

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЛІТВІНЦЕВ

« 16 » 06 _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра за освітньою програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Дослідження точності відновлення діаграми спрямованості антен
планарним методом вимірювань у ближній зоні»**

Виконав:

студент IV курсу, групи РІ-21

Осіпов Петро Андрійович

Керівник:

асистент кафедри РІ РТФ

Саратов Євген Михайлович

Рецензент:

асистент кафедри РТС РТФ

Маленчик Тарас Володимирович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЛІТВИНЦЕВ

«_20_» _____ 04 _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Осіпову Петру Андрійовичу

1. Тема роботи «Дослідження точності відновлення діаграми спрямованості антен планарним методом вимірювань у ближній зоні»,
керівник роботи РІ Саратов Євген Михайлович
затверджені наказом по університету від « 29» 05 2026 р. № 1989
2. Термін подання студентом роботи 15.06.2025р.
3. Вихідні дані до роботи: розробити модель вимірювання антен в ближній зоні планарним методом, реалізувати перерахунок ДС в дальній зоні.
4. Зміст роботи ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ВСТУП, ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ, ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СКАНУВАННЯ, СИМУЛЯЦІЯ ВИМІРУ АНТЕН В БЛИЖНІЙ ЗОНІ, ВИСНОВКИ, СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ, ДОДАТКИ.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): Графіки Діаграм спрямованості, Зображення вимірювальних стендів, Графіки залежності коефіцієнта передачі від відстані, Графіки ДС зі зміненими параметрами при скануванні, Порівняльні графіки із накладеними результатами.

6. Дата видачі завдання 20.04.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури	14.04 – 16.04	Виконано
2	Аналіз можливих варіантів виконання завдання	17.04 – 19.04	Виконано
3	Ознайомлення із середовищем CST, MATLAB	20.04 – 25.04	Виконано
4	Реалізація перерахунку ДС в ближній зоні	26.04 – 28.04	Виконано
5	Розробка моделі вимірювального стенду для дослідження антен у ближній зоні	29.04 – 10.05	Виконано
6	Моделювання вимірювальних зондів та аналіз їхнього впливу на результати сканування	11.05 – 18.05	Виконано
7	Дослідження впливу параметрів сканування на точність відновлення діаграми спрямованості	19.05 – 23.05	Виконано
8	Побудова, нормалізація та порівняння відновлених діаграм спрямованості	24.05 – 28.05	Виконано
9	Написання та оформлення пояснювальної записки дипломної роботи	29.05 – 11.06	Виконано
10	Оформлення висновків	12.06 – 15.06	Виконано

Студент



Осіпов Петро

Керівник



Євген САРАТОВ

АНОТАЦІЯ

Обсяг дипломної роботи — 57 сторінок, 29 рисунків , 7 джерел за переліком посилань.

Дослідження методів вимірювання характеристик антен у ближній зоні є актуальним напрямом сучасної антенно-вимірювальної техніки. Це пов'язано з тим, що пряме вимірювання діаграми спрямованості у дальній зоні для антен з великою апертурою потребує значної відстані між досліджуваною антеною та вимірювальним обладнанням. Використання ближньопольових методів дає змогу зменшити габарити вимірювального стенду та виконувати дослідження в лабораторних умовах із подальшим перерахунком виміряного поля у дальню зону.

Мета роботи — дослідити точність відновлення діаграми спрямованості антен за даними, отриманими планарним методом вимірювань у ближній зоні.

Об'єкт дослідження — процес вимірювання електромагнітного поля антени у ближній зоні з подальшим відновленням характеристик випромінювання у дальній зоні.

Предмет дослідження — відновлена діаграма спрямованості антени планарним методом сканування в ближній зоні.

Ключові слова: антена, діаграма спрямованості, ближня зона, дальня зона, планарне сканування, перетворення ближнього поля у дальнє, вимірювальний зонд, CST Microwave Studio, відкритий кінець хвилеводу, радіопоглинаючий матеріал.

ANNOTATION

The thesis consists of 57 pages, 29 figures, and 7 references listed in the bibliography. Research into methods for measuring antenna characteristics in the near field is a current focus of modern antenna measurement technology. This is because direct measurement of the radiation pattern in the far field for antennas with large apertures requires a significant distance between the antenna under test and the measuring equipment. The use of near-field methods makes it possible to reduce the size of the measurement setup and conduct research in laboratory conditions, with subsequent conversion of the measured field to the far field.

The objective of this work is to investigate the accuracy of reconstructing antenna radiation patterns based on data obtained using the planar measurement method in the near field.

The object of the study is the process of measuring the electromagnetic field of an antenna in the near field, followed by the reconstruction of radiation characteristics in the far field.

The subject of the study is the reconstructed antenna radiation pattern obtained by the planar scanning method in the near field.

Keywords: antenna, radiation pattern, near field, far field, planar scanning, near-field-to-far-field transformation, measuring probe, CST Microwave Studio, open-ended waveguide, radio-absorbing material.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	11
1 ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ	11
1.1 Зони випромінювання антени	11
1.2 Виміри антен в ближній зоні.....	13
1.3 Планарне сканування відкритим кінцем хвилеводу	Помилка! Закладку не визначено.
1.4 Алгоритм перерахунку ДС в дальню зону ..	Помилка! Закладку не визначено.
1.5 Радіо-поглинач.....	21
1.6 Дискретизація та обмеження області сканування	23
1.7 Вимірювальний зонд ближнього поля	25
1.8 Корекція вимірювального зонда.....	28
1.9 Характеризація ко- та крос-поляризації	30
Висновки до розділу 1	32
2 ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СКАНУВАННЯ	34
2.1 Дослідження залежності рівня прийнятого сигналу від відстані між антеною та вимірювальним зондом.....	34
2.2 Дослідження виконання умов Найквіста.....	37
Висновки до розділу 2	40
3 СИМУЛЯЦІЯ ВИМІРУ АНТЕН В БЛИЖНІЙ ЗОНІ	41
3.1 Опис вимірювання в ближній зоні	41
3.2 Симуляція вимірювального стенду в ближній зоні з використанням вимірювальних зондів.....	44

Висновки до розділу 3	53
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56
ДОДАТКИ.....	57
Додаток А.....	577

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДС	Діаграма Спрямованості
КП	Коефіцієнт підсилення
НВЧ	Надвисокі частоти
AUT	Antenna Under Test
FFT	Fast Fourier Transform
CST	CST Microwave Studio — середовище електродинамічного моделювання
NF–FF	Near-Field to Far-Field — перетворення ближнього поля в дальнє
S11	коефіцієнт відбиття
S21	коефіцієнт передачі
VNA	Vector Network Analyzer

ВСТУП

Протягом останніх десятиліть спостерігається інтенсивний розвиток бездротових технологій, які використовуються в системах мобільного зв'язку, супутникових каналах, радіолокації, навігації, системах передавання даних та інших радіотехнічних комплексах. Незважаючи на різноманітність таких систем, їхня робота ґрунтується на спільному фізичному принципі — випромінюванні, поширенні та прийманні електромагнітних хвиль. Основним елементом, який забезпечує цей процес, є антена.

Антена є пристроєм, призначеним для перетворення енергії високочастотного сигналу в електромагнітну хвилю, що поширюється у просторі, або навпаки — для приймання електромагнітної хвилі та перетворення її в електричний сигнал. Від характеристик антени значною мірою залежать дальність зв'язку, енергетична ефективність системи, якість передавання інформації, поляризаційні властивості сигналу та зона покриття. Тому під час розробки антенних пристроїв важливо не лише виконати їхній теоретичний розрахунок або комп'ютерне моделювання, а й провести експериментальну перевірку отриманих характеристик.

Однією з основних характеристик антени є діаграма спрямованості, яка показує просторовий розподіл випромінюваної або прийнятої енергії. Саме вона дозволяє оцінити напрям максимального випромінювання, ширину головної пелюстки, рівень бічних пелюсток та загальну форму випромінювання антени. Крім того, під час антенних вимірювань можуть визначатися коефіцієнт підсилення, коефіцієнт відбиття, поляризаційні характеристики та інші параметри, необхідні для оцінювання працездатності антени в реальній системі.

Традиційно діаграму спрямованості антени визначають у дальній зоні, де електромагнітне поле має сформований кутовий розподіл і практично не залежить від відстані до точки спостереження. Такий підхід є прямим і зручним для інтерпретації результатів, однак його практична реалізація має

низку обмежень. Для забезпечення умов дальньої зони необхідно розмістити антену, що досліджується, на достатньо великій відстані від джерела або приймального обладнання. Ця відстань залежить від розмірів антени та робочої довжини хвилі. У випадку високоспрямованих, великогабаритних або високочастотних антен це може потребувати великих безехових камер або спеціальних відкритих полігонів.

Альтернативним підходом є вимірювання антен у ближній зоні. У цьому випадку електромагнітне поле реєструється на відносно малій відстані від антени, а потім за допомогою математичного перетворення результати вимірювання перераховуються у характеристики дальньої зони. Такий метод дозволяє суттєво зменшити габарити вимірювальної установки та проводити дослідження в лабораторних умовах. При цьому правильно організовані ближньозонні вимірювання можуть забезпечити отримання діаграми спрямованості, близької до тієї, що була б отримана під час прямих вимірювань у дальній зоні.

Серед різних методів ближньозонних вимірювань значне поширення має планарне сканування. Його суть полягає у вимірюванні комплексного електромагнітного поля на плоскій поверхні перед антеною, що досліджується. Вимірювальний зонд переміщується по регулярній сітці точок, а в кожній точці фіксуються амплітуда та фаза сигналу. Після цього отриманий розподіл поля використовується для перерахунку в дальню зону, зокрема за допомогою спектра плоских хвиль і двовимірного перетворення Фур'є.

Метою дипломної роботи є дослідження точності відновлення діаграми спрямованості антен планарним методом вимірювань у ближній зоні.

1 ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ

В цьому розділі розглянуто різні чинники які впливають на вимірювання антен в ближній зоні.

1.1 Зони випромінювання антен

Електромагнітне поле, що створюється антеною, змінює свій характер залежно від відстані до випромінювача. У загальному випадку простір навколо антени поділяють на три основні області: реактивну ближню зону, випромінювальну ближню зону та дальню зону зображено на рисунку 1.1.

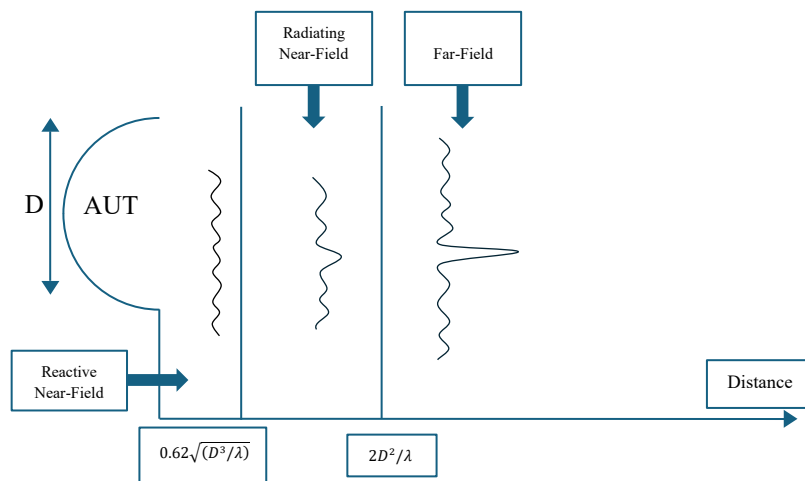


Рисунок 1.1 Зони випромінювання антени [4]

Перехід між цими областями є поступовим, тому чітких фізичних меж між ними не існує.

Реактивна ближня зона розташована безпосередньо поблизу антени. У цій області переважають реактивні складові поля, пов'язані переважно з накопиченням та поверненням електромагнітної енергії, а не з її ефективним випромінюванням у простір. Межа цієї зони для антен загального типу зазвичай оцінюється співвідношенням[4]:

$$R \approx 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}, \quad (1)$$

де D — найбільший лінійний розмір антени, а λ — довжина хвилі.

Випромінювальна ближня зона, яку також називають зоною Френеля, є проміжною областю між реактивною ближньою та дальньою зонами. У ній вже переважають випромінювальні складові поля, однак просторовий розподіл поля все ще залежить від відстані до антени. Нижня межа цієї області збігається з верхньою межею реактивної ближньої зони, а верхня, як правило, наближено визначається виразом

$$R \approx \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2)$$

Саме в цій області форма хвильового фронту ще не може вважатися повністю сталою відносно відстані.

Дальня зона, або зона Фраунгофера, починається приблизно з відстані

$$R \approx \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

і простягається до нескінченності. Для цієї області характерно, що кутовий розподіл поля практично не залежить від відстані до антени, а самі хвилі можна розглядати як локально плоскі.

Таким чином, поділ простору навколо антени на реактивну ближню зону, випромінювальну ближню зону та дальню зону є необхідним для правильного вибору методики вимірювання та подальшої інтерпретації отриманих результатів. Для ближньозонних вимірювань особливе значення мають саме перші дві області, оскільки в них поле ще зберігає просторові особливості, що несуть інформацію про структуру випромінювання антени.

1.2 Виміри антен в ближній зоні

Вимірювання в ближній зоні є одним із практичних способів дослідження характеристик антен, коли неможливо або недоцільно проводити вимірювання на великій відстані. На відміну від дальньозонних методів, де між антеною, що досліджується, і випромінювальним джерелом необхідно забезпечити значну відстань, ближньозонні вимірювання виконуються безпосередньо поблизу антени. Це дозволяє суттєво зменшити розміри вимірювальної установки та зробити процес дослідження більш компактним і зручним.

Необхідність у ближньозонних вимірюваннях пов'язана з тим, що для багатьох антен, особливо великогабаритних або високоспрямованих, створення умов дальньої зони потребує значного простору. У таких випадках побудова повноцінної безехової камери може бути складною та дорогою.

Ближньозонний підхід дає змогу уникнути цієї проблеми: спочатку вимірюється розподіл електромагнітного поля біля антени, а потім за допомогою спеціального математичного перетворення ці дані переводяться у характеристики дальньої зони.

Сутність такого методу полягає в тому, що антена, яка досліджується, працює як випромінювач, а вимірювальний зонд реєструє поле в заданих точках простору. Це відрізняється від класичних вимірювань у дальній зоні, де джерело випромінювання формує поле, а досліджувана антена приймає сигнал. Для реєстрації ближнього поля часто використовують відкритий хвилевідний зонд. Його перевагою є лінійна поляризація, завдяки якій можна визначати окремі складові електричного поля.

Залежно від форми поверхні, на якій виконується сканування, розрізняють три основні типи ближньозонних вимірювань: планарні, циліндричні та сферичні. У кожному з цих випадків поле вимірюється на певній геометричній поверхні поблизу антени, після чого отримані результати можуть бути використані для розрахунку діаграми спрямованості в дальній зоні.

Планарне сканування виконується на плоскій поверхні перед антеною. Для цього зонд переміщується по прямокутній сітці вимірювальних точок за допомогою двох лінійних напрямних. Антена при цьому залишається нерухомою. Такий метод є відносно простим у реалізації, оскільки не потребує складної системи обертання. Для отримання повнішої інформації про поле вимірювання можуть проводитися у двох положеннях зонда, що дозволяє визначити основну та крос-поляризаційну складові випромінювання.

Циліндричне сканування передбачає реєстрацію поля на поверхні циліндра навколо антени. Така схема може реалізовуватися двома способами: або зонд переміщується по висоті та обертається навколо антени, або антена обертається за азимутом, а зонд рухається вертикально. Цей метод є корисним для антен, у яких необхідно дослідити випромінювання в ширшому кутовому секторі, ніж це дозволяє планарне сканування.

Сферичне сканування забезпечує найбільш повне охоплення простору навколо антени, оскільки вимірювання виконуються на сферичній поверхні. У такому випадку зонд може переміщуватися по дузі навколо антени, а сама антена додатково обертається. Інший варіант полягає в тому, що всі необхідні повороти виконує досліджувана антена, тоді як зонд залишається нерухомим. Перевагою сферичного сканування є можливість отримати інформацію не лише про переднє, а й про заднє випромінювання антени.

Отже, ближньозонні вимірювання є ефективним методом дослідження антен, який дозволяє отримати характеристики дальньої зони без потреби у великогабаритній вимірювальній камері. Вибір конкретного типу сканування залежить від конструкції антени, необхідної точності, доступного обладнання та особливостей вимірювальної системи.

У цій роботі найбільш доцільним є використання планарного сканування, оскільки воно має простішу механічну реалізацію та забезпечує отримання необхідних даних для подальшого перерахунку ближнього поля в дальню зону.

Три методи ближньозонних вимірювань, а саме планарне сканування ближнього поля, циліндричне сканування ближнього поля та сферичне сканування ближнього поля. Кожен тип вимірювання передбачає реєстрацію полів на сканувальній поверхні, розташованій поблизу досліджуваної антени (AUT), після чого отримані дані можуть бути перераховані у поля дальньої зони.

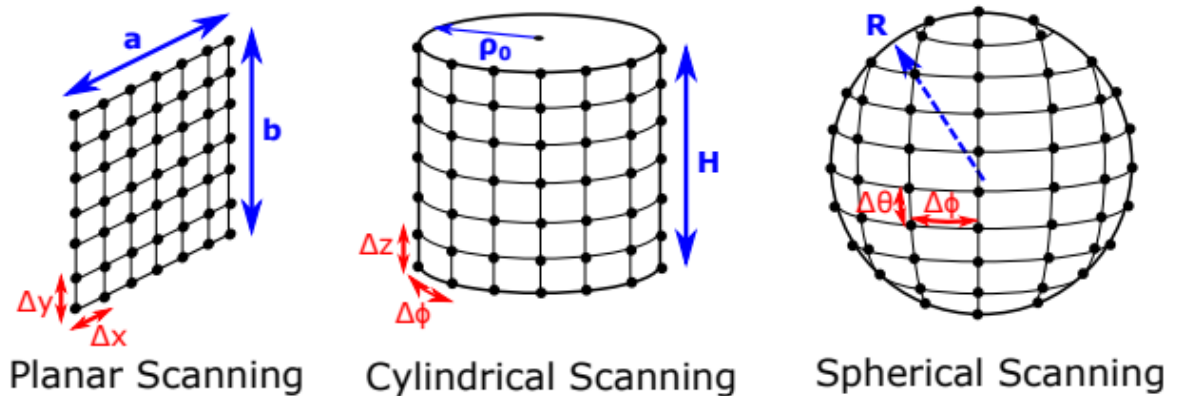


Рисунок 1.2 три види сканування[4]

1.3 Планарне сканування відкритим кінцем хвилеводу:

Суть такого сканування полягає в тому, що досліджувана антена залишається нерухомою, а вимірювальний зонд переміщується по плоскій поверхні перед антеною вздовж двох координат — x та y . Приклад зображений на малюнку 1.3.1

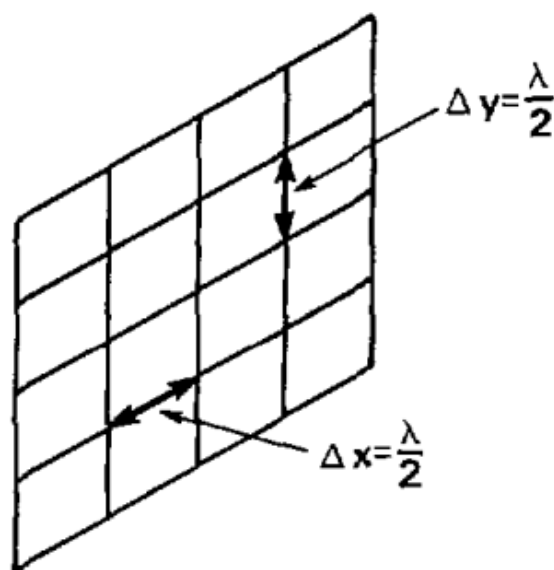


Рис. 1.3 — Сітка переміщення зонду [3]

Такий тип вимірювання ДН застосовують для антен з високою спрямованістю, коли майже вся передана або прийнята енергія проходить через площину сканування. Саме тому цей метод добре підходить для рупорних антен, антенних решіток та інших антен із вираженою головною пелюсткою.

Планарне сканування є одним із найпоширеніших методів ближньозонного вимірювання антен. Його сутність полягає у послідовному вимірюванні комплексного електромагнітного поля на плоскій поверхні, розташованій перед антеною, що досліджується (AUT). У такій геометрії антена зазвичай залишається нерухомою, а вимірювальний зонд переміщується у двох взаємно перпендикулярних напрямках, формуючи регулярну сітку точок. Водночас цей метод вимагає реєстрації не лише амплітуди, а й фази сигналу в кожній точці вимірювальної поверхні, оскільки саме комплексні дані є основою для коректного відновлення дальнього поля.

Процес планарного сканування доцільно розглядати як послідовність кількох етапів. На першому етапі вибирається площа вимірювання та визначається відстань між AUT та вимірювальним сканером, яким найчастіше є відкритий кінець хвилеводу. Ця відстань має бути достатньою, щоб зменшити вплив загасаючих складових поля, однак не надто великою, інакше зменшується кутова область, у якій відновлене дальнє поле буде достовірним. Крім того, надто мала відстань посилює взаємний вплив між зондом і антеною, що призводить до додаткових похибок.

Другим етапом є задання області сканування та просторового кроку вимірювання. Площина повинна бути достатньо великою, щоб охопити істотну частину поля антени. Якщо розміри вимірювальної області є замалими, виникає ефект обрізання сканованої апертури, а це безпосередньо впливає на точність відновленої діаграми спрямованості. Одночасно з цим встановлюється крок між точками вимірювання. Надто великий крок може спричинити просторовий алайзинг, тоді як надмірно малий крок істотно збільшує тривалість експерименту і вимоги до стабільності системи. Отже,

параметри сітки вимірювання визначають не лише якість результату, а й практичну придатність усього методу.

Третій етап пов'язаний із механічною реалізацією сканування. У розглянутій системі переміщення зонда, що зображена на рисунку 1.3.2 по площині здійснюється двокоординатним сканером у напрямках x та y .

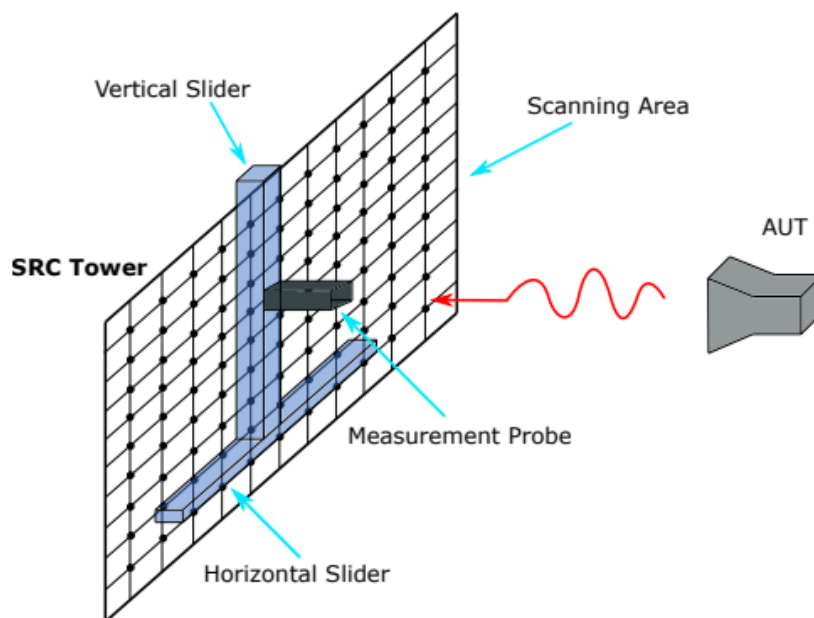


Рисунок 1.4 – Планарна схема сканування ближнього поля[5]

Четвертий етап — безпосередня реєстрація сигналу. Для цього використовується вимірювальний тракт, що включає антену, зонд, сканер, векторний аналізатор мережі та безехову камеру. У кожній точці площини фіксується комплексне значення коефіцієнта передачі, тобто амплітуда та фаза сигналу, прийнятого зондом. Оскільки хвильовідний зонд є лінійно поляризованим, він вимірює лише одну складову поля, тому для повного опису ближнього поля вимірювання повторюють після повороту зонда на дев'яносто градусів. У результаті отримують два масиви даних, які відповідають двом ортогональним поляризаціям. Це є необхідною умовою для коректного відновлення дальнього поля.

П'ятий етап полягає в математичній обробці результатів. Планарне сканування зручне тим, що виміряні дані розміщені на прямокутній сітці, а це

дає змогу використовувати спектральні методи обробки. У межах такого підходу ближнє поле на площині розглядається як сукупність вибірок, з яких визначається спектр плоских хвиль. Далі на основі цього спектра відновлюється дальнє поле антени. Саме регулярність сітки та можливість застосування швидких алгоритмів перетворення становлять одну з головних переваг планарної геометрії. Обчислювально цей метод є значно зручнішим, ніж сферичне сканування, і в більшості практичних випадків не є лімітованим з боку часу чисельної обробки.

Додатковим джерелом похибок є неідеальність самого зонда. Реальний зонд не є точковим приймачем поля, тому його власна діаграма спрямованості, поляризаційні властивості та взаємодія з полем антени впливають на результат вимірювання. З цієї причини у планарному скануванні застосовується пробна корекція, яка дозволяє врахувати приймальні характеристики зонда під час відновлення дальнього поля. Хоча така корекція ускладнює обробку, саме вона забезпечує належну точність при аналізі бічних пелюсток, поляризації та інших тонких особливостей діаграми спрямованості.

1.4 Алгоритм перерахунку ДС в дальню зону для планарного методу вимірювання ДН

Перетворення ближнього поля в дальнє поле виконується на основі розкладу за спектром плоских хвиль. Виміряні дані ближнього поля переводяться у простір хвильових чисел за допомогою двовимірного перетворення Фур'є. У роботі це перетворення реалізується в MATLAB. [3, 5]

Електромагнітне поле в просторі можна подати як суму плоских хвиль, що поширюються в різних напрямках. Електричне поле записується у вигляді:

$$E_{(x,y,z)} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{A}(k_x, k_y) e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} dk_x dk_y \quad (3)$$

де:

$$\vec{A}(k_x, k_y) = A_x(k_x, k_y)\hat{x} + A_y(k_x, k_y)\hat{y} + A_z(k_x, k_y)\hat{z} \quad (4)$$

$$\vec{k} = k_x\hat{x} + k_y\hat{y} + k_z\hat{z} \quad (5)$$

$$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z} \quad (6)$$

Тут k_x, k_y, k_z — хвильові числа у напрямках x, y та z . Величина $\vec{A}$ називається спектром плоских хвиль, оскільки вираз $\vec{A}(k_x, k_y)e^{-j\vec{k}\cdot\vec{r}}$ описує плоску хвилю, яка поширюється у напрямку вектора k .

Для отримання діаграми спрямованості в дальній зоні з результатів ближньозонного вимірювання необхідно виконати три основні дії:

1. отримати компоненти електричного поля $E_x(x, y, z = 0)$ та $E_y(x, y, z = 0)$;
2. знайти спектр плоских хвиль $A(k_x, k_y)$;
3. визначити поле в дальній зоні.

Для площини сканування $z = 0$ виміряні компоненти електричного поля можна записати так:

$$E_x(x, y, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_x(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (7)$$

$$E_y(x, y, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_y(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (8)$$

Площина ближньозонного вимірювання поділяється на сітку з $M \times N$ точок. Відстані між сусідніми точками становлять Δx та Δy . Координати точок вимірювання задаються як:

$$(m\Delta x, n\Delta y, 0)$$

Кількість точок у напрямках x та y визначається формулами:

$$M = \frac{a}{\Delta x} + 1 \quad (9)$$

$$N = \frac{b}{\Delta y} + 1 \quad (10)$$

де a і b — ширина та висота області сканування.

Оскільки для побудови ДС в дальній зоні потрібні обидві поляризаційні складові, а зонд є лінійно поляризованим, його повертають на 90° для

отримання другої поляризації. У результаті на сітці вимірювання отримуються тангенціальні компоненти електричного поля E_x та E_y .

Після цього компоненти поля на всій площині сканування можна подати у вигляді суми значень, отриманих у різних точках:

$$E_x(x, y, z = 0) \cong \sum_{m=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{n=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} E_x(m\Delta x, n\Delta x, 0) \frac{\sin(K_{x0}x - m\pi)}{(K_{x0}x - m\pi)} \frac{\sin(K_{x0}x - n\pi)}{(K_{x0}x - n\pi)} \quad (11)$$

$$E_y(x, y, z = 0) \cong \sum_{m=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{n=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} E_y(m\Delta x, n\Delta x, 0) \frac{\sin(K_{x0}x - m\pi)}{(K_{x0}x - m\pi)} \frac{\sin(K_{x0}x - n\pi)}{(K_{x0}x - n\pi)} \quad (12)$$

Перша формула описує відновлення компоненти E_x за результатами вимірювання в одній поляризації. Друга формула аналогічно описує компоненту E_y після повороту зонда на 90° .

Далі за допомогою оберненого швидкого перетворення Фур'є визначаються складові спектра плоских хвиль A_x та A_y :

$$A_x(k_x k_x) = \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{+\frac{a}{2}} E_x(x, y, z = 0) e^{+j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (13)$$

$$A_y(k_x k_x) = \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{+\frac{a}{2}} E_y(x, y, z = 0) e^{+j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (14)$$

де інтегрування виконується в межах площини сканування:

$$x: \text{від } -a/2 \text{ до } +a/2 \quad (15)$$

$$y: \text{від } -b/2 \text{ до } +b/2 \quad (16)$$

Хвильові числа k_x , k_y та k_z можуть бути записані через сферичні координати:

$$k_x = k \sin \theta \cos \varphi \quad (17)$$

$$k_y = k \sin \theta \sin \varphi \quad (18)$$

$$k_z = k \cos \theta \quad (19)$$

Після знаходження спектра плоских хвиль можна визначити поле в дальній зоні. За методом стаціонарної фази дальнє поле наближено записується як:

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) \cong j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} [\cos \theta + A_y \sin \varphi] \quad (20)$$

У сферичній системі координат компоненти поля мають вигляд:

$$E_\theta(r, \theta, \varphi) \cong j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} (A_x \cos \varphi + A_y \sin \varphi) \quad (21)$$

$$E_\varphi(r, \theta, \varphi) \cong j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} (-A_x \sin \varphi + A_y \cos \varphi) \quad (22)$$

Отже, перетворення ближнього поля в дальнє поле полягає в тому, що виміряні на площині сканування компоненти E_x та E_y перетворюються у спектр плоских хвиль A_x та A_y . Після цього через зв'язок хвильових чисел k_x , k_y , k_z з кутами θ та φ визначаються компоненти E_θ та E_φ , які використовуються для побудови діаграми спрямованості антени в дальній зоні.

1.5 Радіо поглинач

Під час вимірювання антен у ближній зоні важливо максимально наблизити умови експерименту до поширення електромагнітної хвилі у вільному просторі. Оскільки реальна безехова камера має обмежені розміри, її стіни, стеля, підлога, кріплення та елементи сканера можуть створювати небажані відбиття. Такі відбиті хвилі накладаються на основний сигнал і спотворюють амплітудно-фазовий розподіл поля, який записується вимірювальним зондом.

Для зменшення впливу відбиттів використовують радіопоглинаючі матеріали. Радіопоглинач перетворює частину енергії падаючої електромагнітної хвилі у теплову енергію та зменшує рівень хвилі, що повертається назад у робочу область камери. У безехових камерах найчастіше

застосовують пірамідальні або клиноподібні поглиначі. Їх форма забезпечує поступовий перехід від повітря до втратного матеріалу, тому хвиля входить у поглинач з меншим відбиттям і поступово загасає всередині його структури.

У ближньозонному планарному скануванні наявність радіопоглиначів є особливо важливою, оскільки вимірюється не лише рівень сигналу, а й його фаза. Навіть відносно невелике паразитне відбиття може змінити фазовий розподіл на площині сканування, а після перерахунку ближнього поля в дальню зону це проявляється у вигляді похибок діаграми спрямованості. Найбільш помітно такі похибки впливають на рівень бокових пелюсток, глибину провалів та форму діаграми на великих кутах.

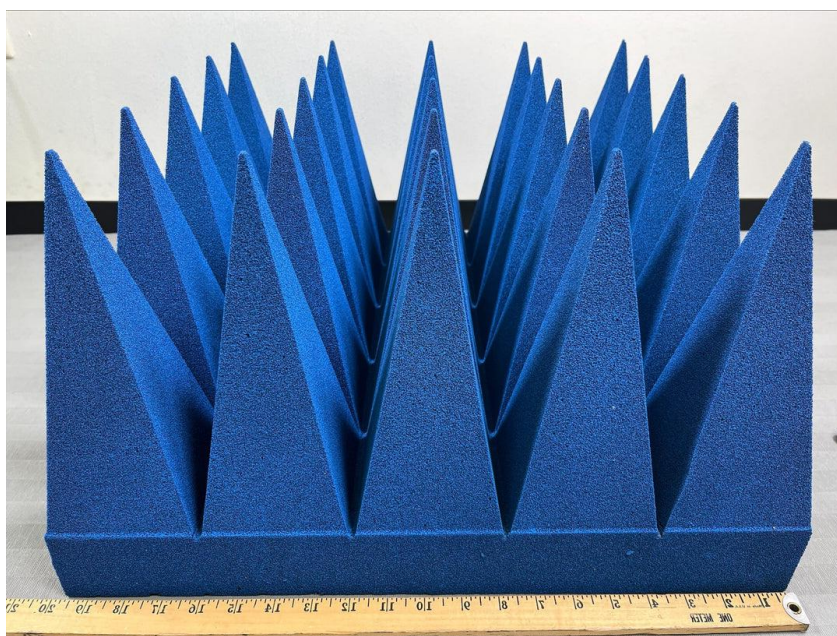


Рисунок 1.5 – Приклад пірамідального радіопоглинача для безехової камери від виробника “dB Absorber”[7]

Вибір розміру радіопоглинача залежить від частоти, доступного простору та необхідної точності вимірювання. Великі поглиначі мають більшу електричну товщину, тому краще працюють на нижчих частотах і забезпечують нижчий рівень відбиття. Їх доцільно використовувати для облицювання стін, стелі та підлоги безехової камери, а також у ділянках, на які потрапляє основна частина випромінювання антени.

Малі поглиначі зручніші для локального застосування: біля вимірювального зонда, на елементах кріплення, поблизу країв конструкції або

в місцях, де великий абсорбер може заважати переміщенню сканера. Вони є доцільними на вищих частотах та для зменшення локальних відбиттів, однак не можуть повністю замінити великі поглиначі під час роботи на нижчих частотах або при вимогах до високої точності вимірювання.

1.6 Дискретизація та обмеження області сканування

Під час проведення вимірювань у ближній зоні важливо правильно вибрати крок між сусідніми точками сканування. Від цього залежить точність подальшого відновлення діаграми спрямованості антени у дальній зоні. Для зменшення похибок дискретизації та уникнення накладання спектрів, тобто алайзингу, крок сітки за координатами (x) та (y) доцільно вибирати не більшим за половину довжини хвилі:

$$\Delta x = \Delta y \leq \lambda/2 \quad (23)$$

Ця умова відповідає критерію Найквіста і дозволяє достатньо точно описати просторовий розподіл електромагнітного поля на площині сканування. Водночас на практиці це не завжди є абсолютно жорсткою вимогою, оскільки вибір кроку також залежить від частоти, розмірів антени, доступної області сканування та необхідної точності результатів. [5, 6]

Окрім кроку дискретизації, важливим параметром є розмір площини сканування. Вона повинна бути достатньо великою, щоб у межах цієї області була зафіксована основна частина енергії, випромінюваної антеною. Якщо область сканування занадто мала, частина поля не буде врахована під час перерахунку з ближньої зони в дальню. Це призводить до обрізання апертури сканування та може спричинити спотворення відновленої діаграми спрямованості, особливо в області бокових пелюсток.

Через обмежені розміри сканувальної площини відновлена діаграма спрямованості є достовірною лише в певному кутовому секторі. Граничний

кут, у межах якого результати можна вважати коректними, визначається за виразом:

$$\theta_{\pm} = \arctan\left(\frac{L_{\pm} - \frac{D}{2}}{z}\right) \quad (24),$$

Де L – довжина частини області сканування вище або нижче відносно центральної осі,

D – найбільший розмір антени,

Z – відстань між антеною та площиною сканування.

З наведеної залежності видно, що допустимий кут огляду залежить від розміру області сканування та відстані між антеною і зондом. Якщо відстань (z) збільшується, то кутова область, у якій можна достовірно відновити діаграму спрямованості, зменшується. Навпаки, при меншій відстані між антеною та площиною сканування допустимий кут стає більшим, однак при цьому можуть зростати похибки, пов'язані з взаємним впливом антени та вимірювального зонда. Площину сканування наведено на рисунку нижче.

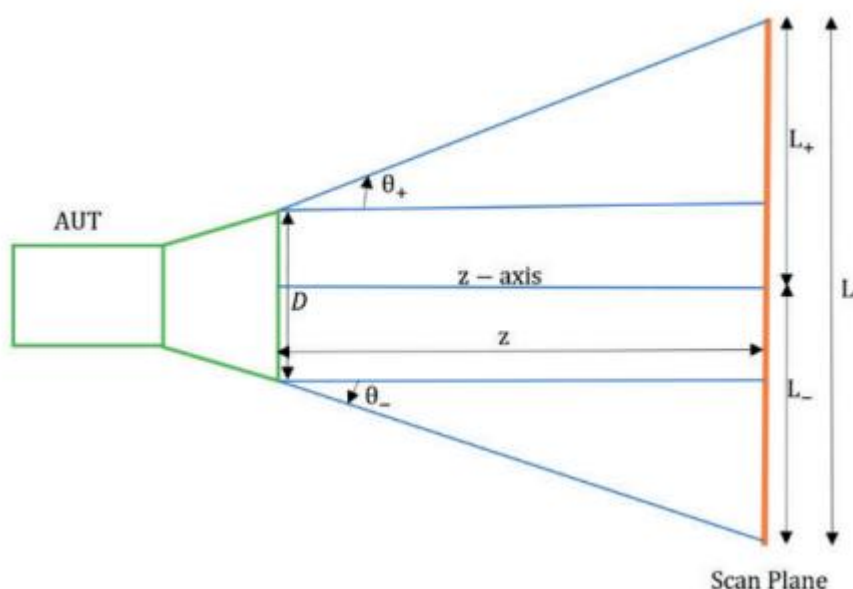


Рис. 1.6 – Область сканування [6]

1.7 Вимірювальний зонд ближнього поля

У системах вимірювання антен у ближній зоні важливу роль відіграє вимірювальний зонд. Саме він використовується для зчитування амплітудно-фазового розподілу електромагнітного поля в заданих точках простору. Від характеристик зонда безпосередньо залежить точність отриманих даних, а отже, і правильність подальшого перерахунку поля з ближньої зони в дальню. [2, 5]

До вимірювального зонда висувається низка вимог. Насамперед його коефіцієнт підсилення має залишатися стабільним у часі, а конструкція повинна бути механічно жорсткою. Це необхідно для того, щоб під час сканування не виникали додаткові похибки, пов'язані зі зміною положення або параметрів зонда. Також бажано, щоб зонд не мав нулів діаграми спрямованості у передній півсфері, оскільки такі провали у характеристиці ускладнюють корекцію вимірюваних даних. Через це зонд зазвичай обирають електрично та фізично малим, тобто з невеликою спрямованістю.

Важливою вимогою є достатня робоча смуга частот. Зонд повинен забезпечувати коректне вимірювання в усьому частотному діапазоні, який використовується під час експерименту. Крім того, він має мати малий коефіцієнт розсіювання та бути добре узгодженим із вимірювальною системою. Це дозволяє зменшити відбиття сигналу від самого зонда та знизити вплив повторних відбиттів між зондом і антеною, що досліджується. Однак на практиці одночасне забезпечення широкої смуги частот і високого узгодження є складним завданням.



Рис. 1.7 – Прямокутні хвилевідні зонди з поглиначем від виробника “NSI-MI” [2]

Окрему увагу приділяють поляризаційним характеристикам зонда. Його поляризаційна чистота повинна бути кращою, ніж у досліджуваної антени, інакше похибки самого зонда можуть спотворювати результати вимірювання основної та перехресної поляризацій. Також бажаним є високий коефіцієнт переднього-заднього випромінювання, оскільки це зменшує чутливість до положення зонда та до небажаних відбиттів у вимірювальній камері. Водночас ця вимога частково суперечить вимозі малої спрямованості, тому під час вибору зонда необхідно знаходити компроміс між різними характеристиками.

У практичних вимірювальних комплексах як зонди ближнього поля можуть використовуватися циліндричні хвилеводи, прямокутні хвилеводи, гофровані рупори та пірамідальні рупори. Найпоширенішими є відкритий прямокутний хвилевідний зонд та двопортовий циліндричний хвилевідний зонд із дросельною структурою. Відкритий прямокутний хвилевідний зонд часто застосовують через простоту конструкції, достатню повторюваність характеристик і зручність калібрування.

Під час встановлення зонда в антенному вимірювальному комплексі важливо точно сумістити його апертуру з геометричними осями системи

позиціонування. Це забезпечує правильне визначення координат точок сканування та зменшує похибки, пов'язані з просторовим зміщенням зонда. Для зменшення дифракції та небажаних відбиттів поблизу зонда можуть використовуватися поглинальні елементи, наприклад поглинальні конуси або коміри з радіопоглинального матеріалу. Такі елементи знижують вплив конструктивних частин тримача зонда на результати вимірювання.

Одним із суттєвих джерел похибки у вимірюваннях ближнього поля є неточне знання власної діаграми спрямованості зонда. Якщо характеристика зонда визначена з похибкою, то ця похибка може перейти у відновлену діаграму спрямованості досліджуваної антени. У класичних планарних вимірюваннях похибка основної поляризаційної компоненти зонда часто проявляється локально, тобто впливає на відповідний напрямок у результаті. Проте в деяких складніших методах сканування похибка характеристики зонда може впливати вже на ширшу кутову область.

Тому перед проведенням точних вимірювань необхідно виконувати калібрування та характеризацію зонда. Для визначення його коефіцієнта підсилення та поляризаційних властивостей може застосовуватися трьохантенний метод калібрування. Після визначення параметрів зонда ці дані використовують під час оброблення результатів вимірювання, зокрема для корекції впливу зонда та для визначення коефіцієнта підсилення досліджуваної антени.

Отже, вимірювальний зонд є одним із ключових елементів системи ближньозонних вимірювань. Його електричні, механічні та поляризаційні характеристики суттєво впливають на точність вимірювання та якість подальшого відновлення діаграми спрямованості антени в дальній зоні.

1.8 Корекція вимірювального зонда

Після вимірювання в ближній зоні, отримані дані перетворюються у характеристики дальньої зони та відображаються у вигляді діаграм спрямованості. Фактично ці результати є перерахованими даними ближнього поля, отриманими безпосередньо під час вимірювання. Такий підхід є допустимим, однак він не повністю враховує вплив самого вимірювального зонда на результати. [3, 5]

Під час вимірювань у ближній зоні електромагнітне поле, яке випромінює досліджувана антена, взаємодіє з хвилевідним зондом. Унаслідок цього на металевих стінках зонда виникають наведені струми. Ці струми, у свою чергу, створюють додаткове вторинне випромінювання. У результаті аналізатор кіл реєструє не лише поле антени, що досліджується, а сумарне поле, яке включає також внесок вимірювального зонда.

Оскільки відкритий хвилевідний зонд не є повністю спрямованим елементом, отримана діаграма спрямованості антени загалом зберігає правильний характер, але містить певну похибку. Для зменшення цієї похибки застосовується корекція зонда ближнього поля. Суть такої корекції полягає у вилученні впливу власного випромінювання зонда з вимірних даних.

Корекцію зонда можна розглядати як операцію деконволюції, тобто розділення внеску хвилевідного зонда та досліджуваної антени у загальному вимірному полі. Оскільки відкритий хвилевід має відносно просту геометрію, його випромінювальні характеристики можна визначити кількома способами: аналітично, за допомогою електродинамічного моделювання або шляхом окремого експериментального вимірювання. Усі ці підходи можуть бути використані для подальшої корекції результатів.

Якщо діаграма спрямованості зонда відома, можна виконати компенсацію його впливу. Основна ідея полягає в тому, що вимірювальна система враховує різні орієнтації зонда, які можуть впливати на поляризаційні складові поля антени. Через це виміряні ко- та крос-поляризаційні компоненти

не завжди повністю відповідають істинним компонентам поля досліджуваної антени.

Для опису цього зв'язку використовується матрична форма. У ній виміряні ко- та крос-поляризаційні складові антени подаються як результат взаємодії істинних складових поля антени з поляризаційними характеристиками зонда. Іншими словами, виміряне поле є комбінацією реального поля антени та впливу зонда в різних положеннях.

У такій моделі використовуються такі величини:

- виміряна ко-поляризаційна складова антени;
- виміряна крос-поляризаційна складова антени;
- ко-поляризаційна складова зонда при куті $\varphi = 0^\circ$;
- крос-поляризаційна складова зонда при куті $\varphi = 0^\circ$;
- ко-поляризаційна складова зонда при куті $\varphi = 90^\circ$;
- крос-поляризаційна складова зонда при куті $\varphi = 90^\circ$;
- істинна ко-поляризаційна складова антени;
- істинна крос-поляризаційна складова антени.

Оскільки під час експерименту безпосередньо вимірюються ко- та крос-поляризаційні компоненти, для отримання істинних значень необхідно виконати обернення відповідної матриці. Після цього можна визначити реальні поляризаційні складові поля антени без внеску, який створює вимірювальний зонд.

Таким чином, корекція зонда є важливим етапом обробки результатів ближньозонних вимірювань. Вона дозволяє підвищити точність визначення діаграми спрямованості та зменшити похибки, пов'язані з впливом приймального хвилевідного зонда. Для її виконання достатньо знати ко- та крос-поляризаційні компоненти поля антени, а також відповідні характеристики самого зонда. Після цього за допомогою матричного перетворення можна отримати скориговані значення поля, які краще відповідають реальному випромінюванню досліджуваної антени.

1.9 Характеризація компонентів ко- та крос-поляризації

Під час оброблення результатів планарного ближньозонного сканування необхідно правильно визначити основну та перехресну поляризаційні складові поля антени, що досліджується. Ці компоненти потрібні для подальшої корекції впливу вимірювального зонда, оскільки зонд не є ідеальним приймачем і може по-різному сприймати складові поля залежно від своєї орієнтації.

На перший погляд основну поляризацію можна визначити простим порівнянням складових дальнього поля E_θ та E_ϕ : компонента з більшою амплітудою приймається як основна, а інша — як перехресна. Проте такий підхід не є універсальним. Причина полягає в тому, що при зміні азимутального кута ϕ співвідношення між компонентами E_θ та E_ϕ також змінюється. У результаті одна й та сама фізична поляризація може бути описана різними компонентами в різних напрямках спостереження.

Особливо помітною така проблема є для рупорних антен. Для них залежно від площини розгляду — Е-площини або Н-площини — основною може виявлятися різна складова поля. Якщо безпосередньо використовувати тільки E_θ та E_ϕ , то вирази корекції зонда можуть бути справедливими не для всіх кутових напрямків. Це призводить до похибок у визначенні реальних поляризаційних характеристик антени.

Для усунення цієї неоднозначності доцільно перейти від сферичних компонентів E_θ та E_ϕ до поляризаційного базису Людвіга III. Такий базис дозволяє описувати основну та перехресну поляризації більш узгоджено, оскільки він зменшує залежність вибору поляризаційної складової від азимутального кута. Перехід до базису Людвіга III може бути записаний у матричному вигляді [5]:

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{cp} \\ \hat{u}_{xp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\phi & \cos\phi \\ \cos\phi & -\sin\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\phi} \end{bmatrix} \quad (25)$$

де $\hat{u}_{cp}$ — одиничний вектор основної поляризації, $\hat{u}_{cp}$ — одиничний вектор перехресної поляризації, $\hat{\theta}$ та $\hat{\phi}$ — одиничні вектори сферичної системи координат. Такий запис показує, що нові поляризаційні осі формуються як лінійні комбінації сферичних напрямків.

Класичне визначення Людвіга III добре працює поблизу напрямку $\theta = 0^\circ$, коли лінійно поляризований зонд орієнтований уздовж осі $\hat{\phi}$. Однак для довільних напрямків спостереження цього недостатньо, оскільки поляризаційна орієнтація може змінюватися не лише з азимутом, але й із кутом θ . Тому для більш точного опису застосовують узагальнену форму базису Людвіга III, у якій замість кута ϕ використовується скоригований кут ξ [5]:

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{cp} \\ \hat{u}_{xp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \xi & \cos \xi \\ \cos \xi & -\sin \xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\phi} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Кут ξ враховує просторове положення точки спостереження та напрямок ідеально лінійно поляризованого апертурного поля. Його можна визначити за виразом[5]:

$$\xi = \arctan\left(\frac{1}{\cos \theta \tan(\phi - \phi')}\right) \quad (27)$$

де θ та ϕ — кути напрямку спостереження, а ϕ' — напрямок ідеально лінійно поляризованого поля в апертурі антени. Завдяки введенню кута ξ поляризаційний базис стає придатним не тільки для головного напрямку випромінювання, а й для ширшої кутової області.

Отже, повна процедура поляризаційної обробки під час корекції зонда складається з двох основних етапів. Спочатку поля антени, що досліджується, та поля відкритого хвилевідного зонда переводяться в узагальнений базис Людвіга III. Після цього вже можна застосовувати матричні співвідношення корекції зонда для визначення істинних основної та перехресної складових поля антени.

Такий підхід підвищує достовірність результатів ближньопольових вимірювань, оскільки дозволяє уникнути помилкового визначення основної та перехресної поляризацій у різних кутових напрямках. Це особливо важливо

для антен із високою спрямованістю та для випадків, коли потрібно коректно оцінити не лише діаграму спрямованості, а й рівень перехресної поляризації.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто основні теоретичні положення, необхідні для вимірювання діаграми спрямованості антен у ближній зоні. Показано, що електромагнітне поле антени має різний характер залежно від відстані до випромінювача, тому для правильного вибору методики вимірювання важливо враховувати поділ простору на реактивну ближню зону, випромінювальну ближню зону та дальню зону.

Встановлено, що вимірювання в дальній зоні не завжди є зручними для практичної реалізації, оскільки для великогабаритних або високоспрямованих антен потрібна значна відстань між антеною та вимірювальним обладнанням. Саме тому ближньозонні методи є доцільною альтернативою, оскільки дозволяють виконувати вимірювання в лабораторних умовах із подальшим математичним перерахунком отриманих даних у дальню зону.

У розділі було проаналізовано основні типи ближньозонного сканування: планарне, циліндричне та сферичне. Визначено, що для даної роботи найбільш доцільним є планарне сканування, оскільки воно має простішу механічну реалізацію, використовує регулярну прямокутну сітку вимірювань і добре підходить для дослідження антен із вираженою головною пелюсткою випромінювання.

Також було розглянуто алгоритм перерахунку ближнього поля в дальнє поле. Його основою є вимірювання комплексних значень поля на площині сканування, визначення спектра плоских хвиль за допомогою двовимірного перетворення Фур'є та подальше отримання компонент поля в дальній зоні. Такий підхід дозволяє відновити діаграму спрямованості антени без проведення прямих вимірювань на великій відстані.

Окрему увагу приділено вибору кроку дискретизації та розміру області сканування. Показано, що надто великий крок між точками може призвести до

просторового алайзингу, а недостатній розмір площини сканування — до обрізання частини поля та спотворення відновленої діаграми спрямованості. Тому параметри вимірювальної сітки безпосередньо впливають на точність кінцевого результату.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СКАНУВАННЯ

2.1 Дослідження залежності рівня прийнятого сигналу від відстані між антеною та вимірювальним зондом

Для додаткової оцінки умов проведення планарного ближньозонного сканування доцільно виконати експеримент, у якому аналізується зміна рівня прийнятого сигналу залежно від відстані між антеною, що досліджується, та вимірювальним зондом. Такий підхід дозволяє на практиці простежити, як змінюється характер електромагнітного поля під час переходу від області, розташованої безпосередньо біля антени, до області сформованого випромінювання.

Під час експерименту антена встановлюється у фіксованому положенні, а вимірювальний зонд розміщується на її осі максимального випромінювання. Далі зонд послідовно переміщується вздовж цієї осі на різні відстані від апертури антени. У кожному положенні за допомогою векторного аналізатора кін реєструється комплексний коефіцієнт передачі S_{21} . Для побудови графіка використовується його амплітудна складова, подана у логарифмічному масштабі.

На малих відстанях між антеною та зондом очікується нерівномірна зміна рівня $|S_{21}|$. Це пов'язано з тим, що поблизу апертури поле ще має складну просторову структуру, а на результат вимірювання помітно впливає взаємодія між антеною та зондом. У цій області можливі локальні максимуми та провали, які не слід розглядати як сталу характеристику випромінювання антени.

При подальшому збільшенні відстані поле переходить у випромінювальну ближню зону. У цій частині простору електромагнітна енергія вже переважно поширюється від антени, однак амплітудно-фазовий розподіл ще залишається залежним від відстані. Саме ця область є найбільш важливою для планарних ближньозонних вимірювань, оскільки в ній можна

отримати просторовий розподіл поля, придатний для подальшого перерахунку в дальню зону.

На великих відстанях рівень прийнятого сигналу змінюється більш плавно. У цій області поле поступово набуває властивостей дальньої зони, а залежність між переданою та прийнятою потужністю все більше визначається відстанню між антенами та їхніми коефіцієнтами підсилення. Тому ця ділянка графіка може використовуватися як орієнтир для порівняння з ближньозонним режимом, однак для практичного планарного сканування зазвичай обирають меншу відстань, щоб зберегти достатній рівень сигналу та доступну кутову область відновлення.

Вимірювальний стенд змодельовано нижче:

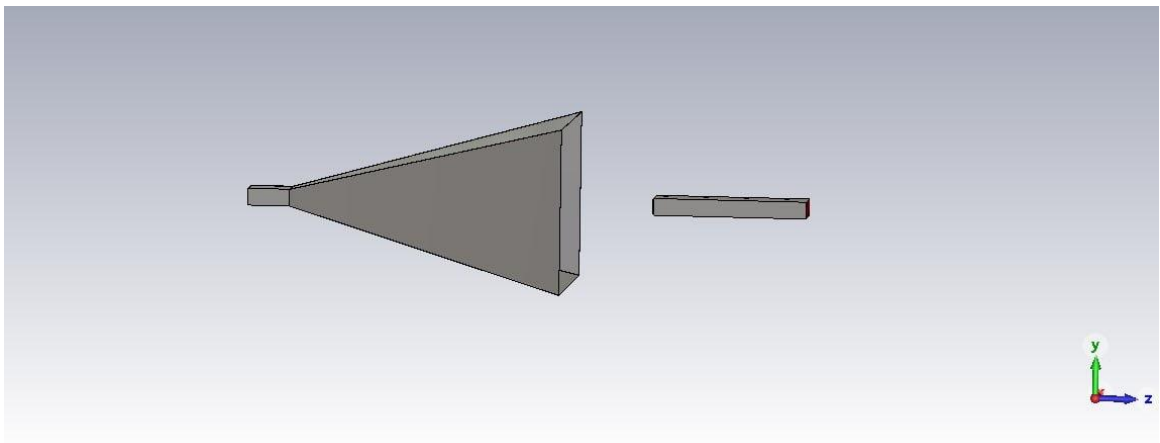


Рис. 3.1 – Вимірювальний стенд в CST

Залежність коефіцієнта передачі від відстані між антеною та вимірювальним зондом зображена на рисунку 3.2.2:

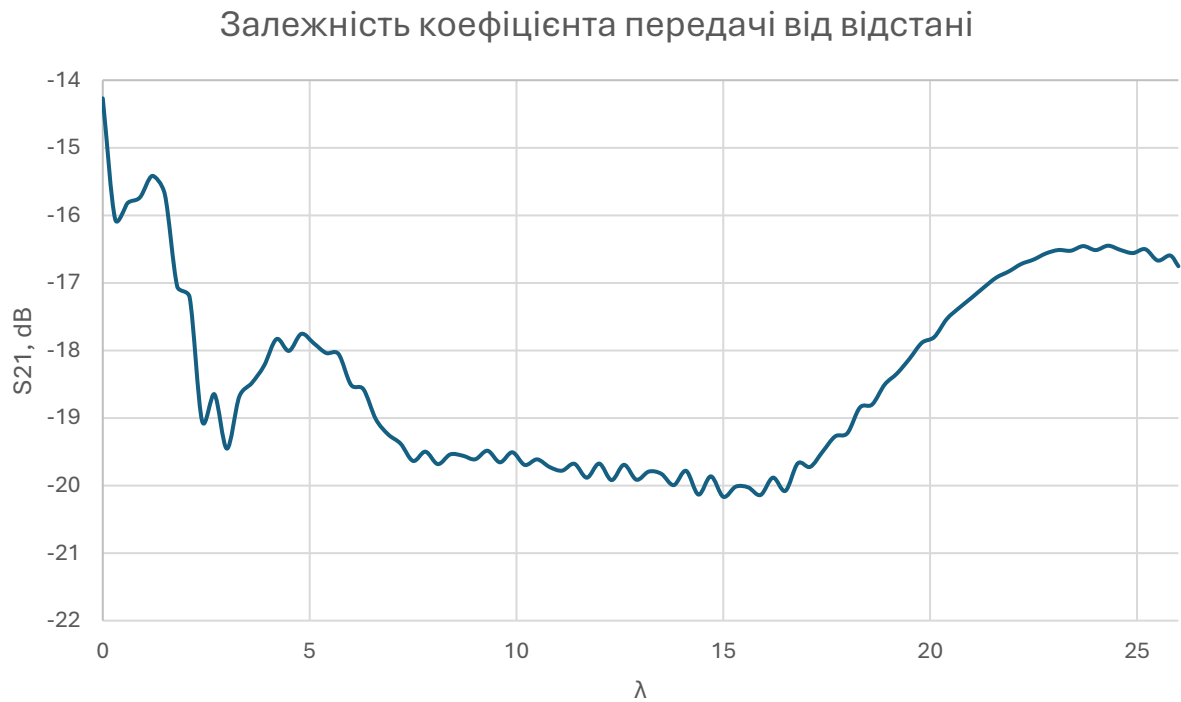


Рис. 3.2 – Залежність рівня коефіцієнта передачі $|S_{21}|$ від відстані між антеною та вимірювальним зондом на частоті 10 ГГц.

Після побудови власного графіка за результатами моделювання або вимірювання буде можливо визначити ділянки, у яких рівень сигналу має найбільші коливання, а також область, де залежність стає більш стабільною. Це дозволить обґрунтувати вибір відстані між антеною та площиною сканування для подальшого отримання ближньопольових даних.

Для даної роботи такий експеримент є важливим підготовчим етапом. Він показує, що вибір відстані між антеною та зондом не можна виконувати довільно. Якщо зонд розташувати занадто близько, результат буде суттєво залежати від локального поля та взаємного впливу елементів вимірювального тракту. Якщо ж відстань буде надмірно великою, зменшиться рівень прийнятого сигналу, а площа сканування охоплюватиме меншу корисну кутову область після перерахунку.

Отже, побудова залежності $|S_{21}|$ від відстані дозволяє оцінити, у якій зоні фактично проводиться вимірювання, та вибрати раціональне положення площини планарного сканування. Надалі це впливає на якість відновленої

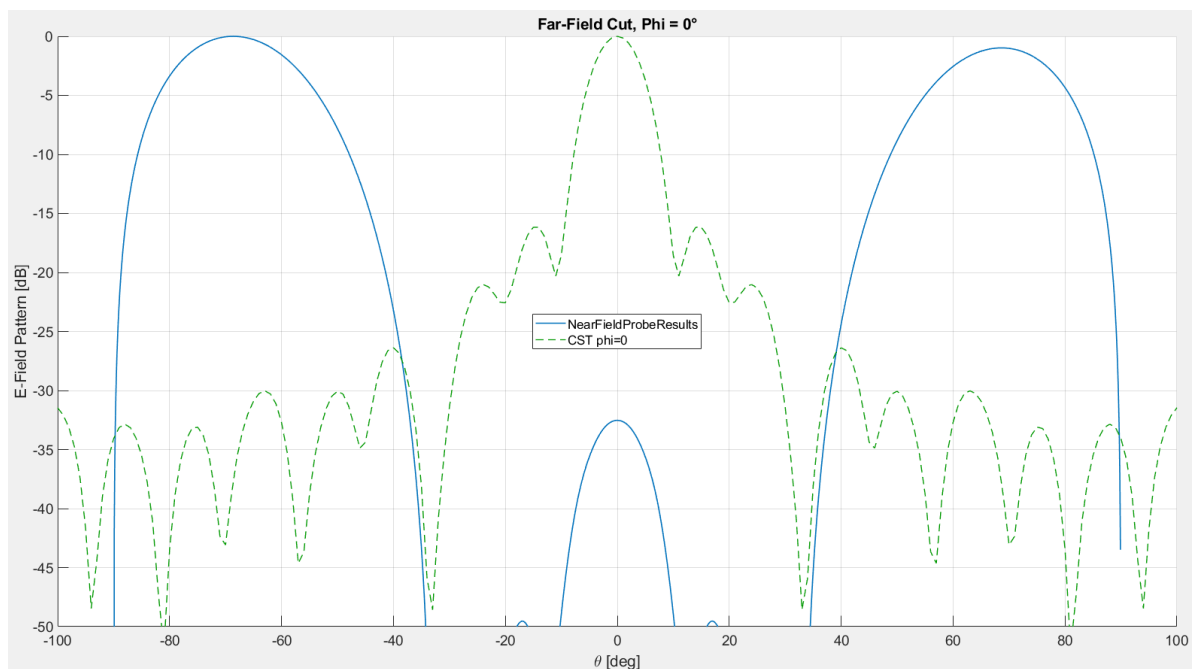
діаграми спрямованості, оскільки саме від початкових умов вимірювання залежить точність перерахунку ближнього поля в дальнє.

2.2 Дослідження виконання умов Найквіста

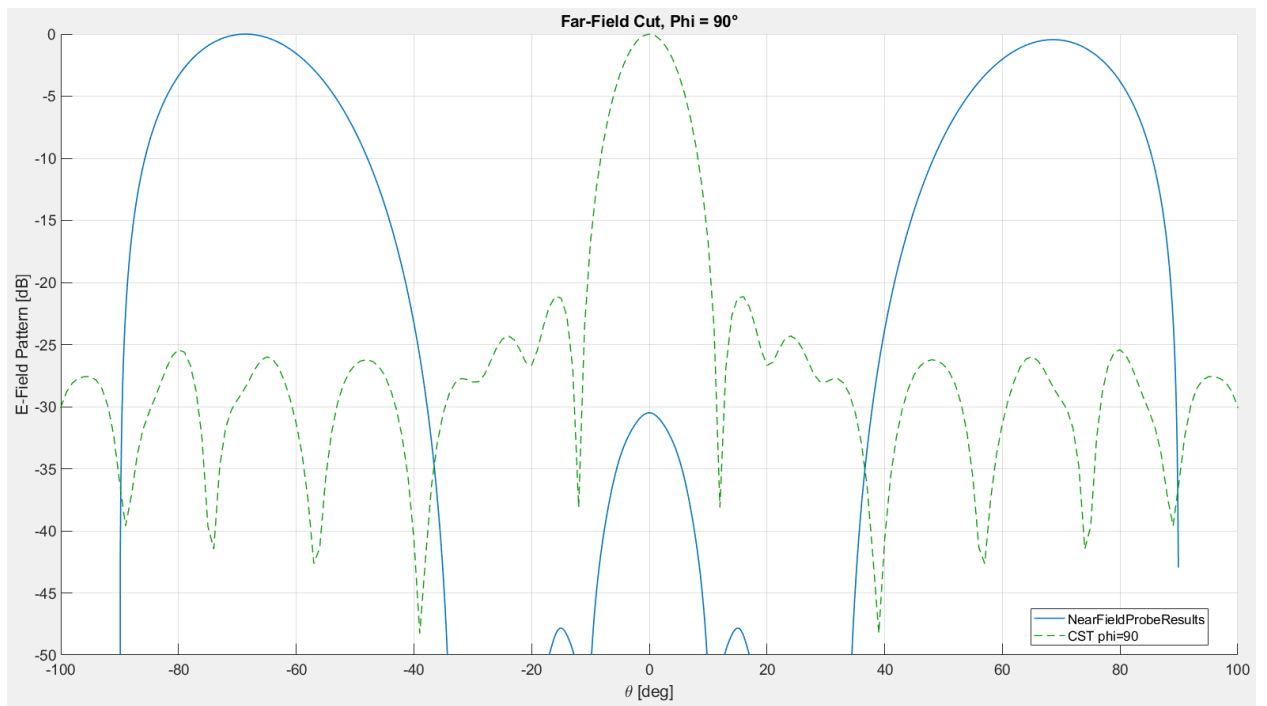
Особливістю експерименту було збільшення кроку між сусідніми положеннями зонда до значення, що дорівнює довжині хвилі. Такий режим сканування було обрано для перевірки того, як грубіша дискретизація вимірювальної площини впливає на кінцеву діаграму спрямованості. Для порівняння використовувалися результати, отримані при коректнішому кроці сканування.

Сканування проводилось методом описаним в пункті 2.1 для двох типів антен, збільшивши крок дискретизації, за таким принципом $\Delta x = \Delta y = \lambda$, тобто на заданій частоті, а саме 10 ГГц крок сканування дорівнював 30 міліметрів. Результати вимірювань з подальшим перерахунком в дальню зону наведено на нижче.

На рисунку 3.1 зображено перерахунок ДС для параболічної антени зі збільшеним кроком сканування в двох площинах:



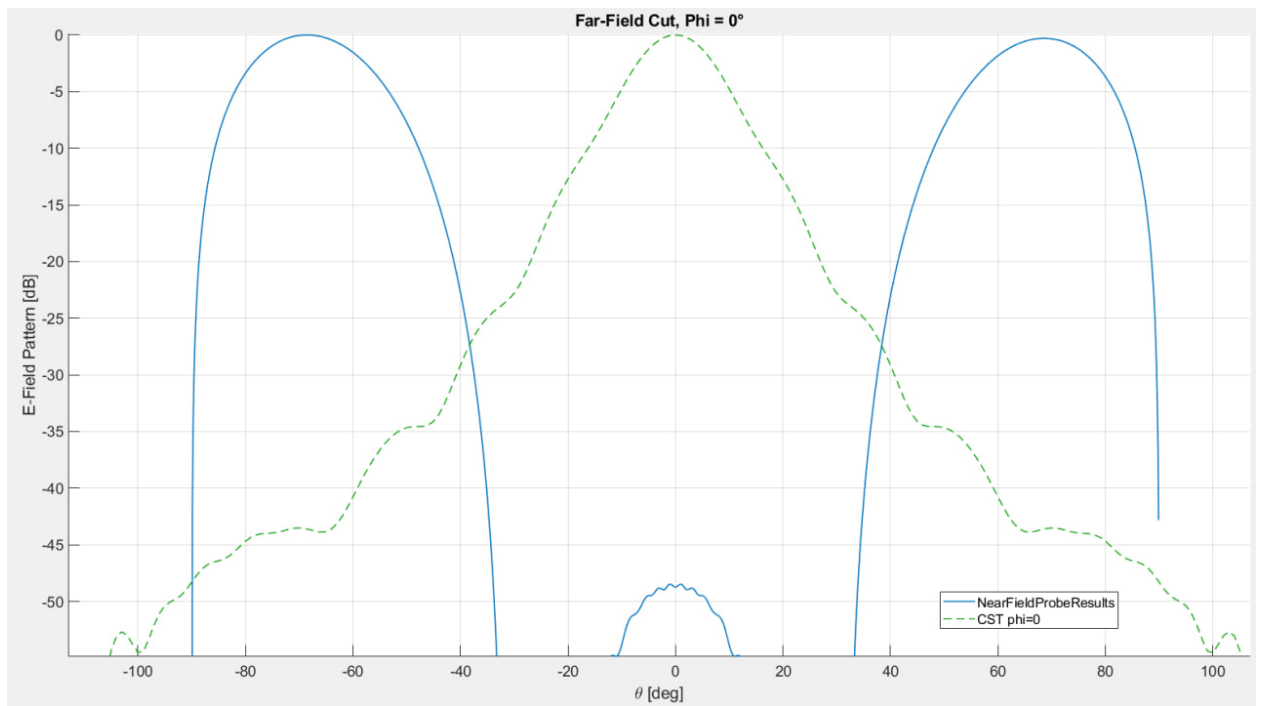
a)



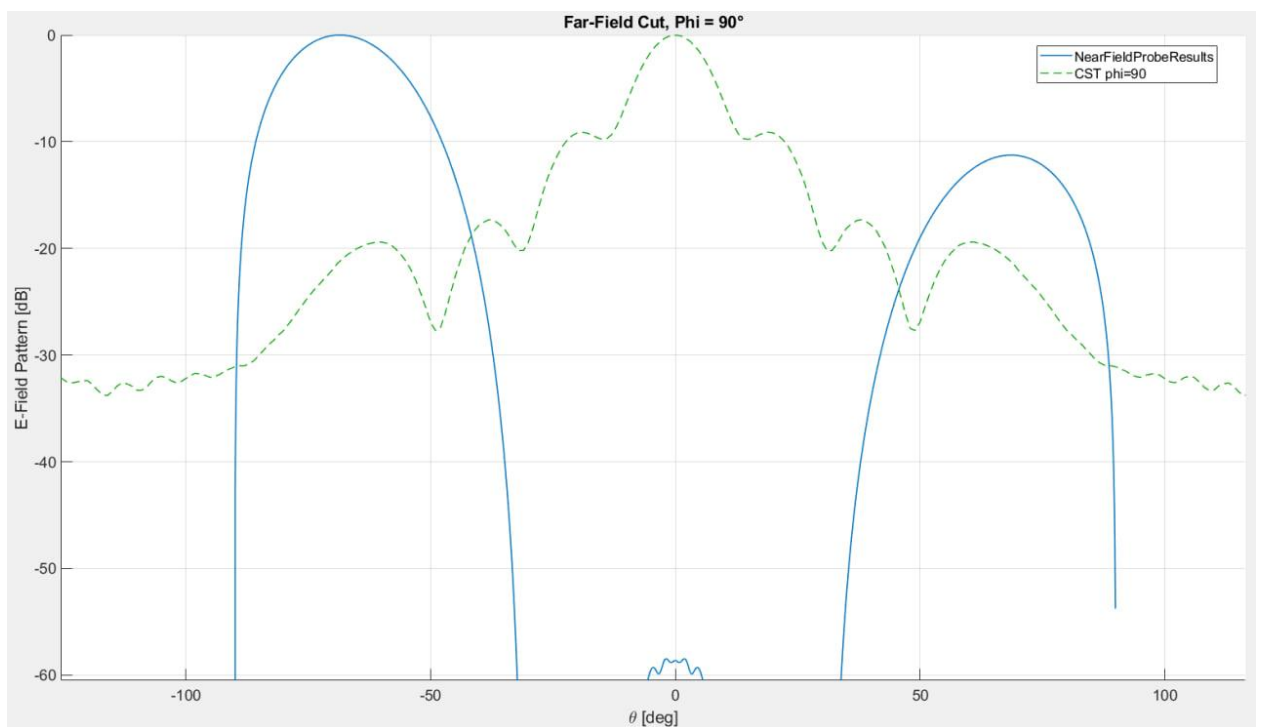
б)

Рис. 3.3 — Порівняння відновленої та еталонної діаграм спрямованості параболічної антени при кроці сканування $\Delta x = \Delta y = \lambda$: а — зріз при $\varphi = 0^\circ$; б — зріз при $\varphi = 90^\circ$

Аналогічне дослідження було виконано для рупорної антени. Для неї також було задано збільшений крок планарного сканування $\Delta x = \Delta y = \lambda$, після чого отримані дані ближнього поля були перераховані у дальню зону. Результати порівняння наведено на рисунку 3.2.



а) зріз у площині $\varphi = 0^\circ$



б) зріз діаграми спрямованості при $\varphi = 90^\circ$

Рисунок 3.4 — Порівняння відновленої та еталонної діаграм спрямованості рупорної антени при кроці сканування $\Delta x = \Delta y = \lambda$: а — зріз при $\varphi = 0^\circ$; б — зріз при $\varphi = 90^\circ$

При збільшенні кроку планарного сканування до $\Delta x = \Delta y = \lambda$ на відновленій діаграмі спрямованості з'являються ґраткові пелюстки (grating lobes). Їх поява свідчить про недостатню щільність вимірювальної сітки та про втрату частини просторової інформації під час сканування, через що результат перерахунку ближнього поля в дальню зону стає спотвореним.

Отже, проведений експеримент показав, що збільшення кроку планарного сканування до довжини хвилі призводить до втрати частини інформації про просторовий розподіл поля. Через це результат перерахунку ближнього поля в дальнє стає недостовірним, а на відновленій діаграмі спрямованості можуть з'являтися ґраткові пелюстки, які не є реальною характеристикою досліджуваної антени.

Висновки до розділу 2

У третьому розділі було досліджено вплив умов семплювання на точність відновлення діаграми спрямованості під час планарного ближньозонного сканування. Основну увагу приділено кроку між точками вимірювання та вибору відстані між антеною і вимірювальним зондом.

Показано, що збільшення кроку сканування до значення $\Delta x = \Delta y = \lambda$ на частоті 10 ГГц призводить до недостатньої просторової дискретизації ближнього поля. У такому випадку в процесі перерахунку виникає накладання просторового спектра, що проявляється у появі ґраткових пелюсток на відновленій діаграмі спрямованості.

Отримані результати підтверджують необхідність дотримання умов Найквіста під час вибору кроку планарного сканування. Для коректного відновлення діаграми спрямованості крок вимірювальної сітки доцільно обирати не більшим за половину довжини хвилі, тобто $\Delta x, \Delta y \leq \lambda/2$.

Також розглянуто залежність рівня прийнятого сигналу $|S_{21}|$ від відстані між антеною та вимірювальним зондом. Такий аналіз дозволяє визначити

ділянку, у якій поле вже має переважно випромінювальний характер, але рівень сигналу залишається достатнім для стабільного вимірювання.

Таким чином, точність перерахунку ближнього поля в дальнє визначається не лише самим алгоритмом обробки, а й правильним вибором параметрів вимірювання: кроку дискретизації, розміру площини сканування та відстані до зонда. Недотримання цих умов призводить до спотворення відновленої діаграми спрямованості, особливо в області бокових пелюсток і на краях кутового діапазону.

3 СИМУЛЯЦІЯ ВИМІРУ АНТЕН В БЛИЖНІЙ ЗОНІ

3.1 Опис вимірювання в ближній зоні

Експеримент проводився з використанням зондів в CST, які являють собою сканери поля, їх зображено на рисунку 3.1

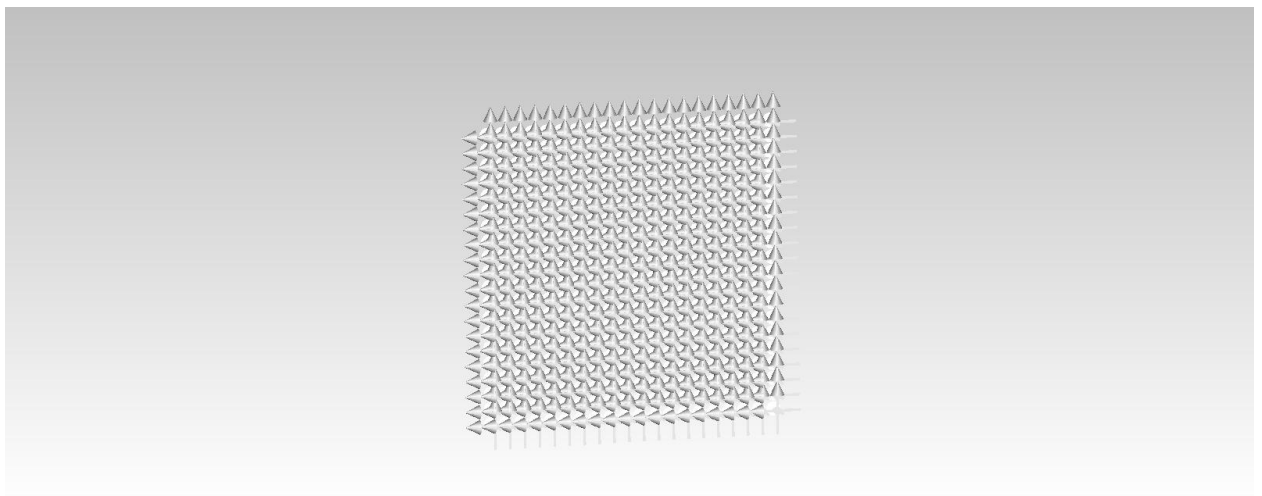


Рис. 3.1 – Зонди.

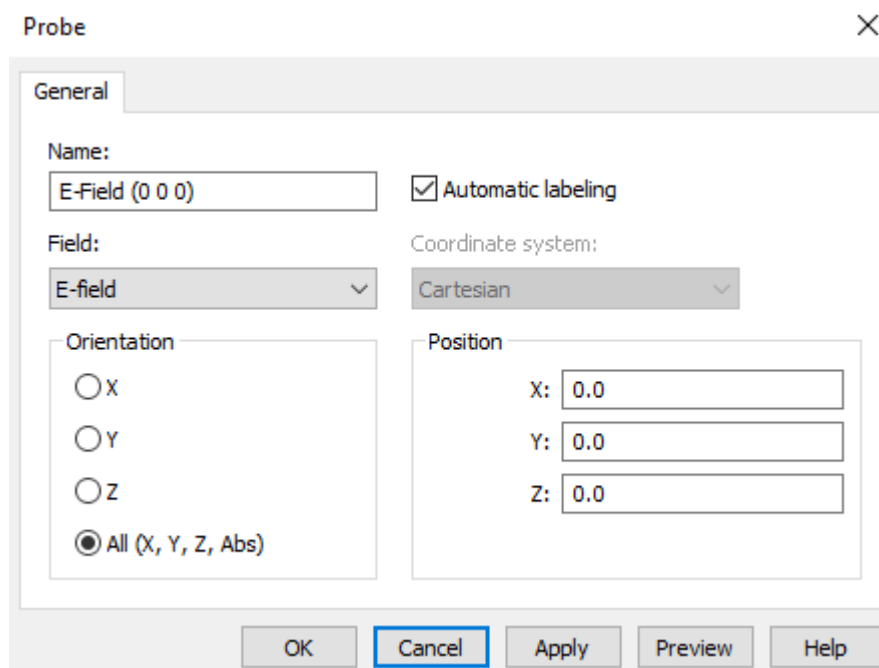


Рис. 3.2 – Меню встановлення координат зонда.

У програмному середовищі CST Studio Suite для аналізу електромагнітного поля можуть використовуватися віртуальні польові зонди, які розміщуються в заданих точках розрахункової області. Такі зонди є чисельним аналогом вимірювальних датчиків і дають змогу контролювати значення електричного або магнітного поля в окремих точках простору. У задачах антенного моделювання вони можуть розташовуватися перед апертурою антени у вигляді регулярної планарної сітки, що імітує процес дискретного сканування ближнього поля.

На відміну від монітора поля, який зазвичай використовується для побудови просторового розподілу поля в площині або в об'ємі на заданій частоті, польовий зонд фіксує значення поля в конкретній точці. Такий підхід є зручним тоді, коли необхідно отримати амплітудно-частотну характеристику поля в окремому положенні або порівняти значення поля в різних точках сітки. За даними Dassault Systèmes, near-field probe, на відміну від near-field monitor, забезпечує широкосмуговий результат, тобто дозволяє аналізувати поведінку поля в частотному діапазоні [1].

У випадку планарного сканування набір таких зондів може бути розташований у площині перед антеною, що досліджується. Кожен зонд відповідає окремій точці вимірювання з координатами (x_i) , (y_j) , (z_0) , де (z_0) є сталою відстанню від антени до площини сканування. У кожній точці може бути визначено одну або кілька складових електромагнітного поля, наприклад (E_x) , (E_y) , (E_z) або (H_x) , (H_y) , (H_z) . Отриманий набір значень формує дискретний розподіл поля на площині.

У контексті перерахунку ближнього поля в дальню зону така сітка зондів фактично моделює вимірювальну площину планарного сканера. Якщо значення поля отримані з достатнім просторовим кроком і на достатній площі сканування, вони можуть бути використані для подальшого аналізу просторового спектра поля та відновлення діаграми спрямованості антени. Водночас точність такого підходу залежить від розміру площини сканування, кроку між зондами, відстані від антени до площини вимірювання та правильності вибору компонент поля.

Таким чином, показані в CST зонди можна розглядати як віртуальну вимірювальну сітку ближнього поля. Вони дозволяють імітувати процес планарного сканування без фізичного переміщення реального вимірювального зонда. Це робить їх зручним інструментом для попереднього чисельного аналізу антен, перевірки розподілу ближнього поля та підготовки даних для подальшого перерахунку в дальню зону.

3.2 Симуляція вимірювального стенду в ближній зоні з використанням вимірювальних зондів

Для перевірки роботи моделі вимірювального стенду було обрано два типи антен: параболічну та рупорну. Для кожної антени в CST було сформовано площину сканування з набором польових зондів, після чого отримані амплітудно-фазові дані ближнього поля було оброблено в MATLAB. Метою цього етапу було перевірити, наскільки коректно за даними планарного сканування відновлюється діаграма спрямованості у дальній зоні.

Для вимірювань обрано параболічну антену, що зображена на рисунку 2.3. Ближня зона для якої починається з відстані 0.3 м від антени, а закінчується в 3 метрах на частоті 10 ГГц, тому було обрано відстань в 0.35 метра для забезпечення NF.

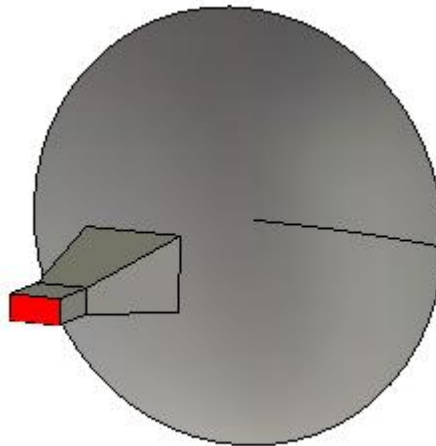
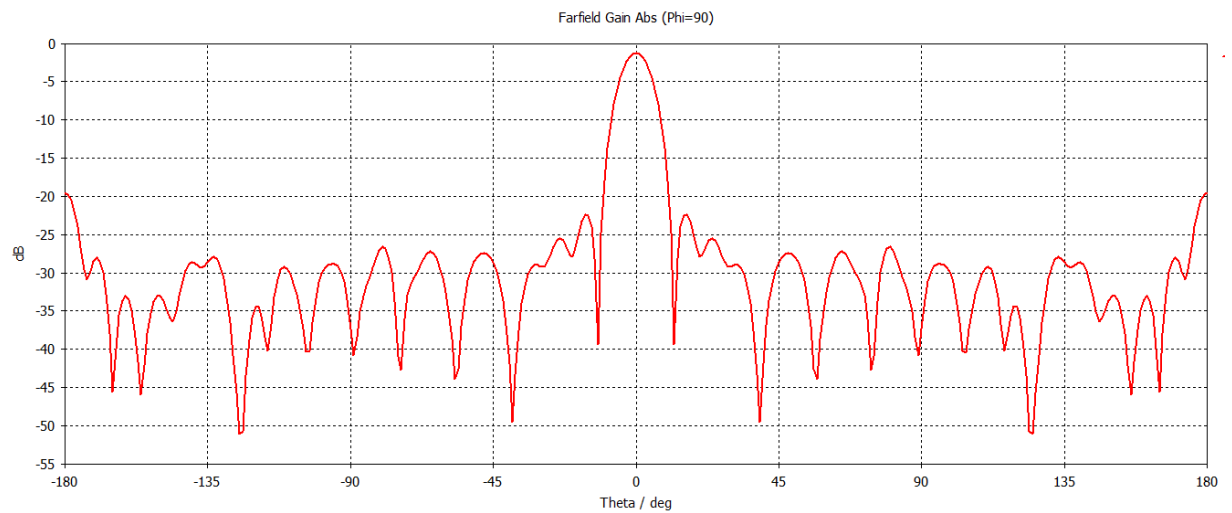
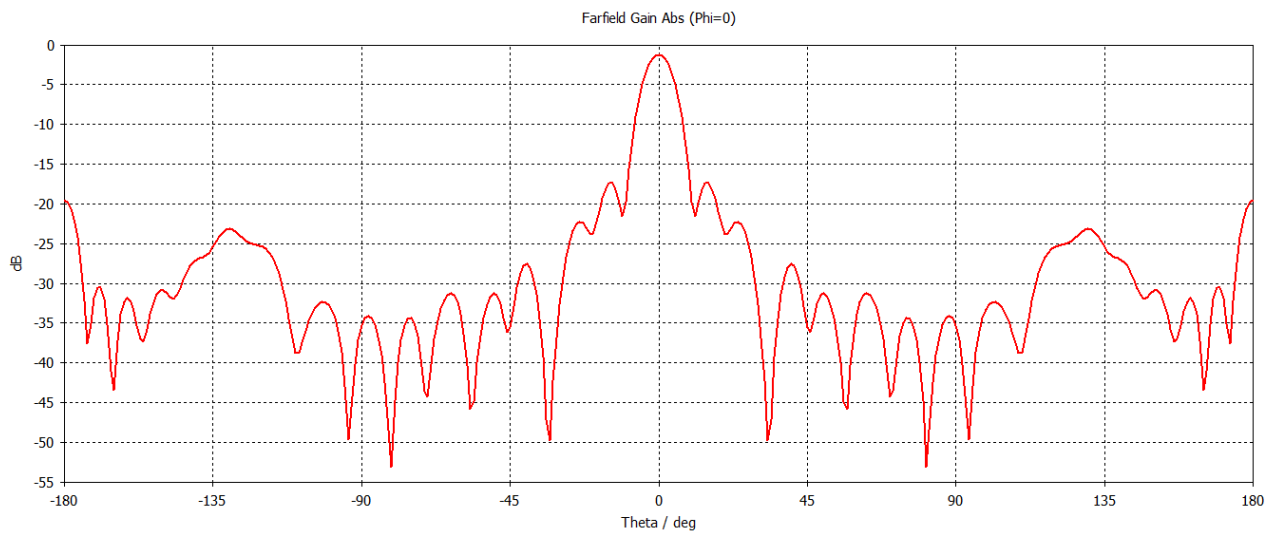


Рис. 3.3 – Вимірювана антена.

На рисунку 2.4 зображено ДС вимірюваної антени в двох площинах для частоти 10 ГГц.



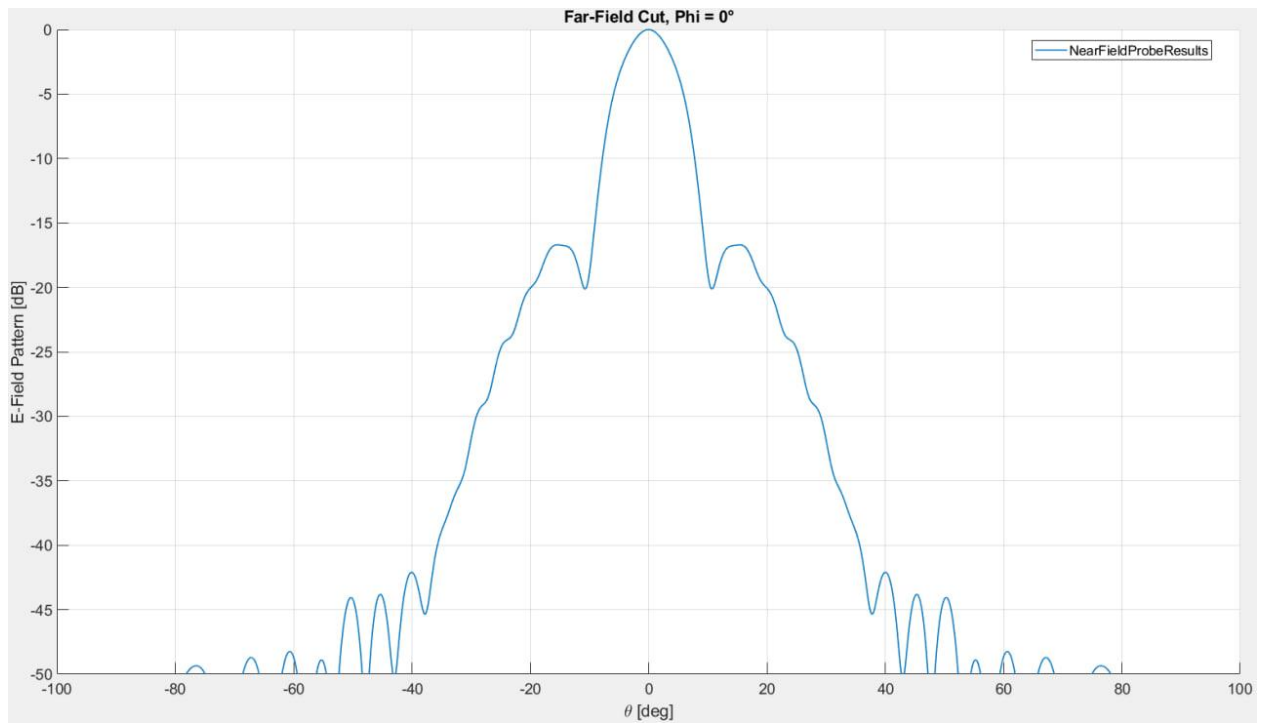
а)



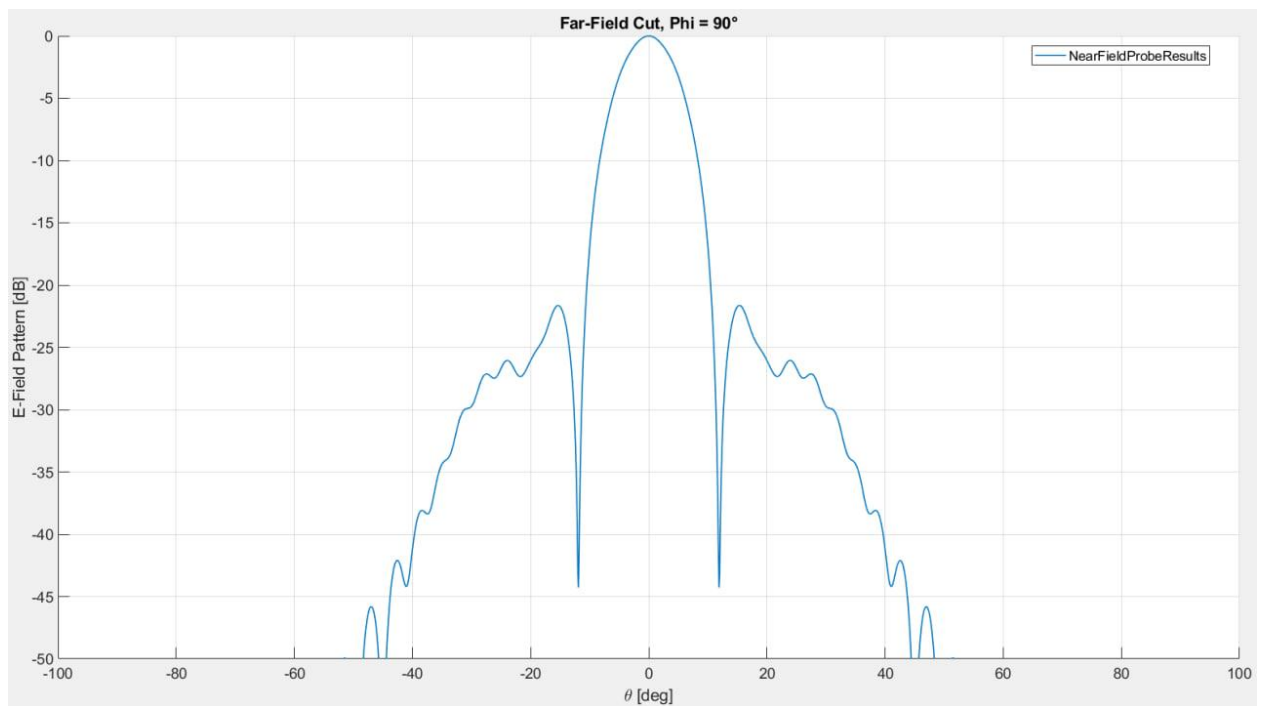
б)

Рис. 3.4 – Діаграми спрямованості параболічної антени в двох площинах: а — зріз при $\varphi = 0^\circ$; б — зріз при $\varphi = 90^\circ$

Після цього віртуальні зонди були розміщені у площині сканування перед антеною. У кожній точці сітки, а було збережено комплексні значення поля, які надалі використовувалися для перерахунку ближнього поля у дальню зону. Зонди були розміщені з кроком 10 міліметрів для виконання умови Найквіста. Результати відновлення діаграми спрямованості для двох площин наведено на рис. 2.5:



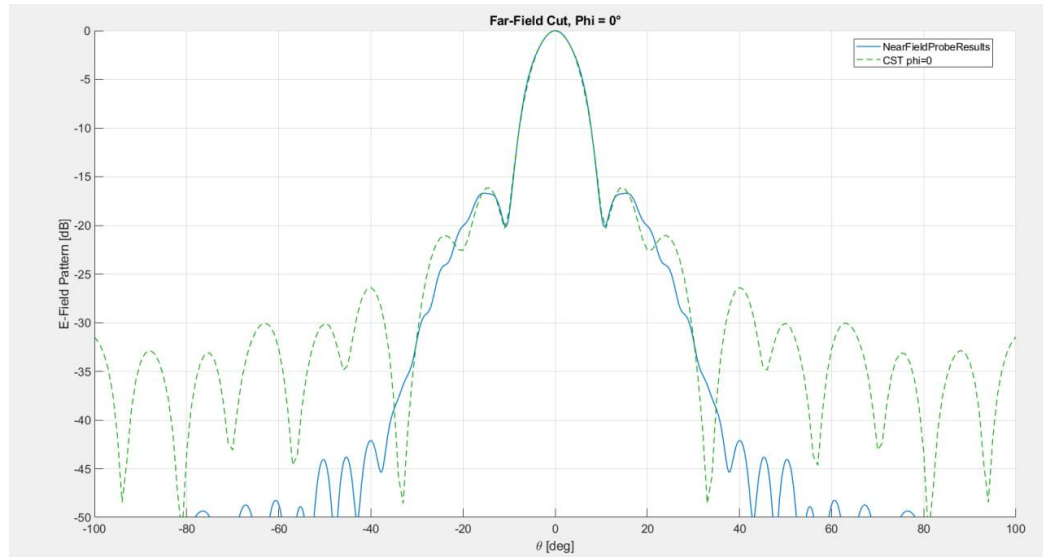
a)



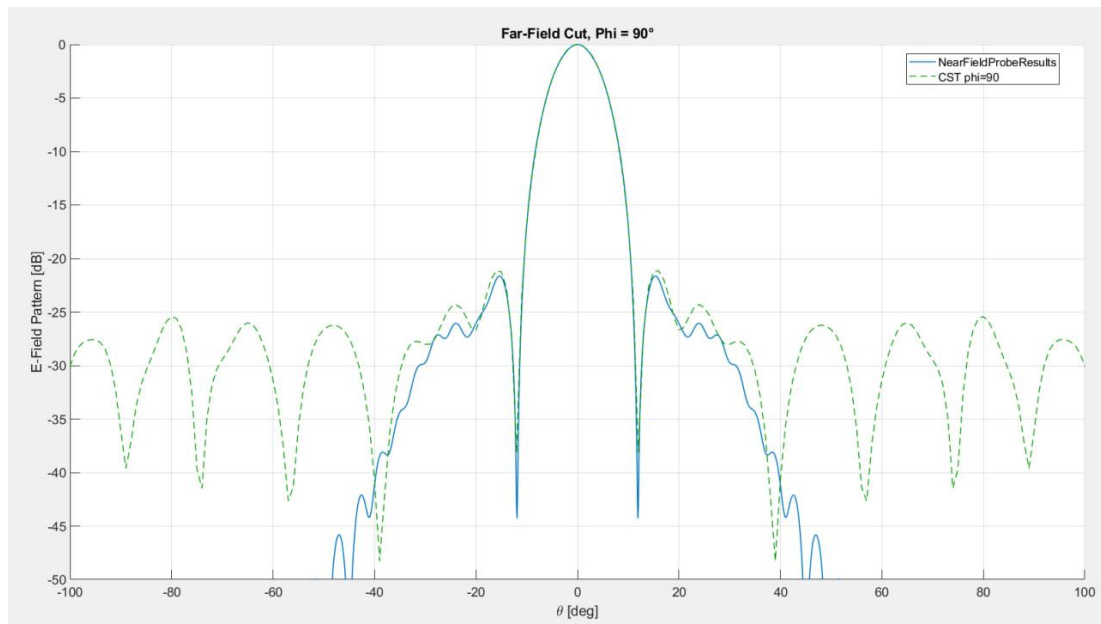
б)

Рис. 3.5 – Діаграми спрямованості параболічної антени, відновлені після перерахунку ближнього поля в дальню зону: а — зріз при $\varphi = 0^\circ$; б — зріз при $\varphi = 90^\circ$

Для оцінювання точності відновлення перераховані діаграми було накладено на еталонні результати, отримані в CST. Таке порівняння дає змогу оцінити збіг положення головної пелюстки, її форми та рівня бокових пелюсток. Результати накладання наведено на рис. 3.6.



а)



б)

Рис. 3.6 – Порівняння відновлених діаграм спрямованості параболічної антени з еталонними діаграмами, отриманими в CST.

З отриманих графіків видно, що після перерахунку напрямок головної пелюстки зберігається, а її максимум розташований у центральному напрямку. Найкраще узгодження спостерігається в області головної пелюстки. Відхилення між кривими помітніші в області бокових пелюсток і на великих кутах, що є характерним для перерахунку при обмеженій площині сканування.

Отже, для параболічної антени модель вимірювального стенду дозволяє відтворити основну частину діаграми спрямованості. Водночас точність на периферії діаграми залежить від розміру сканувальної площини, кроку дискретизації та повноти зчитування поля.

Другим об'єктом дослідження була рупорна антена, модель якої наведено на рис. 3.7 Вона була промодельована за аналогічною процедурою: спочатку отримано еталонні діаграми спрямованості в CST, після чого ближнє поле було зчитано в площині сканування та перераховано в MATLAB.

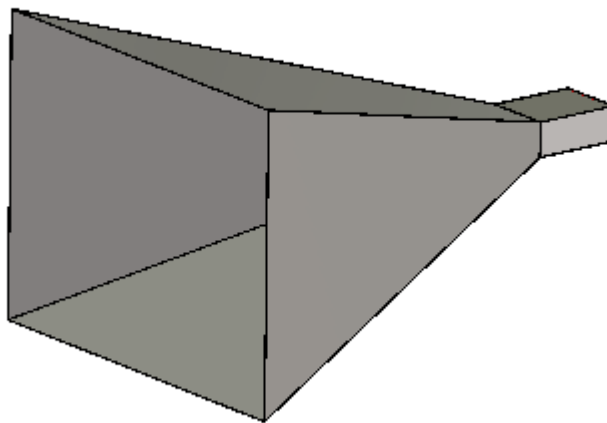
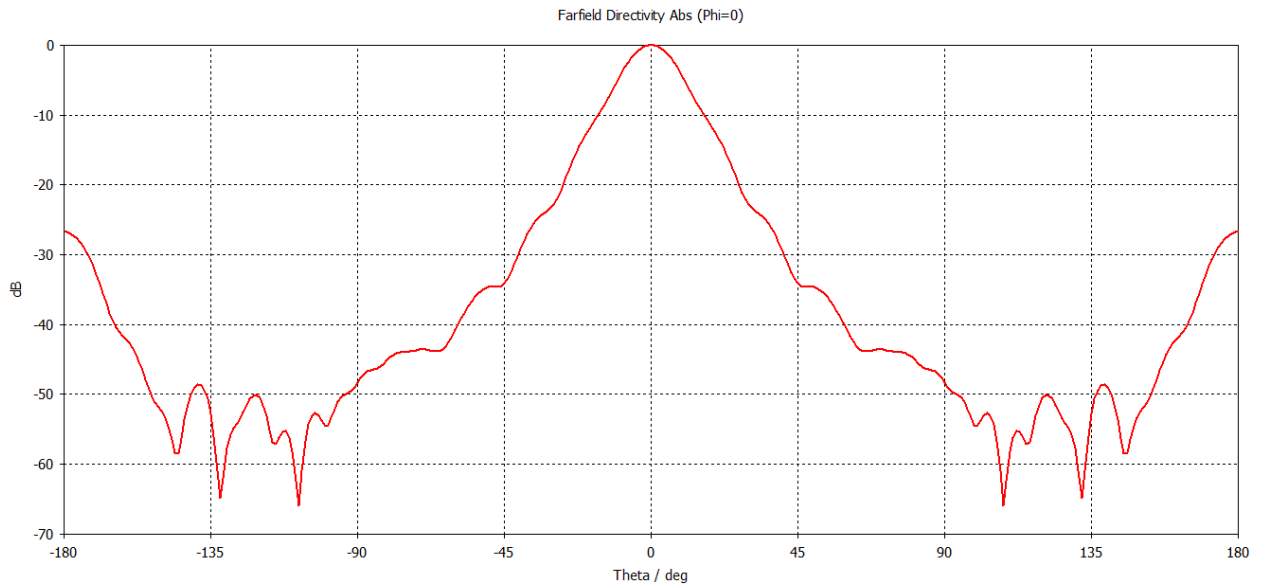
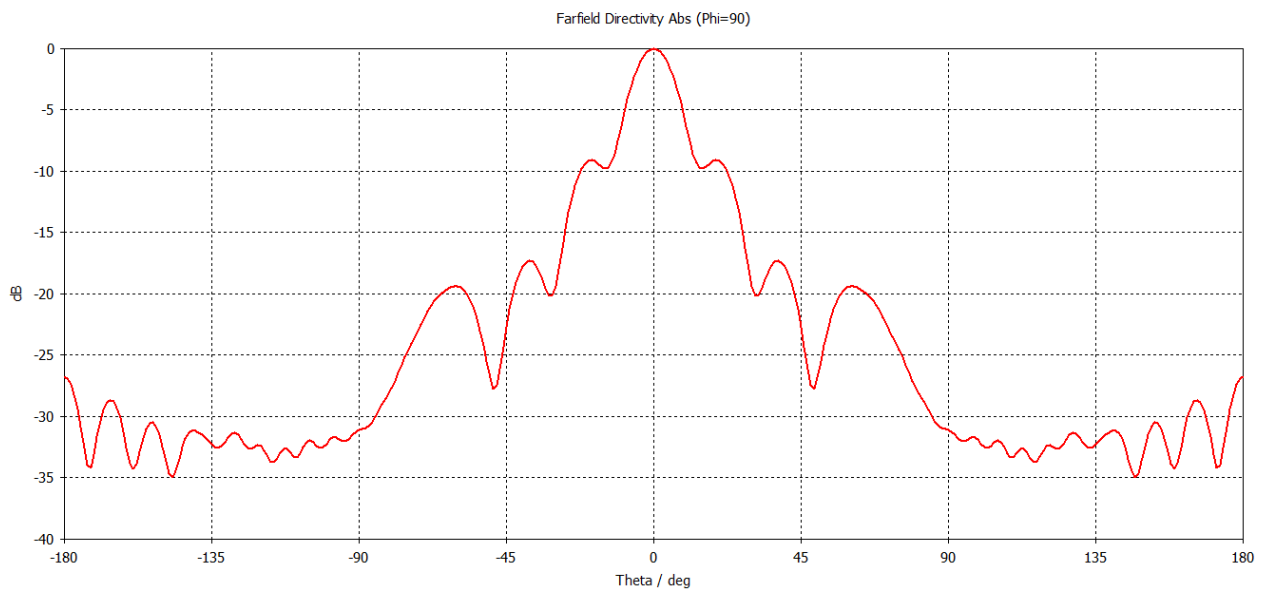


Рис. 3.7 – Рупорна антена.

На рис. 3.8 наведено еталонні діаграми спрямованості рупорної антени в двох площинах на частоті 10 ГГц. Ці результати використовувалися для порівняння з діаграмами, відновленими після вимірювання поля в ближній зоні.



а)

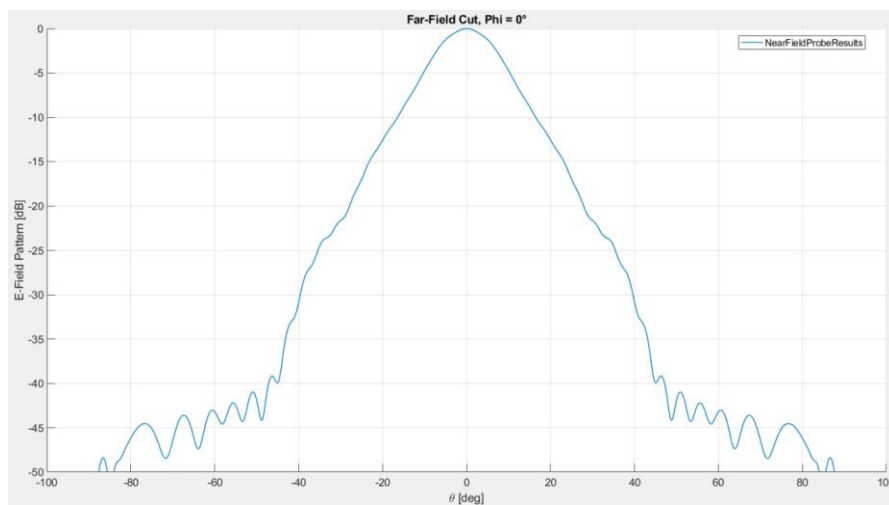


б)

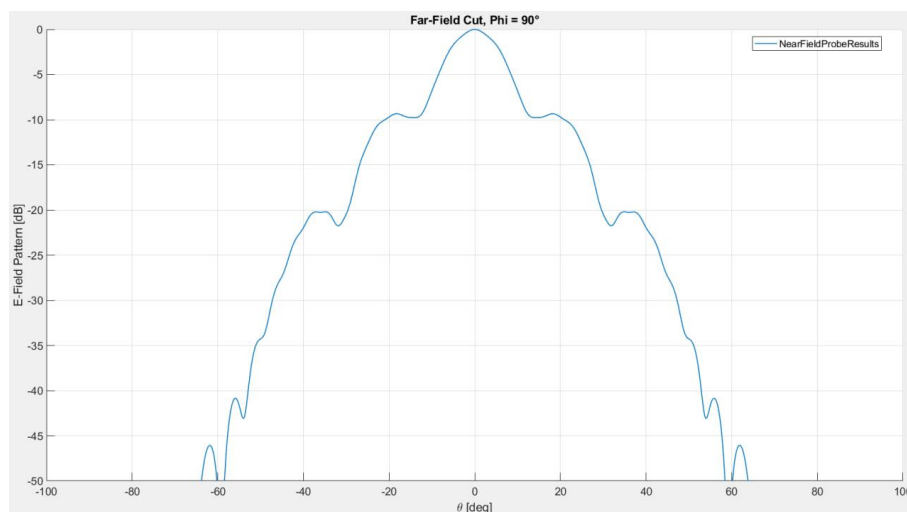
Рис. 3.8 – Еталонні діаграми спрямованості рупорної антени в двох площинах на частоті 10 ГГц. а — зріз при $\varphi = 0^\circ$; б — зріз при $\varphi = 90^\circ$.

Зонди були віднесені на відстань 0.2 метрів для забезпечення ближньої зони та розміщені на відстані 10 міліметрів один від одного.

Після зчитування поля в точках сканувальної площини було виконано перерахунок у дальню зону. Відновлені діаграми спрямованості рупорної антени для двох площин показано на рис. 3.9



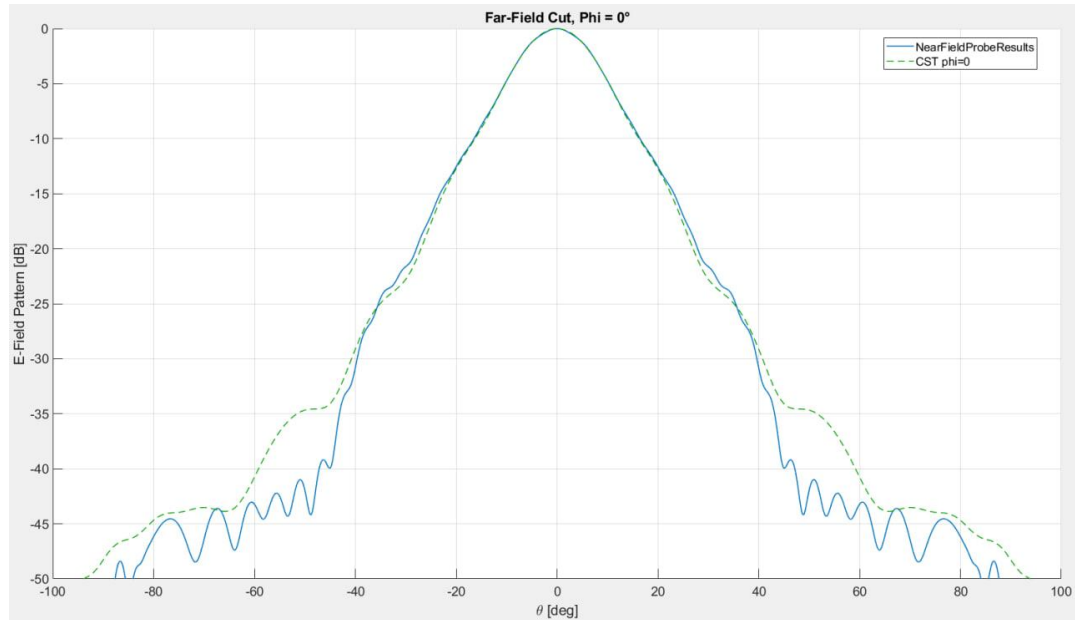
а)



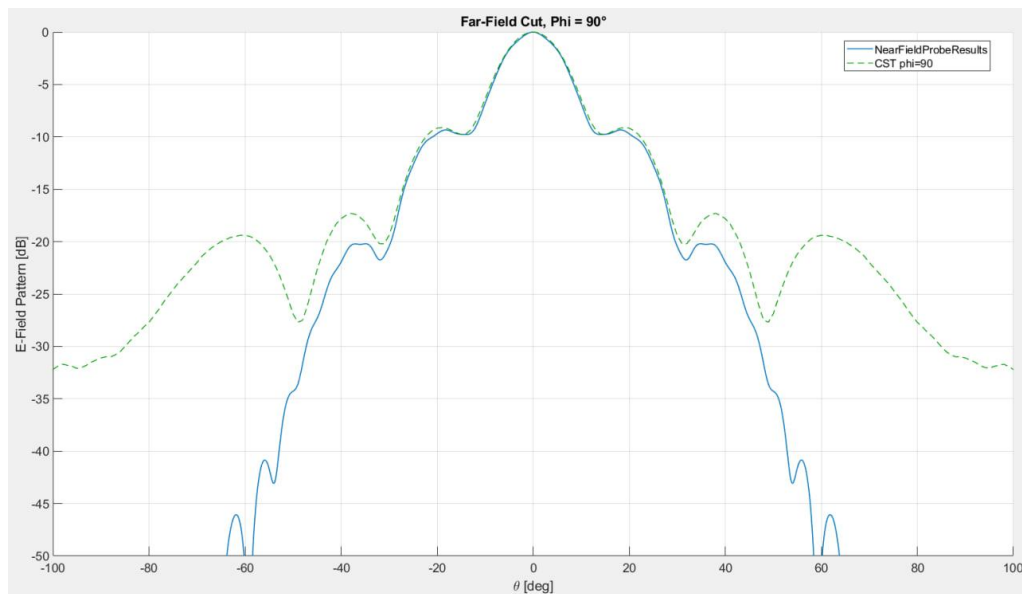
б)

Рис. 3.9 – Перерахована ДС в дальній зоні в двох площинах: а — зріз при $\varphi = 0^\circ$; б — зріз при $\varphi = 90^\circ$.

На завершальному етапі результати перерахунку були накладені на еталонні діаграми спрямованості з CST. Таке порівняння дає змогу оцінити збіг форми головної пелюстки, положення максимуму та характер розбіжностей у бокових областях.



а)



б)

Рис. 2.10 – Накладання вимірних діаграм на порашовні в середовищі CST: а — зріз при $\varphi = 0^\circ$; б — зріз при $\varphi = 90^\circ$

Для рупорної антени збіг у центральній області є достатньо добрим: положення максимуму та загальна форма головної пелюстки зберігаються. Водночас на краях кутового діапазону спостерігаються розбіжності, які можуть бути пов'язані з обмеженою областю сканування, дискретизацією ближнього поля та особливостями моделі вимірювального зонда.

Порівняння двох антен показало, що запропонована схема імітації вимірювального стенду в CST дає змогу отримати дані, придатні для подальшого перерахунку в MATLAB. Найбільш стійко відновлюється головна пелюстка, тоді як бокові пелюстки та далекі кутові області є більш чутливими до параметрів сканування.

Було показано, що сітка польових зондів у CST може використовуватися як чисельний аналог вимірювальної площини планарного сканера.

Після перерахунку ближнього поля в дальню зону в MATLAB для обох антен було отримано діаграми спрямованості, які зберігають основний напрямок випромінювання та форму головної пелюстки.

Найбільші відмінності між відновленими та еталонними діаграмами спостерігаються в області бокових пелюсток і на великих кутах. Це вказує на чутливість результату до параметрів сканування, розміру вимірювальної площини та дискретизації поля.

Отримані результати підтверджують працездатність обраного підходу та можуть бути використані як основа для подальшого аналізу впливу кроку сканування на точність відновлення діаграми спрямованості.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було виконано чисельну імітацію вимірювання антен у ближній зоні з використанням програмного середовища CST Studio Suite. Показано, що польові зонди CST можуть бути використані як чисельний аналог вимірювальної площини планарного сканера, оскільки вони дозволяють отримати амплітудно-фазові значення електромагнітного поля в заданих точках простору.

Для перевірки методу було розглянуто дві антени: параболічну та рупорну. Для кожної з них отримано еталонні діаграми спрямованості у CST, після чого ближнє поле було зчитано в площині сканування та перераховано у дальню зону за допомогою MATLAB. Такий підхід дав змогу оцінити збіг відновлених діаграм із результатами прямого електродинамічного моделювання.

За результатами порівняння встановлено, що для обох антен після перерахунку зберігається основний напрямок випромінювання та форма головної пелюстки. Найкраще узгодження спостерігається в центральній області діаграми спрямованості, що є найбільш важливим для оцінювання спрямованих антен.

Водночас у бокових пелюстках і на великих кутах помітні відхилення між відновленими та еталонними характеристиками. Такі розбіжності пов'язані з обмеженими розмірами площини сканування, вибором кроку дискретизації, відстанню між антеною та зондом, а також з особливостями моделі вимірювального зонда.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено точність відновлення діаграми спрямованості антен за результатами планарного вимірювання електромагнітного поля у ближній зоні. Розглянуто фізичні особливості ближньої та дальньої зон випромінювання, основні типи ближньозонного сканування, принцип планарного методу, вимоги до вимірювального зонда, а також вплив дискретизації та обмеження площини сканування на кінцевий результат.

Показано, що планарне сканування є доцільним для дослідження спрямованих антен, оскільки воно має відносно просту механічну реалізацію, використовує прямокутну сітку вимірювальних точок і дає змогу застосовувати спектральні методи обробки на основі двовимірного перетворення Фур'є. При цьому для коректного відновлення дальнього поля необхідно записувати комплексні значення поля, тобто амплітуду та фазу сигналу, а також враховувати поляризаційні властивості вимірювального зонда.

У роботі обґрунтовано, що одним із ключових параметрів планарного ближньозонного вимірювання є крок сканування. Для зменшення похибок дискретизації та запобігання просторовому алейзингу крок вимірювальної сітки доцільно обирати не більшим за половину довжини хвилі. Також встановлено, що розмір площини сканування та відстань між антеною і зондом визначають кутову область, у межах якої відновлена діаграма спрямованості може вважатися достовірною.

За результатами чисельного моделювання у CST Studio Suite та подальшого перерахунку даних у MATLAB встановлено, що відновлені діаграми спрямованості загалом зберігають основний напрямок випромінювання та форму головної пелюстки досліджуваних антен. Найкраще узгодження з еталонними результатами спостерігається в центральній області діаграми спрямованості, що є найбільш важливим для аналізу антен з високим підсиленням, що характеризуються вузьким променем.

Водночас виявлено, що бокові пелюстки та ділянки на великих кутах є більш чутливими до параметрів вимірювання. Основними джерелами розбіжностей між відновленими та еталонними характеристиками є обмежений розмір площини сканування, вибір кроку дискретизації, відстань між антеною та зондом, а також неідеальність вимірювального зонда. Це підтверджує необхідність коректного вибору параметрів сканування ще на етапі підготовки вимірювального експерименту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dassault Systèmes. 3D EM/circuit co-simulation of a DC–DC converter with partially saturated magnetic material / SIMULIA Blog [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://blog.3ds.com/brands/simulia/3d-em-circuit-co-simulation-dc-dc-converter-partially-saturated-magnetic-material/>
2. Waveguide Probes / NSI-MI Technologies [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.nsi-mi.com/products/antenna-products/waveguide-probes>
3. Yaghjian A. D. An overview of near-field antenna measurements // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1986. — Vol. 34, No. 1. — P. 30–45. — DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143727>
4. Velasco A. The Design and Development of a Hybrid Near-Field Antenna Measurement System [Електронний ресурс]. — Colorado School of Mines. — Режим доступу: <https://repository.mines.edu/server/api/core/bitstreams/aea4e4c4-2188-48ff-bf39-7e0e094c4848/content>
5. Gregson S., McCormick J., Parini C. Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements. — 2nd ed. — London: The Institution of Engineering and Technology, 2023. — Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/37723245_Principles_of_Planar_Near-Field_Antenna_Measurements
6. Wang B. Near-Field Measurement System for 5G Advanced Antenna System [Електронний ресурс] / B. Wang. — Lund University, 2020. — Режим доступу: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9078774>
7. Count RF Absorber 8in, Pyramidal / dB Absorber [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://dbabsorber.com/products/pyramidal-rf-absorber-8in>

ДОДАТКИ

Додаток А

Алгоритм перетворення ближнього поля в дальню зону

