

**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
циліндричним методом вимірювань у ближній зоні»**

Виконав:

студент IV курсу, групи РІ-21

Осіпов Павло 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» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Осіпову Павлу Андрійовичу

1. Тема роботи «Дослідження точності відновлення діаграми спрямованості антен циліндричним методом вимірювань у ближній зоні», керівник роботи асистент кафедри РІ Саратов Євген Михайлович, затверджені наказом по університету від «Наказ № 1989-с від “29” 05 2026р. »
2. Термін подання студентом роботи 16.06.2026р.
3. Вихідні дані до роботи: дослідити процес вимірювання антен у ближній зоні циліндричним методом; виконати моделювання вимірювальних зондів у CST Microwave Studio; оцінити вплив кроку сканування, геометрії стелю та радіопоглинаючого матеріалу на точність відновлення діаграми спрямованості.
4. Зміст роботи ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ВСТУП, ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС ЦИЛІНДРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗОНДІВ У CST MICROWAVE

STUDIO, МОДЕЛЮВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО СТЕНДУ,
ВИСНОВКИ, СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): схеми областей випромінювання антени, схеми планарного, циліндричного та сферичного сканування, схема циліндричного вимірювального стенду, моделі вимірювальних зондів, діаграми спрямованості зондів, графіки впливу радіопоглинаючого матеріалу

6. Дата видачі завдання 14 квітня 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	20.04 – 25.04	Виконано
4	Побудова 3D-моделей зразків та стенду	26.04 – 28.04	Виконано
5	Створення ПЗ для перерахунку діаграми	29.04 – 10.05	Виконано
6	Дослідження впливу різних зондів	11.05 – 18.05	Виконано
7	Вибір параметрів циліндричного сканування та кроку вимірювань	19.05 – 23.05	Виконано
8	Моделювання циліндричного вимірювального стенду	24.05 – 28.05	Виконано
9	Написання та оформлення пояснювальної записки дипломної роботи	29.05 – 13.06	Виконано
10	Оформлення висновків	13.06 – 16.06	Виконано

Студент



Павло ОСІПОВ

Керівник



САРАТОВ Євген

АНОТАЦІЯ

Обсяг дипломної роботи — 56 сторінок, 37 рисунків, 5 джерел за переліком посилань.

У дипломній роботі досліджено точність відновлення діаграми спрямованості антен циліндричним методом вимірювань у ближній зоні. Розглянуто фізичні основи вимірювань у ближній зоні, геометрію циліндричного сканування, умови дискретизації та математичні принципи перетворення ближнього поля у дальнє.

Окрему увагу приділено аналізу вимірювальних зондів у середовищі CST Microwave Studio. Проведено порівняння відкритого кінця хвилеводу, хвилеводу з фланцем та хвилевідних зондів із радіопоглинаючим матеріалом. Показано, що застосування абсорбера зменшує паразитне бокове приймання та підвищує стабільність результатів під час циліндричного сканування.

Мета роботи — дослідити особливості циліндричного методу вимірювання антен у ближній зоні та оцінити чинники, що впливають на точність відновлення діаграми спрямованості.

Об'єкт дослідження — процес вимірювання амплітудно-фазового розподілу електромагнітного поля антени у ближній зоні.

Предмет дослідження — циліндричний метод сканування ближнього поля, параметри дискретизації та вплив вимірювального зонда на відновлену діаграму спрямованості.

Ключові слова: антена, ближня зона, дальня зона, діаграма спрямованості, циліндричне сканування, вимірювальний зонд, CST Microwave Studio, радіопоглинаючий матеріал

ANNOTATION

The thesis consists of 58 pages, 37 figures, 5 references.

The thesis investigates the accuracy of antenna radiation pattern reconstruction using cylindrical near-field measurement. The work considers the physical principles of near-field antenna measurements, the geometry of cylindrical scanning, sampling conditions and the mathematical basis of near-field to far-field transformation.

Special attention is paid to the analysis of measurement probes in CST Microwave Studio. The open-ended waveguide, the waveguide with a flange, and waveguide probes with radio absorbing material are compared. The results show that the use of absorber reduces parasitic side reception and improves the stability of the cylindrical scanning results.

The aim of the work is to investigate the features of the cylindrical near-field antenna measurement method and to evaluate the factors affecting the accuracy of radiation pattern reconstruction.

The object of the study is the process of measuring the amplitude-phase distribution of the electromagnetic field of an antenna in the near-field region.

The subject of the study is the cylindrical near-field scanning method, sampling parameters and the influence of the measurement probe on the reconstructed radiation pattern.

Keywords: antenna, near field, far field, radiation pattern, cylindrical scanning, measurement probe, CST Microwave Studio, radio absorbing material.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 Теоретичний опис методу вимірювання діаграми спрямованості антен в ближній зоні циліндричним методом вимірювань	12
1.1 Загальні положення про вимірювання діаграми спрямованості антен...12	
1.2 Области випромінювання антени	13
1.3 Суть вимірювання у ближньому полі	14
1.4 Геометрія циліндричного сканування	16
1.5 Перетворення ближнього поля у дальнє при циліндричному скануванні	17
1.6 Умови дискретизації та вплив кроку сканування	21
1.7 Роль двовимірного FFT у циліндричному скануванні	22
1.8 Вплив вимірювального зонда	22
Висновки до розділу 1	25
2 Моделювання та аналіз різних вимірювальних зондів в CST Microwave Studio.....	27
2.1 Мета та постановка задачі	27
2.2 Різні типи вимірювальних зондів	27
2.3 Різні типи вимірювальних зондів	28
2.4 Визначення параметрів радіопоглинаючого матеріалу	31
2.5 Порівняння характеристик різних зондів	33
Висновки до розділу 2	47
3. Моделювання циліндричного вимірювального стенду в CST Microwave Studio.....	49

3.1 Вибір та параметри вимірюваної антени.....	49
3.2 Координати та параметри циліндричного сканування	51
3.3 Моделювання системи вимірювань в CST Microwave Studio	53
Висновки до розділу 3	54
ВИСНОВКИ.....	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ...	Ошибка! Закладка не определена.

Перелік скорочень

ДС	Діаграма спрямованості
НВЧ	Надвисокі частоти
NF-FF	перетворення ближнього поля у дальнє поле
AUT	Антина, що досліджується
ПЗ	Програмне забезпечення
РПМ	радіопоглинаючий матеріал
FFT	Швидке перетворення Фур'є

Антени є одним із ключових елементів сучасних радіотехнічних, телекомунікаційних, радіолокаційних та навігаційних систем. Від їхніх характеристик безпосередньо залежать якість передавання й приймання сигналів, дальність зв'язку, завадостійкість та ефективність роботи всієї радіоелектронної системи. Тому точне вимірювання характеристик антен є важливим етапом. Традиційно характеристики антен визначаються шляхом вимірювань у дальній зоні, де електромагнітне поле має сформовану хвильову структуру, а кутовий розподіл поля відповідає реальній діаграмі спрямованості антени. Однак для антен великих електричних розмірів забезпечення умов дальньої зони потребує значної відстані між досліджуваною антеною та вимірювальним зондом. Це ускладнює проведення експериментів, потребує великих полігонів або спеціалізованих безехових камер, а також підвищує вартість і складність вимірювальної системи.

У зв'язку з цим актуальним є використання методів вимірювання антен у ближній зоні. Такі методи дають змогу отримувати інформацію про електромагнітне поле поблизу антени, а потім за допомогою математичної обробки перераховувати отримані дані у характеристики дальньої зони. Це дозволяє визначати діаграму спрямованості, коефіцієнт підсилення, рівень бічних пелюсток та інші параметри антени без необхідності розміщення вимірювального обладнання на великих відстанях.

Одним із поширених методів вимірювань в ближній зоні є циліндричний метод сканування. Його суть полягає у скануванні електромагнітного поля на циліндричній поверхні навколо досліджуваної антени. Такий підхід є особливо зручним для антен, діаграма спрямованості яких має виражену залежність від азимутального кута, а також для антенних систем, які потребують аналізу просторового розподілу випромінювання. Після вимірювання поля на циліндричній поверхні виконується обробка отриманих амплітудно-фазових даних і перерахунок ближнього поля у дальнє.

Актуальність теми дипломної роботи зумовлена необхідністю підвищення точності та зручності експериментального визначення характеристик антен

без використання великих вимірювальних полігонів. Циліндричний метод вимірювань у ближній зоні дозволяє проводити дослідження у лабораторних умовах, зменшити габаритні вимоги до вимірювальної установки та отримати повну інформацію про просторові характеристики випромінювання антени.

Метою дипломної роботи є дослідження процесу вимірювання антен у ближній зоні циліндричним методом та аналіз можливості перерахунку вимірних даних у характеристики дальньої зони.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути основні принципи формування ближньої та дальньої зон антени;
- проаналізувати особливості вимірювання електромагнітного поля в ближній зоні;
- дослідити сутність циліндричного методу сканування;
- розглянути математичні основи перетворення ближнього поля у дальнє;
- визначити основні вимоги до вимірювальної установки;
- проаналізувати фактори, що впливають на точність результатів вимірювання;
- виконати оцінку можливостей застосування циліндричного методу для практичного дослідження антен.

Таким чином, дослідження вимірювання антен у ближній зоні циліндричним методом є актуальним завданням сучасної антенно-вимірювальної техніки, оскільки поєднує експериментальний підхід із математичною обробкою даних і дає змогу ефективно визначати параметри антен без необхідності проведення вимірювань у дальній зоні.

1 Теоретичний опис методу вимірювання діаграми спрямованості антен в ближній зоні циліндричним методом вимірювань

1.1 Загальні положення про вимірювання діаграми спрямованості антен

Діаграма спрямованості є однією з основних характеристик антени, оскільки вона показує просторовий розподіл випромінюваної або прийнятої енергії. Для практичних антен, особливо у НВЧ та міліметровому діапазонах, точне вимірювання діаграми спрямованості має важливе значення під час проектування, налаштування та експериментальної перевірки результатів моделювання.

Класичним способом отримання діаграми спрямованості є вимірювання в дальній зоні. У такому випадку антена, що досліджується, розміщується на достатньо великій відстані від вимірювальної антени або зонда. У дальній зоні фронт електромагнітної хвилі можна вважати майже плоским, а кутовий розподіл поля практично не залежить від відстані до точки спостереження. Саме тому вимірювання у дальній зоні дозволяє безпосередньо отримати діаграму спрямованості антени.

Мінімальна відстань до дальньої зони зазвичай оцінюється за співвідношенням:

$$R = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

де (D) - найбільший лінійний розмір антени, (λ) - довжина хвилі. З цієї формули видно, що зі збільшенням розміру антени або зі зменшенням довжини хвилі потрібна відстань для вимірювання різко зростає. Наприклад, для великих дзеркальних антен або антенних решіток у НВЧ-діапазоні вимірювання у дальній зоні може вимагати значного простору, спеціального полігону або великої безлунної камери. Це ускладнює експеримент, збільшує

вартість вимірювань і може знижувати точність через вплив відбиттів, втрат у тракці, нестабільності обладнання та навколишнього середовища.

Альтернативою є вимірювання у ближній зоні. У цьому випадку поле вимірюється не на великій відстані, а поблизу антени, після чого за допомогою математичного перетворення відновлюється поле у дальній зоні. Такий підхід називається перетворенням ближнього поля у дальнє поле, або NF–FF перетворенням. Він дозволяє отримати діаграму спрямованості без необхідності створювати умови реальної дальньої зони.

1.2 Області випромінювання антени

Простір навколо антени умовно поділяють на три основні області: реактивну ближню зону, випромінювальну ближню зону та дальню зону.

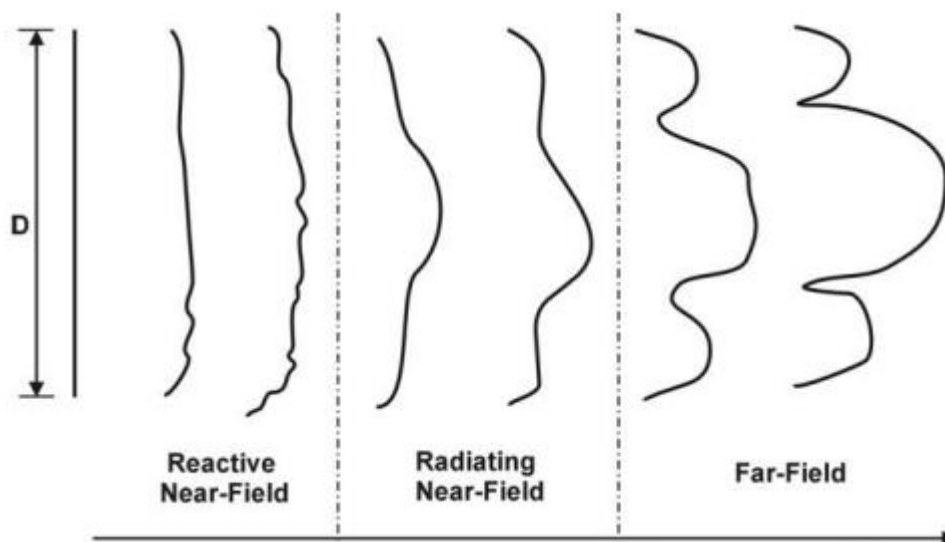


Рис. 1.1 – Області випромінювання антени [2]

Реактивна ближня зона (Reactive Near–Field) розташована безпосередньо біля антени. У цій області значну роль відіграють реактивні складові електромагнітного поля. Вони пов’язані з накопиченням енергії біля антени, а не тільки з її випромінюванням. Поле в цій зоні має складний характер, тому безпосередньо використовувати його для визначення діаграми спрямованості складно.

Випромінювальна ближня зона (Radiating Near–Field), або зона Френеля, розташована далі від антени. У цій області випромінювальні

складові поля вже переважають над реактивними, однак кутовий розподіл поля ще залежить від відстані до точки спостереження. Тобто форма діаграми, отримана у цій зоні, ще не є остаточною діаграмою дальнього поля. Саме в цій області найчастіше виконують вимірювання ближнього поля, після чого застосовують спеціальні алгоритми перетворення.

Дальня зона (Far-Field), або зона Фраунгофера, характеризується тим, що кутовий розподіл поля вже майже не змінюється зі збільшенням відстані. У цій області електричне та магнітне поля взаємно перпендикулярні, а також перпендикулярні до напрямку поширення хвилі.

1.3 Суть вимірювання у ближньому полі

Цей метод вимірювання полягає у тому, що амплітуда і фаза електромагнітного поля вимірюються на деякій поверхні навколо антени. Для цього використовується вимірювальний зонд, який переміщується по заданій траєкторії. Залежно від форми поверхні сканування розрізняють три основні методи вимірювань в ближньому полі:

- planar scanning – плоске сканування,
- cylindrical scanning – циліндричне сканування,
- spherical scanning – сферичне сканування.

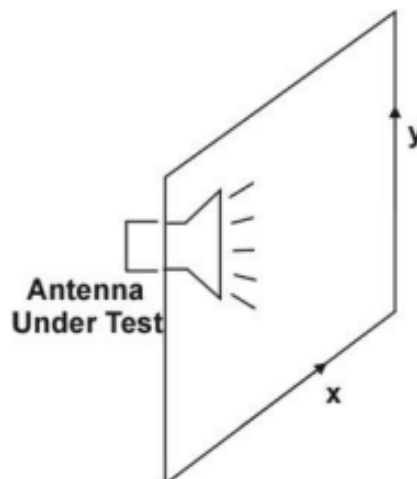


Рис. 1.2 – плоске сканування [2]

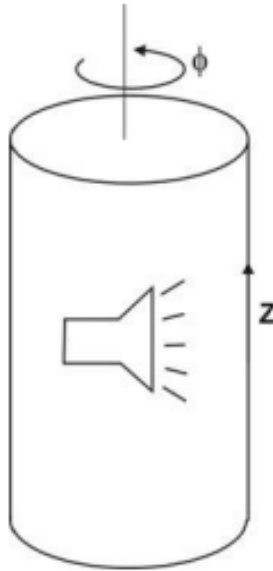


Рис. 1.2 – циліндричне сканування [2]

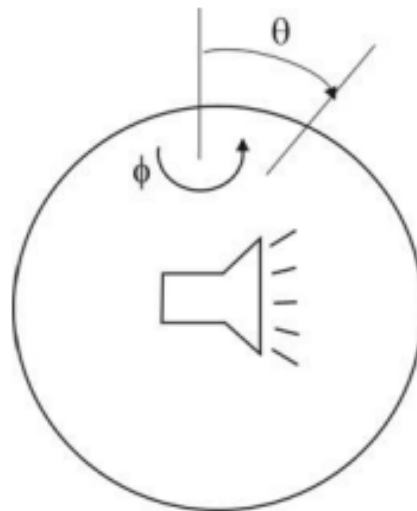


Рис. 1.2 – сферичне сканування [2]

Плоске сканування є найпростішим з точки зору механічної реалізації, але воно найкраще підходить для антен з вузьким променем, спрямованим нормально до площини сканування.

Сферичне сканування дозволяє отримати найбільш повну інформацію про поле антени, однак воно є складнішим у механічній реалізації та потребує точнішої системи позиціонування.

Циліндричне сканування займає проміжне положення між цими двома методами. Воно складніше за плоске, але простіше за сферичне, і при цьому дозволяє отримувати діаграму спрямованості у широкому діапазоні азимутальних кутів.

Циліндричний метод є особливо зручним для антен, у яких важливо дослідити діаграму спрямованості в азимутальній площині. У такому методі антена, що досліджується, розміщується всередині уявного циліндра, а зонд виконує вимірювання на поверхні цього циліндра. Практично це може реалізовуватися двома способами: або антена обертається навколо своєї осі, а зонд рухається вертикально, або зонд переміщується навколо антени по циліндричній поверхні.

1.4 Геометрія циліндричного сканування

Схему системи циліндричного сканування наведено на рис. 1.3. Така система складається з досліджуваної антени, встановленої на обертовому пристрої, та антени-зонда, яка переміщується вздовж вертикальної осі за допомогою лінійного сканера. Під час вимірювання необхідно дотримуватися заданого кроку вертикального переміщення зонда та кроку повороту антени, оскільки ці параметри визначають точність дискретизації поля. Відстань між сусідніми точками вимірювання по вертикалі та кутовий крок обертання не повинні перевищувати встановлених граничних значень $\lambda/2$. Рекомендована відстань між досліджуваною антеною та антеною-зондом зазвичай становить від 2 до 10λ .

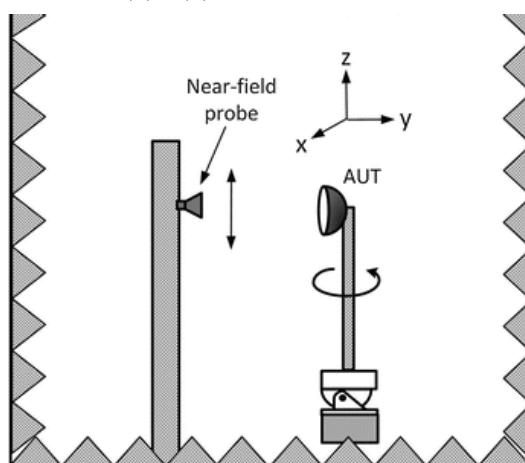


Рис. 1.3 – схема циліндричного сканування [2]

1.5 Перетворення ближнього поля у дальнє при циліндричному скануванні

Математична основа циліндричного NF–FF перетворення полягає у представленні поля як сукупності циліндричних хвиль. Кожна така хвиля описується номером азимутальної гармоніки та просторовою частотою вздовж осі z . Після вимірювання ближнього поля потрібно визначити вагові коефіцієнти цих хвиль, а потім за ними обчислити поле в дальній зоні.

Для переходу від просторового розподілу вимірюної напруги до спектрального подання використовують двовимірне перетворення Фур'є [1], [2]:

$$I_n(h) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} V(\rho_s, \varphi, z) e^{-j\pi\varphi} e^{-jhz} d\varphi dz \quad (1.2)$$

де n – номер азимутальної гармоніки, h – просторова частота вздовж осі z . У реальному експерименті інтеграли з формули (1.2) замінюються дискретними сумами, оскільки вимірювання виконуються у скінченній кількості точок. Для прискорення обчислень застосовують швидке перетворення Фур'є, тобто FFT.

У практичній реалізації циліндричного перетворення важливо враховувати, що виміряне ближнє поле не є неперервною функцією. Зонд фіксує значення сигналу тільки в окремих точках циліндричної поверхні, тому інтегральні залежності замінюються дискретною обробкою. У такому випадку перетворення Фур'є виконується не для неперервного розподілу поля, а для матриці комплексних значень, де кожен елемент відповідає певному кутовому положенню φ та певній висоті z .

У дискретному вигляді спектральну складову можна подати як суму за всіма виміряними точками циліндричної поверхні:

$$I_n(h_q) \approx \Delta\varphi\Delta z \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{p=0}^{P-1} V(\rho_s, \varphi_m, z_p) e^{-j\pi\varphi} e^{-jhz} \quad (1.2a)$$

де M — кількість кутових положень, P — кількість точок за висотою, $\Delta\varphi$ — крок за азимутальним кутом, Δz — крок вертикального переміщення зонда, h_q — дискретне значення просторової частоти. Такий запис показує, що точність відновлення дальнього поля прямо залежить від кількості точок сканування, рівномірності вимірювальної сітки та стабільності фазових вимірювань.

Особливість циліндричного методу полягає в тому, що просторовий розподіл поля аналізується одночасно у двох напрямках. Зміна поля за кутом φ відповідає азимутальним гармонікам, а зміна за координатою z — просторовим частотам уздовж осі циліндра. Тому використання двовимірного швидкого перетворення Фур'є є більш обґрунтованим, ніж застосування лише одновимірного FFT. Одновимірна обробка враховує зміну поля тільки в одному напрямку, тоді як двовимірна дозволяє повніше описати структуру ближнього поля на циліндричній поверхні [2].

Після визначення модальних коефіцієнтів дальнє поле може бути подане через дві кутові складові. У спрощеному вигляді ці залежності можна записати так:

$$E_\theta(\theta, \varphi) \sim \sin\theta \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n(k\cos\theta) e^{jn\varphi} \quad (1.3)$$

$$E_\varphi(\theta, \varphi) \sim \sin\theta \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n(k\cos\theta) e^{jn\varphi} \quad (1.4)$$

де a_n та b_n — вагові коефіцієнти циліндричних хвиль, $k = 2\pi/\lambda$ — хвильове число. Ці вирази показують, що відновлення діаграми спрямованості

зводиться до правильного визначення спектральних коефіцієнтів за даними ближнього поля.

У класичній схемі перетворення також враховують характеристики вимірювального зонда. Це необхідно тому, що зонд не є ідеальним точковим приймачем: він має власну діаграму спрямованості, поляризацію та фазову характеристику. Тому вимірний сигнал є результатом взаємодії поля досліджуваної антени з приймальними властивостями зонда. У роботах із класичної циліндричної теорії для цього використовують зондову компенсацію, а також два незалежні набори вимірювань для різних орієнтацій зонда [1], [2].

Важливо також враховувати, що в реальному експерименті поверхня сканування має обмежені розміри. Теоретично інтегрування за координатою z виконується від $-\infty$ до $+\infty$, однак у вимірювальній установці зонд переміщується тільки в межах певної висоти. Через це частина інформації про поле не потрапляє до вимірювального масиву. Наслідком такого обмеження можуть бути крайові ефекти, які проявляються у вигляді пульсацій або додаткових спотворень у відновленій діаграмі спрямованості [1].

Для зменшення таких похибок у сучасних підходах застосовують різні способи обробки даних: згладжування, віконні функції, інтерполяцію, нерезервовану дискретизацію або пряме перетворення без попереднього відновлення повної сітки. Останній підхід є корисним тоді, коли потрібно скоротити кількість точок вимірювання і зменшити час експерименту. Його суть полягає в тому, що дальня зона обчислюється безпосередньо з наявних даних, без проміжного формування надлишкової сітки вимірювань [1].

Ще одним важливим напрямом є використання методів реконструкції еквівалентних джерел. У таких методах антена замінюється набором умовних джерел, наприклад малих диполів, параметри яких підбираються так, щоб створене ними поле збігалось з вимірним ближнім полем. Після визначення параметрів цих джерел можна обчислити поле в дальній зоні. Перевага

такого підходу полягає в тому, що він може працювати з менш щільною сіткою вимірювань, однак потребує розв'язання оберненої задачі та стабілізації чисельного розрахунку [3].

У матричній формі такий підхід можна подати через зв'язок між вимірним полем, матрицею поширення та вектором невідомих параметрів еквівалентних джерел:

$$E = G_p \quad (1.5)$$

де E — вектор вимірних значень ближнього поля, G — матриця, яка описує зв'язок між джерелами та точками спостереження, p — вектор невідомих параметрів еквівалентних джерел. Після знаходження вектора p дальнє поле може бути визначене за подібним матричним співвідношенням:

$$E_{FF} = G_{FFP} \quad (1.6)$$

де E_{FF} — вектор значень поля у дальній зоні, G_{FFP} — матриця переходу від еквівалентних джерел до точок спостереження у дальній зоні. Такий опис показує різницю між класичним циліндричним хвильовим розкладом і методами реконструкції джерел: у першому випадку поле відновлюється через спектральні коефіцієнти, а в другому — через еквівалентну модель випромінювача.

Отже, перетворення ближнього поля у дальнє при циліндричному скануванні є не просто математичним перерахунком координат. Воно включає кілька послідовних етапів: вимірювання комплексного поля на циліндричній поверхні, спектральне подання даних, визначення модальних коефіцієнтів, урахування характеристик зонда та обчислення складових поля у дальній зоні. Точність кожного з цих етапів впливає на кінцеву діаграму спрямованості, тому під час дослідження необхідно окремо аналізувати вплив кроку сканування, кількості точок, висоти циліндра, фазових похибок і вибраного алгоритму обробки.

1.6 Умови дискретизації та вплив кроку сканування

Крок сканування є одним із головних параметрів, що визначає точність відновлення дальнього поля. Якщо відстань між сусідніми точками зavelика, просторовий спектр виміряного поля відновлюється з помилками. У такому випадку виникає накладання спектральних складових, що проявляється як спотворення діаграми спрямованості: змінюється форма головного пелюстка, з'являються помилкові бічні пелюстки або порушується рівень мінімумів.

Для класичного циліндричного хвильового розкладу зазвичай використовують такі умови дискретизації:

$$\Delta z \leq \frac{\lambda}{2} \quad (1.7)$$

$$\Delta \varphi \leq \frac{\lambda}{2a} \quad (1.8)$$

де Δz — крок уздовж вертикальної координати, $\Delta \varphi$ — кутовий крок сканування, a — радіус мінімальної сфери або циліндричної області, що охоплює антену. У деяких формулюваннях замість a використовують радіус мінімального циліндра, який обмежує досліджувану антену. Фізичний зміст цих умов полягає в тому, що більша антена потребує більш щільного кутового сканування.

Зменшення кроку сканування підвищує якість відновлення, але одночасно збільшує кількість точок, тривалість експерименту та обсяг даних. Тому в практичній системі завжди існує компроміс між точністю і швидкістю вимірювання. У сучасних дослідженнях розглядаються підходи, які дозволяють зменшити кількість точок без значної втрати точності. До таких підходів належать нерезервована дискретизація, інтерполяційні методи, реконструкція еквівалентних джерел та моделювання інфінітезимальними диполями [1], [3].

Для теми цієї дипломної роботи питання дискретизації є особливо важливим, оскільки точність відновлення діаграми спрямованості прямо

залежить від кількості вимірних точок і правильності вибору кроків Δz та $\Delta \varphi$. Якщо сітка сканування буде надто грубою, алгоритм може дати візуально схожу, але кількісно неточну діаграму.

1.7 Роль двовимірного FFT у циліндричному скануванні

Оскільки циліндричні дані змінюються одразу за двома координатами — φ і z , природним інструментом їх обробки є двовимірне швидке перетворення Фур'є. Якщо застосовувати тільки одновимірне FFT, то частина просторової інформації буде врахована неповністю. Це може бути допустимим для окремих спрощених задач, але для коректного NF–FF перетворення циліндричні дані бажано обробляти як двовимірний масив.

Перевагою FFT є також висока швидкість обчислень. У класичному прямому підрахунку сум або інтегралів час обробки може швидко зростати зі збільшенням кількості точок. FFT дозволяє значно скоротити час обробки, що важливо при великій кількості вимірних даних. Це означає, що після завершення сканування можна швидко отримати відновлені E- та H-площини, а також оцінити якість результату.

1.8 Вплив вимірювального зонда

Під час сканування ближнього поля вимірювальний зонд не просто реєструє значення поля в одній точці. Його власні електродинамічні властивості впливають на вимірний сигнал. Зонд має скінченні розміри, власну поляризацію, фазову характеристику та просторову вибірковість. Через це вихідна напруга зонда не є абсолютно точним значенням поля досліджуваної антени.

Якщо вплив зонда не враховувати, у відновленій діаграмі можуть виникати систематичні похибки. Найпомітніше це проявляється під час оцінювання рівня бічних пелюсток, ширини головного пелюстка та поляризаційних характеристик. Для підвищення точності використовують

зондову компенсацію. Її суть полягає у врахуванні власних коефіцієнтів випромінювання або приймання зонда в алгоритмі перетворення.

У класичній циліндричній схемі для повнішого опису поля можуть виконуватися два вимірювання з різними орієнтаціями зонда. Наприклад, другий набір даних отримують після повороту зонда на 90° відносно його поздовжньої осі. Це дає можливість відновити дві незалежні поляризаційні складові поля і точніше перейти до складових E_θ та E_ϕ у дальній зоні.

В експериментах інколи використовують один зонд і одну поляризацію. Такий підхід може бути достатнім для порівняння форми основного перерізу діаграми, однак він не дає повної векторної інформації про поле. Тому під час аналізу точності потрібно чітко зазначати, які складові поля реально вимірювалися і які припущення були прийняті під час обробки.

У найпростішій теоретичній моделі як зонд можна розглядати ідеальний диполь Герца. Такий елемент є дуже малим порівняно з довжиною хвилі та в ідеальному випадку реагує на одну складову електричного поля. Саме тому він зручний для теоретичного пояснення принципу вимірювання. Проте в реальній апаратурі ідеальний диполь Герца практично не використовується, оскільки його неможливо повністю реалізувати фізично. Реальні короткі диполі мають низку недоліків: вузьку смугу частот, малу ефективність і майже всенаправлену діаграму. Через це вони менш зручні для точних НВЧ-вимірювань, особливо коли необхідно зменшити вплив відбиттів і сторонніх сигналів.

Одним із найпоширеніших типів зондів у НВЧ-діапазоні є відкритий кінець прямокутного хвилеводу. Такий зонд має просту конструкцію, добре працює у заданому хвилевідному діапазоні та може забезпечувати стабільну фазову характеристику. У циліндричних вимірюваннях ближнього поля він часто використовується як практичний приймальний елемент, оскільки його характеристики можна попередньо визначити та врахувати в алгоритмі перетворення ближнього поля у дальнє. Хвилевідний зонд має важливу перевагу: його параметри достатньо стабільні та добре описуються

електродинамічною моделлю. Це дозволяє виконувати компенсацію впливу зонда. Однак він також має обмеження. Його робоча смуга частот визначається хвилевідним діапазоном, а власна діаграма спрямованості впливає на вимірний сигнал. Тому без урахування характеристик хвилеводу результат може відрізнятись від реального поля антени.



Рис. 1.4 – приклад вимірювальних зондів від компанії “Microwave Vision Group” [3]

Іншим типом вимірювального зонда є рупорна антена. Рупорний зонд має більш виражену спрямованість порівняно з коротким диполем або монополем. Завдяки цьому він краще пригнічує сигнали, що приходять з небажаних напрямків, і може зменшувати вплив залишкових відбиттів у безлунній камері. Спрямований зонд є корисним тоді, коли потрібно підвищити точність вимірювання слабких рівнів поля, наприклад у зоні бічних пелюсток діаграми спрямованості. Проте більша спрямованість означає і сильніший вплив власної діаграми зонда на вимірювання, тому для такого зонда особливо важливо виконувати корекцію.



Рис. 1.5 – приклад рупорної антени яка використовується для вимірювань від компанії “NSI-MI” [5]

Для вимірювань антен міліметрового діапазону також можуть використовуватися мікросмушкові або патч-зонди. Вони мають компактні розміри та можуть бути зручними в інтегрованих вимірювальних системах. Такі зонди добре підходять для обмеженого простору, де використання великої рупорної антени або хвилеводної конструкції є незручним. Водночас мікросмушкові зонди мають власні резонансні властивості, обмежену робочу смугу та можуть бути чутливими до поляризації, тому їх характеристики також потрібно враховувати під час обробки результатів.

Окремо можна виділити двополяризаційні зонди. Їх застосовують тоді, коли необхідно отримати дві ортогональні складові електричного поля.

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто фізичні та математичні основи вимірювання діаграми спрямованості антен у ближній зоні за допомогою циліндричного сканування. Показано, що пряме вимірювання у дальній зоні не завжди є практичним, оскільки необхідна відстань суттєво залежить від розмірів антени та довжини хвилі.

Циліндричний метод передбачає вимірювання комплексного поля на поверхні циліндра навколо досліджуваної антени. Отримані амплітудно-

фазові дані перетворюються у дальню зону за допомогою математичної моделі, що базується на циліндричному хвильовому розкладі та перетворенні Фур'є. Важливою особливістю такого підходу є необхідність правильного вибору кроку дискретизації за висотою та азимутальним кутом.

Точність відновлення діаграми спрямованості залежить від параметрів сканування, стабільності вимірювального тракту, впливу зонда, розміру вимірювальної області та алгоритму обробки.

2. Моделювання та аналіз різних вимірювальних зондів в CST Microwave Studio

2.1 Мета та постановка задачі

Метою другого розділу є опис побудови та порівняння чисельних моделей різних вимірювальних зондів, які можуть застосовуватися у стенді для дослідження антен у ближньому полі. У межах роботи розглянуто три основні варіанти зонда: відкритий кінець хвилеводу, відкритий кінець хвилеводу з радіопоглинаючим матеріалом та планарну антену Вівальді. Кожна з цих конструкцій має власні переваги, обмеження та особливості використання під час реєстрації амплітудно-фазового розподілу поля.

Чисельне моделювання у CST Microwave Studio дає змогу оцінити не лише узгодження та діаграму спрямованості зонда, але й його вплив на вимірюване поле. Це є важливим, оскільки у ближній зоні зонд розташовується на відносно малій відстані від досліджуваної антени, тому його власні електромагнітні властивості можуть впливати на результат вимірювання. Зокрема, форма апертури, рівень бокового приймання, наявність паразитних відбиттів і поляризаційні властивості зонда визначають точність подальшого перерахунку поля з ближньої зони в дальню.

2.2 Загальні вимоги для вимірювального зонда

Вимірювальний зонд у вимірювальній системі в ближньому полі повинен приймати локальне електромагнітне поле у заданій точці простору та мінімально спотворювати його. На практиці повністю ідеальний зонд реалізувати неможливо, тому під час вибору конструкції необхідно враховувати компроміс між габаритами, робочою смугою частот, чутливістю, поляризацією та стабільністю параметрів.

Основними вимогами до зонда є стабільне узгодження в робочому діапазоні частот, відома поляризація, невеликий рівень паразитних відбиттів, достатня механічна жорсткість і можливість зручного підключення до вимірювальної апаратури. Крім того, зонд повинен мати передбачувану власну діаграму спрямованості, оскільки під час обробки результатів вимірювання необхідно враховувати його вплив на зареєстроване поле.

2.3 Різні типи вимірювальних зондів

Вимірювальний зонд є одним із ключових елементів стенду. У реальному експерименті вимірюється не абстрактне значення поля в точці, а сигнал на виході приймального елемента. Тому результат залежить від власної діаграми спрямованості зонда, поляризації, узгодження, фазової характеристики та робочої смуги частот.

Першим варіантом буде розглянуто відкритий кінець прямокутного хвилеводу як вимірювальний зонд

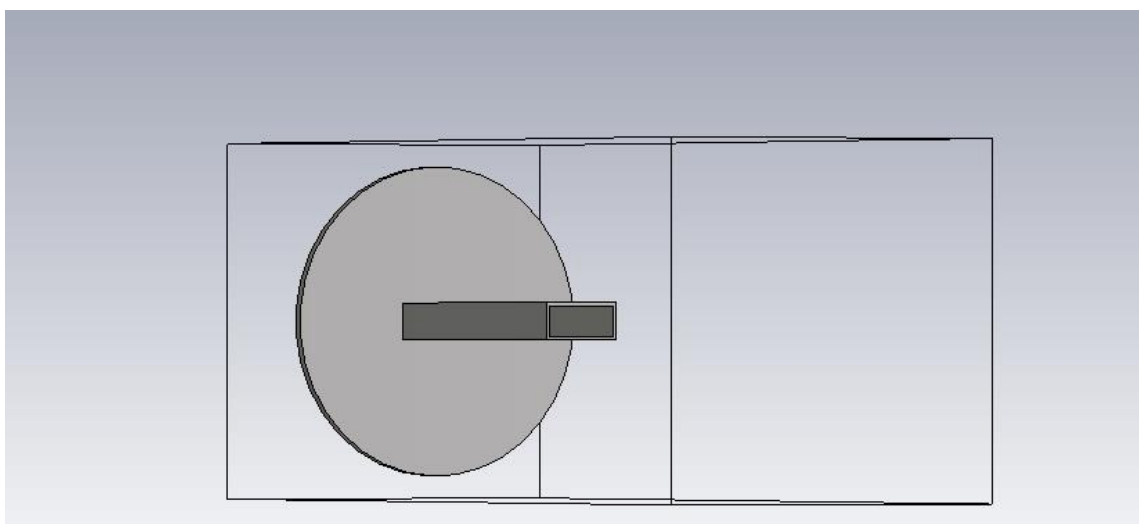


Рис. 2.1 – вимірювальний зонд у вигляді відкритого кінця хвилеводу

Основною перевагою відкритого кінця хвилеводу є передбачуваний розподіл поля в його апертурі. Завдяки цьому його характеристики легше враховувати під час подальшої обробки результатів вимірювання та перерахунку поля з ближньої зони в дальню. Такий зонд має визначену

поляризацію, достатню механічну жорсткість і добре працює у заданому діапазоні частот, який відповідає робочому діапазону хвилеводу.

Крім того, відкритий кінець хвилеводу має відносно малі розміри порівняно з рупорними антенами, тому він менше спотворює вимірюване поле поблизу антени. Це важливо для вимірювань в ближньому полі, оскільки зонд розташовується на невеликій відстані від антени, і його власний вплив на поле повинен бути мінімальним.

Другим варіантом вимірювального зонду буде відкритий кінець прямокутного хвилеводу з радіо поглинаючим матеріалом

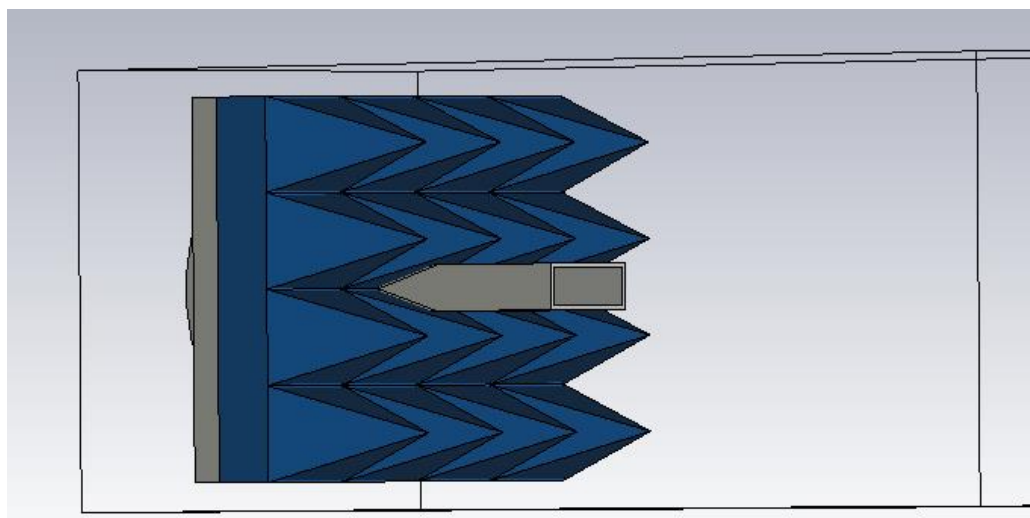


Рис. 2.2 – вимірювальний зонд у вигляді відкритого кінця хвилеводу з радіо поглинаючим матеріалом

У вимірюваннях антен у ближньому полі як вимірювальний зонд часто використовують відкритий кінець хвилеводу з радіопоглинаючим матеріалом, оскільки така конструкція дає змогу підвищити точність вимірювання та зменшити вплив паразитних відбиттів. На відміну від звичайного відкритого хвилеводу, у цій конструкції навколо апертури або на зовнішніх елементах зонда розміщують радіопоглинаючий матеріал, який послаблює небажані електромагнітні хвилі. Завдяки цьому зменшується вплив розсіювання від країв зонда, а також знижуються відбиття від його конструктивних частин.

Основною перевагою відкритого хвильоводу з радіопоглинаючим матеріалом є покращення просторової вибірковості зонда. Такий зонд краще приймає поле безпосередньо від досліджуваної антени та менше реагує на сторонні сигнали, відбиті від елементів вимірювального стенду, механічних опор або навколишніх об'єктів. Це особливо важливо під час вимірювань в ближній зоні, де навіть незначні паразитні відбиття можуть спричинити похибки у виміряних амплітудно-фазових розподілах поля.

Ще однією важливою перевагою є зменшення дифракції на краях апертури та послаблення бокового приймання. У результаті зонд менше спотворює вимірюване поле, а отримані дані точніше відображають власні характеристики досліджуваної антени. Це підвищує достовірність подальшого перерахунку поля з ближньої зони в дальню, оскільки зменшується вплив похибок, пов'язаних із недосконалістю самого вимірювального зонда.

Третім варіантом вимірювального зонда буде виступати антена планарна антена вівальді

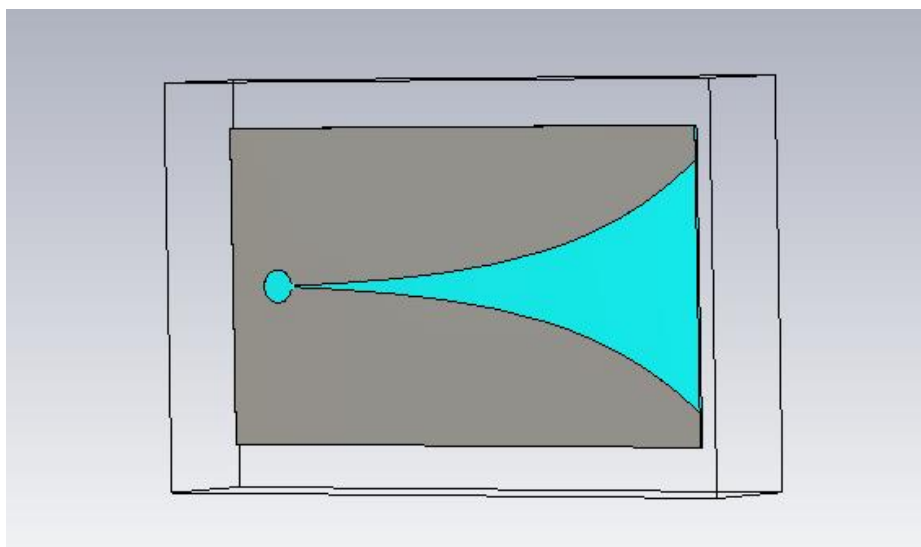


Рис. 2.3 – вимірювальний зонд у вигляді вівальді антени

У вимірювальних системах в ближньому полі як вимірювальний зонд може застосовуватися антена Вівальді. Вона належить до класу широкосмугових щілинних антен із плавним розкритом випромінювальної області. Її конструкція зазвичай виконується у вигляді металізованої структури на діелектричній підкладці, де випромінювання формується за

рахунок поступового розширення щілини. Завдяки такій геометрії антена забезпечує спрямоване випромінювання, стабільну поляризацію та роботу в широкому діапазоні частот.

Однією з основних причин використання антени Вівальді у вимірюваннях антен у ближньому полі є її широкосмуговість. На відміну від відкритого кінця хвилеводу, робочий діапазон якого обмежується параметрами конкретного хвилевідного перерізу, антена Вівальді може ефективно працювати в значно ширшій смузі частот. Це особливо важливо у випадках, коли необхідно досліджувати антену не на одній фіксованій частоті, а в певному частотному діапазоні.

Важливою перевагою антени Вівальді є її спрямована діаграма випромінювання. Завдяки плавному розкриву щілини електромагнітна хвиля поступово переходить із лінії живлення у вільний простір, що зменшує різкі неоднорідності та покращує узгодження. У результаті зонд краще приймає поле з боку досліджуваної антени та менше реагує на сигнали, які надходять із бокових напрямків або виникають унаслідок паразитних відбиттів від елементів вимірювального стенду.

2.4 Визначення параметрів радіопоглинаючого матеріалу

Радіопоглинаючий матеріал, або абсорбер, є важливим елементом вимірювальної системи, оскільки він зменшує вплив паразитних відбиттів електромагнітних хвиль від елементів стенду, фланців, кріплень та навколишніх поверхонь. Під час вимірювань у ближній зоні навіть незначні відбиття можуть спотворювати амплітудно-фазовий розподіл поля, що надалі впливає на точність відновлення діаграми спрямованості в дальній зоні. Використання абсорбера біля вимірювального зонда дозволяє зменшити бокове приймання та зробити результат вимірювання більш стабільним.

Основними характеристиками радіопоглинаючого матеріалу є робочий частотний діапазон, рівень відбиття, коефіцієнт поглинання, товщина, форма поверхні та електромагнітні параметри матеріалу. Найчастіше в НВЧ-вимірюваннях застосовують пірамідальні абсорбери, оскільки їхня форма

забезпечує поступове узгодження хвилі з матеріалом і зменшує відбиття від поверхні. Чим нижчий рівень відбиття абсорбера, тим краще він пригнічує небажані хвилі та тим менший його вплив на результати вимірювання. Тому в циліндричному методі вимірювань у ближній зоні застосування абсорбера підвищує точність і достовірність отриманих діаграм спрямованості.

Практично виміряли такі характеристики: діелектрична проникність та тангенс кута діелектричних втрат і отримали такі параметри, які будуть використовуватись в майбутніх обрахунках. При вимірах використовували 3 однакові зразки і брали середнє значення від результату вимірів.

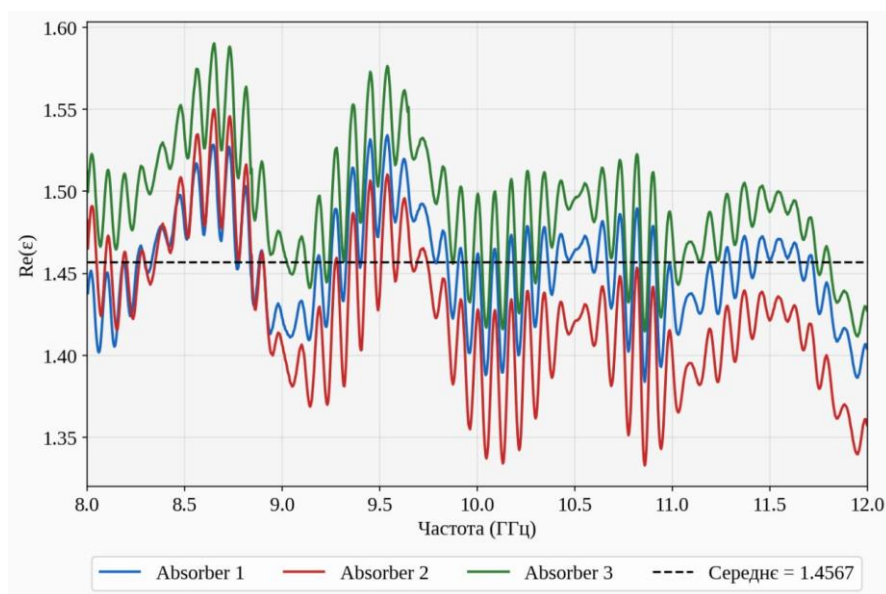


Рис. 2.4 – виміряні значення діелектричної проникності

На графіку наведено результати вимірювання діелектричної проникності радіопоглинаючого матеріалу для трьох зразків. Криві мають близький характер зміни, що свідчить про повторюваність властивостей матеріалу та можливість використання усередненого значення під час подальшого моделювання в CST Microwave Studio. Діелектрична проникність визначає, як електромагнітна хвиля поширюється всередині абсорбера, тому цей параметр безпосередньо впливає на ефективність поглинання та рівень відбиття.

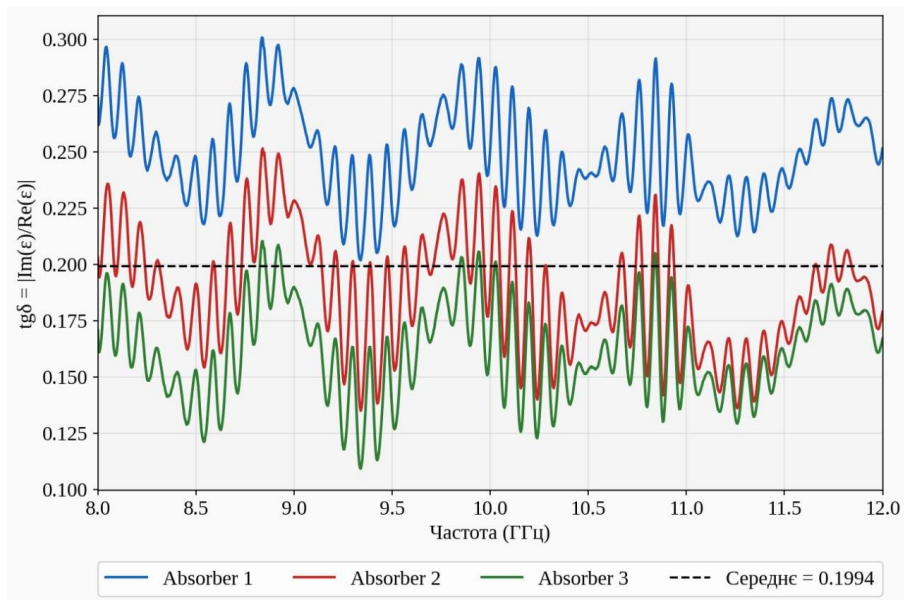


Рис. 2.5 – виміряні значення тангенсу кута діелектричних втрат

На графіку показано частотну залежність тангенсу кута діелектричних втрат для досліджуваного матеріалу. Цей параметр характеризує здатність матеріалу перетворювати енергію електромагнітної хвилі у теплові втрати. Чим більшим є тангенс кута втрат у робочому діапазоні, тим ефективніше матеріал послаблює паразитні хвилі. Отримані значення використовуються для задання

2.5 Порівняння характеристик різних зондів

Першим зондом виступає відкритий кінець хвилеводу

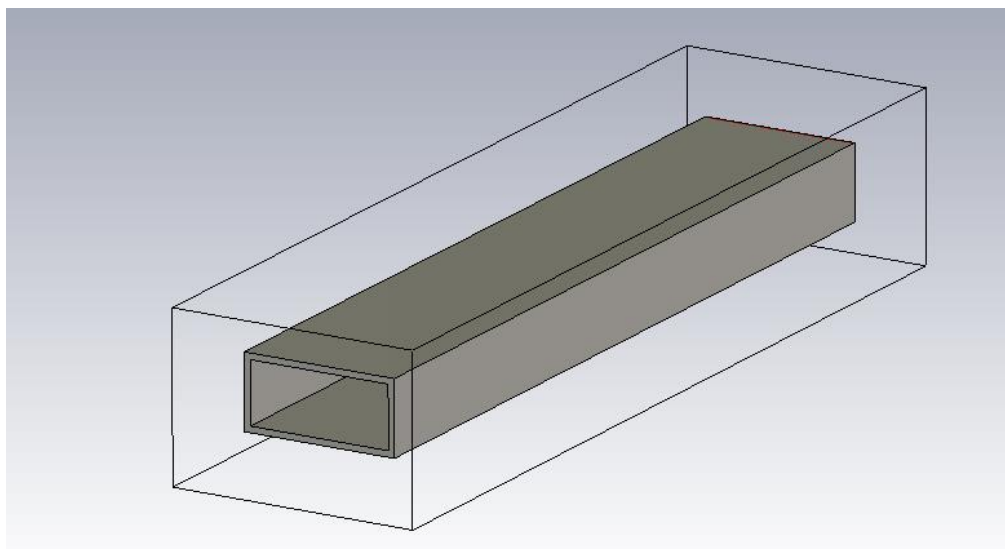


Рис. 2.6 – вимірювальний зонд у вигляді відкритого кінця хвилеводу

Наведена модель використовується як початковий варіант для подальшого порівняння. Відкритий кінець хвилеводу не має додаткового фланця або поглиначя, тому отримані для нього характеристики можна вважати базовими для оцінювання впливу подальших конструктивних змін.

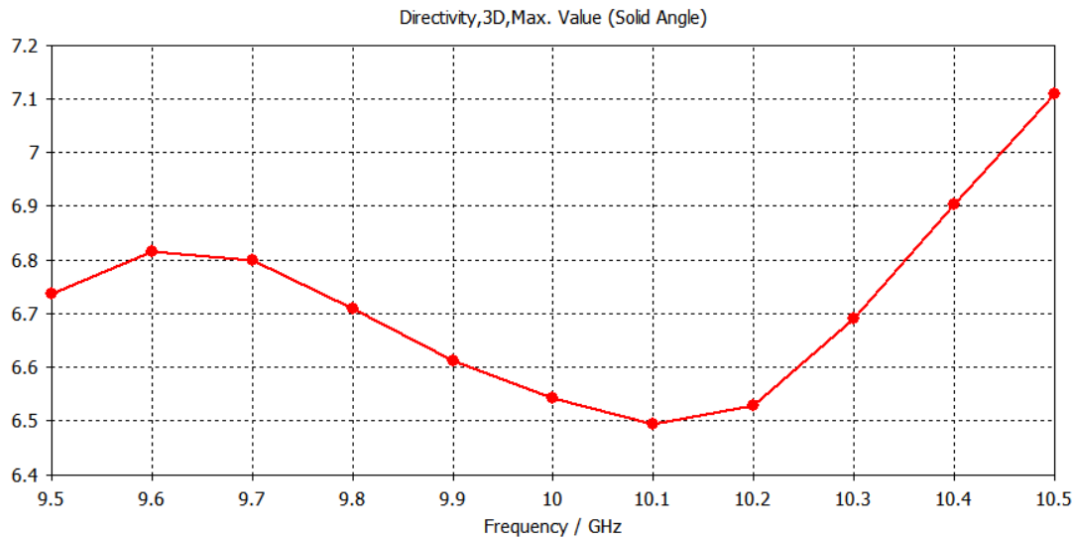


Рис. 2.7 – характеристика направленості відкритого кінця хвилеводу

На графіку показано просторову характеристику направленості відкритого кінця хвилеводу. За формою цієї характеристики можна оцінити, наскільки зонд є спрямованим і які напрями він приймає найефективніше. Для стенду вимірювань в ближньому полі це важливо, оскільки власна діаграма зонда впливає на зареєстрований амплітудно-фазовий розподіл поля [1].

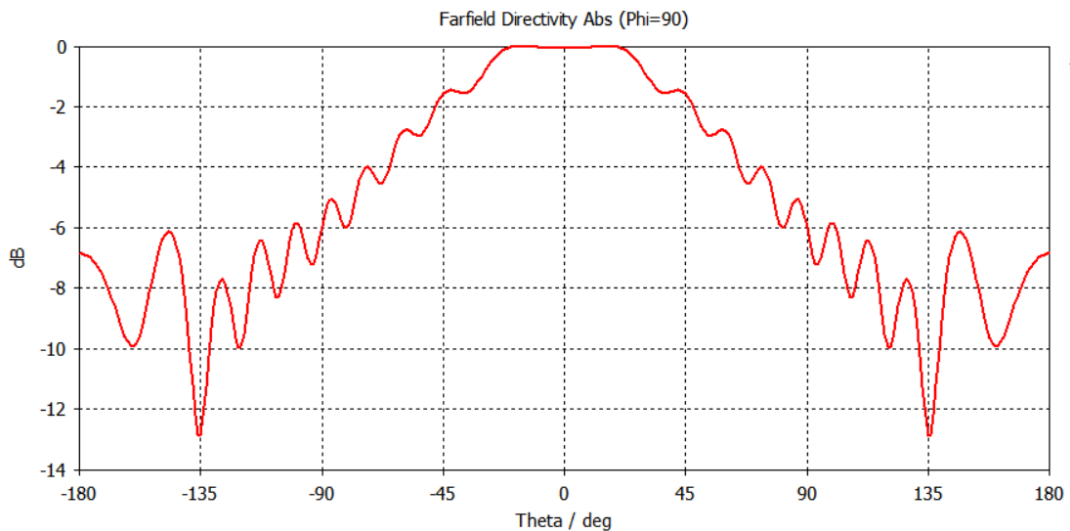


Рис. 2.8 – розріз діаграми спрямованості відкритого кінця хвилеводу по Phi

Цей розріз характеризує випромінювання зонда в площині $\Phi = 90^\circ$. За ним можна оцінити ширину основної пелюстки та рівень поля поза головним напрямком. Якщо бічні рівні є значними, такий зонд може сильніше приймати відбиті або небажані складові поля під час сканування.

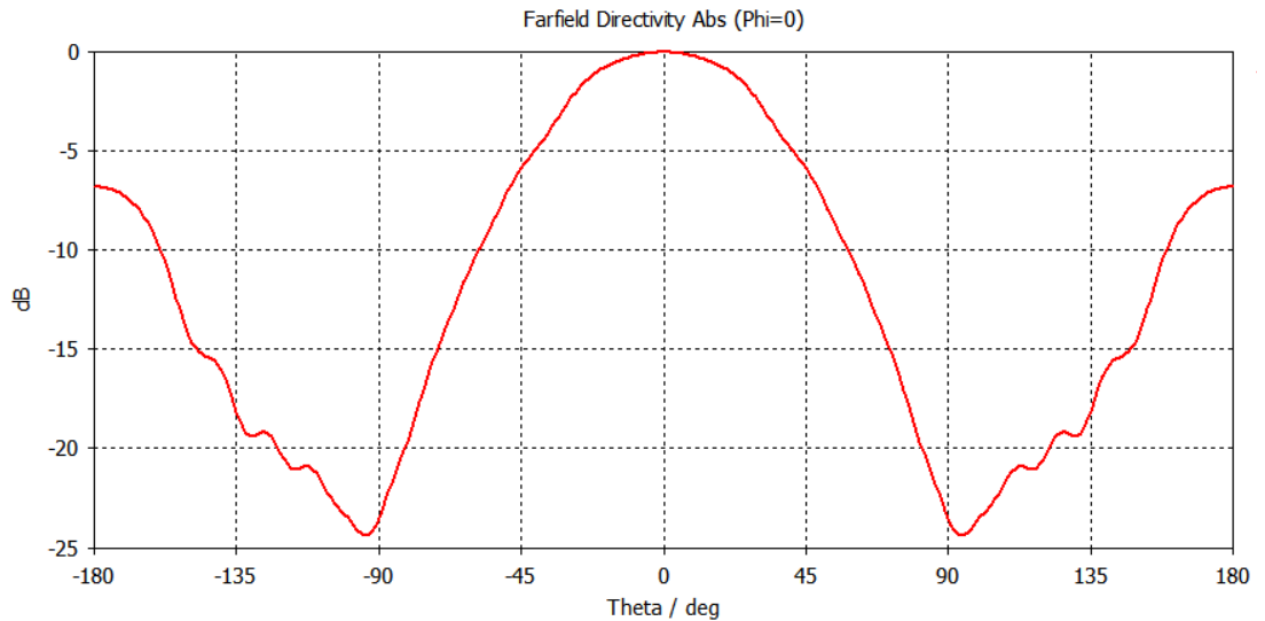


Рис. 2.9– розріз діаграми спрямованості відкритого кінця хвилеводу по $\Phi = 0$

На рисунку наведено ортогональний розріз для $\Phi = 0^\circ$. Його порівняння з попереднім розрізом дає змогу визначити, чи є характеристика зонда симетричною в основних площинах.

Другим зондом виступає класичний відкритий кінець хвилеводу з фланцем

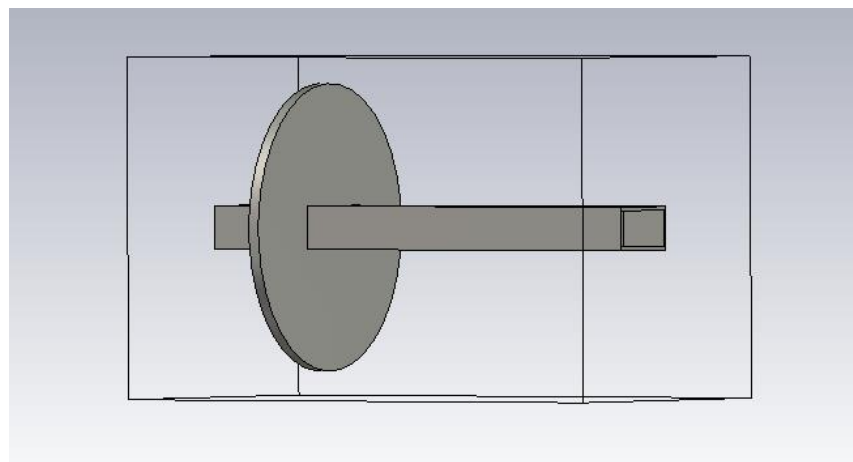


Рис. 2.10 – вимірювальний зонд у вигляді відкритого кінця хвилеводу з фланцем

На рисунку показано хвилевідний зонд із фланцем. Фланець змінює умови випромінювання біля апертури та може впливати на рівень крайової дифракції. З одного боку, він спрощує механічне кріплення хвилеводу, а з іншого – може додавати власні відбиття, які потрібно враховувати при аналізі результатів.

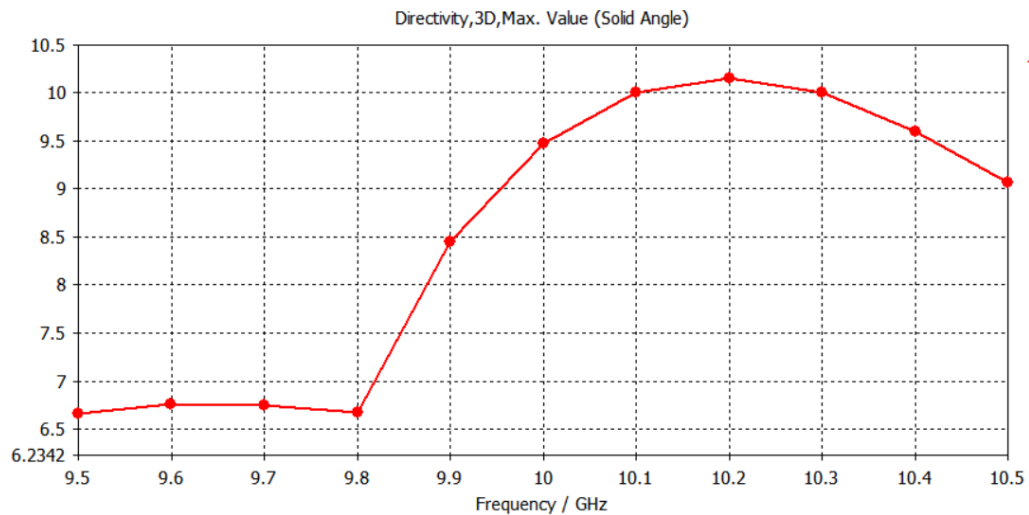


Рис. 2.11 – характеристика направленості відкритого кінця хвилеводу з фланцем

Характеристика направленості зонда з фланцем показує, як додаткова металева площина змінює просторовий розподіл поля. Такий графік потрібний для порівняння з відкритим хвилеводом без фланця та для оцінки того, чи покращує фланець стабільність основної пелюстки або, навпаки, підсилює небажані бічні складові.

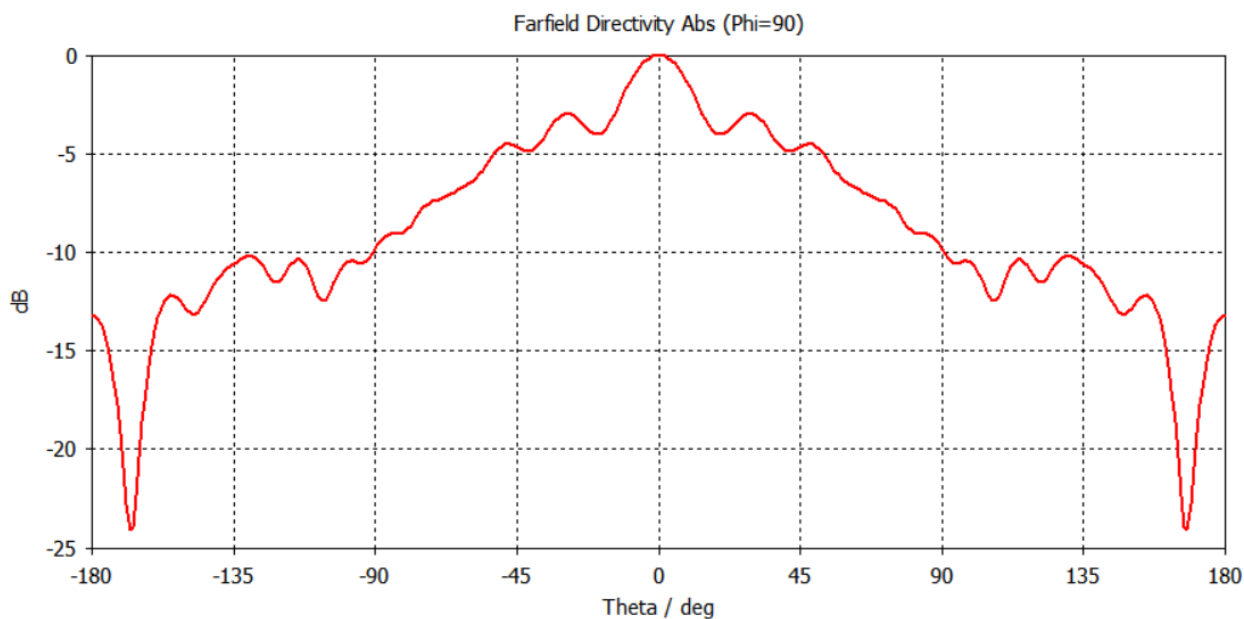


Рис. 2.12 – розріз діаграми спрямованості відкритого кінця хвилеводу по Φ 90

Розріз у площині $\Phi = 90^\circ$ демонструє вплив фланця на форму діаграми в одній з головних площин. За цим графіком можна оцінити зміну ширини основної пелюстки та появу додаткових максимумів, пов'язаних із відбиттям і дифракцією на металевих краях.

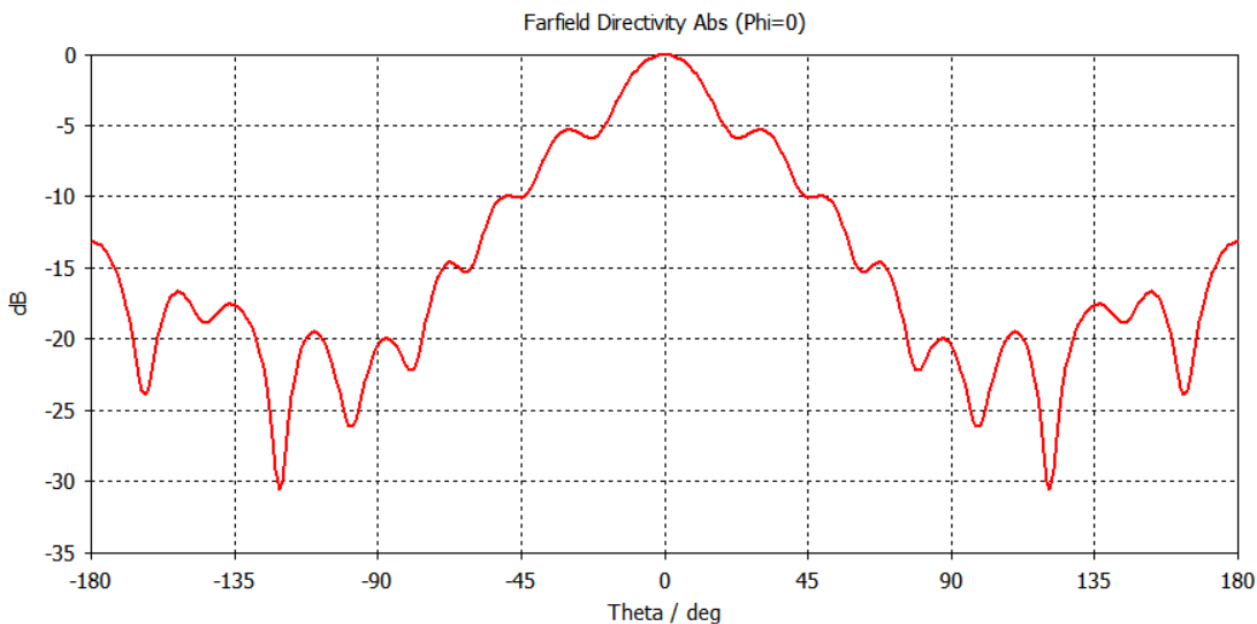


Рис. 2.13 – розріз діаграми спрямованості відкритого кінця хвилеводу по Φ 0°

Розріз у площині $\Phi = 0^\circ$ доповнює попередній аналіз і показує поведінку зонда в ортогональній площині.

Третім зондом виступає класичний відкритий кінець хвилеводу з фланцем з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 8 пірамід

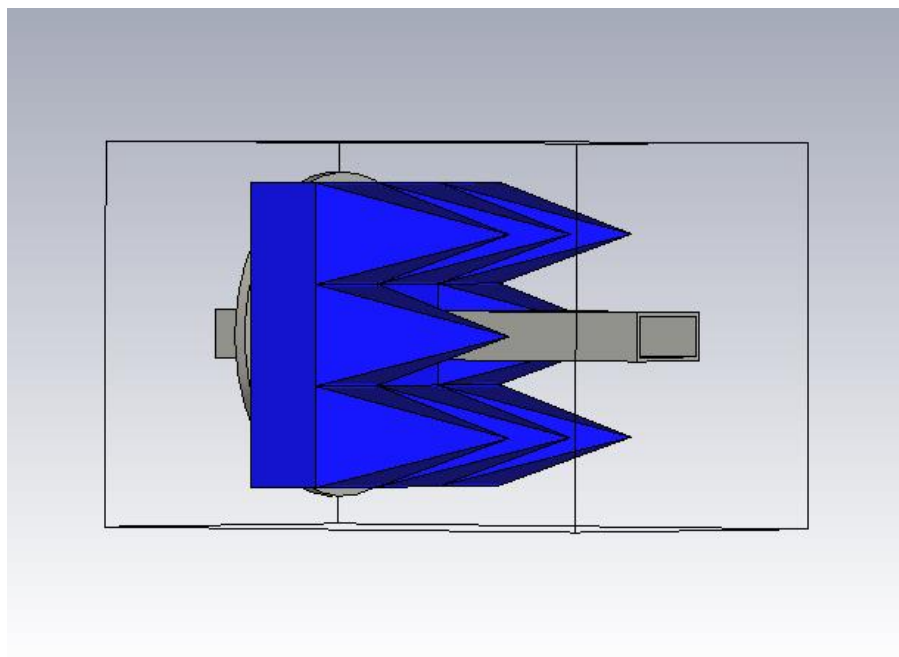


Рис. 2.14— вимірювальний зонд у вигляді відкритого кінця хвилеводу з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 8 пірамід

У цьому варіанті навколо хвилеводу розміщено вісім пірамід радіопоглинаючого матеріалу. Така конструкція спрямована на зменшення паразитного розсіювання поблизу апертури та часткове пригнічення хвиль, які можуть відбиватися від фланця або від елементів вимірювального стенду

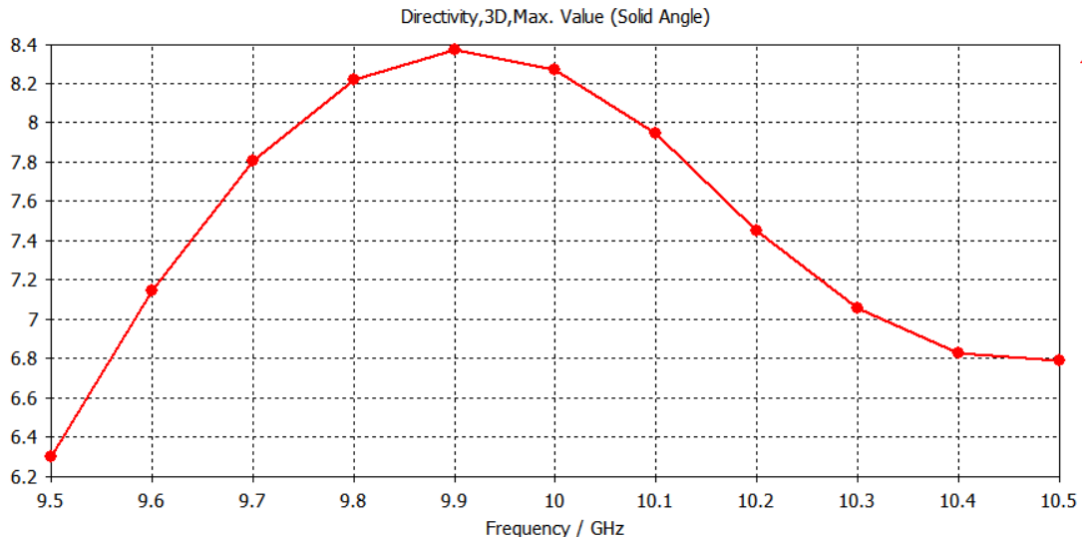


Рис. 2.15 – характеристика направленності відкритого кінця хвилеводу з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 8 пірамід

Просторова характеристика направленності для зонда з вісьмома поглинальними пірамідами дає змогу оцінити, наскільки додавання поглиначів змінює приймання з бокових напрямків. Зменшення небажаних пелюсток є корисним для вимірювань в ближньому полі, оскільки знижує вплив сторонніх відбиттів на виміряні дані.

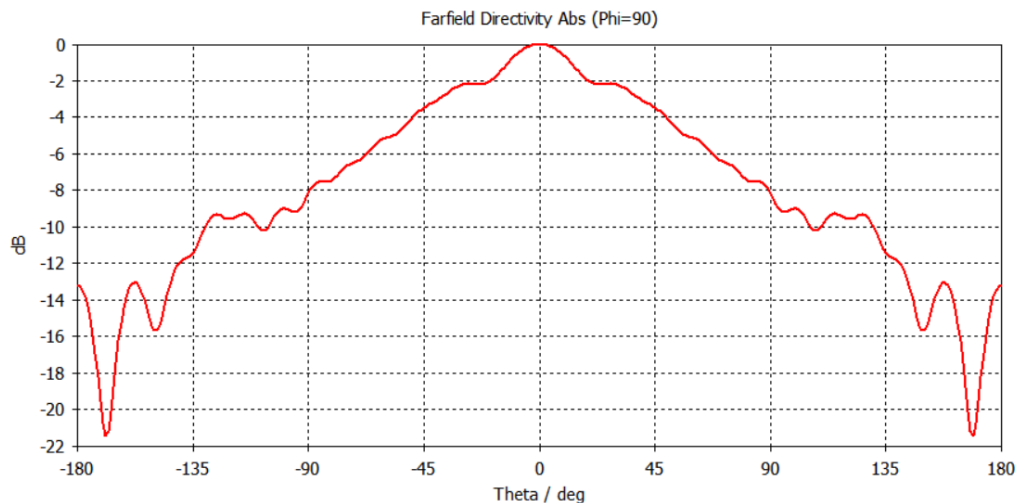


Рис. 2.16 – розріз діаграми спрямованості відкритого кінця хвилеводу з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 8 пірамід по $\Phi = 90^\circ$

Розріз у площині $\Phi = 90^\circ$ показує, як радіопоглинаючий матеріал впливає на основну пелюстку та бічні рівні. Якщо порівняно з попередніми

варіантами коливання кривої зменшуються, це свідчить про кращу локалізацію приймання зонда в основному напрямку.

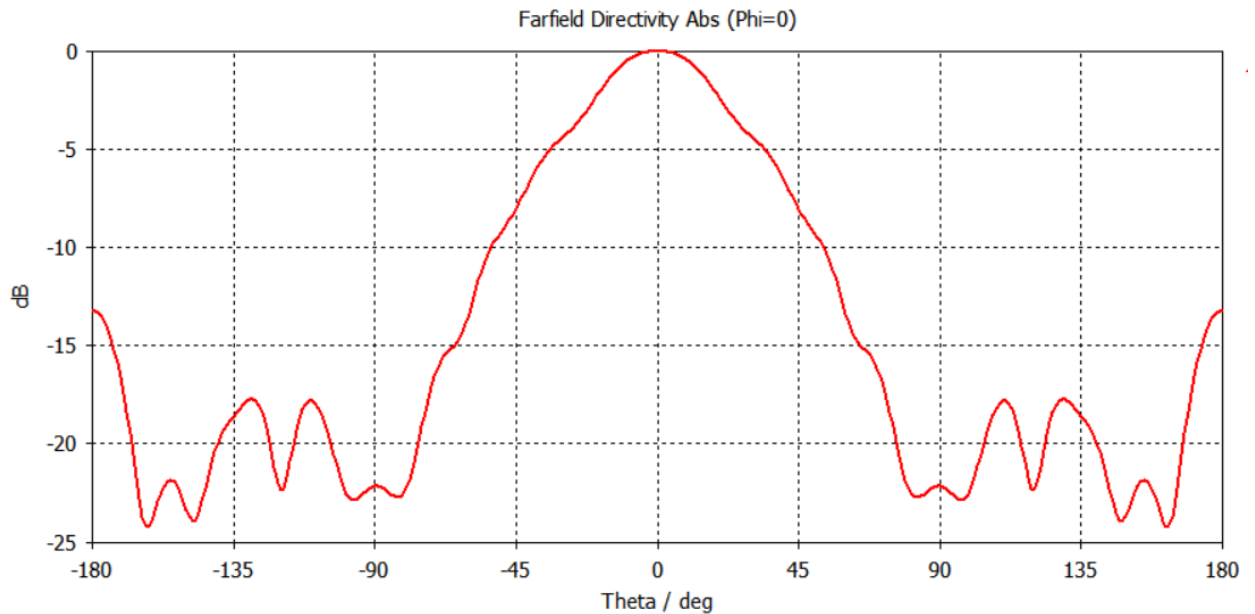


Рис. 2.17 – розріз діаграми спрямованості відкритого кінця хвилеводу з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 8 пірамід по $\Phi = 0^\circ$

Розріз у площині $\Phi = 0^\circ$ використовується для перевірки дії поглиначів в іншій головній площині. Такий аналіз є необхідним, оскільки поліпшення характеристики в одній площині не завжди означає аналогічне поліпшення в ортогональній площині.

Четвертим зондом виступає класичний відкритий кінець хвилеводу з фланцем з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 24 пірамід. На рисунку представлено варіант із більшою кількістю радіопоглинаючих пірамід. Збільшення області поглинання дозволяє сильніше екранувати небажані хвилі, однак водночас збільшує габарити зонда та може змінювати умови його розміщення відносно досліджуваної антени.

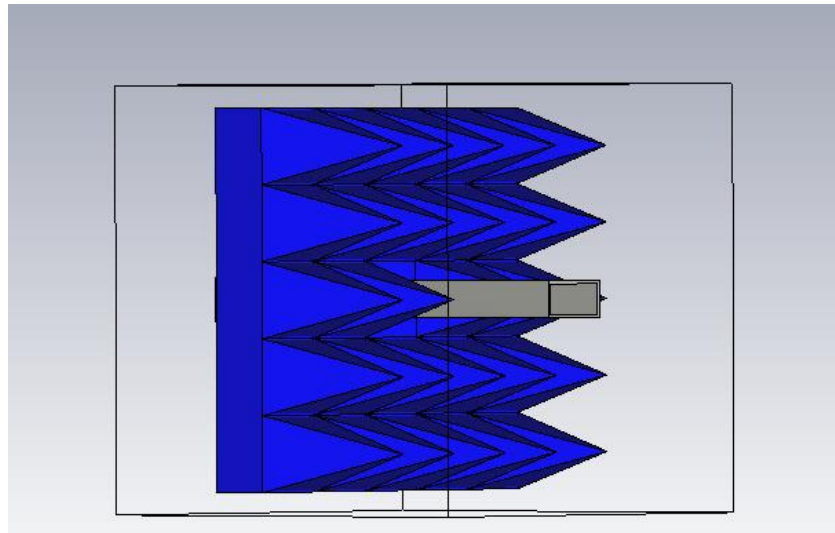


Рис. 2.18– вимірювальний зонд у вигляді відкритого кінця хвилеводу з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 24 пірамід

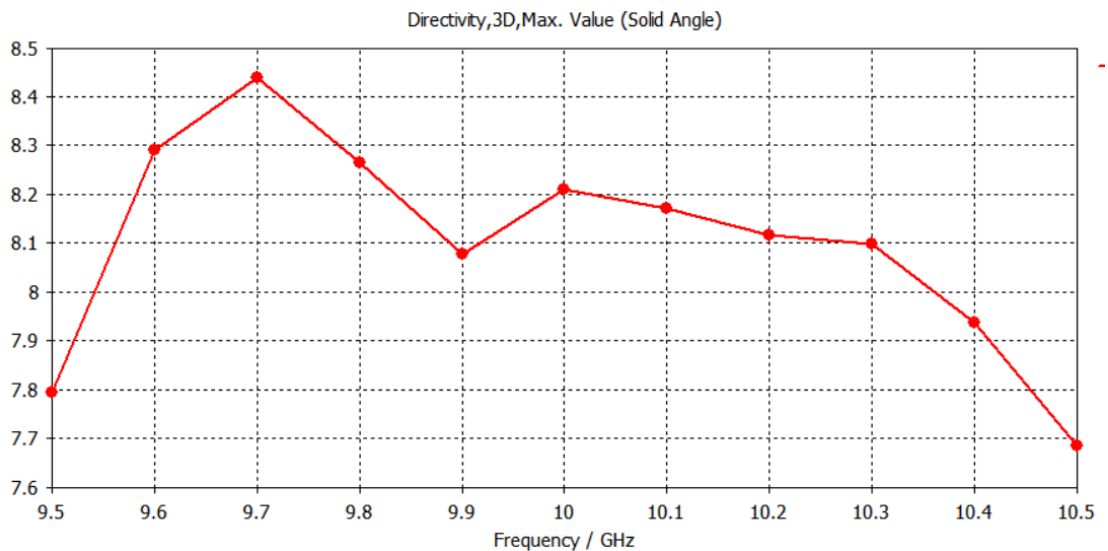


Рис. 2.19 – характеристика направленості відкритого кінця хвилеводу з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 24 пірамід

Характеристика направленості для варіанта з двадцятьма чотирма пірамідами показує вплив розширеної поглинаючої області. Такий графік дає змогу перевірити, чи справді збільшення кількості поглиначів покращує пригнічення бічного приймання, або ж ефект стає незначним порівняно з попереднім варіантом.

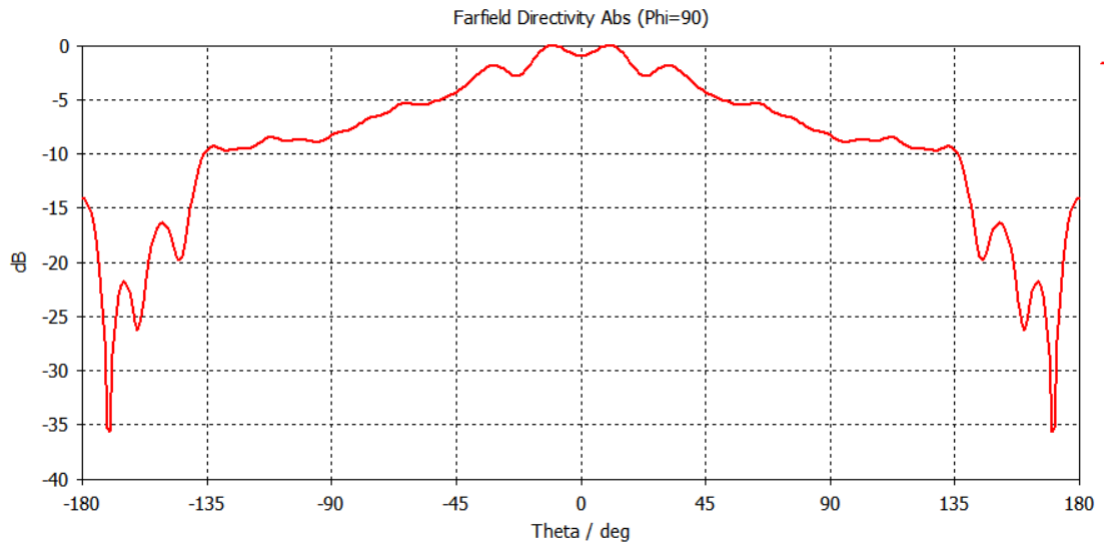


Рис. 2.20 – розріз діаграми спрямованості відкритого кінця хвилеводу з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 24 пірамід по $\Phi = 90^\circ$

Розріз у площині $\Phi = 90^\circ$ дозволяє оцінити, як збільшена кількість радіопоглинаючого матеріалу впливає на головну пелюстку. У вимірюваннях важливо, щоб поглинач зменшував паразитні складові, але не створював надмірного спотворення основного приймального напрямку.

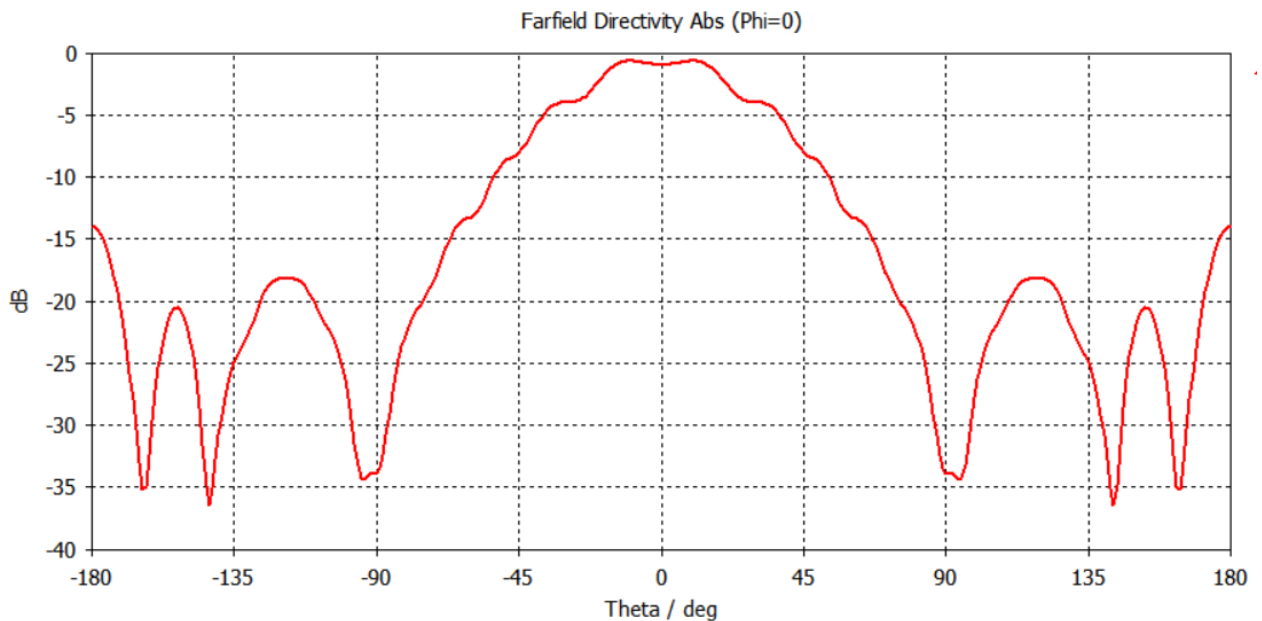


Рис. 2.21 – розріз діаграми спрямованості відкритого кінця хвилеводу з додаванням радіопоглинаючого матеріалу навколо хвилеводу в кількості 24 пірамід по $\Phi = 0^\circ$

Розріз у площині $\Phi = 0^\circ$ показує дію розширеного поглинача в ортогональній площині. Порівняння з попередніми розрізами дозволяє

визначити, чи є використання більшої кількості пірамід доцільним з погляду точності та складності конструкції.

На наступному рисунку показано порівняння всіх чотирьох зондів

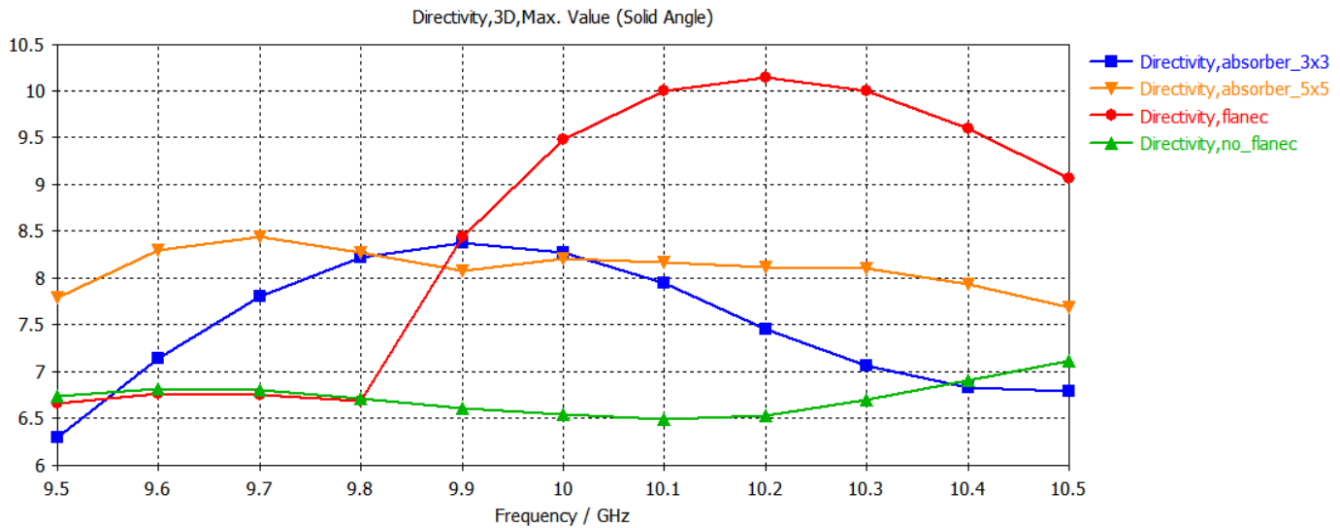


Рис. 2.22 – порівняння характеристики направленості різних зондів

На підсумковому графіку зведено характеристики направленості всіх розглянутих варіантів зондів. Таке порівняння дозволяє оцінити не тільки форму головної пелюстки, але й рівень бічного приймання. Саме ці параметри визначають, який зонд доцільніше використовувати для подальшого моделювання циліндричного стенду.

На наступних рисунках представлено накладені розрізи діаграм спрямованості зондів які перераховані вище

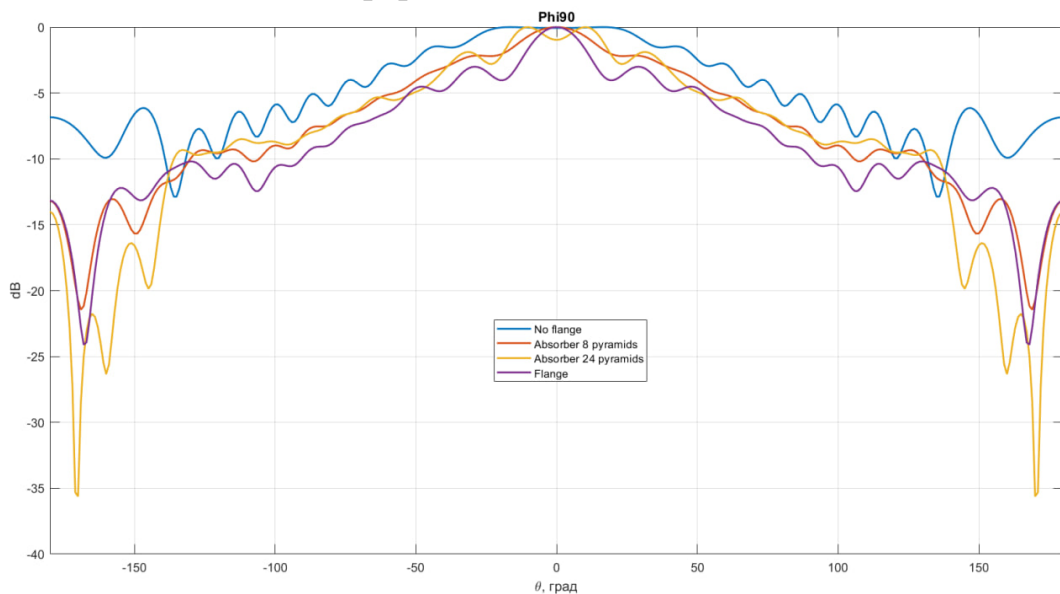


Рис. 2.23 – розрізи діаграм спрямованості по $\phi=0^\circ$.

На рис. 2.23 наведено порівняння нормованих розрізів для кількох варіантів вимірювального зонда у площині $\phi = 0^\circ$. Усі криві мають максимум поблизу $\theta = 0^\circ$, тобто основний приймальний напрям для всіх конструкцій зберігається однаковим. Водночас форма бічних ділянок помітно відрізняється. Відкритий кінець хвилеводу без додаткових елементів має ширшу характеристику та вищий рівень приймання на великих кутах, тому такий зонд сильніше реагує на поле поза основним напрямком. Фланець звужує головну пелюстку, але через металеві краї може створювати додаткові нерівномірності в області бічних пелюсток. Додавання радіопоглинаючого матеріалу зменшує паразитне приймання на периферії діаграми і робить характеристику більш придатною для контрольованого сканування ближнього поля.

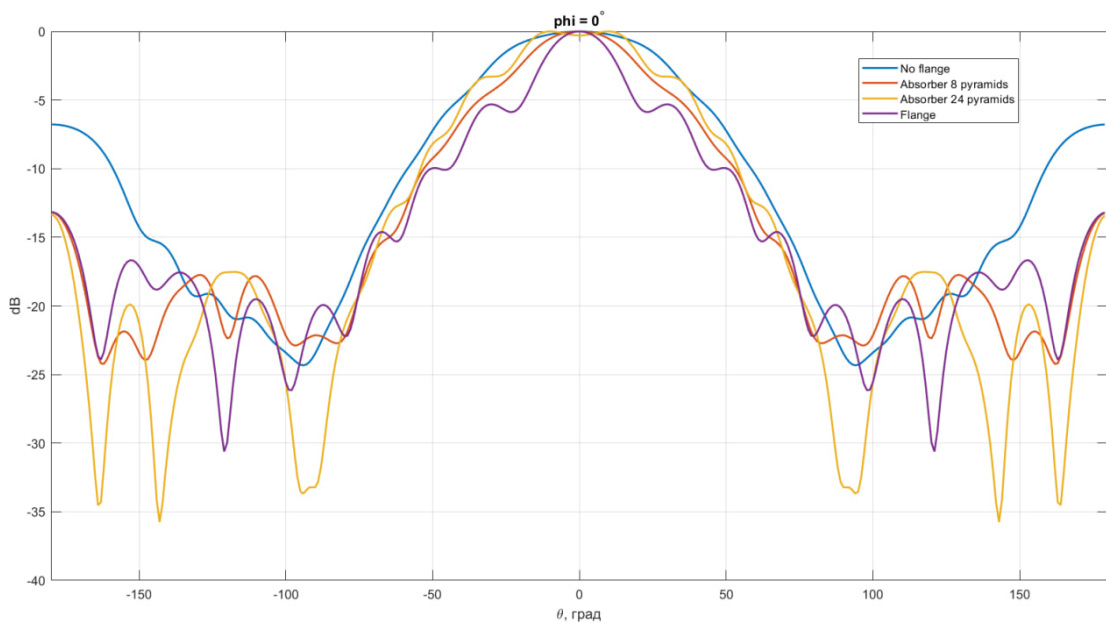


Рис. 2.24 – розрізи діаграм спрямованості по $\phi 90^\circ$

На рис. 2.24 показано аналогічне накладання розрізів у площині $\phi = 90^\circ$. У цій площині відмінності між зондами проявляються ще помітніше: варіант без фланця має вищий рівень бокового приймання на крайніх кутах, що може погіршувати точність вимірювання через більшу чутливість до відбитих хвиль. Варіанти з радіопоглинаючими пірамідами краще пригнічують небажані бокові складові, а тому зменшують вплив перевідбиттів від

елементів стенду та меж розрахункової області. Збільшення кількості поглиначів до 24 пірамід дає глибші провали в окремих бокових напрямках, однак така конструкція є складнішою та більш габаритною.

За результатами порівняння можна зробити висновок, що для циліндричного методу вимірювань у ближній зоні найбільш доцільним є використання відкритого кінця хвилеводу з радіопоглинаючим матеріалом. Такий зонд зберігає просту і стабільну хвилевідну апертуру, але має менший рівень паразитного приймання порівняно з відкритим хвилеводом без поглиначів. З практичної точки зору варіант з 8 пірамідами можна вважати оптимальним компромісом між точністю, простотою конструкції та габаритами. Варіант з 24 пірамідами доцільний тоді, коли головною вимогою є максимальне пригнічення бічних складових, однак для лабораторного стенду він може бути надмірно складним. Фланцевий зонд забезпечує більшу спрямованість, але металевий фланець може вносити дифракційні спотворення, тому його використання потребує точнішої зондової компенсації.

Порівняння впливу різних зондів в менших межах $0...90^\circ$

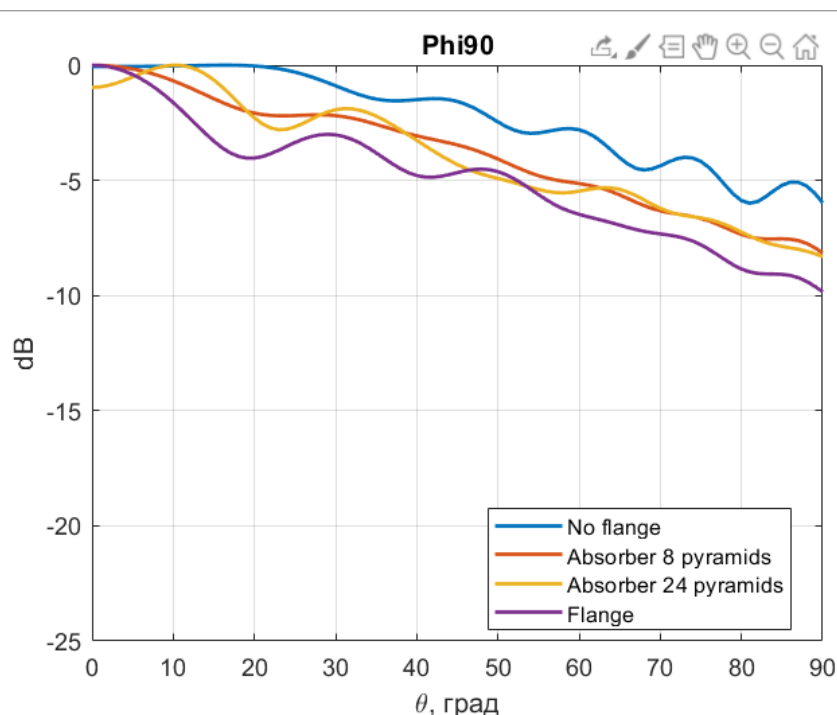


Рис. 2.25 – накладені розрізи діаграм спрямованості у площині $\phi = 90^\circ$ в межах $0...90^\circ$

На рис. 2.25 наведено накладені нормовані розрізи діаграм у площині $\varphi = 90^\circ$ для діапазону θ від 0° до 90° . Такий масштаб дає змогу детальніше оцінити не всю периферійну область діаграми, а саме спадання рівня від максимуму до бокових напрямків. Крива відкритого хвилеводу без фланця зменшується найповільніше, тому цей варіант має ширше приймання і може сильніше реагувати на відбиті складові поля. Фланцевий зонд забезпечує нижчий рівень на великих кутах, однак його характеристика має помітні нерівномірності, що може бути пов'язано з дифракцією на металевих краях. Варіанти з радіопоглинаючими пірамідами мають більш контрольоване спадання характеристики, тому краще обмежують приймання поля поза основним напрямком.

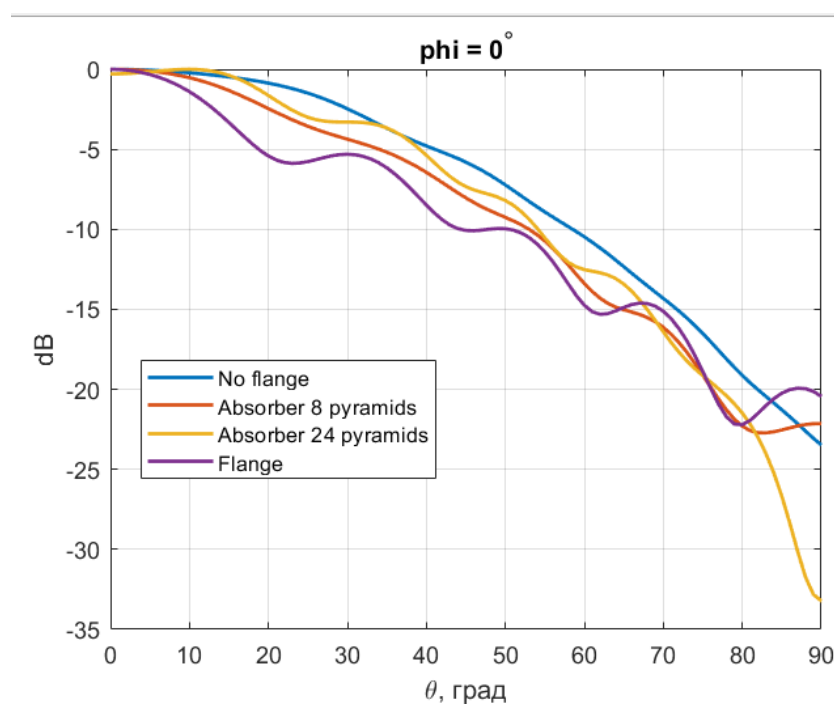


Рис. 2.26 – накладені розрізи діаграм спрямованості у площині $\varphi = 0^\circ$ в межах $0 \dots 90^\circ$

На рис. 2.24 показано аналогічне порівняння у площині $\varphi = 0^\circ$. У цьому розрізі різниця між конструкціями найбільш помітна на кутах понад $50\text{--}60^\circ$. Звичайний відкритий кінець хвилеводу зберігає порівняно високий рівень приймання на віддалених кутах, що небажано для стенду вимірювань в ближньому полі. Додавання радіопоглинаючого матеріалу зменшує рівень

бокових складових: варіант з 24 пірамідами забезпечує найглибше пригнічення на краю діапазону, проте має більші габарити. Варіант з 8 пірамідами дає помітне зниження бокового приймання без суттєвого ускладнення конструкції.

Отже, для циліндричного методу вимірювань у ближній зоні найкращим практичним вибором серед розглянутих варіантів є відкритий кінець хвилеводу з радіопоглинаючим матеріалом, насамперед конфігурація з 8 пірамідами. Вона зберігає стабільну хвилевідну апертуру, має передбачувану поляризацію, зменшує паразитне бокове приймання та не робить зонд надмірно габаритним. Конфігурація з 24 пірамідами може бути корисною для максимального пригнічення відбиттів, але для лабораторного циліндричного стенду її перевага не завжди компенсує збільшення розмірів і складності.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було виконано моделювання та порівняння різних вимірювальних зондів у середовищі CST Microwave Studio. Розглянуто відкритий кінець хвилеводу, відкритий кінець хвилеводу з радіопоглинаючим матеріалом та планарну антену Вівальді. Для кожного варіанта оцінювалися форма діаграми спрямованості, рівень бокового випромінювання, стабільність основної пелюстки та придатність до використання у циліндричному методі вимірювань у ближній зоні.

За результатами аналізу встановлено, що тип зонда помітно впливає на вигляд отриманих розрізів діаграми спрямованості. Відкритий кінець хвилеводу має просту конструкцію та стабільні параметри, однак без додаткового поглинального матеріалу він може приймати частину паразитних сигналів і формувати більші відхилення в області бокових пелюсток. Антена Вівальді забезпечує широку робочу смугу, проте її власна спрямованість і складніша форма випромінювання можуть сильніше впливати на результат вимірювання. Тому для точного сканування в ближньому полі такий зонд потребує уважнішого врахування власної діаграми.

Найбільш придатним для циліндричного методу вимірювань у ближній зоні в межах виконаного порівняння є відкритий кінець хвилеводу з радіопоглинаючим матеріалом. Додавання поглинача зменшує вплив небажаного бокового приймання та паразитних відбиттів, завдяки чому форма основної пелюстки на накладених діаграмах зберігається стабільнішою. При цьому варіант з помірною кількістю поглинальних елементів є більш практичним, оскільки забезпечує покращення характеристики без надмірного ускладнення конструкції.

Порівняння накладених діаграм у площинах $\varphi = 0^\circ$ та $\varphi = 90^\circ$ показало, що основна відмінність між зондами проявляється не стільки в положенні максимуму випромінювання, скільки в рівні бокових пелюсток і характері спадання діаграми за межами головної пелюстки. Це підтверджує, що під час циліндричного сканування важливо враховувати не лише характеристики досліджуваної антени, а й власні електродинамічні властивості вимірювального зонда. Отже, для подальших досліджень доцільно використовувати хвилеводний зонд з радіопоглинаючим матеріалом, оскільки він забезпечує більш стійкий результат і краще відповідає задачі відновлення діаграми спрямованості за даними ближнього поля

3. Моделювання циліндричного вимірювального стенду в CST Microwave Studio

3.1 Вибір та параметри вимірюваної антени

Як антену, що досліджується, обрано секторний рупор. Такий вибір є зручним для перевірки методу, оскільки рупорна антена має виражену головну пелюстку та передбачувану форму діаграми спрямованості. Це дає можливість наочно оцінювати положення максимуму, ширину головної пелюстки та рівень бічних пелюсток після обробки результатів

Робоча частота антени в моделі становить 10 ГГц. Довжина хвилі у вільному просторі визначається співвідношенням:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

де c - швидкість поширення електромагнітної хвилі у вільному просторі, f - робоча частота. Для частоти 10 ГГц отримуємо:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^9} = 0.03\text{м} = 30\text{мм} \quad (3.2)$$

Отримане значення використовується під час вибору кроку сканування, відстані між антеною та зондом, а також під час оцінки межі дальньої зони.

Орієнтовна умова дальньої зони для антени з найбільшим розміром D може бути записана у вигляді:

$$R_{FF} \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.4)$$

Ця умова показує, що необхідна відстань швидко зростає зі збільшенням розміру антени. Тому моделювання стенду в ближньому по в

CST дозволяє дослідити характеристики антени без потреби створювати велику модель дальньої зони.

На наступних рисунках представлений загальний вигляд та характеристики вимірюваної антени

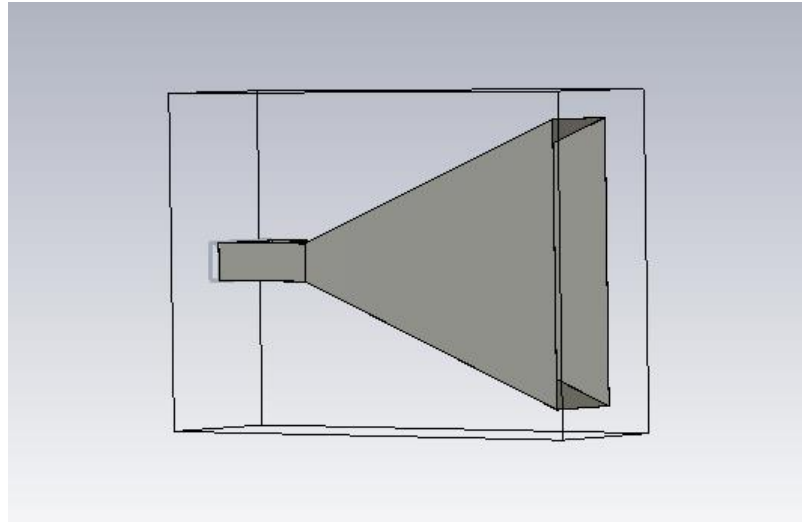


Рис. 2.3 – вимірювана антена

На рисунку показано модель секторної рупорної антени, яка використовується як досліджуваний випромінювач. Такий тип антени обрано тому, що рупор має виражений напрям максимуму та достатньо передбачувану форму діаграми спрямованості, що спрощує перевірку впливу різних зондів.

На наступних рисунках представлені розрізи ДС в різних площинах

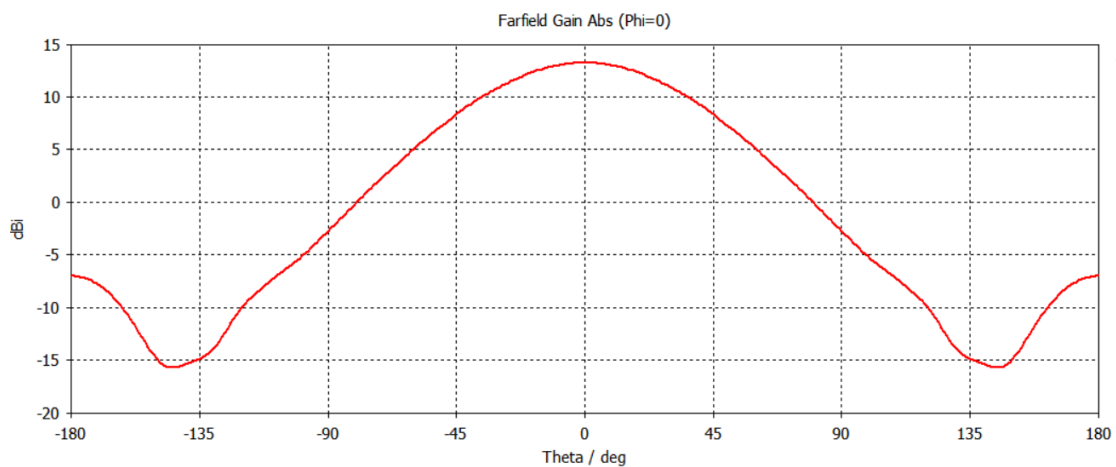


Рис. 2.4 – розріз діаграми спрямованості досліджуваної антени

Наведений розріз діаграми спрямованості демонструє форму випромінювання досліджуваної антени в одній з основних площин. За ним можна визначити напрям максимуму, ширину головної пелюстки та приблизний рівень бічного випромінювання, які надалі використовуються як орієнтир для порівняння результатів.

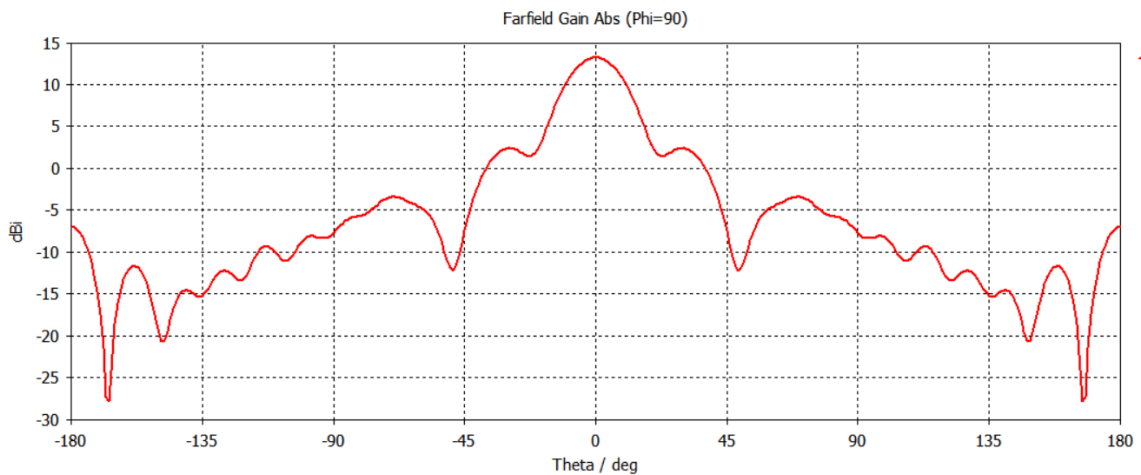


Рис. 2.4 – розріз діаграми спрямованості досліджуваної антени

Другий розріз діаграми спрямованості доповнює попередній графік і показує випромінювання антени в іншій площині. Для секторного рупора така перевірка є важливою, оскільки ширина пелюстки в різних площинах може відрізнитися через геометрію апертури.

3.2 Координати та параметри циліндричного сканування

У циліндричній системі координат положення точки сканування задається радіусом ρ , азимутальним кутом φ та вертикальною координатою z . Вимірюваний сигнал можна подати як функцію цих координат:

$$V = V(\rho, \varphi, z) \quad (3.5)$$

Сигнал V є комплексною величиною, тому містить інформацію про амплітуду і фазу. Саме фазова інформація є необхідною для коректного перерахунку ближнього поля в дальнє. У реальному стенді комплексний сигнал реєструється вимірювальною апаратурою, а в CST відповідна інформація отримується з результатів чисельного розрахунку.

Для дискретного сканування значення поля беруться не в усіх точках поверхні, а з певним кроком. Тому координати точок можна записати у вигляді:

$$\varphi_i = i\Delta\varphi, \quad z_j = z_0 + j\Delta z \quad (3.6)$$

де $\Delta\varphi$ – кутовий крок, Δz – крок за вертикальною координатою, i та j – номери точок сканування. Чим менший крок, тим точніше описується просторовий розподіл поля, але тим більшим стає обсяг даних і час розрахунку.

Для вертикального напрямку доцільно обирати крок, що не перевищує половини довжини хвилі:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2} \quad (3.7)$$

Оскільки для частоти 10 ГГц довжина хвилі дорівнює 30 мм, допустиме значення кроку за вертикальною координатою становить:

$$\Delta z \leq \frac{30 \text{ мм}}{2} = 15 \text{ мм} \quad (3.7)$$

Для кутового напрямку крок також повинен бути достатньо малим. Його можна пов'язати з радіусом області, яка охоплює антену, та довжиною хвилі:

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\rho'} \quad (3.7)$$

де ρ' – радіус найменшого циліндра, який охоплює антену. Якщо кутовий крок перевищує допустиме значення, то в азимутальному напрямку можуть виникати помилки дискретизації, які проявляються у вигляді спотворення діаграми спрямованості.

3.3 Моделювання системи вимірювань в CST Microwave Studio

На наступному рисунку зображено приклад циліндричної системи вимірювань, побудованої за допомогою ідеальних вимірювальних зондів

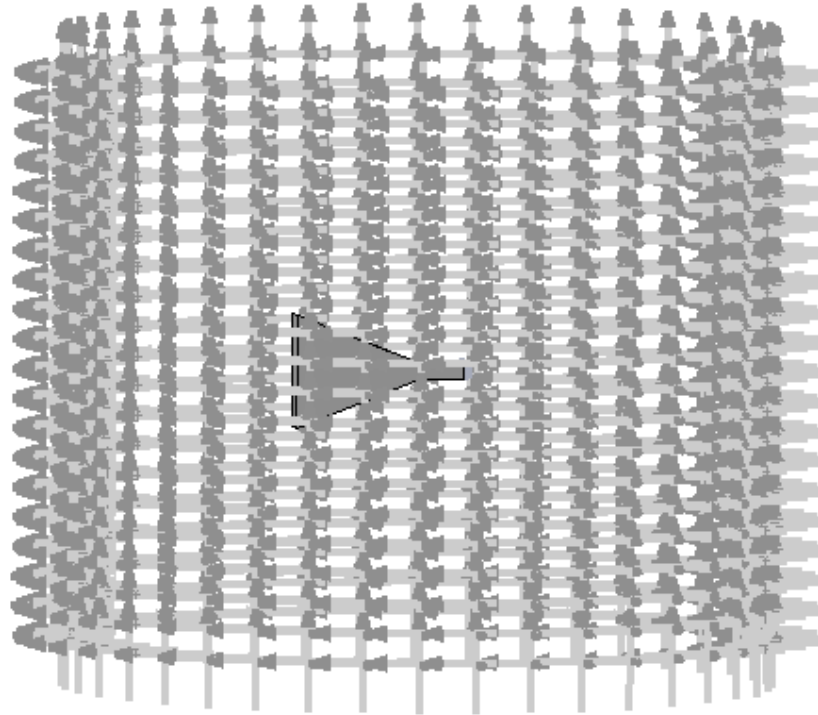


Рис. 3.1– приклад циліндричної системи вимірювань
Використовуючи дану систему вимірювань вдалось зняти розрізи
діаграми спрямованості по кутам $\Phi = 0^\circ$ та $\Phi = 90^\circ$

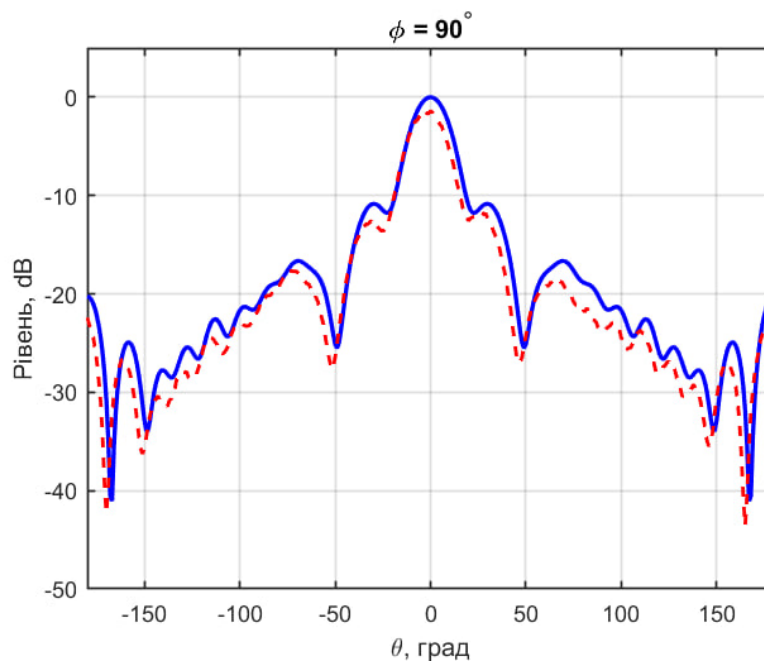


Рис. 3.2 – Відновлений розріз діаграми спрямованості при $\Phi = 90^\circ$

На рисунку 3.5 наведено порівняння розрізу діаграми спрямованості, отриманого після циліндричного сканування, з еталонною характеристикою. Основна пелюстка зберігає напрям максимуму поблизу $\theta = 0^\circ$, що підтверджує коректність вибраної геометрії сканування. Відмінності на великих кутах пов'язані з обмеженою кількістю точок вимірювання, дискретизацією за координатами ϕ та z , а також із впливом вимірювального зонда.

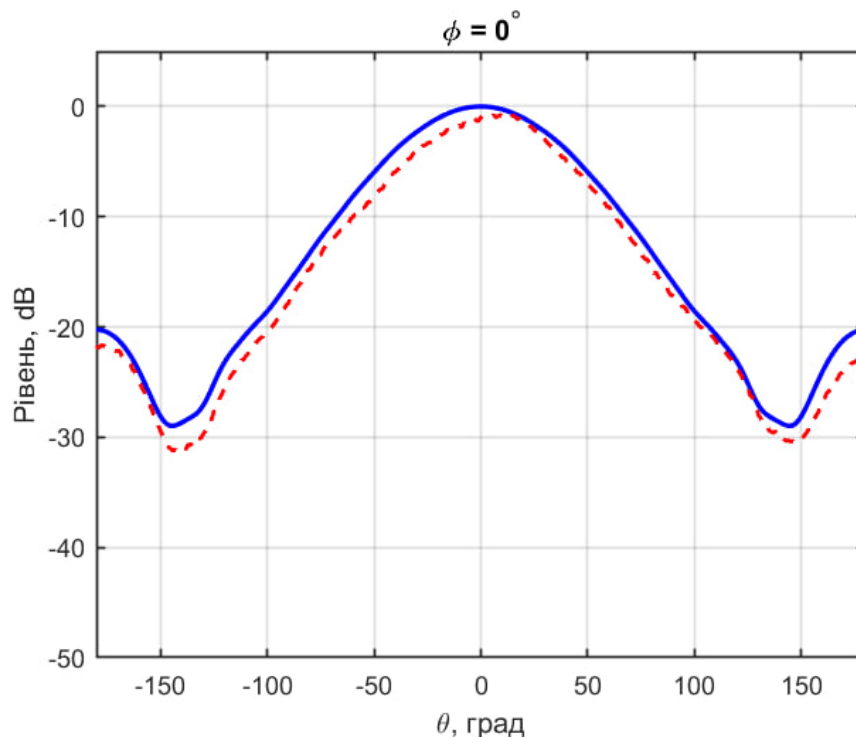


Рис. 3.6 – Відновлений розріз діаграми спрямованості при $\Phi = 0^\circ$

На рисунку 3.6 показано розріз діаграми спрямованості в площині $\phi = 0^\circ$. Порівняно з розрізом при $\phi = 90^\circ$, характеристика має більш плавну форму головної пелюстки та меншу кількість локальних коливань. Це пояснюється особливостями випромінювання секторної рупорної антени в різних площинах. Збіг положення максимуму та загальної форми кривих свідчить про можливість застосування циліндричного методу для відновлення основних параметрів діаграми спрямованості.

Отримані графіки показують, що циліндричне сканування дозволяє відновити форму діаграми спрямованості досліджуваної антени в основних площинах. Найкраще узгодження спостерігається в області головної пелюстки, тоді як у зоні бічного випромінювання похибка зростає. Це є

очікуваним результатом, оскільки слабкі рівні поля сильніше залежать від точності дискретизації, розміру області сканування та паразитних відбиттів у вимірювальній системі.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано моделювання циліндричного вимірювального стенду в CST Microwave Studio. Як досліджувану антену обрано секторний рупор, оскільки його діаграма спрямованості має виражену головну пелюстку та зручна для оцінювання точності відновлення поля.

Розглянуто вибір координат циліндричного сканування, а також параметри дискретизації за азимутальним кутом φ та вертикальною координатою z . Показано, що правильний вибір кроку сканування є важливою умовою коректного відновлення діаграми спрямованості, оскільки надмірно великий крок може призводити до просторового накладання спектральних складових і появи похибок у дальній зоні.

За результатами моделювання отримано розрізи діаграми спрямованості в площинах $\varphi = 0^\circ$ та $\varphi = 90^\circ$. Аналіз графіків показав, що циліндричний метод забезпечує правильне відновлення положення головної пелюстки та загальної форми випромінювання. Найбільші відхилення спостерігаються на великих кутах і в області бічних пелюсток, що пояснюється впливом дискретизації, обмеженістю області сканування та характеристиками вимірювального зонда.

Таким чином, побудована модель підтверджує доцільність використання циліндричного сканування для дослідження антен у ближній зоні та подальшого перерахунку результатів у дальню зону.

Висновки

У дипломній роботі досліджено точність відновлення діаграми спрямованості антен циліндричним методом вимірювань у ближній зоні. Розглянуто теоретичні основи вимірювань в ближній зоні, особливості циліндричної геометрії сканування, умови дискретизації та принципи перетворення ближнього поля у дальнє.

Показано, що вимірювання у ближній зоні є ефективною альтернативою прямим вимірюванням у дальній зоні, особливо для антен, для яких забезпечення умов дальньої зони потребує значної відстані або великої безехової камери. Циліндричний метод займає проміжне положення між планарним і сферичним скануванням: він забезпечує ширше кутове охоплення, ніж планарний метод, але залишається простішим у реалізації порівняно зі сферичним.

У середовищі CST Microwave Studio виконано моделювання та порівняння різних вимірювальних зондів. Встановлено, що форма зонда, наявність фланця та використання радіопоглинаючого матеріалу впливають на рівень паразитного приймання, форму діаграми спрямованості та стабільність результатів вимірювання. Використання абсорбера дозволяє зменшити вплив небажаних відбиттів і покращити просторову вибіркковість зонда.

У процесі моделювання циліндричного вимірювального стенду визначено основні параметри сканування та отримано розрізи діаграми спрямованості досліджуваної антени. Результати показали, що за правильного вибору кроку сканування та геометрії стенду циліндричний метод дозволяє коректно відновити положення головної пелюстки та загальну форму діаграми спрямованості.

Отже, поставлену мету роботи досягнуто: досліджено особливості циліндричного методу вимірювання антен у ближній зоні та проаналізовано чинники, що впливають на точність відновлення діаграми спрямованості. Отримані результати можуть бути використані під час побудови та оптимізації вимірювальних стендів для дослідження антен у ближньому полі.

Список використаних джерел

- [1] D'Agostino F., Ferrara F., Gennarelli C., Gennarelli G., Guerriero R., Migliozzi M. On the Direct Non-Redundant Near-Field-to-Far-Field Transformation in a Cylindrical Scanning Geometry. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2012.
- [2] Apriono C., Nofrizal, Firmansyah M. D., Zulkifli F. Y., Rahardjo E. T. Near-field to Far-field Transformation of Cylindrical Scanning Antenna Measurement Using Two Dimension Fast-Fourier Transform. 2017 15th International Conference on Quality in Research. 2017.
- [3] Han J. Y., Kang Y., Lee W. J., Kim Y. D. Efficient Far-Field Pattern Reconstruction using Infinitesimal Dipole Modeling from Cylindrical Near-Field Measurements for mm-Wave Antennas. *IEEE Access*. Accepted manuscript.
- [4] <https://www.mvg-world.com/en/products/antennas/measurement-probes-and-feeds/open-ended-waveguides>
- [5] <https://www.nsi-mi.com/products/antenna-products/broadband-ridged-probes>
- [6] 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>.
- [7] Gregson S., McCormick J., Parini C. *Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements*. — 2nd ed. — London: The Institution of Engineering and Technology, 2023.
- [8] *IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements*. — IEEE Std 1720-2012. — IEEE, 2012.
- [9] Foged L. J., Francis M. H., Rodriguez V. Update of IEEE Std 1720-2012 Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements // 2019 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA). — 2019. — P. 1–3. — DOI: <https://doi.org/10.23919/AMTAP.2019.8906313>.
- [10] Wang B. *Near-Field Measurement System for 5G Advanced Antenna System at mm-Wavelength*. — Lund University, 2022.
- [11] 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>.

[12] Kobayashi H., Yamaguchi Y., Cui Y. Simple Near-field to Far-field Transformation Method Using Antenna Array-factor // Journal of Wireless Networking and Communications. — 2012. — Vol. 2, No. 4. — P. 43–48. — DOI: <https://doi.org/10.5923/j.jwnc.20120204.03>.