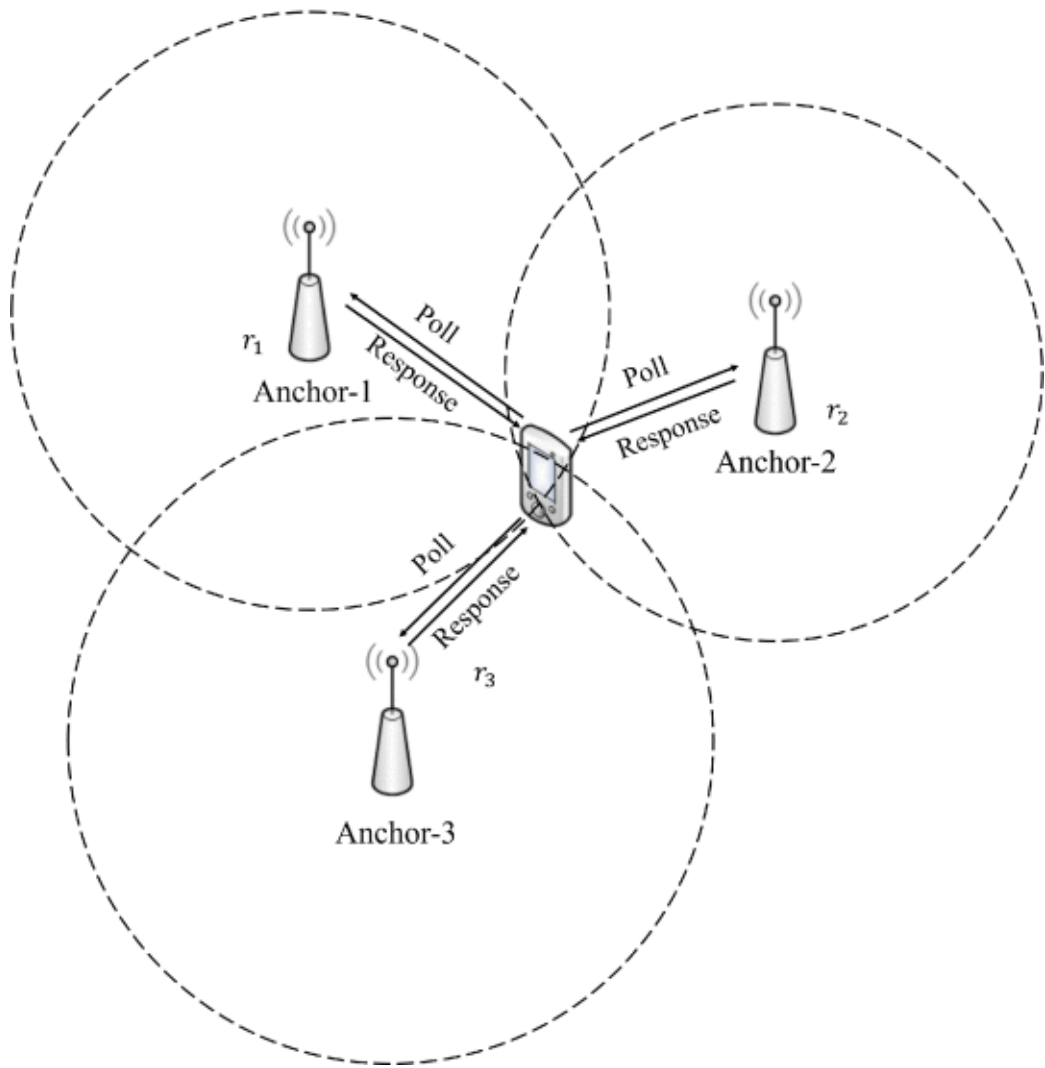


Рисунок 3 – Трилатерация на основе UWB TWR [8]

або використовують різницю у часі прибуття сигналів до кількох приймачів для обчислення позиції [9], [10], визначають напрямок сигналу для оцінки місця розташування об'єкта [11] або оцінюють місце розташування об'єкта, аналізуючи силу отриманого сигналу [12].

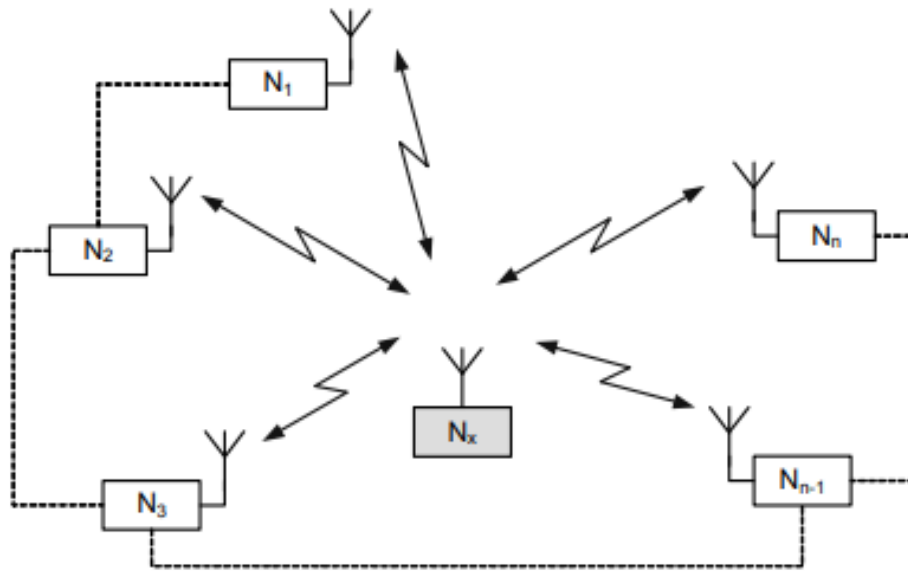


Рисунок 4 – Загальна архітектура системи позиціонування.

Переваги надширокосмугових систем:

Висока точність забезпечують позиціонування з точністю до 10–30 см, що вигідно для трекінгу об'єктів у реальному часі [13]. Стійкість до перешкод завдяки широкому спектру частот, UWB менш чутливі до радіоперешкод порівняно з Wi-Fi або Bluetooth [14], [15], [16].

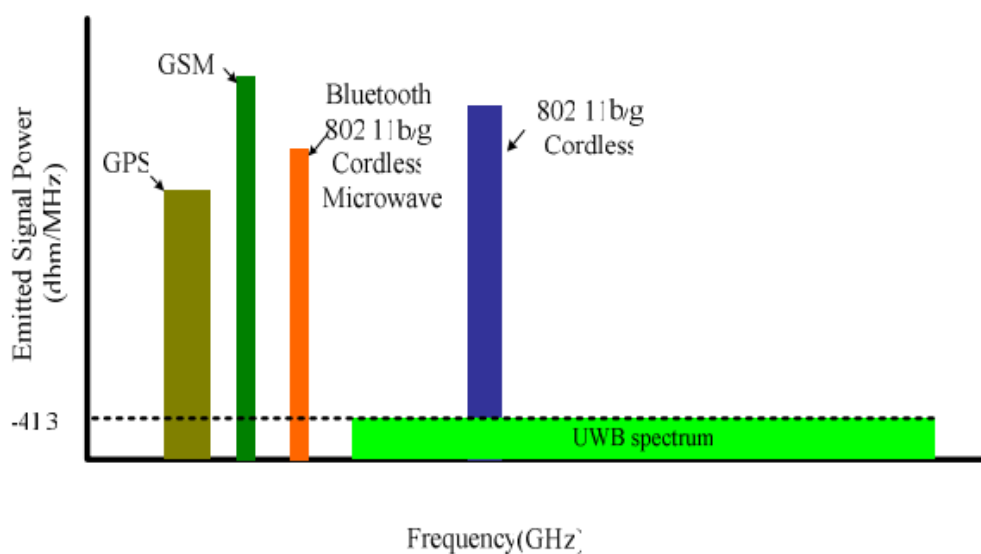


Рисунок 5 – Спектр UWB з іншими бездротовими стандартами.

Мала енергоспоживаність низька потужність сигналу робить їх енергоефективними, що важливо для пристроїв з батарейним живленням [17]. Безпечність передачі низька потужність і вузька концентрація енергії зменшують ризик шкідливого впливу на людей [18]. Можливість роботи у складних умовах UWB працюють ефективно навіть у приміщеннях зі складними конструкціями, як-от заводи або склади [19], [20].

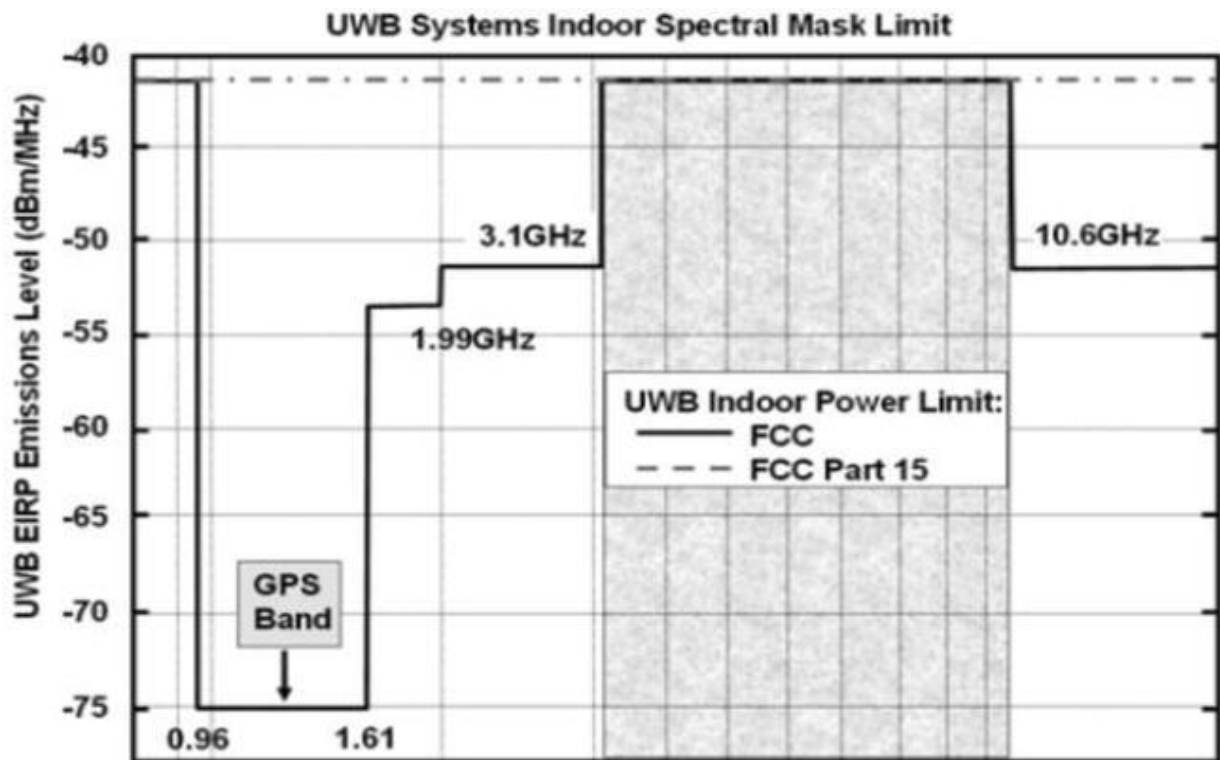


Рисунок 6 – Маска спектру потужності для приміщень від FCC

Недоліки надширокосмугових систем:

Обмежений радіус дії зазвичай працюють на відстанях до 30–100 м, що може бути недостатньо для деяких застосувань [21]. Складність налаштування для забезпечення точності потрібна попередня калібровка та належне розміщення базових станцій [22]. Вартість обладнання – початкові витрати на впровадження UWB-систем можуть бути вищими, ніж для Wi-Fi або Bluetooth [23]. Інфраструктурні вимоги – необхідна розгалужена мережа приймачів для забезпечення точного позиціонування, особливо в масштабних проектах.

Обмежена підтримка – попри зростання популярності, UWB ще не є повсюдно інтегрованою технологією у споживчих пристроях.

Одним із ключових аспектів, що вирізняє технологію позиціонування на основі ультраширокосмугових сигналів (UWB) серед інших методів, є її висока завадостійкість. Це забезпечує точність визначення координат навіть у складних умовах, коли традиційні методи можуть втрачати ефективність.

Традиційні методи позиціонування, такі як GPS або Wi-Fi, є більш уразливими до завад. Наприклад, GPS-сигнали можуть повністю загубитися у міських каньйонах або приміщеннях через вплив перешкод чи затінення сигналу. Wi-Fi або Bluetooth зазвичай працюють у вузькому діапазоні частот, де перешкоди, викликані іншими пристроями, можуть суттєво погіршити якість сигналу.

На відміну від них, UWB демонструє стабільність навіть у насиченому радіочастотному середовищі. Це робить його особливо привабливим для застосування у складних умовах, наприклад, у виробничих цехах, лікарнях чи спортивних комплексах, де точність і стійкість сигналу є критично важливими.

RTK (Real-Time Kinematic) — це сучасна технологія супутникового позиціонування, яка дозволяє досягати сантиметрової точності в режимі реального часу. Основою її роботи є використання базової станції з точно відомими координатами, яка обчислює похибки сигналів GNSS-супутників та передає поправки до рухомого приймача (ровера). Завдяки цьому ровер може враховувати локальні спотворення сигналу, зокрема вплив іоносфери, тропосфери та мультипасу. RTK зазвичай застосовується у сферах, що потребують високої точності, таких як геодезія, сільське господарство, будівництво та управління автономними транспортними засобами.

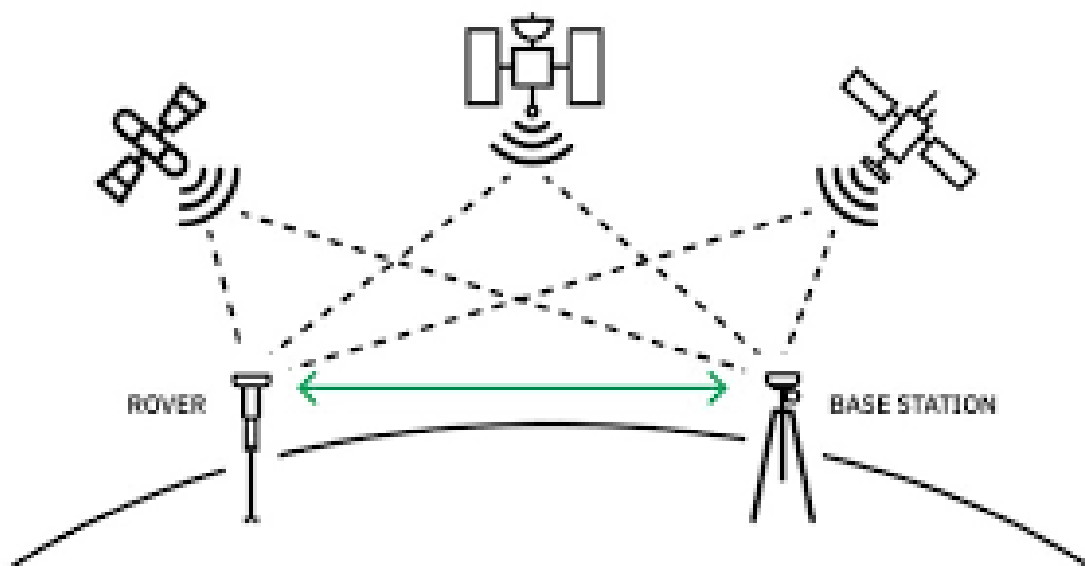


Рисунок 7 – Схематична робота системи RTK

Попри високу точність та ефективність, RTK має певні обмеження. Система залежить від стабільного зв'язку між базовою станцією та ровером, що ускладнює її використання в умовах перешкод або значної віддаленості (до 10–20 км). Крім того, густо забудовані території чи місця з високим рівнем природних перешкод (наприклад, лісистість) можуть впливати на якість роботи. Однак розвиток GNSS-інфраструктури та технологій передачі даних дозволяє усувати ці недоліки, що сприяє поширенню RTK у нових галузях і масштабних проектах.

В даний час існує великий попит на бездротовий локальний зв'язок системи позиціонування для різноманітних внутрішніх і зовнішніх систем програми. Надширокосмугові (UWB) сигнали пропонують чудовий потенціал для точного позиціонування в приміщенні. Крім точності таких локальних систем позиціонування, ще одна критична проблема надійність у середовищах із високим відбиттям.

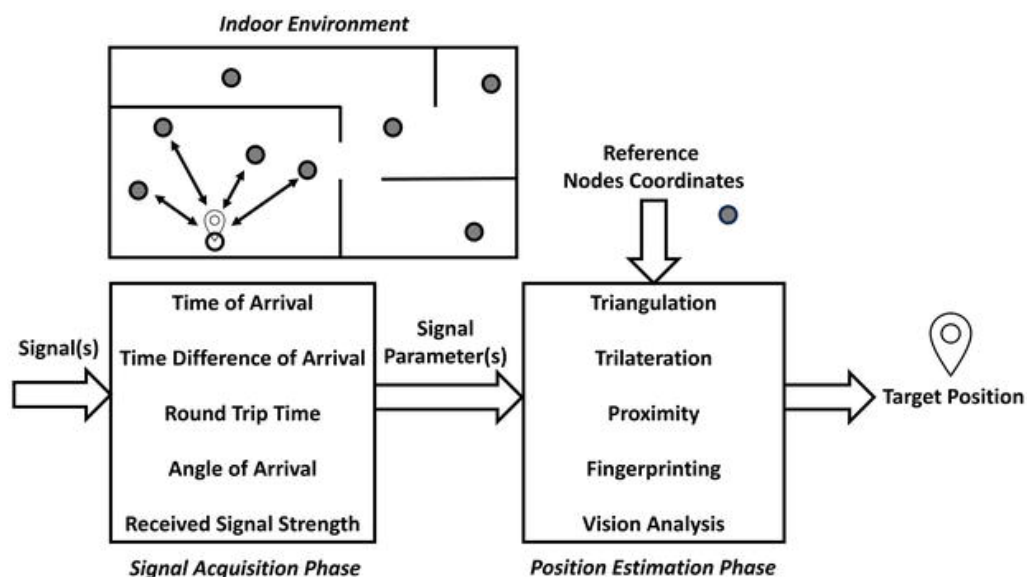


Рисунок 8 – Отримання сигналу та оцінка позиції в системах внутрішнього позиціонування

Акредитована пропускна здатність для систем UWB, точність в діапазоні у кілька сантиметрів можлива у поєднанні з багатопроменевою роздільною здатністю. Поточні комерційні і дослідницькі системи зазвичай засновані на імпульсних сигналах і в основному використання методів різниці в часі прибуття (TDOA). Опублікована точність для комерційних систем, як правило, в діапазон 10 см. Перевага імпульсних систем проявляється в низькій складності передавача. Корелюючий UWB імпульсний сигнал приймачі вимагають величезної пропускної здатності та/або спеціальних схем попередньої синхронізації. Якщо методи послідовного відбору проб використовуються, складність і необхідна пропускна здатність зменшується ціною неефективного використання переданої енергії [24].

Попит на точне позиціонування всередині приміщень сьогодні зростає, оскільки традиційні методи, такі як GPS, не можна використовувати всередині

приміщень.

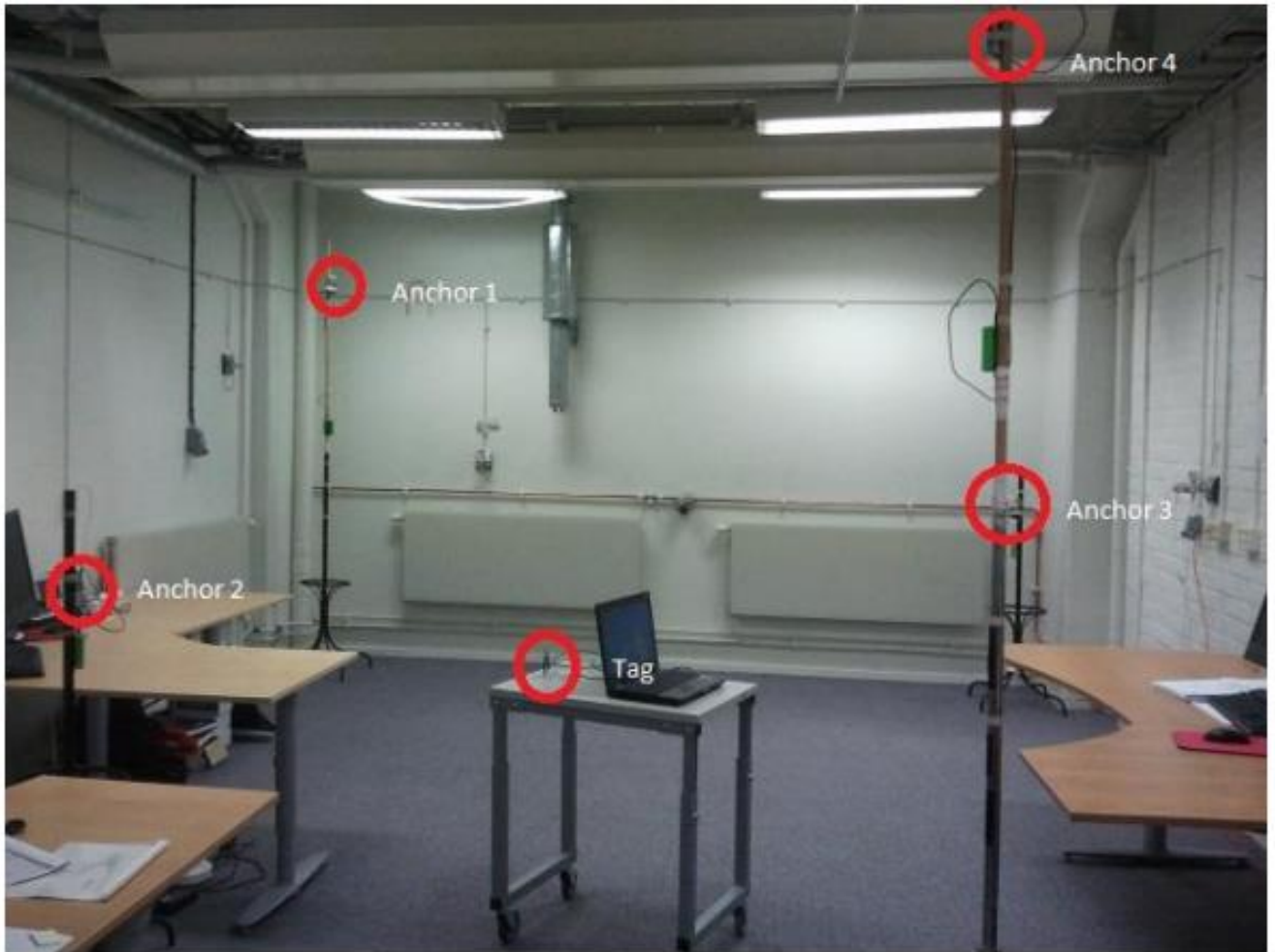


Рисунок 9 – Налаштування системи для 3D-тестів

Існує багато технологій, які можна використовувати для таких цілей, які мають свої переваги та недоліки, коли справа стосується позиціонування. Проте, здається, що UWB є найбільш сприятливим, маючи можливість досягти ліпших результатів. Мета системи позиціонування полягає в тому, щоб мати можливість локалізувати положення пристрою, зазвичай прикріпленого до рухомого об'єкта як безпілотні літальні апарати (БПЛА) або автономні наземні транспортних засобів, а також широко використовується в областях робототехніки, промисловості 4.0 або інші служби на основі визначення місцезнаходження. Потреба у визначенні точного положення рухомого об'єкта не є новим;

Система позиціонування (GPS) існує вже 40 років, і вона може забезпечити точне місцезнаходження практично в будь-якій точці Землі. Але коли справа доходить до позиціонування в приміщенні, GPS – ні застосовні через ослаблення отриманого сигналу сила. Тому доводиться застосовувати інші технології. Кілька технологій можна використовувати всередині приміщень, як системи бачення або радіо. Хоча на основі бачення системи можуть досягти субміліметрової точності, вони не можуть використовуватися в обмежених візуальних умовах. З іншого боку, рішення на основі радіо можуть використовуватися в будь-яких візуальних умовах, і може забезпечити точне положення від сантиметра до міліметра. Серед радіотехнологій технологія UWB має перевагу у високій швидкості передачі даних при низькому енергоспоживанні. За даними Федеральної комісії зв'язку та Сектор радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-R), UWB – це радіотехнологія, яка має а смуга пропускання понад 500 МГц або охоплює більший спектр ніж 20 % його несучої частоти. Через широку спектра, у часовій області він має дуже вузькі імпульси, які ідеально підходить для вимірювання часу розповсюдження між вузлами. кращої точності завдяки своїм спектральним характеристикам [25].

2. МОДЕЛЮВАННЯ НАДШИРОКОСМУГОВОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

Розділ присвячено задачі моделюванню реального надширокосмугового випромінювача з метою отримання часових залежностей електромагнітного поля в просторі навколо нього під множиною кутів спостереження. В ході роботи також перевіряються його частотні характеристики, а саме параметр КСХН, який буде слугувати індикатором того, що цей випромінювач зможе забезпечити ефективне випромінювання в необхідному діапазоні частот. Для розрахунку цього випромінювача був використаний метод кінцевих різниць у часовому просторі (FDTD).

2.1. Постановка задачі

В якості надширокосмугового випромінювача була обрана логоперіодична антена, яка є на даний момент поширеною на ринку, і яку не складно виготовити. Саме для тої антени, яку ми обрали, виробником заявлено робочий діапазон частот в смузі 800 МГц – 6 ГГц. Антена виготовлюється на текстоліті товщиною 2 мм, далі на фотографії вказані її основні геометричні розміри (рис. 10).

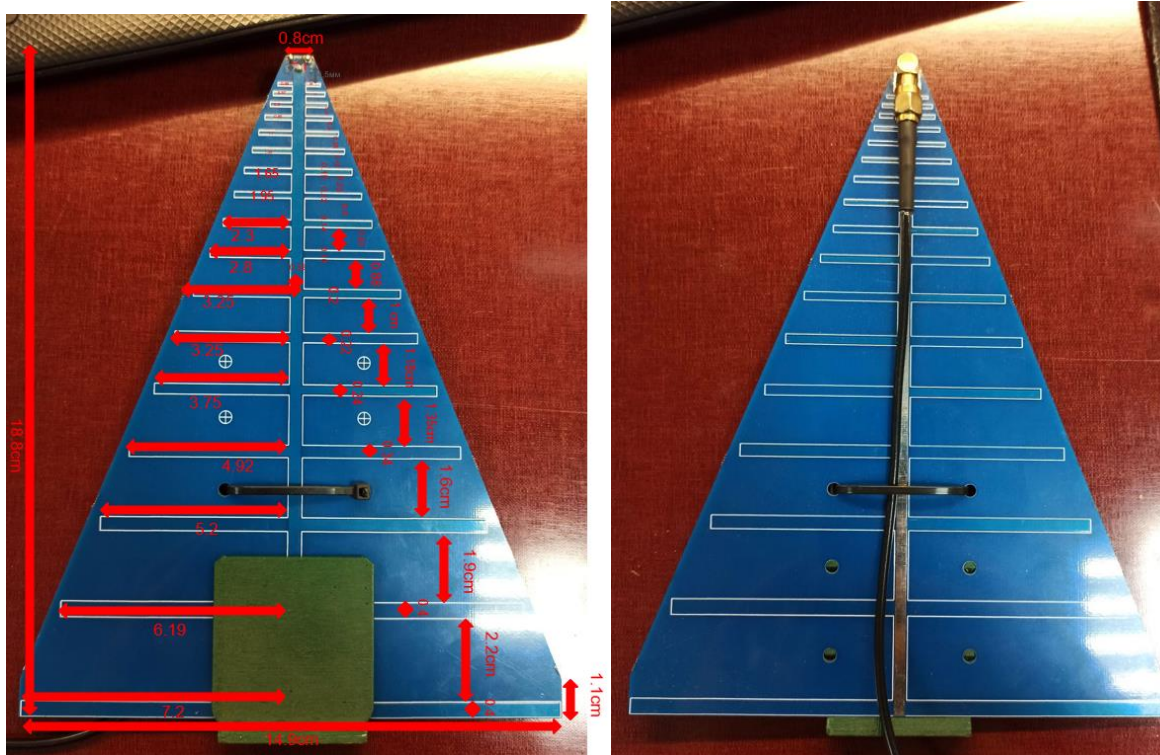


Рисунок 10 – Фотографії логоперіодичної надширокосмугової антени з обох сторін з вимірами основних геометричних параметрів

Опираючись на геометричні параметри вищезгаданої антени була побудована модель цього випромінювача в електродинамічному симуляторі CST Microwave studio [26], і вона представлена на рис. 11.

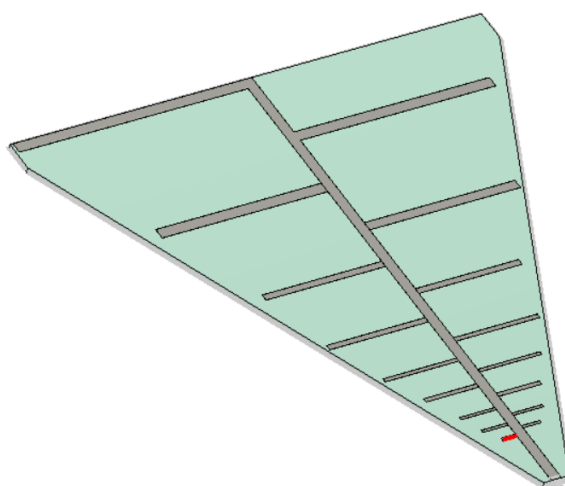


Рисунок 11 – Модель логоперіодичної надширокосмугової антени

Наступне, що нас цікавило, який робочий діапазон має ця антена. Тому на рис. 12 зображена розрахована залежність параметру КСХН від частоти.

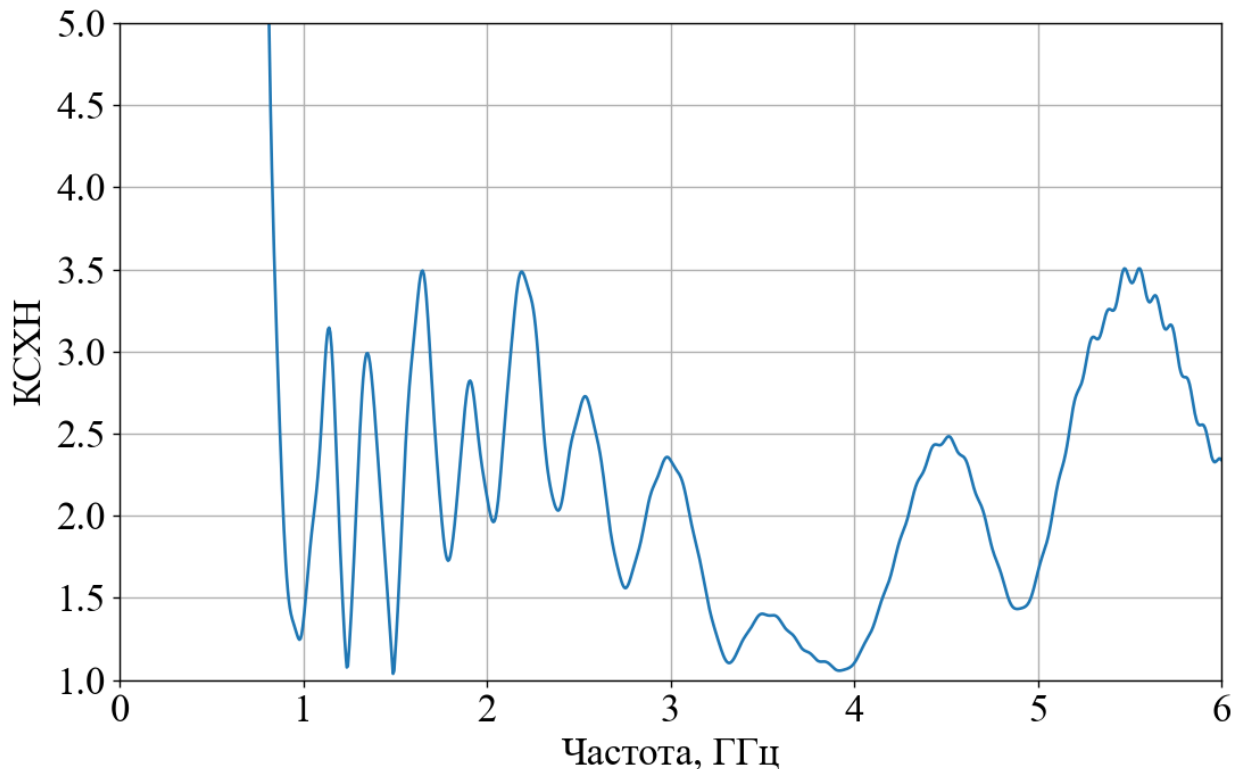


Рисунок 12 – Залежність параметру КСХН від частоти для логоперіодичної антени

2.2. Моделювання часових залежностей для системи позиціонування

Для системи позиціонування на основі надширокосмужових сигналів в просторі необхідно порахувати часові залежності електричного поля в багатьох точках простору від антени. Для цього була написана програма, яка автоматично генерує проби електричної компоненти поля в околі на антени на відстані за межами дальньої зони цієї антени. Для цього випадку ми обрали відстань 40 см. Були розглянуті комбінації кутів $\theta = 5-85^\circ$ та $\varphi = 0-85$ градусів.

Далі цей файл дає змогу додати проби поля в симулятор, як зображено на рис. 13.

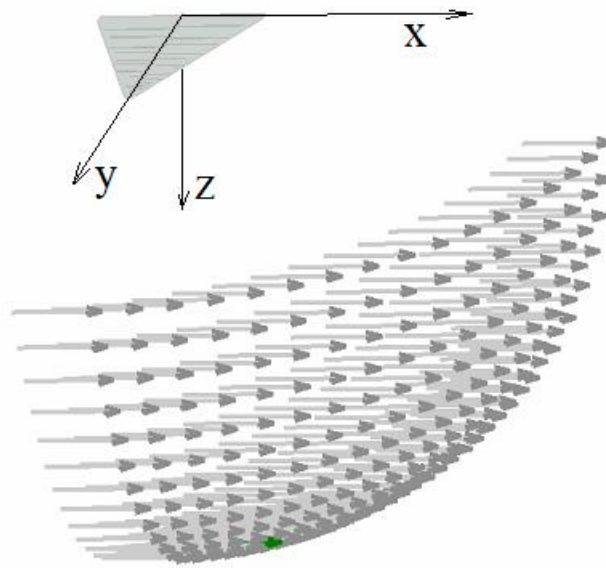


Рисунок 13 – Проби електричного поля, які закривають область кутів спостереження $\theta = 5\text{--}85^\circ$ та $\varphi = 0\text{--}85^\circ$ градусів

Головна ідея системи позиціонування на надширокосмугових сигналах була викладена в [27] та в [28] і вона ґрунтується на одному з ефектів, які притаманні надширокосмуговим випромінювачам, а саме спотворення часової форми випроміненого сигналу, в залежності від кута спостереження. Зазвичай для радарних задач намагаються отримати незмінну форму часової залежності в певному секторі кутів, в нас же задача виглядає навпаки – чим сильніше антена буде спотворювати сигнал, тим краще. Для системи позиціонування на площині [29] достатньо двох антен. Для позиціонування в просторі необхідні три антени. І для забезпечення відмінності між сигналами, які вони випромінюють є два шляхи реалізації. Перший полягає в тому, що збуджуюча часова залежність однакова, проте антени мають відрізнитись за своєю будовою, наприклад загальним розміром антени. Другий же, який ми використали в цій роботі, це три

однакові антени, проте з різними часовими залежностями збуджуючого сигналу. Ці часові залежності продемонстровані на рис. 14.

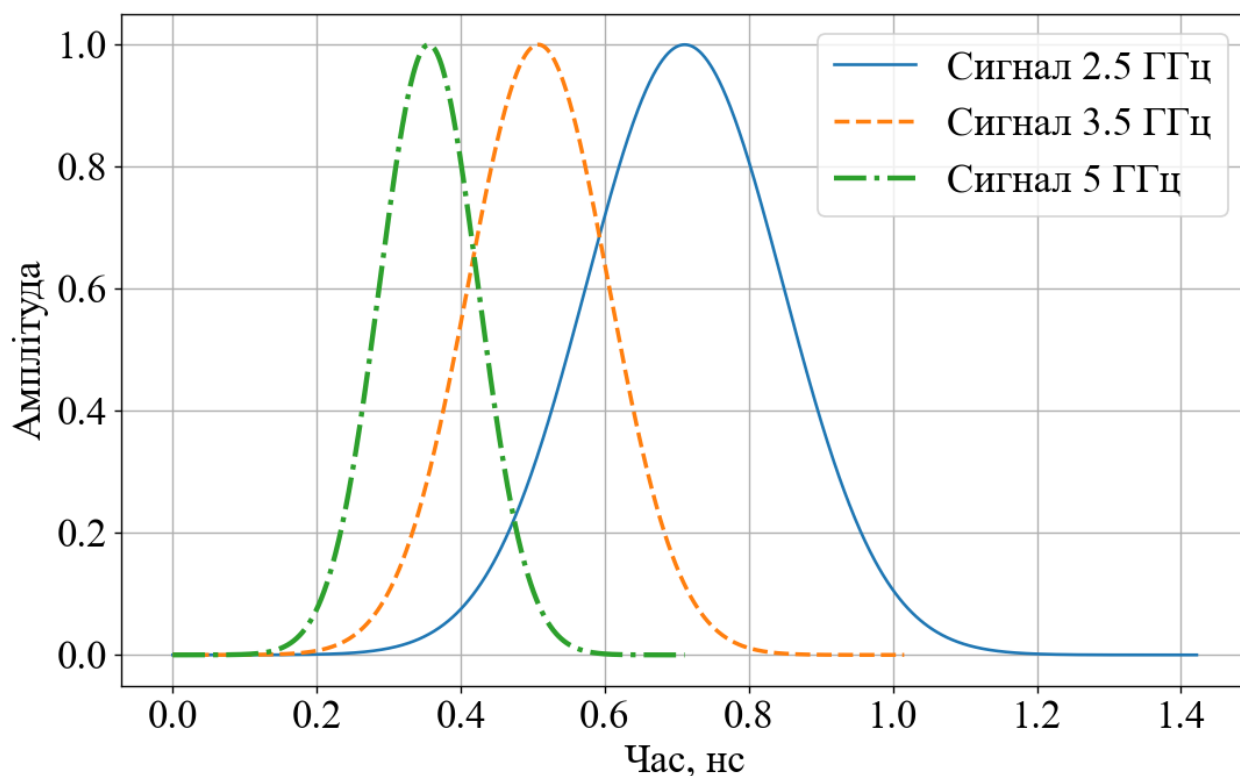


Рисунок 14 – Часові залежності збуджуючих сигналів

Тут треба пояснити, що за позначки на рис. 14, а саме сигнал 2.5 ГГц, сигнал 3.5 ГГц та сигнал 5 ГГц. Це впливає з принципу задавання збуджуючого сигналу в середовищі електромагнітного моделювання CST Microwave Studio. В цій програмі можна задавати збуджуючий сигнал у формі гаусового імпульсу, і це відбувається за рахунок обрання його робочого діапазону частот. На рис. 14 продемонстровані три сигнали, у яких робочий діапазон частот рівни 0–2.5 ГГц, 0–3.5 ГГц та 0–5 ГГц відповідно. Для подальшої зручності ми будемо вказувати три антени як перша, друга та третя, які збуджувались сигналам, які були згадані вище. На часовій залежності це буде напряду відображатись на тривалості імпульсу та швидкості наростання фронту та швидкості його спадання. В даному випадку при наявній надширокосмуговій антені нам дуже зручно використати цей підхід для моделювання системи позиціонування, а саме використавши одну

антену та різний спектральний склад збуджуючих сигналів для отримання різних форм часових залежностей з однієї й тієї ж антени. Якщо до того, як це може бути реалізовано на практиці, то це може бути наприклад схема імпульсного генератора, який базується на швидкому зворотному викиді ЕДС самоіндукції [30], або на діодному та магнітному вимикачі [31].

Порахувавши ці три проекти для трьох антен був також написаний VBA макрос, який автоматично дістав часові залежності в точках спостереження для всіх вищезгаданих кутів.

На рис. 15-17 представлені пораховані часові залежності електричної компоненти електромагнітного поля для всіх заданих комбінацій для першої, другої та третьої антени відповідно.

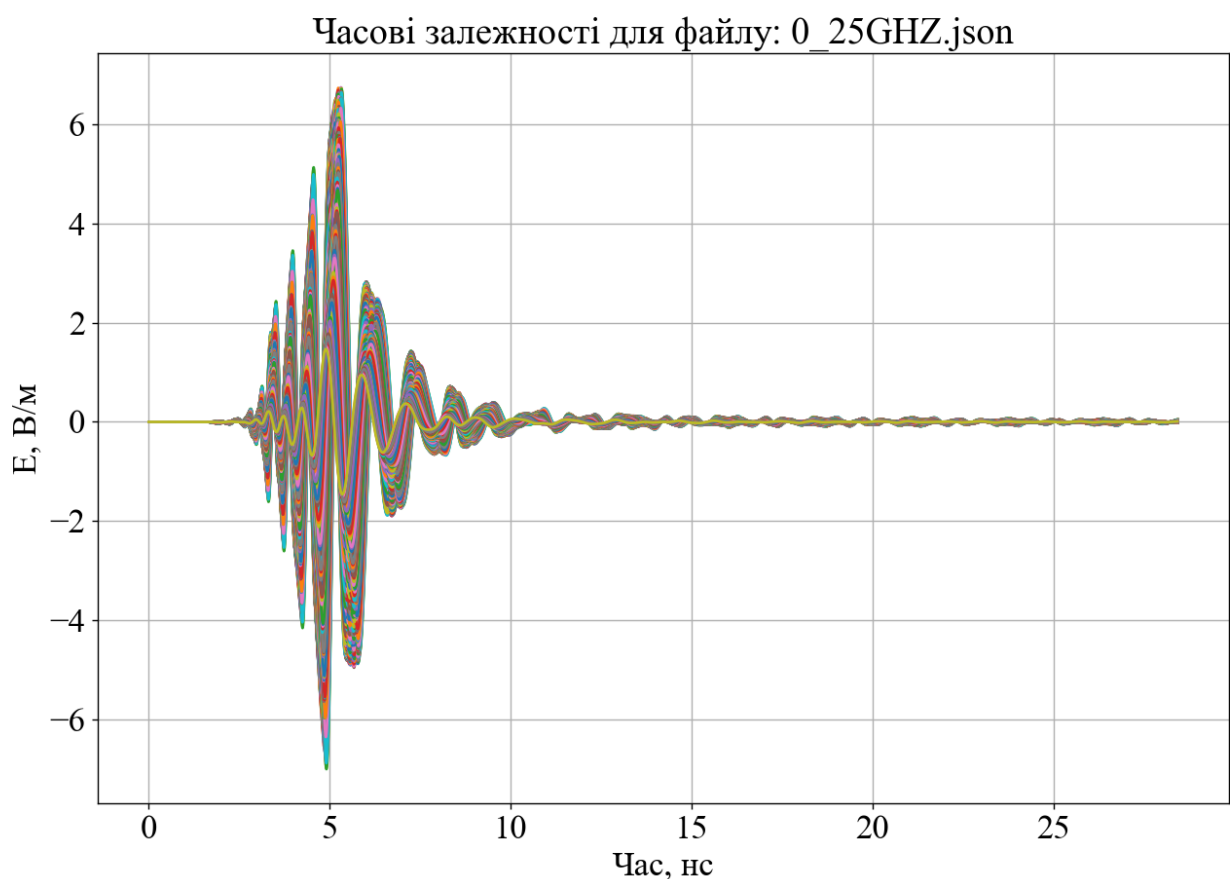


Рисунок 15 – Пораховані часові залежності електричної компоненти електромагнітного поля для першої антени

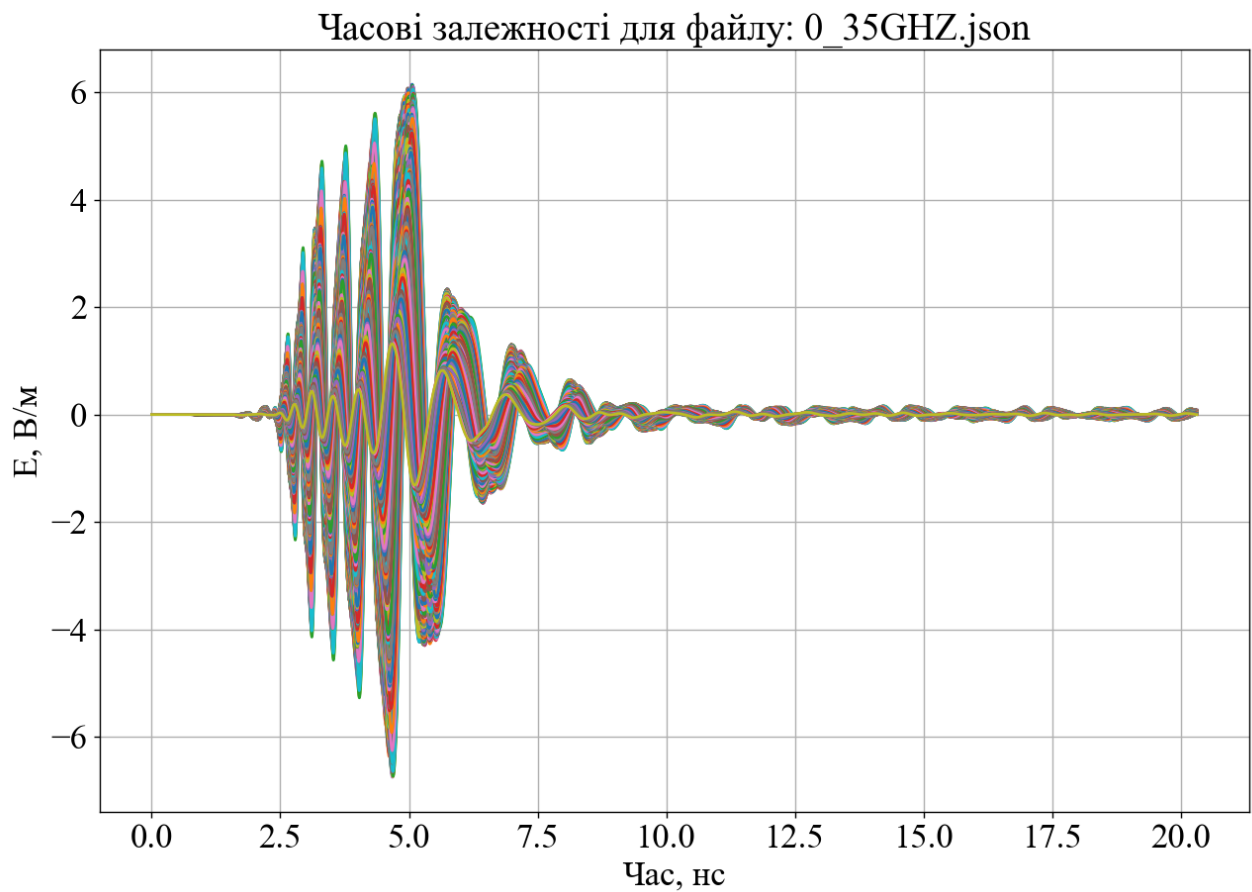


Рисунок 16 – Пораховані часові залежності електричної компоненти електромагнітного поля для другої антени

Слід зауважити, що порівнювати їх візуально в масштабі часу поки що не коректно, через нерівномірність кроку в часі, тому далі буде порівняння трьох часових залежностей при фіксованих кутах вже інтерпольованих і відмасштабованих даних від трьох антен.

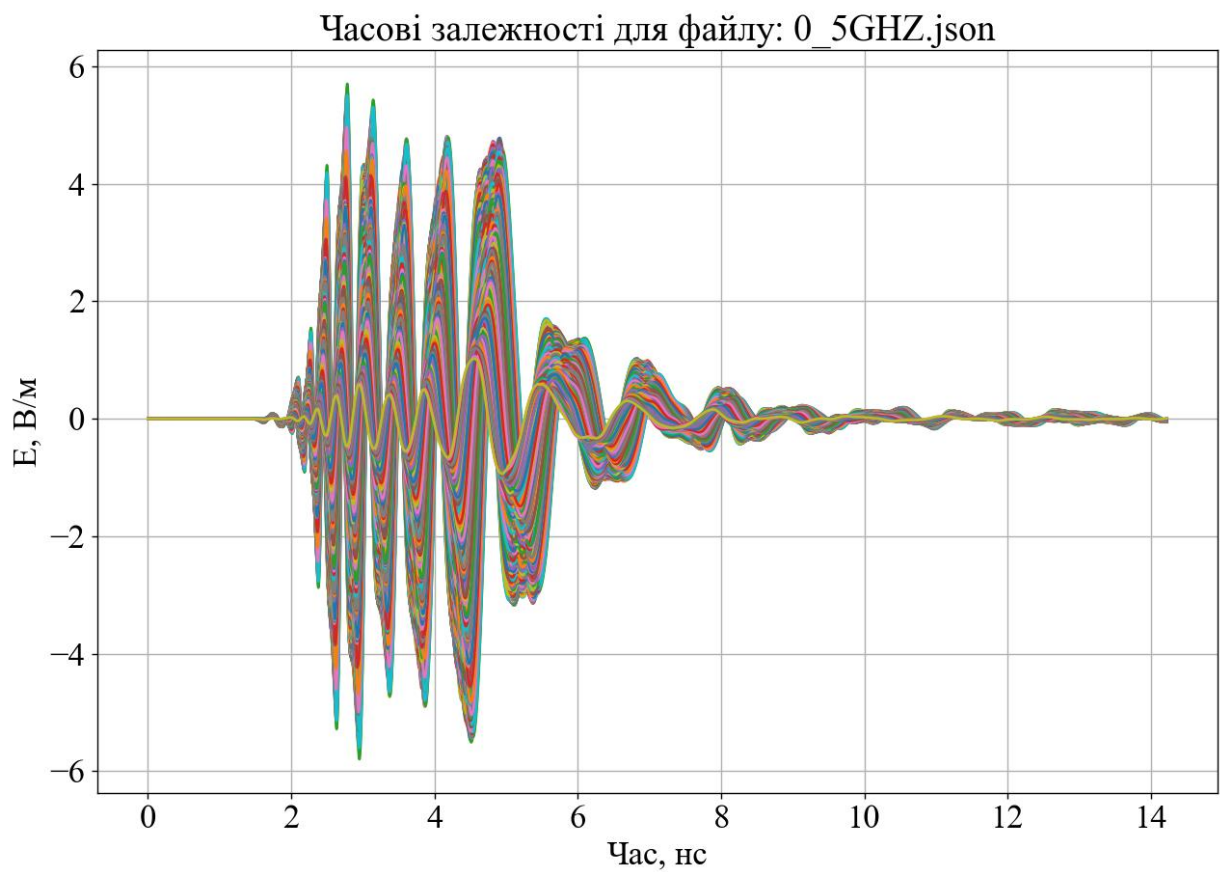


Рисунок 17 – Пораховані часові залежності електричної компоненти електромагнітного поля для третьої антени

Для прикладу, щоб порівняти всі три антени одночасно на рис. 18 продемонстровано три часові залежності від різних антен для фіксованих кутів спостереження $\theta=45$ градусів та $\varphi=45$ градусів.

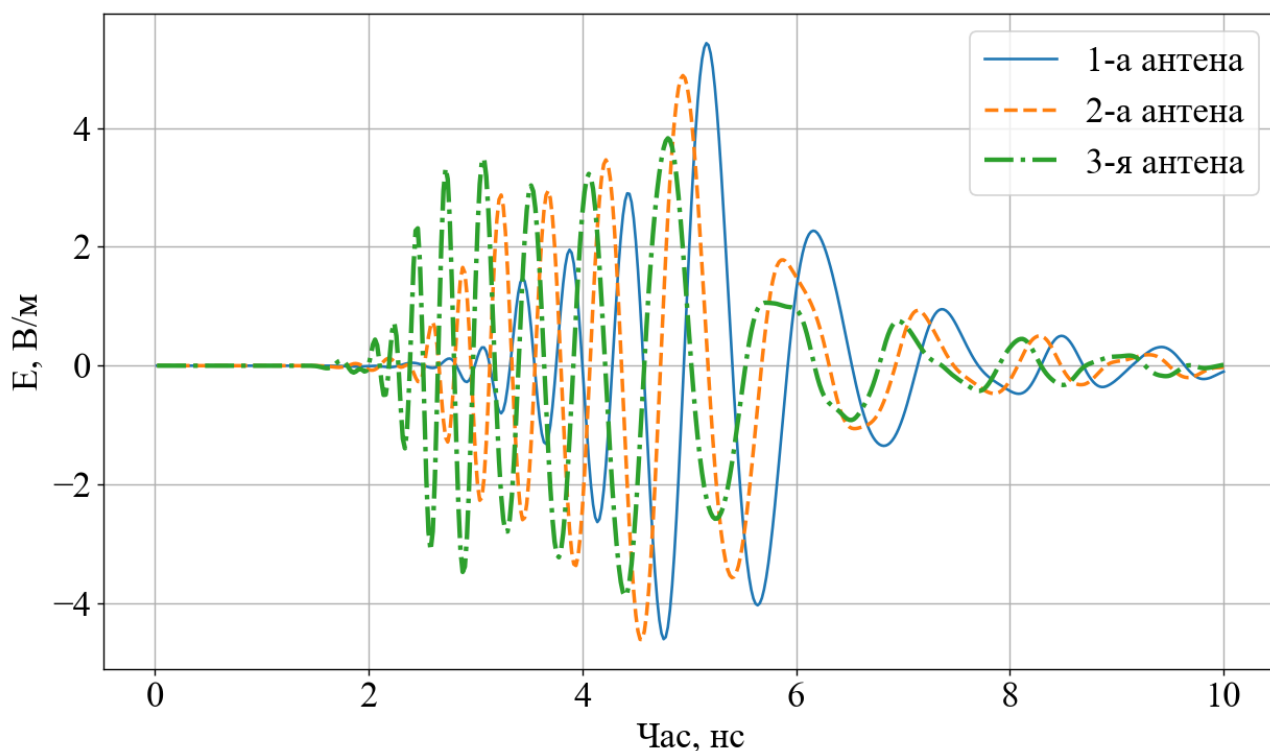


Рисунок 18 – Часові залежності електричної компоненти електромагнітного поля в точці спостереження під кутами спостереження $\theta=45$ градусів та $\varphi=45$ градусів на відстані 40 см для трьох антен.

З рис. 18 можна простежити цікавий ефект, а саме те, що сигнал із третьої антени з'являється в часі помітно раніше за попередні, так само як і сигнал з 2-ї антени з'являється пізніше за сигнал з третьої, проте раніше ніж від першої. Це пов'язано з тим, що фідер цієї антени знаходиться біля вершини її трикутної форми, де і знаходяться найкоротші диполі, і далі вздовж антени диполі збільшують свою довжину. Відповідно сигнали з вищою частотою як в третій антені випромінюються у вільний простір раніше, у порівнянні з іншими сигналами, які тут були представлені.

3. КЛАСИФІКАЦІЯ ЧАСОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗА ФОРМОЮ СИГНАЛУ

У цьому розділі буде розглянутий процес підготовки даних для тренування штучної нейронної мережі, а саме їх розмітка та нормування, вибір структури нейронної мережі, сам процес тренування.

3.1. Постановка задачі

Наступним етапом є розробка системи, яка здатна класифікувати під якими кутами була прийнята та чи інша часова залежність електричної компоненти електромагнітного поля і також визначення, з якої антени цей сигнал прийшов. Є два основних варіанти, які можна було тут застосувати, а саме метод кореляції, як було раніше зроблено для системи позиціонування на площині [32] та підхід із застосуванням штучних нейронних мереж. Дивлячись на попередні розробки [33], було визначено, що штучна нейронна мережа справляється з цим швидше, у порівнянні з кореляційним підходом.

3.2. Послідовність підготовки даних та тренування штучної нейронної мережі

Послідовність реалізації цього підходу представлено на рис. 19.

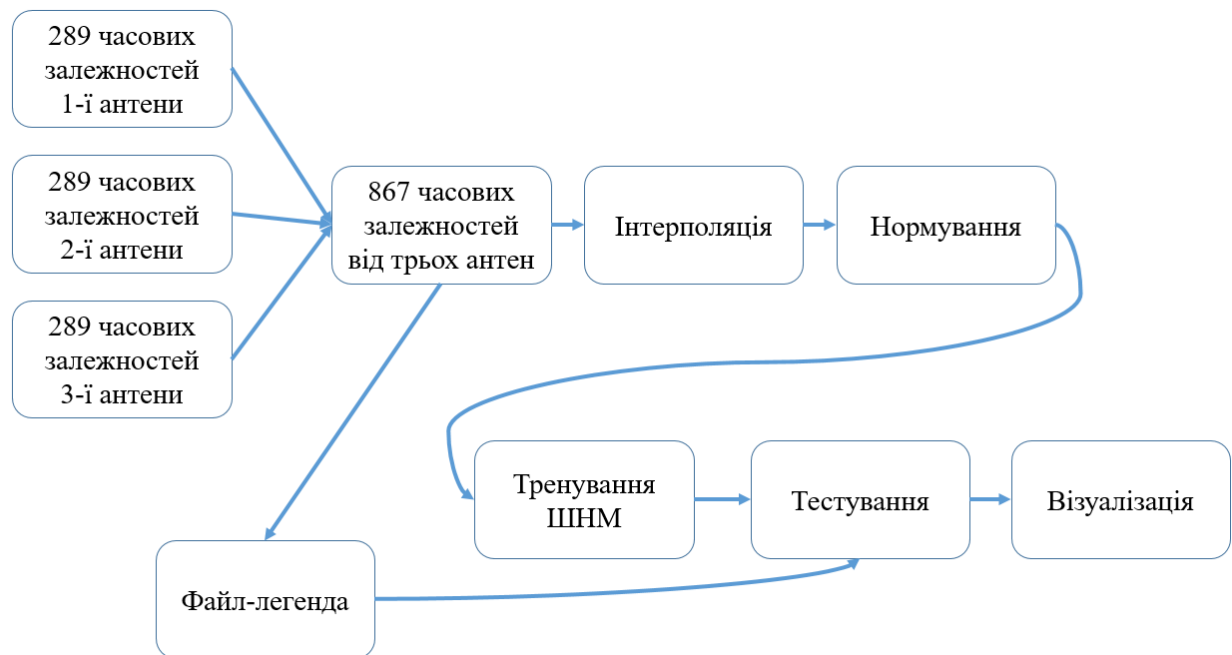
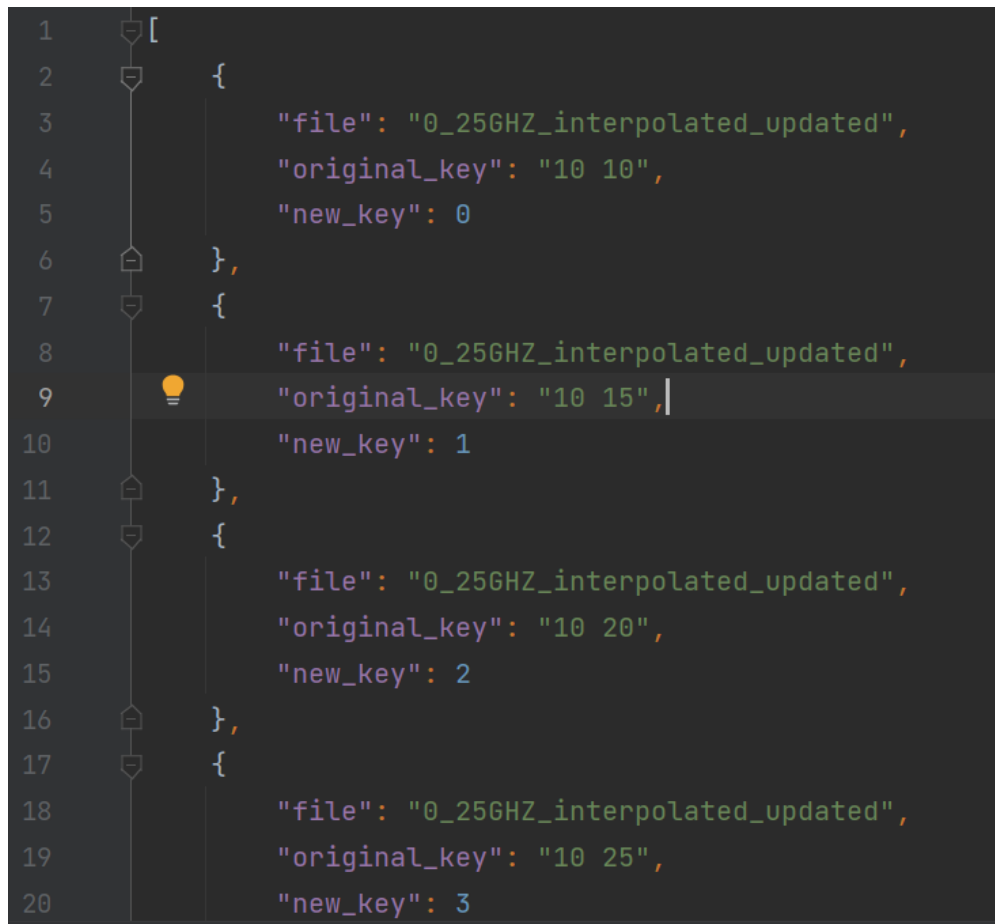


Рисунок 19 – Алгоритм обробки та тренування штучної нейронної мережі

Тут детально розберемо кожен із цих блоків. Після того, як ми розрахуємо часові залежності електричної компоненти електромагнітного поля в усіх точках спостереження для кожної антени, на виході ми отримуємо великий текстовий файл, який містить в собі їх усіх. Тому першим етапом є структурування цих результатів. Для даної задачі ми використали json формат даних, який мав в собі словник, в якому ключами були комбінації кутів θ та φ , а значеннями відповідні часові залежності. Таку структуру даних має кожна розрахована антена. Далі ці три структури даних об'єднуються в одну, де вони вже отримують в якості ключа порядковий номер, а в якості значення саму часову залежність. Паралельно до

цього створюється файл-легенда, де зберігається відповідна інформація про кожен порядковий номер в новій структурі даних, щоб потім після класифікації можна було порівняти отримані значення з реальними розпізнаними кутами. Частина цього файлу зображена на рис. 20.



```
1  [
2    {
3      "file": "0_256HZ_interpolated_updated",
4      "original_key": "10 10",
5      "new_key": 0
6    },
7    {
8      "file": "0_256HZ_interpolated_updated",
9      "original_key": "10 15",
10     "new_key": 1
11   },
12   {
13     "file": "0_256HZ_interpolated_updated",
14     "original_key": "10 20",
15     "new_key": 2
16   },
17   {
18     "file": "0_256HZ_interpolated_updated",
19     "original_key": "10 25",
20     "new_key": 3
21   }
22 ]
```

Рисунок 20 – Структура файлу-легенди

Далі всі залежності необхідно інтерполювати, адже для кожного нового проекту CST Microwave Studio коли моделює структуру в часовому просторі, результуючі часові залежності мають різну довжину вектора і нерівномірний крок. Поглянувши на розраховані часові залежності (рис. 21), було видно, що основна інформація лежить в межах 0–10 нс. Тому всі часові залежності були інтерпольовані з кроком 0,02 нс з довжиною вектора 500 точок, що відповідає 10 нс.

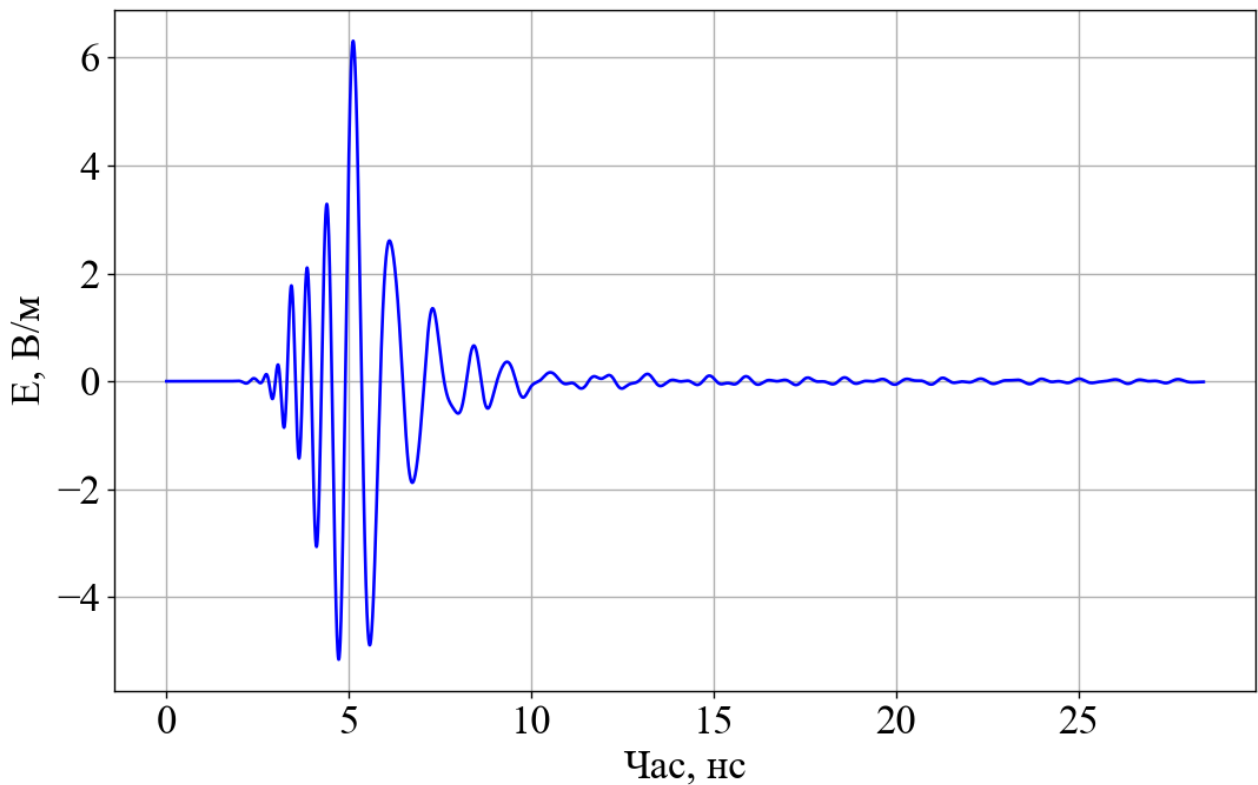


Рисунок 21 – Приклад «сирих» даних з симулятора CST Microwave Studio

Далі після інтерполяції, кожна часова залежність нормується на свою максимальну амплітуду. Це необхідно для стабільнішого процесу навчання та результуючої здатності класифікувати ту чи іншу часову залежність нейронній мережі.

Тепер треба пояснити, як ми обирали тип та структуру штучної нейронної мережі. Весь вищезгаданий процес підготовки даних був зроблений для використання даних разом з повнозв'язною глибокої штучної нейронною мережею. Проте тут можна було використати й LSTM (Long Short-Term Memory - довга короткочасна пам'ять). Її перевагою було б те, що вона могла б працювати і з «сирими» даними. Проте як результат складніше б і довше тренувалась, без суттєвого виграшу в точності [34]. Тому й було обрано саме попередня обробка вхідних даних та використання повнозв'язної глибокої штучної нейронної мережі.

Найвдалішою на даний момент структура глибокої повнозв'язної штучної нейронної мережі продемонстровано на рис. 22.

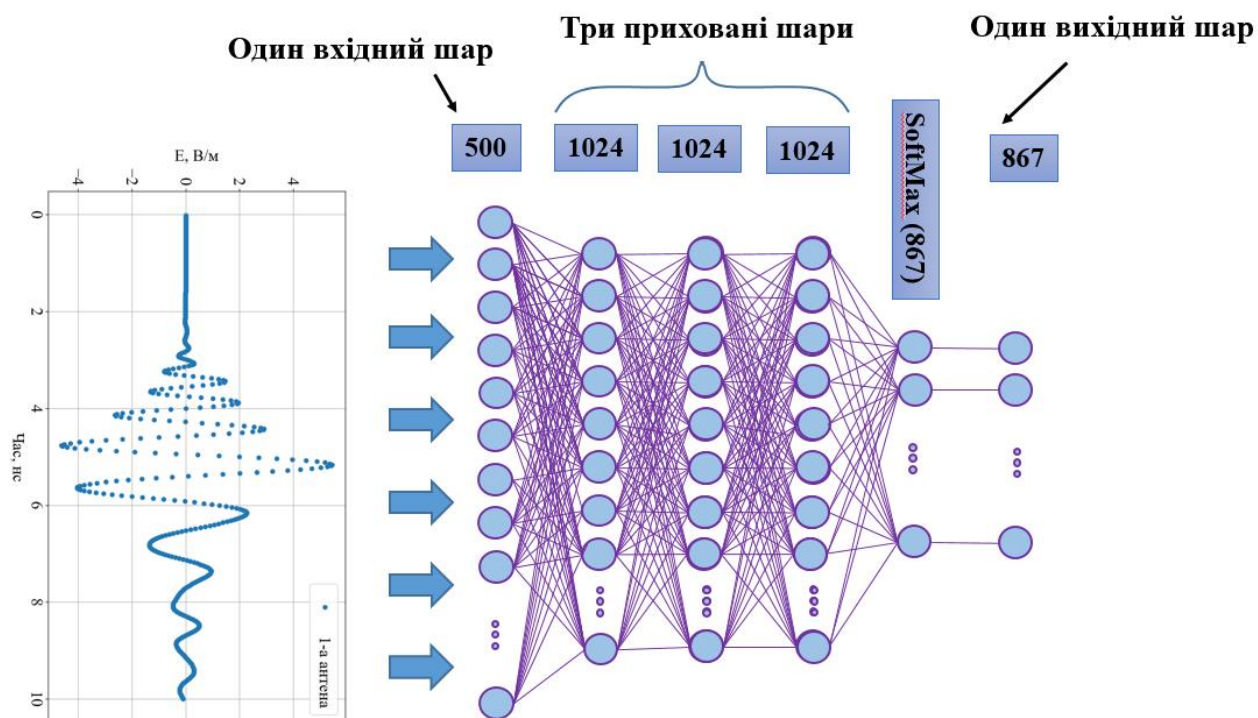


Рисунок 22 – Структура штучної нейронної мережі, яка була використана в подальших тестуваннях системи позиціонування.

Про структуру самої штучної нейронної мережі: перший вхідний шар відповідає розміру вектора часових залежностей, які ми інтерполювали. Далі йдуть декілька прихованих шарів, а саме 3 шари з розміром в 1024 нейрони кожен. Функція активація була обрана лінійна. Після них йде шар SoftMax, який приймає вхідний вектор із необмеженими значеннями (від'ємними чи додатними) і перетворює його на вектор, де кожен елемент лежить у діапазоні від 0 до 1. Значення після SoftMax інтерпретуються як ймовірності належності до певного класу. Також SoftMax забезпечує, що сума всіх значень вихідного вектора дорівнює 1, тобто результат відповідає умовам ймовірнісного розподілу. Останній вихідний шар має 867 нейронів, які відповідають всім комбінаціям

кутів спостереження від всіх трьох антен. Точність натренованої мережі склала порядка 95%.

Може бути цікавим поглянути на значення вагових коефіцієнтів прихованих шарів для нашої штучної нейронної мережі. Вони представлені на рис. 23-26.

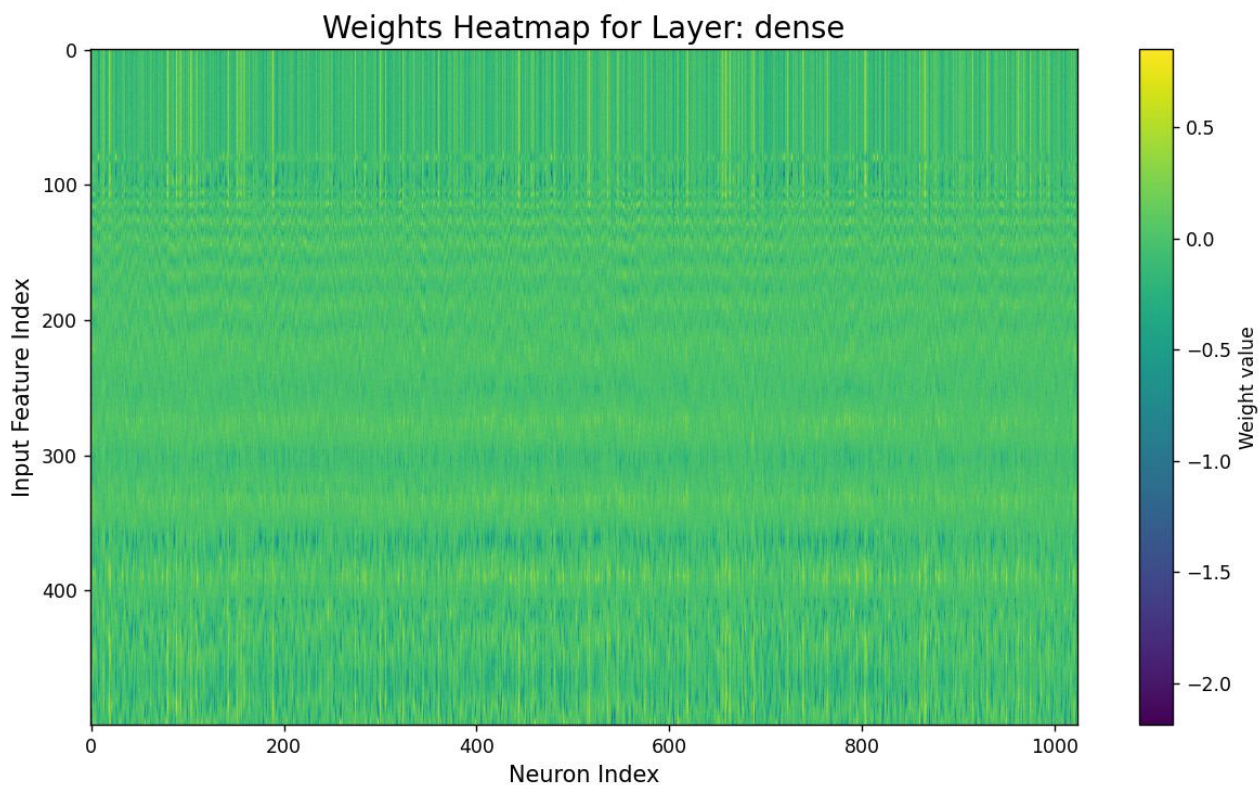


Рисунок 23 – Вагові коефіцієнти між вхідним (500) та першим прихованим шаром (1024)

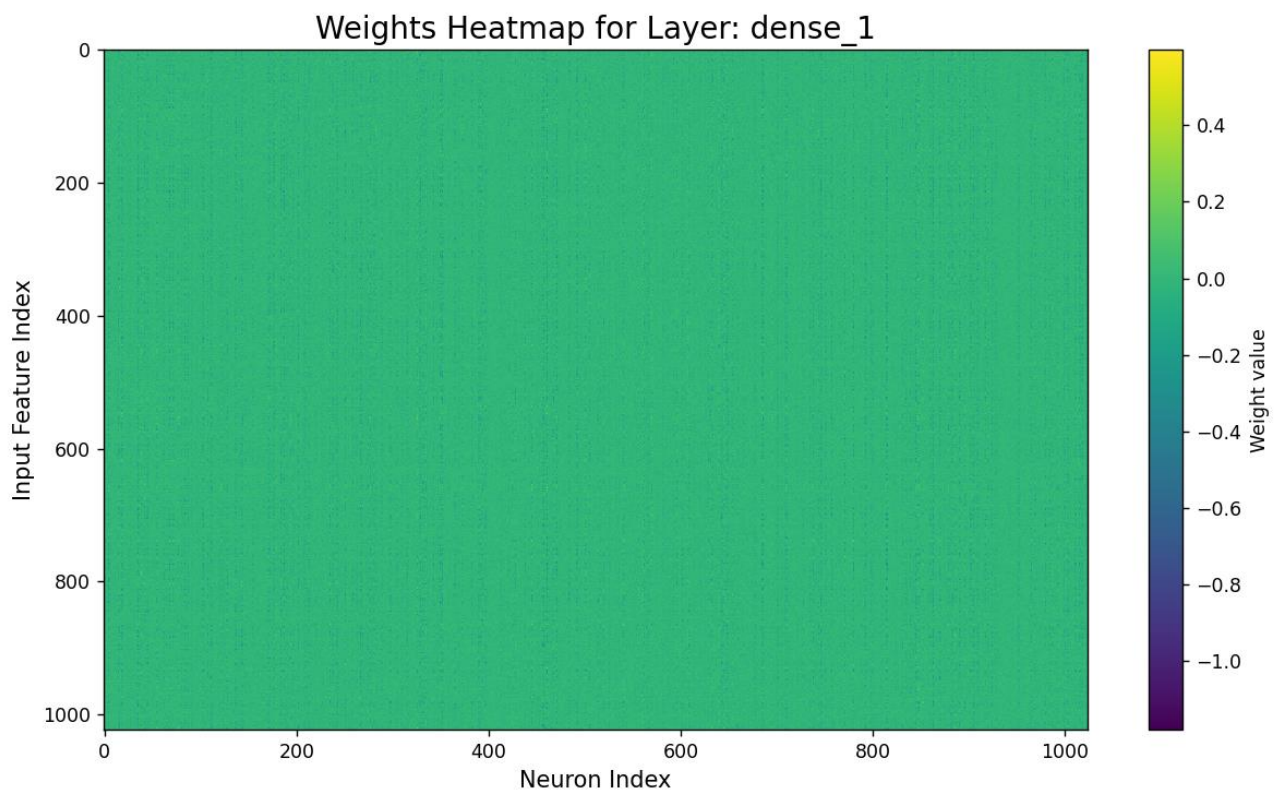


Рисунок 24 – Вагові коефіцієнти між першим прихованим шаром (1024) та другим прихованим шаром (1024)

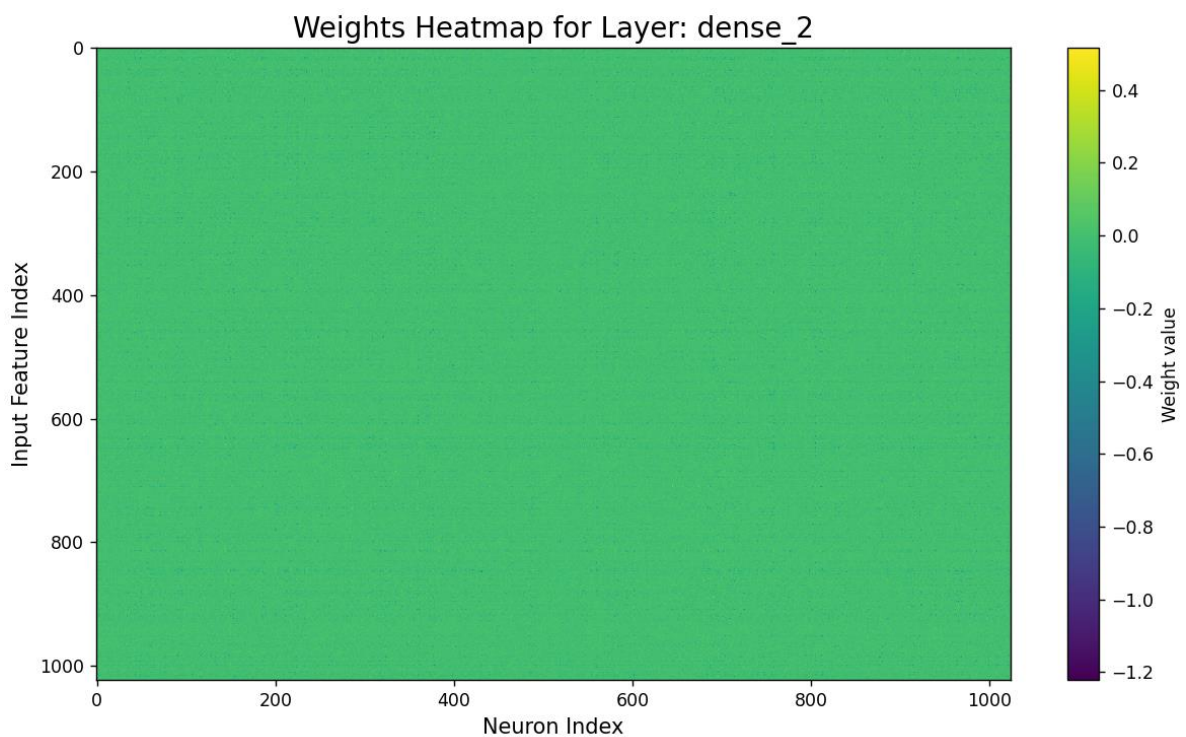


Рисунок 25 – Вагові коефіцієнти між другим прихованим шаром (1024) та третім прихованим шаром (1024)

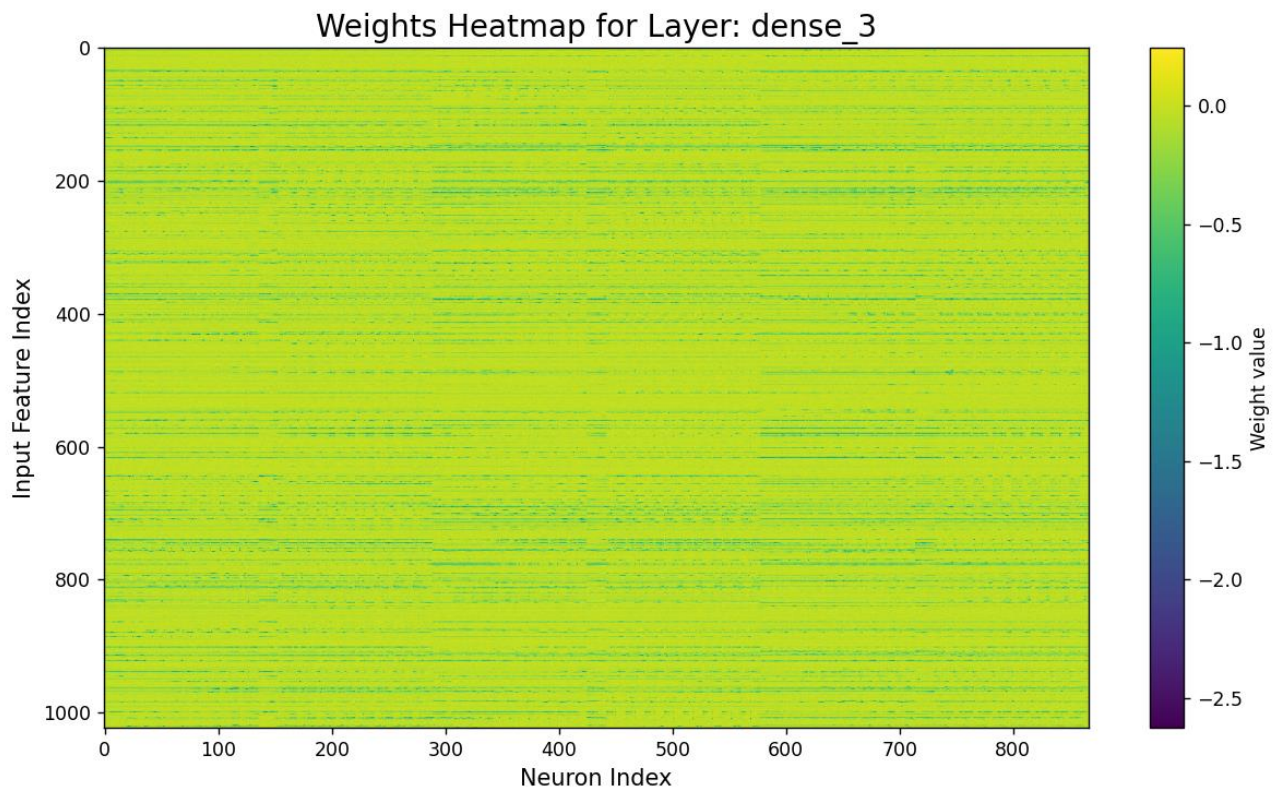


Рисунок 26 – Вагові коефіцієнти між третім прихованим шаром (1024) та шаром SotMax (867)

З цих графіків можна побачити, як на рис. 11 ще можна побачити певні патерни у вагах, які фактично можуть підказати, на що більше всього звертає увагу штучна нейронна мережа при класифікації сигналів. Також можна побачити, як з глибиною шарів ускладнюється структура вагів, і людським оком вже нічого не можна відмітити.

3.3. Тестування натренованої штучної нейронної мережі

Результати тестування нашої штучної нейронної мережі продемонстровані на рис. 27. Цей рисунок показує, які виходи штучної нейронної мережі були активовані внаслідок подавання на вхід відповідної часової залежності. Для ідеального випадку це мала б бути ідеальна пряма лінія. Проте видно, що в деяких випадках, а саме менше 4% наша мережа робить помилкові рішення і фактично плутає деякі часові залежності. Для кращого аналізу отриманих результатів, вся площа графіку поділена на 9 областей. Фактично червоні пунктирні лінії розділяють номери міток, які відповідають номерам тої чи іншої антени. Лівий нижній прямокутник відповідає за класифікацію кутів з першої антени, центральний прямокутник відповідає за класифікацію сигналів з другої антени, і відповідно правий верхній прямокутник – за третю антену. Тепер знаючи це, можна побачити, що всі відхилення в розпізнаних часових залежностях для комбінації кутів спостереження відбуваються в межах однієї антени і не плутають сигнали з інших антен.

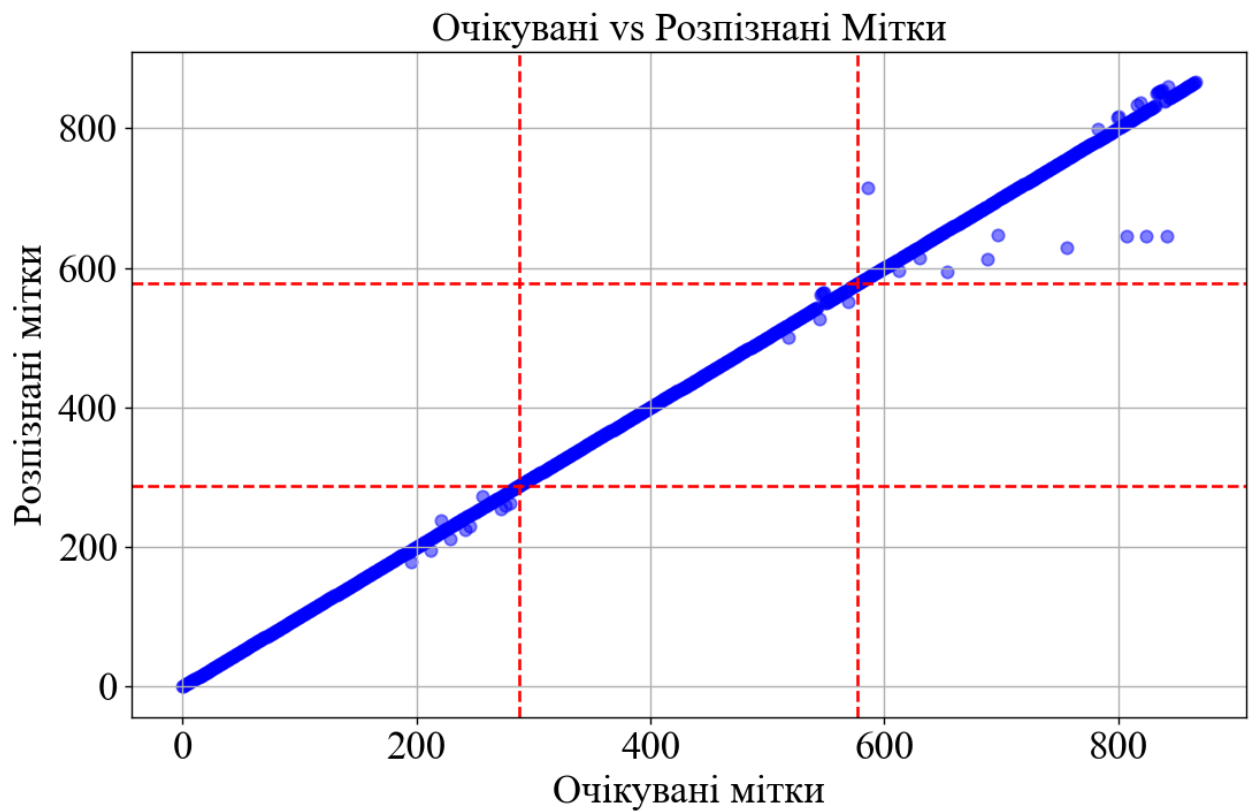


Рисунок 27 – Залежність вихідних розпізнаних міток від поданих часових залежностей.

Цей результат не є кінцевим, тому що тут можна багато чого покращити в майбутньому, а саме підібрати більш вдалу структуру глибокої штучної нейронної мережі, застосувати розширення тренувальної вибірки за рахунок підшумлення даних, застосувати метод DropOut, який при збільшенні структури мережі не дасть їй перетренуватись і багато інших підходів.

4. ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

В цьому розділі ми розглянемо безпосередньо позиціонування. Для цього буде сформована постановка задачі та на конкретному прикладі буде показано результат роботи даної системи.

4.1. Постановка задачі

Розглянемо на розташування наших трьох антен в просторі (рис. 28). Тут ви можете побачити наші три надширокосмугові логоперіодичні антени, які розташовані в одній площині. Перша в дальньому лівому куті, друга в правому дальньому і третя буквально ближче всіх до нас знаходиться. Відстань між першою та другою антеною рівна L , так як і відстань між другою та третьою рівна L . Фактично антени знаходяться в трьох вершинах квадрата. Кожна антена має свою власну систему координат X, Y, Z . Проте щоб коректно все порахувати, будемо вважати, що загальна система координат збігається з ортами системи координат першої антени. Тому варто зазначити, що у другої антени вісь X розвернута, а система координат третьої антени розвернута на 180 градусів навколо вісі Z . Це нам необхідно буде врахувати в програмі розрахунку за допомогою кутів Ейлера. Антени мають саме таке положення, щоб пораховані кути спостереження $\theta_n=5-85$ градусів та $\varphi_n=5-85$ градусів від кожної антени знайшли точки перетину в межах обраного простору, а саме паралелепіпеда із гранями з розміром рівним L . Приймальна система на цьому рисунку позначена білою сферою та має координати x, y, z .

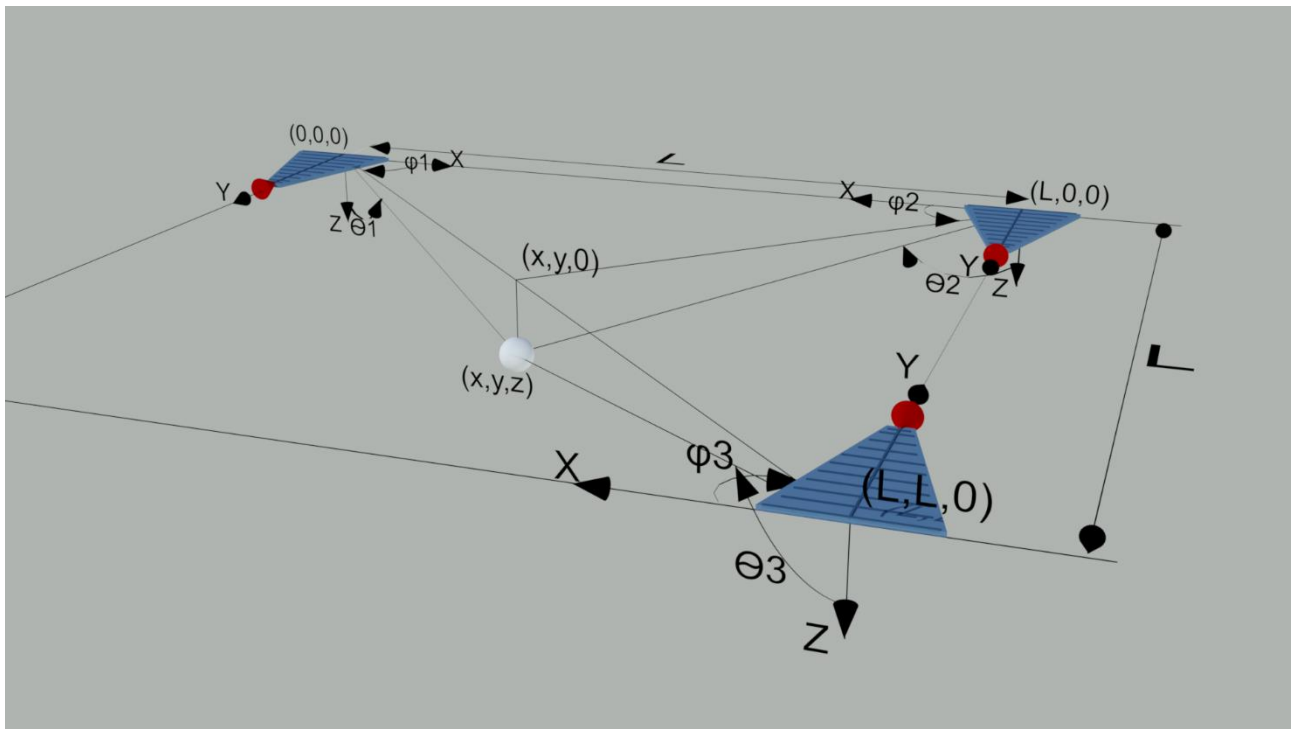


Рисунок 28 – Постановка задачі системи позиціонування

4.2. Візуалізація отриманих результатів

Після того, як повнозв'язна штучна нейронна мережа визначила номери міток для трьох антен, ми користуємось файлом-легендою, дістаємо звідти конкретні значення кутів для кожної антени. Щоб продемонструвати на прикладі роботу даної системи, а саме визначення простору, де може знаходитись приймальна система у відношенні до трьох опромінювачів було обрано $L = 5$ м. Далі, щоб це зобразити в просторі необхідно побудувати конуси, вершини яких знаходяться у відповідних центрах координат кожного опромінювача. Щодо кута розкрива конусу, він визначається напряду із нашого крока моделювання кутів спостереження, а саме ми взяли крок в 5 градусів по кожному із кутів, відповідно наша половина ціни поділки шкали це і є наш кут розкрива конусу. З цими усіма умовами, на рис.29 зображені координати наших опромінювачів, та

відповідні конуси. В результаті, приймальна система має знаходитись в тій області, де перетинаються всі три конуси. Це можна побачити, бо конуси напівпрозорі, і ця область добре помітна.

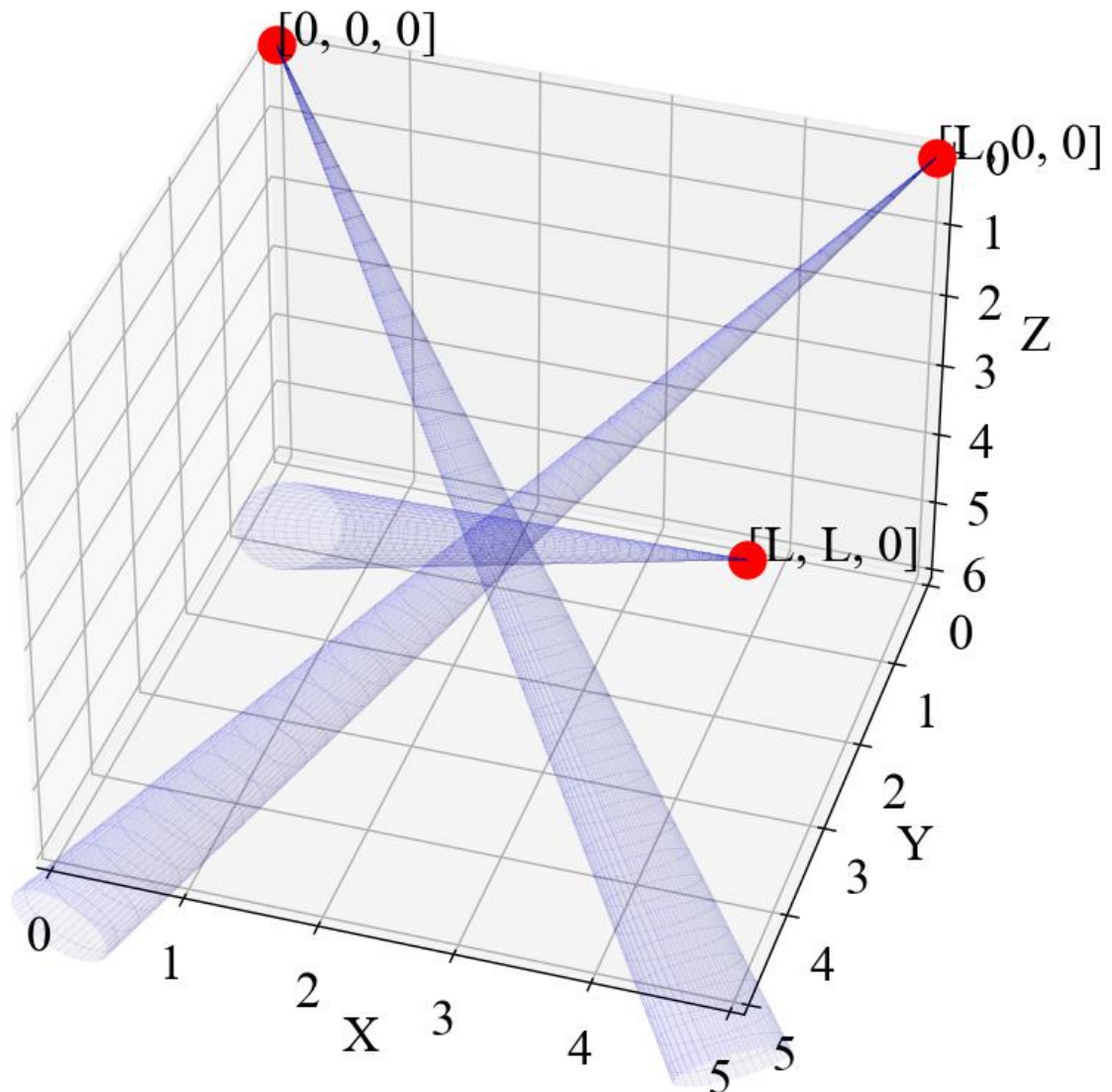


Рисунок 29 – Візуалізація системи позиціонування для випадку кутів

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 45 \text{ градусів, } \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 45 \text{ градусів}$$

5. ВИСНОВКИ

Для задачі позиціонування в просторі, а саме визначення координати приймача x , y , z відносно координат передавальних антен було змодельовано надширокосмугову логоперіодичну антену, яка працює в діапазоні 800 МГц – 5 ГГц. Були отримані часові залежності для трьох однакових антен, які збуджуються гаусовими імпульсами різної наносекундної тривалості в певному секторі кутів θ та ϕ . Була проведена попередня обробка і підготовка даних для тренування глибокої повнозв'язної штучної нерйонної мережі за визначеним алгоритмом. Проведене тестування класифікатора та побудована візуалізація області, де може знаходитись приймальна система.

Тестування штучної нерйонної мережі показало, що невелика кількість прихованих шарів забезпечує однозначну класифікацію сигналів від кожної з антен окремо, проте точність системи не є стовідсотковою і потребує подальших покращень. В нашому випадку точність класифікації склала 95 відсотків. Це може бути як зміна структури та кількості нейронів, додавання шару з функцією DropOut, яка запобігає перетренування штучної нейронної мережі. Варто можна збільшити тренувальний набір завдяки використанні підшумлених тренувальних даних. Також можна спробувати використати інший надширокосмуговий випромінювач, у якого спотворення форми часової залежності при різних кутах спостереження буде сильнішою. Це також могло бути причиною того, що для деяких кутів від кожної антени точність класифікації впала і були допущені помилки класифікації.

Для повноцінної роботи системи варто зробити крок кутів спостереження меншим, що також в результаті зменшить визначену область в просторі, де може знаходитись приймальна система. В даній роботі були використані кроки по кутам рівним 5 градусів, що насправді є тільки ілюстративним.

Дана система може працювати у відкритому просторі, та для роботи в закритих приміщеннях необхідно проводити окремі дослідження про вплив інтерференцій та перевідбиття сигналів. Варто зауважити, що в якості приймача були використані проби електричного поля, проте в реальності це виключає вплив від використання реальної надширокосмугової антени для прийому сигналів. З іншого боку, використання реальної антени замість проби може посилити спотворення сигналів під різними кутами спостереження, що може помітно покращити точність позиціонування.

1. M. Cheraghinia et al., “A Comprehensive Overview on UWB Radar: Applications, Standards, Signal Processing Techniques, Datasets, Radio Chips, Trends and Future Research Directions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, pp. 1–1, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/comst.2024.3488173>.
2. B. Allen et al., “Ultra wideband: applications, technology and future perspectives,” *Handle.net*, 2016, doi: <http://hdl.handle.net/10547/269833>.
3. “Revision of Part 15 of the Commission’s Rules Regarding Ultra WideBand Transmission Systems,” www.fcc.gov, Dec. 27, 2015. <https://www.fcc.gov/document/revision-part-15-commissions-rules-regarding-ultra-wideband-7>
4. M. R. Mahfouz, A. E. Fathy, M. Kühn, and Y. Wang, “Recent trends and advances in UWB positioning,” Sep. 2009, doi: <https://doi.org/10.1109/imws2.2009.5307895>.
5. “An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions,” *ar5iv*, 2015. <https://ar5iv.org/html/2202.02190> (accessed Dec. 02, 2024).
6. A. Hamed, “Medical Application of Ultra-Wideband Technology,” Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.93577>.
7. J. Kolakowski, J. Cichocki, P. Makal, and R. Michnowski, “An Ultra-Wideband System for Vehicle Positioning,” *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 56, no. 3, pp. 247–256, Sep. 2010, doi: <https://doi.org/10.2478/v10177-010-0032-1>.
8. S. Sung, H. Kim, and J. Jung, “Accurate Indoor Positioning for UWB-Based Personal Devices Using Deep Learning,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 20095–20113, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3250180>.

9. Ben Van Herbruggen, J. Fontaine, and Eli De Poorter, “Anchor Pair Selection for Error Correction in Time Difference of Arrival (TDoA) Ultra Wideband (UWB) Positioning Systems,” Ghent University Academic Bibliography (Ghent University), Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ipin51156.2021.9662553>.
10. W. Zhao, Jacopo Panerati, and A. P. Schoellig, “Learning-based Bias Correction for Time Difference of Arrival Ultra-wideband Localization of Resource-constrained Mobile Robots,” arXiv (Cornell University), Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2103.01885>.
11. N. Smaoui, M. Heydariaan, and O. Gnawail, “Single-Antenna AoA Estimation with UWB Radios,” 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/wcnc49053.2021.9417526>.
12. L. Botler, Konrad Diwold, and K. Roemer, “Improving Signal-Strength-based Distance Estimation in UWB Transceivers,” pp. 61–66, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1145/3576914.3587519>.
13. L. Yao, L. Yao, and Y.-W. Wu, “Analysis and Improvement of Indoor Positioning Accuracy for UWB Sensors,” *Sensors*, vol. 21, no. 17, p. 5731, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21175731>.
14. J.-S. Lee, Y.-W. Su, and C.-C. Shen, “A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi,” IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/iecon.2007.4460126>.
15. J. R. Foerster, “The performance of a direct-sequence spread ultrawideband system in the presence of multipath, narrowband interference, and multiuser interference,” IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, May 2002, doi: <https://doi.org/10.1109/uwbst.2002.1006325>.
16. B. M. Sadler and A. Swami, “On the performance of UWB and DS-spread spectrum communication systems,” Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research), Jun. 2003, doi: <https://doi.org/10.1109/uwbst.2002.1006376>.

17. C. Enz and V. Kopta, Ultra-Low Power FM-UWB Transceivers for IoT. 2022. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003339908>.
18. N. W. Rhee, N. N. Xu, B. Zhou, and N. Z. Wang, “Low power, non invasive UWB systems for WBAN and biomedical applications,” 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Nov. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/ictc.2010.5674731>.
19. B. Ivšić, Z. Šipuš, J. Bartolić, and J. Babić, “Modelling of Ultrawideband Propagation Scenarios for Safe Human-Robot Interaction in Warehouse Environment,” arXiv (Cornell University), Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2001.03160>.
20. B. J. Silva, Z. Pang, J. Akerberg, J. Neander, and G. P. Hancke, “Experimental study of UWB-based high precision localization for industrial applications,” Nov. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/icuwb.2014.6958993>.
21. D. Coppens, A. Shahid, S. Lemey, B. Van Herbruggen, C. Marshall, and E. De Poorter, “An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions,” IEEE Access, vol. 10, pp. 70219–70241, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3187410>.
22. M. A. Shalaby, C. C. Cossette, J. R. Forbes, and J. L. Ny, “Calibration and Uncertainty Characterization for Ultra-Wideband Two-Way-Ranging Measurements,” arXiv (Cornell University), Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2210.05888>.
23. O. Casha, “A Comparative Analysis and Review of Indoor Positioning Systems and Technologies,” IntechOpen eBooks, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005185>.
24. B. Waldmann, A. Goetz, and R. Weigel, “An ultra wideband positioning system enhanced by a short multipath mitigation technique,” pp. 1–4, Sep. 2009, doi: <https://doi.org/10.1109/imws2.2009.5307871>.

25. M. Molnar and Tamas Luspai, "Development of an UWB based Indoor Positioning System," 2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/med48518.2020.9183329>.
26. "CST Studio Suite," Dassault Systèmes, Jul. 25, 2023. <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
27. 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) – Lviv-Slavske (Ukraine, February 25-29). – 2020.
28. Persanov I., Plakhtii V., Pryshchenko O., Dumin O., Fomin P.. Noise Immunity of UWB Positioning System on ANN // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). – Kharkiv, (Ukraine, September 21-25). – 2020. – P. 1083-1088
29. I. D. Persanov, O. M. Dumin, V. A. Plakhtii, O. A. Pryshchenko, and F. G. Fomin, "Comparison of correlation method and artificial neural networks for determining of object position by ultrawideband fields," Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics" 34, no. 34, pp. 39–47, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-05>. (In Ukrainian)
30. J. Ma, S. Dong, H. Liu, L. Yu, and C. Yao, "A High-gain nanosecond pulse generator based on inductor energy storage and pulse forming line voltage superposition," Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ppps34859.2019.9009869>.
31. Z. Deng, Z. Ding, Q. Yuan, W. Ding, L. Ren, and Y. Wang, "High voltage nanosecond pulse generator based on diode opening switch and magnetic switch," Review of Scientific Instruments, vol. 92, no. 6, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0055062>.
32. В. А. Плахтій, " Надширокосмугові електромагнітні поля в задачах розпізнавання підповерхневих об'єктів штучними нейронними мережами," дисертація доктора філософії, ХНУ ім. Каразіна, Харків, Україна, 2024.

33. Думін О. М., "Випромінювання і розповсюдження нестаціонарних електромагнітних полів у нелінійних, нестаціонарних та біологічних середовищах", докторська дисертація, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна, 208.21
34. R. Akhmedov, "Neural Radio in DS-UWB IoT Applications," 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020, pp. 1073-1078, doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252611.