

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

бакалавра

(ступінь вищої освіти)

на тему Антенна для технології MIMO

Виконав: студент(ка) 4 курсу, групи РТ-218сп
Спеціальності

172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Радіотехніка»

Баранов Віктор Андрійович

(прізвище та ініціали)

Керівник Бугрова Т.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кудерметов Р.К.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики та радіоелектроніки, ФРЕТ
 Кафедра Радіотехніка та телекомунікації
 Ступінь вищої освіти Бакалавр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) «Радіотехніка»
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри РТТ 
 к.т.н., доц. Морщавка С.В.
 « » червня 2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Баранова Віктора Андрійовича
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Антенна для технології МІМО

керівник проєкту (роботи) Бугрова Тетяна Іванівна, к.т.н. доцент,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «30»квітня 2021 року № 164

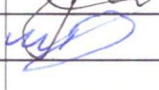
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 26 травня 2021 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Спроектувати антену за технологією
МІМО на базі антени AGATA MIMO 2x2 з застосуванням метаматеріалів.
Діапазон робочих частот 2,2...3,2 ГГц, коефіцієнт підсилення не менше 14 дБ

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд технології МІМО, метаматеріалів, вибор конструкції, аналіз у HFSS, отримання ДС, КСХ, коефіцієнтів відбиття, вхідного опору в смузі частот, порівняння різних проєктів, висновки щодо прийнятих рішень

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація роботи в Microsoft PowerPoint 14 слайдів

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-5	Бугрова Т.І, доцент		
			
Нормо-контроль	Мороз Г.В., ст. викладач		
			

7. Дата видачі завдання « 02 » квітня 2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

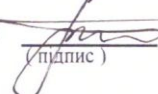
№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Технологія MIMO	1 тиждень	
2	Види метаматеріалів	2 тиждень	
3	Антенa AGATA MIMO 2X2	3 тиждень	
4	Покращення характеристик антени	4 тиждень	
5	Моделювання покращеної антени AGATA у HFSS	6 тиждень	
6	Написання ПЗ та підготовка презентації	6 тиждень	
7	Нормоконтроль. Антиплагіат	7 тиждень	
8	Захист ДП	7 тиждень	

Студент(ка)


(підпис)

Баранов В.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

Бугрова Т.І.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 54 сторінки, 33 рисунки, 6 таблиць, 7 джерел

Об'єкт – антена AGATA MIMO 2x2.

Мета – покращення характеристик антени AGATA MIMO 2x2 за рахунок використання у конструкції метаматеріалу.

Методи – чисельні, статистичні, методи інженерного проектування за допомогою сучасних САПР.

Основні результати – Антена реалізує технологію MIMO. Просторове рознесення відбувається внаслідок розсунення випромінювачів у просторі на відстань 90 мм, а поляризаційне – за рахунок використання вертикальної і горизонтальної поляризації.

Здійснено математичне моделювання в HFSS – одній з сучасних систем автоматизованого проектування. Отримано діаграми спрямованості антени в полярній та декартовій системах координат, частотні залежності модулів КСХ та коефіцієнта відбиття від входу антени, реальної та уявної частин вхідного опору.

Результати розрахунків підтверджують можливість досягнення мети – покращення характеристик антени - запропонованим способом.

MIMO, МЕТАМАТЕРІАЛ, ENG, MNG, DNG, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНOSTІ, БІЧНА ПЕЛЮСТКА, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ, КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ, КОЕФІЦІЄНТ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ, HFSS, ДІАГРАМА СМІТА, УЗГОДЖЕННЯ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
1 ТЕХНОЛОГІЯ МІМО	9
1.1 Принцип і концепція технології МІМО.....	9
1.2 Особливості технології МІМО при проектуванні базових і абонентських станцій в телекомунікаційних системах.....	11
2 ВИДИ МЕТАМАТЕРІАЛІВ ТА ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СЕРЕДОВИЩ.....	13
2.1 Класифікація середовищ по їх електрофізичних властивостях	13
2.2 Деякі конструктивні реалізації метаматеріалів.....	14
3 АНТЕНА AGATA МІМО 2Х2	18
3.1 Базова конструкція.....	18
3.2 Розміри та матеріали.....	20
4 ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНИ AGATA МІМО 2Х2 ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТАМАТЕРІАЛУ	22
4.1 Використовувані метаматеріали.....	22
4.2 Зміни в конструкції	24
5 МОДЕЛЮВАННЯ ПОКРАЩЕНОЇ АНТЕНИ AGATA МІМО 2Х2 У ПРОГРАМНОМУ ПАКЕТІ ANSYS HFSS	28
5.1 Моделювання базового варіанту	28
5.2 AGATA МІМО 2х2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури першої модифікації.....	36
5.3 AGATA МІМО 2х2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури другої модифікації	43
5.4 Порівняння характеристик спрямованості та узгодження антен всіх розглянутих конструкцій.....	47
ВИСНОВКИ.....	52
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	54

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДС	–	діаграма спрямованості
KCX	–	коефіцієнт стоячої хвилі
DDM	–	метод декомпозиції
DNG	–	Double negative material
DPS	–	Double positive material
HFSS	–	програма електромагнітного моделювання
MIMO	–	Multiple Input Multiple Output
ENG	–	Epsilon negative media
LTE	–	Long Term Evolution
MCE	–	метод кінцевих елементів
MNG	–	Magnetic negative media
Wi-Fi	–	Wireless Fidelity
WiMAX	–	Worldwide Interoperability for Microwave Access

ВСТУП

Одним із найважливіших компонентів систем бездротового зв'язку є антена. Існує велика кількість видів антен для мобільних і бездротових Інтернет мереж (рис. В.1).

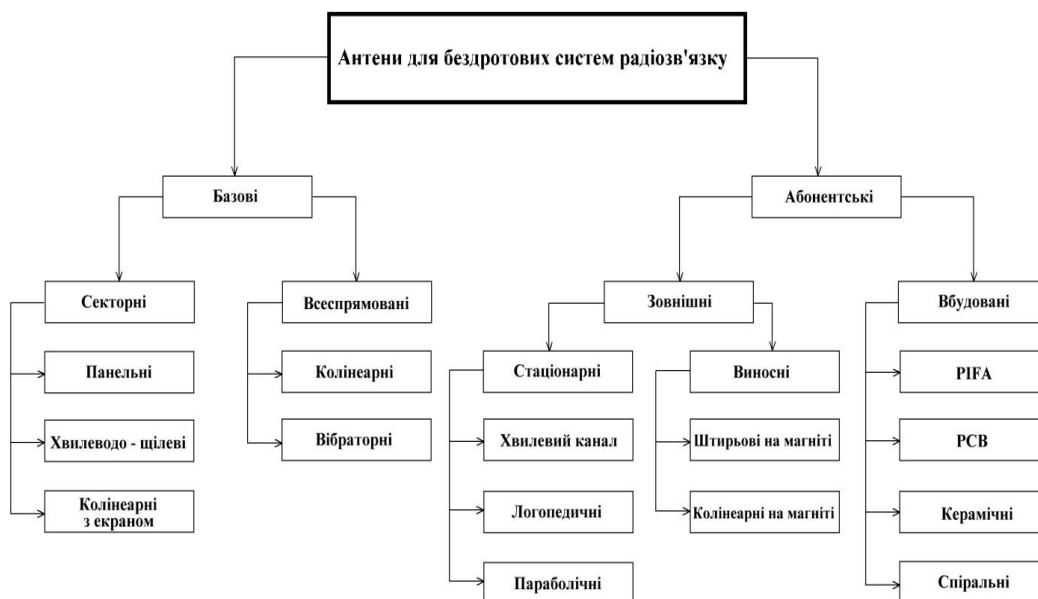


Рисунок В.1 – Види антен для бездротових систем радіозв'язку

У межах даної роботи нас цікавить антена AGATA MIMO 2x2 з використанням технології MIMO. Multiple Input Multiple Output (MIMO) технологія – це метод просторового кодування сигналу, який дозволяє збільшити якість каналу зв'язку, а також швидкість передачі інформації за рахунок рознесеного прийому і передачі. Передавальні і приймальні антени рознесені у просторі так, щоб досягнути мінімальної взаємодії між сусідніми антенами [2], [3].

Метаматеріал – це рукотворні, не існуючі в природі, спеціальним чином структуровані середовища на основі комбінації діелектриків та металів, які мають від'ємні електрофізичні параметри (діелектричну або магнітну проникність, або обидві одразу). У світі існує багато випадків

використання метаматеріалів для покращення характеристик антен. Наприклад, використання метаматеріалу у конструкції рупорної антени Х-діапазону дозволило збільшити ширину смуги пропускання до 12% за рівнем половинної потужності, і при цьому зменшити довжину рупора на 52%.

Актуальність розробки полягає в тому, що модернізується широко розповсюджений тип патч антен.

Наукова новизна полягає в застосуванні метаматеріалу нестандартної форми.

Практична корись виражається в тому, що поліпшуються технічні та масо-габаритні показники антени типу AGATA MIMO 2x2.

1 ТЕХНОЛОГІЯ MIMO

1.1 Принцип і концепція технології MIMO

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) – це принцип просторового кодування сигналу при якому прийом і передача сигналу відбувається з використанням декількох шляхів розповсюдження (антен), але одним фізичним каналом. Основою класичної технології є використання багатоантенної системи з багатьох передаючих і приймальних антен які працюють в одному фізичному каналі (рис. 1.1), при цьому утворюється багатопроменева система поширення радіохвиль.

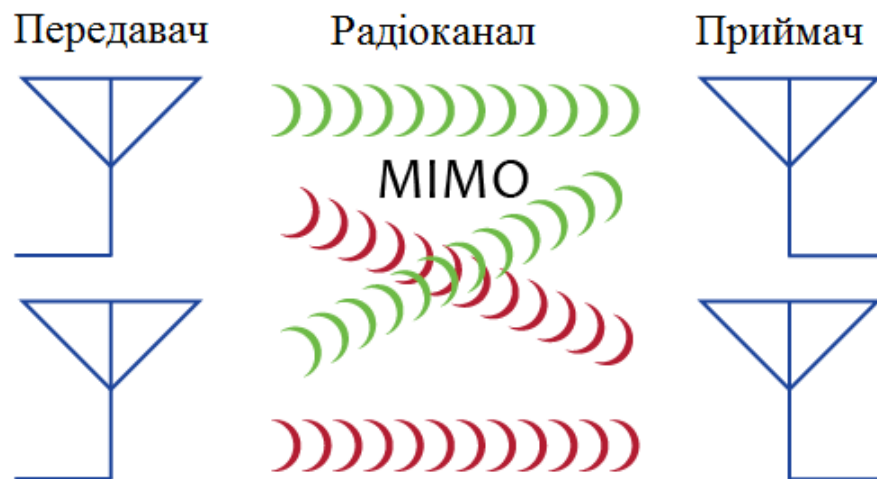
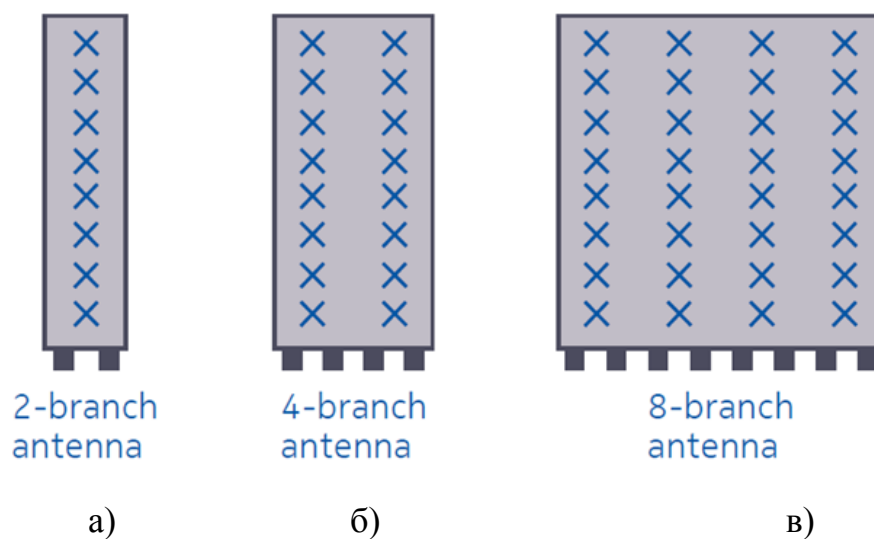


Рисунок 1.1 – Принцип функціонування MIMO системи

Велика кількість варіантів поширення сигналу в технології MIMO дозволяє суттєво покращити якість каналу зв'язку за рахунок боротьби з міжканальними завмираннями і перевідбиттям, а також покращення рівня сигнал-шум. Використання передачі з багатоканальним поширенням особливо актуально у місцевості міст де особливо висока проблематика багатопроменевого поширення сигналу. Часто у місті неможливо організувати прийом у межах прямої видимості, і до приймальної антени

приходять тільки перевідбиті сигнали з різними часовими затримками. При даній технології приймальні антени отримують сигнал з різних точок простору з різними його спотвореннями, що дозволяє далі провести порівняльний аналіз з метою виявлення дійсних значень прийнятого сигналу. Розділення точок прийому-передавання може проводитись як за рахунок використання багатьох антен, так і за рахунок використання різних видів поляризації (вертикальна, горизонтальна), але найчастіше ці методи комбінують.

Найбільш поширеним є використання MIMO технології у WiFi, та WiMAX де його використовують у стандартах: 802.11n, 802.11g, 802.16e, 802.16m. Також існує досить високий рівень використання MIMO в LTE мережах. На рисунку 1.2 представлені приклади крос-поляризаційних антен на 2, 4 та 8 MIMO каналів.



- а) на 2 канали MIMO за рахунок поляризації,
 б), в) 4 та 8 каналів MIMO за рахунок поляризації і рознесення елементів
 антенної решітки

Рисунок 1.2 – Приклади типових крос-поляризаційних антен з
 MIMO технологією

В даній роботі використана MIMO антена з просторовим розділенням за рахунок розділення прийому і передачі за видом поляризації (вертикальна, горизонтальна). Це дозволяє розглядати задану антену як систему із двох об'єднаних антен. Практично з'ясовано, що різниця в швидкості при використанні звичайної антени і MIMO антени складає 20-25% [1].

1.2 Особливості технології MIMO при проектуванні базових і абонентських станцій в телекомунікаційних системах

На рисунку 1.3 показано зовнішній вигляд деяких конструкцій MIMO антен.

До головних переваг відноситься можливість поліпшення пропускної здатності, не розширюючи при цьому смугу займаних частот. Пристрій одночасно роздає кілька потоків інформації по єдиному каналу.

Якість переданого сигналу і швидкість передачі даних поліпшуються за рахунок кодування даних на передавальному кінці і подальшого відновлення (декодування) їх на приймальній стороні.



a)



б)

а) «стріла» з поляризаційним рознесенням;

б) панельна «патч» антена з 2 входами і 2 виходами

Рисунок 1.3 – MIMO антени

Частіше за все технологія MIMO використовується для передачі і прийому сигналів мобільного інтернету, для передачі даних за протоколом Wi-Fi. Розглянемо як приклад протокол 802.11n, в ньому за рахунок використання згадуваної технології можна отримати швидкість передачі даних до 350 Мегабіт/с.

2 ВИДИ МЕТАМАТЕРІАЛІВ ТА ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СЕРЕДОВИЩ

2.1 Класифікація середовищ по їх електрофізичних властивостях

Загалом в залежності від значення діелектричної (ϵ), а також магнітної (μ) проникності усі середовища можна розділити на 4 види (рис. 2.1):

- а) матеріали DPS-типу ($\epsilon > 0, \mu > 0$);
- б) матеріали ENG-типу ($\epsilon < 0, \mu > 0$);
- в) матеріали MNG-типу ($\epsilon > 0, \mu < 0$);
- г) матеріали DNG-типу ($\epsilon < 0, \mu < 0$).



Рисунок 2.1 – Класифікація фізичних середовищ в залежності від значення діелектричної (ϵ), і магнітної (μ) проникності, і характеру їх впливу на електромагнітну хвилю

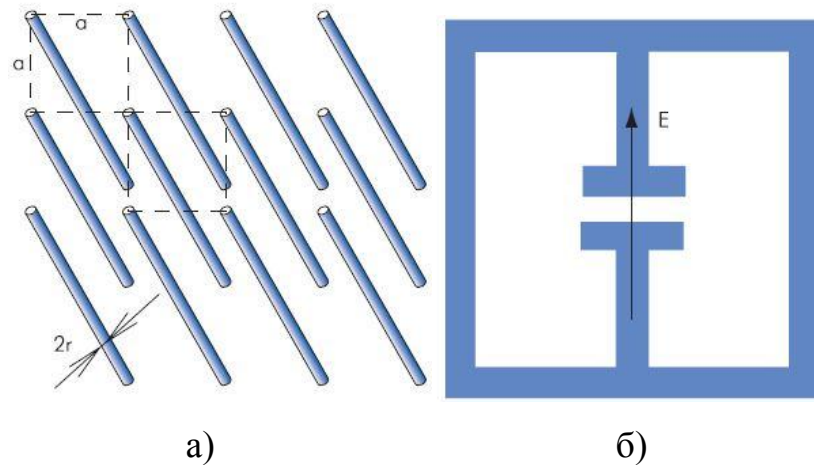
Майже всі натуральні природні речовини мають додатну діелектричну і магнітну проникність. Для більшості з них, а особливо найбільш цікавих з практичної точки зору значення ці значення взагалі більші або рівні одиниці. Такі середовища зазвичай називають діелектриками, або DPS-матеріалами [1].

Інші три види матеріалів не існують в природі, але існує можливість отримання середовищ з даними параметрами в певному діапазоні частот у вигляді регулярних періодичних структур. Причому ці структури можуть мати як 2D так і 3D конструкцію. Вплив даних структур полягає в тому, що завдяки їх наявності покращується ступінь узгодження вхідного опору антени з хвилевим опором лінії живлення. Завдяки наявності метаматеріалу вся конструкція в цілому стає більш високочастотною, тобто, з'являється можливість зменшити габарити та масу антени.

2.2 Деякі конструктивні реалізації метаматеріалів

Метаматеріалами ENG-типу являються матеріали у яких $\epsilon < 0$, а $\mu > 0$. Зазвичай ці матеріали можуть бути як радіопрозорими, так і радіонепрозорими, в залежності від довжини хвилі збудження. Прикладом даного середовища є плазма, для якої існує критична довжина хвилі. Довші за критичну хвилі не можуть розповсюджуватись в середовищі через зникнення радіопрозорості середовища.

Серед штучних матеріалів можна розглядати як метаматеріал систему із тонких металевих провідників (рис. 2.2, а), або систему із набору розімкнутих індуктивних кілець (рис. 2.2, б) [1,4].



а) з тонких металевих провідників,

б) на основі розімкнутих індуктивних кілець

Рисунок 2.2 – Приклади структури метаматеріалу ENG-типу

Метаматеріалами MNG-типу являються матеріали, у яких $\epsilon > 0$, а $\mu < 0$. Структура таких штучних середовищ представляє собою набір тонких вкладених один в один металевих циліндрів, рулонних структур типу "рулет", або плоских вирізок з нього, різні вкладені кільця, Ω -подібні або прямокутні рамки (рис. 1.3) [1,4].

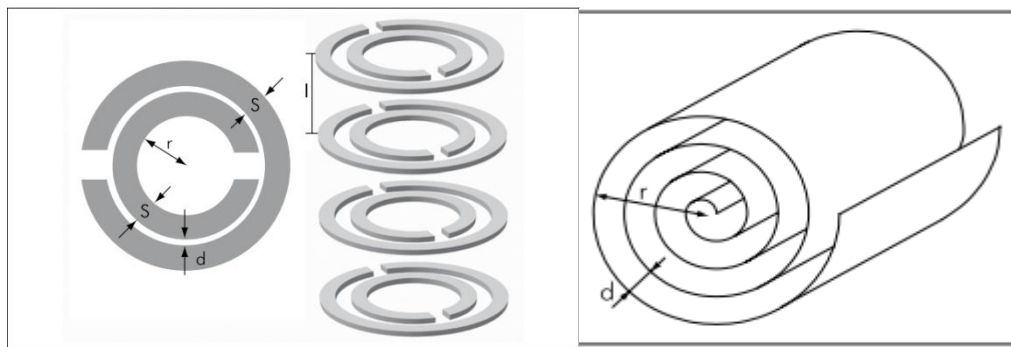


Рисунок 2.3 – Приклади структури метаматеріалу MNG-типу

Розглянемо приклад розрахунку параметрів MNG – структури, зокрема встановимо зв'язок між геометрією кільця – його радіусом r , товщиною s (рис. 2.4, б) та ефективною магнітною проникністю метаматеріалу μ_{eff} . З рис. 2.4, а очевидно, що для отримання MNG властивостей треба знаходитись в інтервалі частот:

$$\omega_0 < \omega < \omega_{mp}.$$

Так звана гранична «плазмова частота», яка відповідає нульовій ефективній магнітній проникності, визначається за формулою:

$$\omega_{mp} = \sqrt{\frac{3dc^2}{\pi^2 r^3 (1 - \frac{\pi r^2}{a^2})}}.$$

З цієї та попередньої формул можна знайти геометричні розміри елементів MNG – структури.

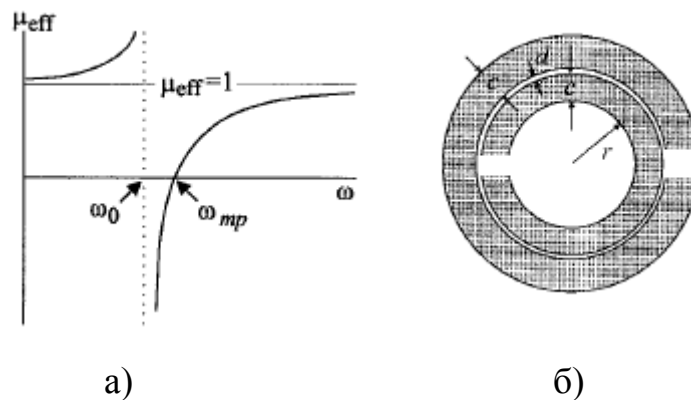


Рисунок 2.4 – Частотна залежність ефективної магнітної проникності μ_{eff} для магнітодіелектриків (а) та геометрія елементу MNG – метаструктури (б)

Так звана частота ядерного магнітного резонансу, яка визначає розрив першого роду в частотній залежності магнітної проникності (рисунок 2.4, а), визначається за формулою:

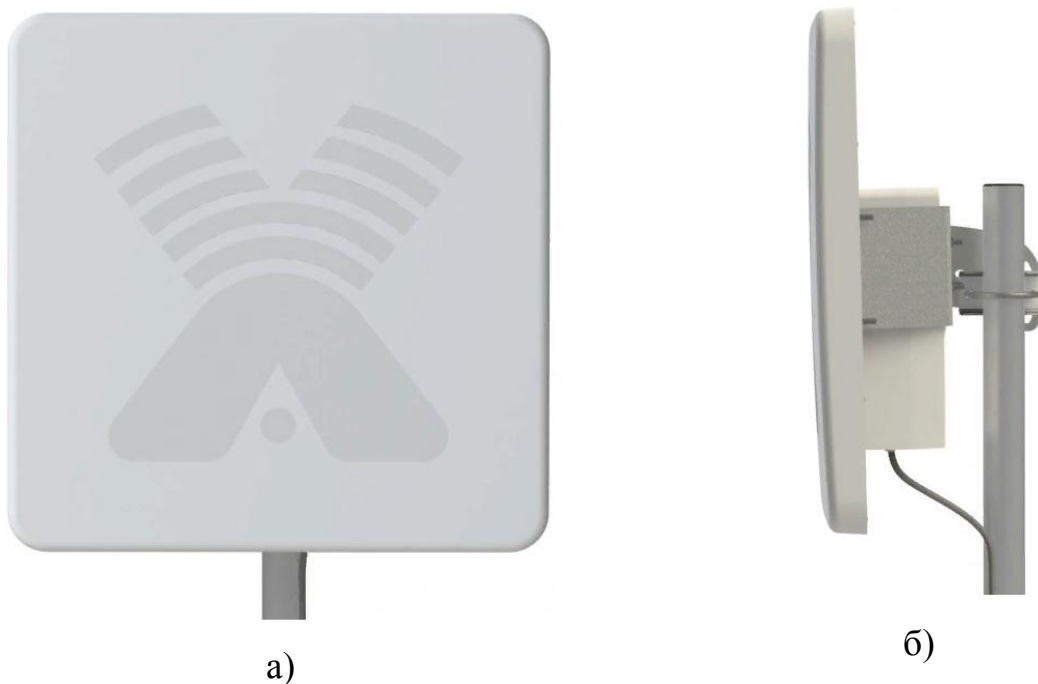
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3dc^2}{\pi^2 r^3}}.$$

Метаматеріалами DNG-типу являються матеріали у яких $\epsilon < 0$, $\mu < 0$. Даний матеріал було отримано відносно нещодавно. Прогнозується, що використання даного матеріалу також є перспективним, але на даний час це неможливо через велику дисперсію і поглинання отриманих зараз DNG середовищ [1,4]. Поява способу легкого виготовлення цих середовищ у вигляді метаматеріалів надає можливість для їх використання при побудові антен. На відміну від вже відомих конструкцій з використанням метаматеріалів, особливість цієї роботи полягає у використанні метаматеріалу в антені MIMO типу. Поки що ці антени використовуються для 3G-4G зв'язку, тобто в діапазоні від 1800 до 2700 МГц; але за допомоги метаматеріалу є можливим розширення застосування антени MIMO до 5G-6G стандарту. Спробуємо покращити характеристики антени AGATA MIMO 2x2. Для цього спочатку розглянемо базову конструкцію та її параметри і характеристики.

3 АНТЕНА AGATA MIMO 2X2

3.1 Базова конструкція

Антенa AGATA MIMO 2x2 є абонентською антеною для використання у мережах 2G, 3G, 4G (LTE 2600, LTE 1800), WI-FI і іншими пристроями діапазону 1700-2700МГц. За конструкцією антену можна розглядати як комбінацію антен патч типу і антени ребристо-стрижневого типу. Зовнішній вигляд антени представлений на рисунку 3.1. Про розміри антени дає уявлення рис. 3.2 [3]. Внутрішня побудова зображена на рисунку 3.3.



а) фронтальний вид; б) вид збоку

Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд антени

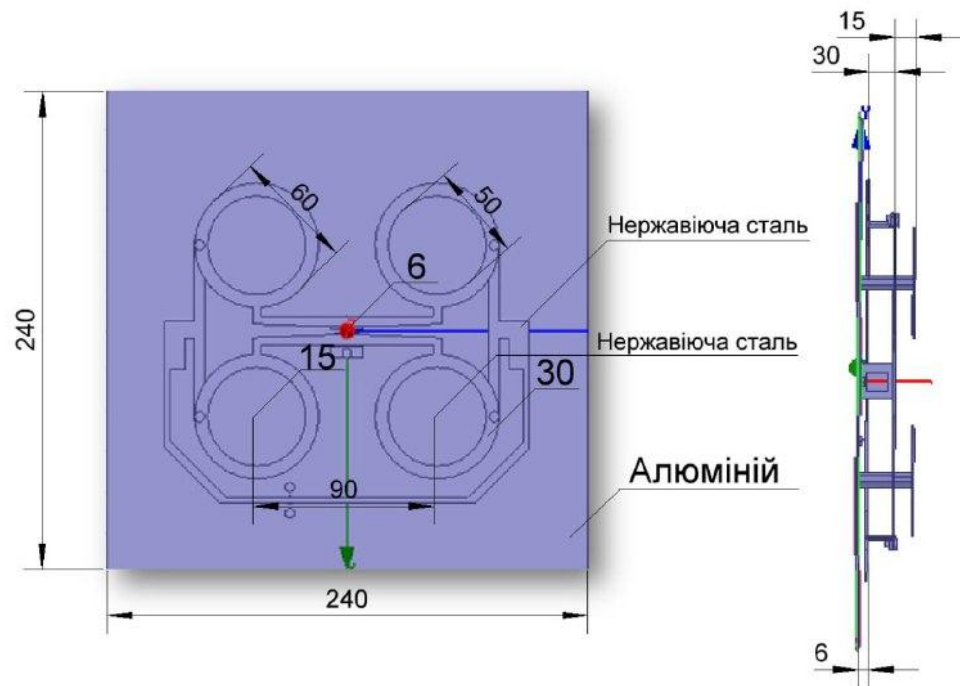


Рисунок 3.2 – Конструкція антени з розмірами

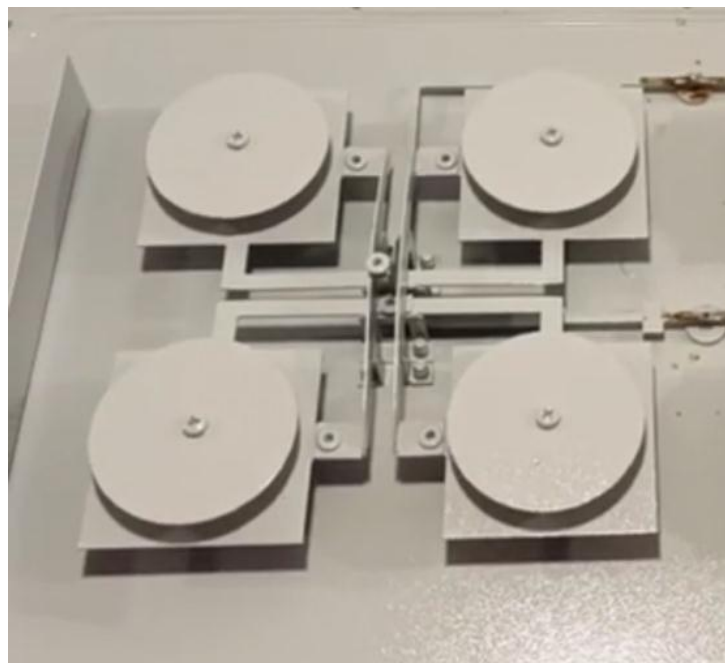


Рисунок 3.3 – Внутрішня побудова антени

3.2 Розміри та матеріали

Розміри антени і матеріали представлені в таблицях 3.1, 3.2 [3].

Таблиця 3.1 – Геометричні розміри антени AGATA MIMO 2x2

Рефлектор, мм	240x240
Вібратор №1, мм	d=60
Вібратор №2, мм	d=50
Висота вібратора №1, мм	h=30
Висота вібратора №2, мм	h=15
Висота конструкції на рефлекторі, мм	h=6
Рознесення вібраторів, мм	90

Таблиця 3.2 – Матеріали складових елементів антени AGATA MIMO 2x2

Рефлектор	алюміній
Вібратор	нержавіюча сталь
Кріплення вібратора	нержавіюча сталь
Покриття захисної коробки	пластик

Як уже зазначалося, дана антена реалізує технологію MIMO. Просторове розділення за цією технологією відбувається в антені внаслідок рознесення у просторі, поляризаційне – за рахунок використання вертикальної і горизонтальної поляризації. Спеціальне кріплення на зовнішній частині корпусу дозволяє змінювати кут місця, азимут і нахил поляризації. Електричні характеристики антени AGATA MIMO 2x2 вказані в таблиці 3.3 [3].

Таблиця 3.3 – Електричні характеристики антени AGATA MIMO 2x2

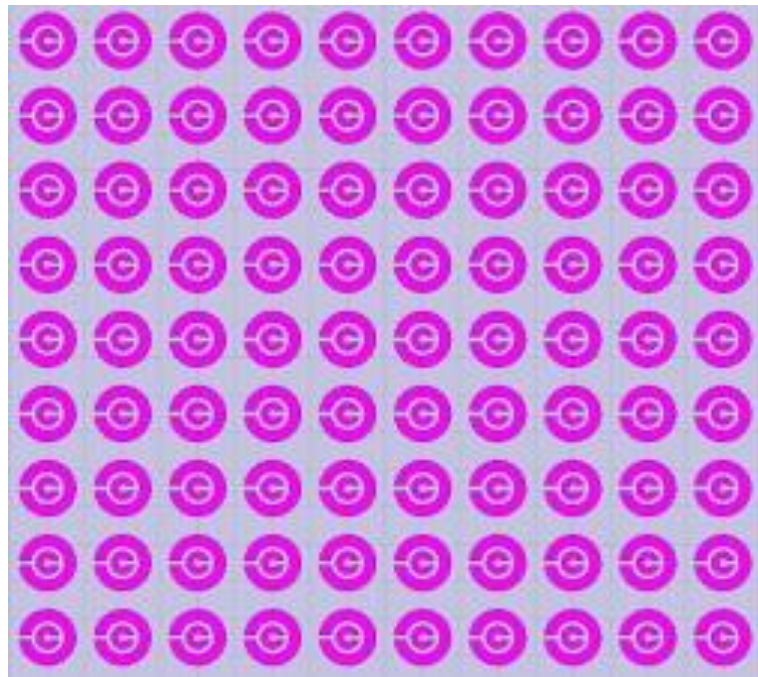
Робочий діапазон частот, МГц	1700-2700
Підсилення антени (LTE), dBi	15
Рівень бічних пелюсток, dB	-12
Вхідний опір, Ом	50
КСХ	1.5
Ізоляція між портами, дБ	30
Допустима потужність, Вт	50
Поляризація	вертикальна / горизонтальна
Механічні характеристики антени AGATA MIMO 2x2	
Маса з кріпленням, г	2865
Кріплення, мм	щогла діаметром 20 – 52
Габаритні розміри без кріплення, м	0.21x0.41x0.06
Матеріал захисної коробки	полікарбонат
Матеріал антени	оцинкована сталь
Захисне покриття	порошкова полімерна фарба

Як видно із таблиці 3.3, антена має досить високий коефіцієнт підсилення, низький КСХ. Активні випромінювачі вкриті герметичним корпусом, який захищає антену від зовнішніх впливів.

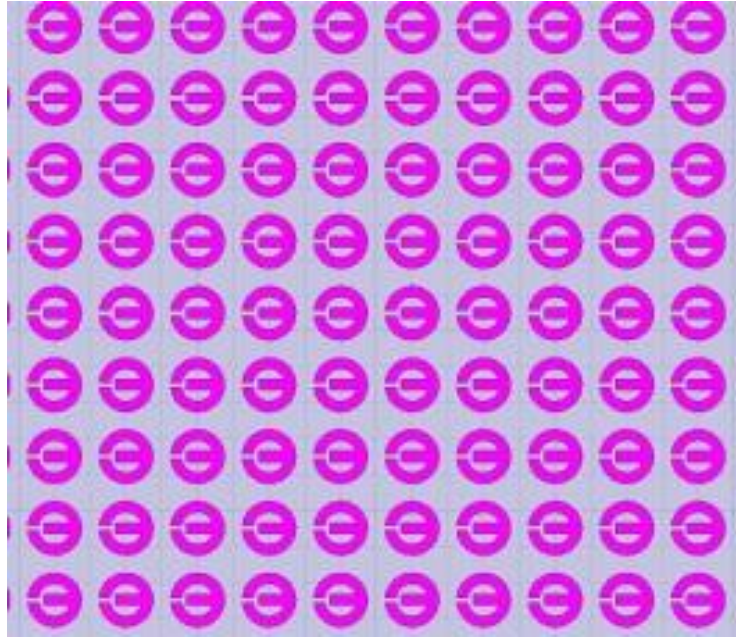
4 ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНИ AGATA МІМО 2Х2 ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТАМАТЕРІАЛУ

4.1 Використовувані метаматеріали

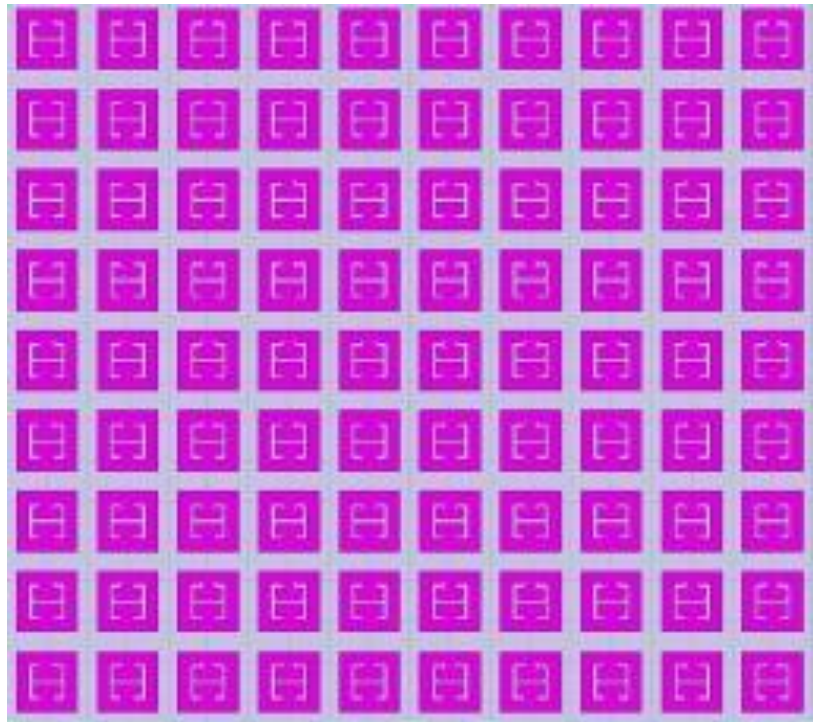
Модифікація антени AGATA МІМО 2Х2 полягає у заміні сталевих рефлекторів ФАР на виготовлені із фольгованого текстоліту з витравленою метаструктурою. Для знаходження кращих значень параметрів було проведено аналіз різноманітних видів 2D метаструктур. Приклади проаналізованих варіантів геометрії якого зображено на рисунку 4.1. З аналізу було виділено два найбільш перспективних варіанта структури MNG типу, аналізу яких і присвячено зміст подальших розділів.



a)



б)



в)

а) б) MNG матеріал; в) ENG матеріал

Рисунок 4.1 – Структури матеріалів

4.2 Зміни в конструкції

З урахуванням внесених змін лінійні параметри антени і матеріали виготовлення будуть наступними (табл. 4.1, 4.2).

Таблиця 4.1 – Матеріали покращеної антени AGATA MIMO 2x2

Рефлектор	алюміній
Вібратор	нержавіюча сталь
Кріплення вібратора	нержавіюча сталь
Покриття захисної коробки	пластик
Додаткова підкладка	метаматеріал

Таблиця 4.2 – Геометричні розміри (у мм) елементів покращеної антени AGATA MIMO

Рефлектор, мм	240x240
Вібратор №1, мм	d=60
Вібратор №2, мм	d=50
Висота вібратора №1, мм	h=30
Висота вібратора №2, мм	h=15
Висота конструкції на рефлекторі, мм	h=6
Рознесення вібраторів, мм	90
Підкладка із метаматеріалу, мм	240x240x3

З урахуванням внесених змін внутрішню конструкцію можна представити наступним чином (рис. 4.2).

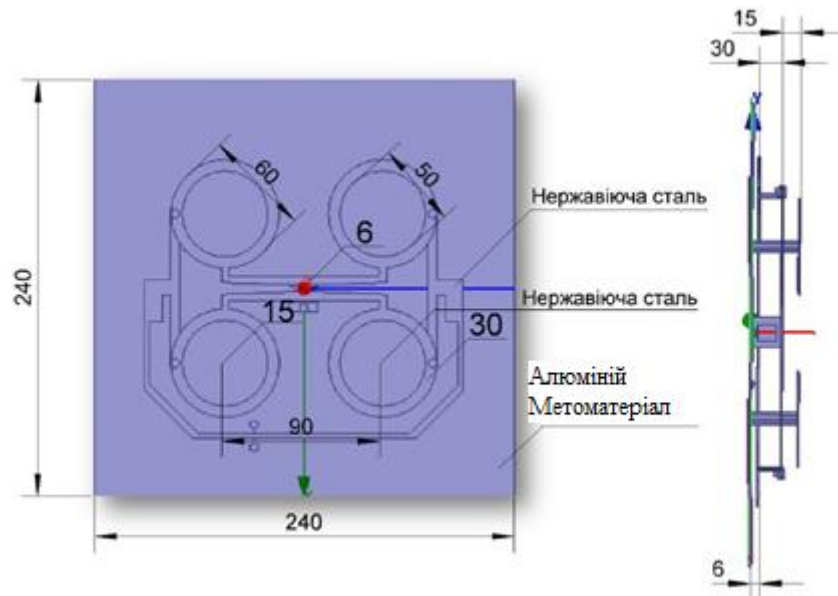
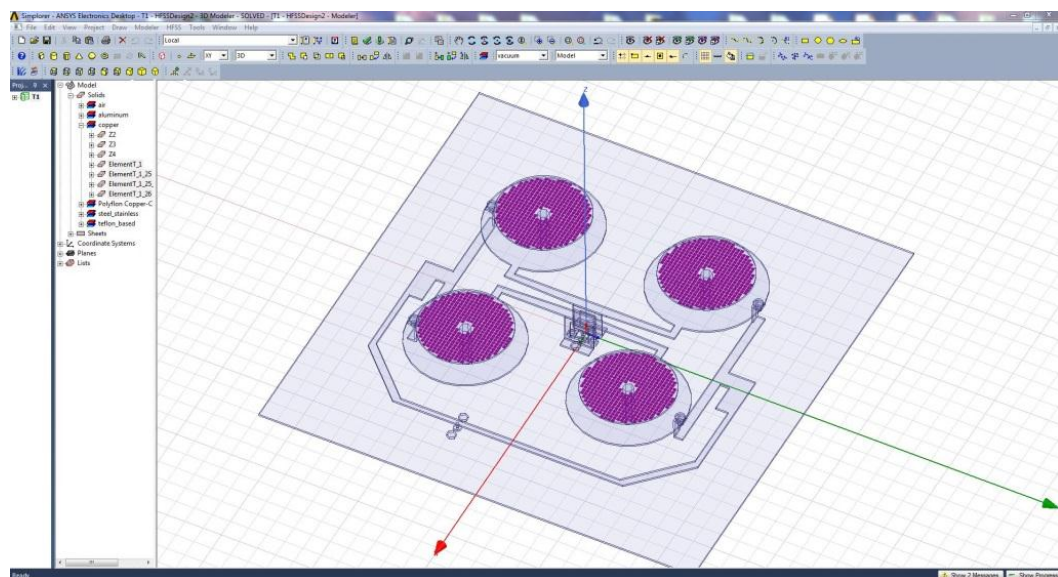


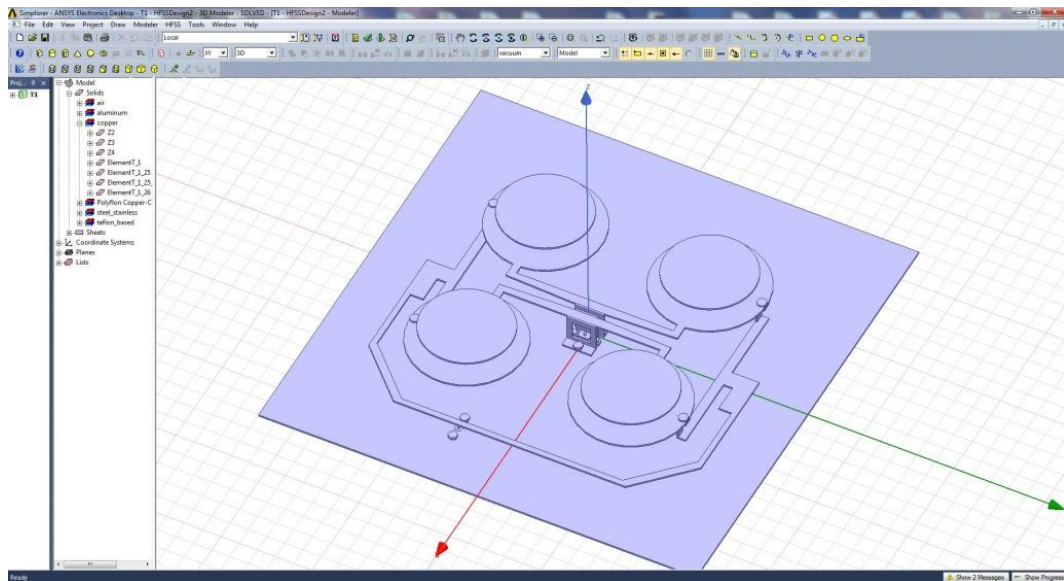
Рисунок 4.2 – Внутрішня конструкція антени

Замість алюмінієвого рефлектора використовується метаматеріал ENG-типу. Розглянемо метаматеріал двох конструктивних модифікацій.

На рисунку 4.3 зображена конструкція модифікованої антени MIMO, яку змодельовано в середовищі 3D електродинамічного моделювання HFSS версії 17.2.



a)



б)

а) директори чотирьох випромінювачів з метаматеріалу,

б) проект у вигляді 3D структури

Рисунок 4.3 – Проект модифікованої антени AGATA MIMO 2x2 в HFSS

Програма ANSYS HFSS є визнаним лідером серед 3D програм електромагнітного моделювання.

В цьому середовищі автоматизованого проектування використовуються методи кінцевих елементів, метод моментів, гібридні методи, метод фізичної та геометричної оптики і т. д. Метод кінцевих елементів (МКЕ) добре підходить для 3D геометрії довільної форми. Цей метод базується на тому принципі, що геометрична модель автоматично розбивається на деяку кількість тетраедричних елементів, конформних відповідним поверхням геометрії. Тетраедричні елементи добре підходять для неструктурованої і нерівномірної сітки, так як вони можуть розтягуватися, щоб в результаті максимально точно відповідати заданій, часто досить складній, геометрії вирішуваної задачі.

Під формулюванням «метод кінцевих елементів» мається на увазі використання передових математичних методів, які відповідають рівнянням Максвелла, що є справедливими для всієї побудованої моделі. Цей метод найбільш ефективний для моделей, що містять багато різних матеріалів.

В ANSYS HFSS можуть бути проаналізовані такі основні характеристики, як зворотні втрати, вхідний імпеданс, підсилення, спрямованість і різні поляризаційні параметри та характеристики.

Ключовою особливістю ANSYS HFSS є автоматичне адаптивне генерування сітки. В системі HFSS фізика досліджуваної моделі визначає майбутню сітку, а не навпаки, – тим самим забезпечується гарантована точність обчислень. Така автоматизація процесу моделювання з гарантованою точністю виділяє HFSS з-поміж усіх інших програм електромагнітного моделювання.

Для вирішення задач великого об'єму велика геометрія розбивається на фрагменти – домени. Використовується своєрідний принцип декомпозиції (DDM). Принцип роботи DDM наступний: велике завдання розділяється на невеликі окремі підзадачі з подальшим їх розв'язанням.

При виборі програми вкрай важливо, що результати моделювання антени будуть збігатися з вимірами. ANSYS HFSS забезпечує високу точність обчислень при моделюванні антен.

Висока точність досягається автоматичним адаптивним перестроюванням сітки в ході рішення, яке працює для всіх впроваджених в HFSS методів, застосовуваних для широкого спектра конструкцій антен.

Тому логічним є вибір середовища ANSYS HFSS для електродинамічного моделювання антени MIMO 2x2 AGATA.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ПОКРАЩЕНОЇ АНТЕНИ AGATA МІМО 2Х2 У ПРОГРАМНОМУ ПАКЕТІ ANSYS HFSS

5.1 Моделювання базового варіанту

Для аналізу характеристик покращеної антени використовуємо спеціалізований програмний пакет ANSYS HFSS, у якому наявні всі необхідні інструменти для електродинамічного моделювання [5].

У програмному пакеті задаємо всі лінійні розміри компонентів антени і матеріал виготовлення. Перед аналізом зазначаємо сітку частот, і отримуємо результат:

- а) діаграма спрямованості в декартовій і полярній системі координат (рис. 5.1);
- б) об'ємний вигляд діаграми спрямованості антени (рис. 5.2);
- в) годограф вхідного опору антени на діаграмі Сміта (рис. 5.3);
- г) залежність модуля коефіцієнта відбиття від частоти (рис. 5.3);
- г) залежність КСХ антени від частоти (рис. 5.4);
- д) зазначені в таблиці 5.1 числові параметри.

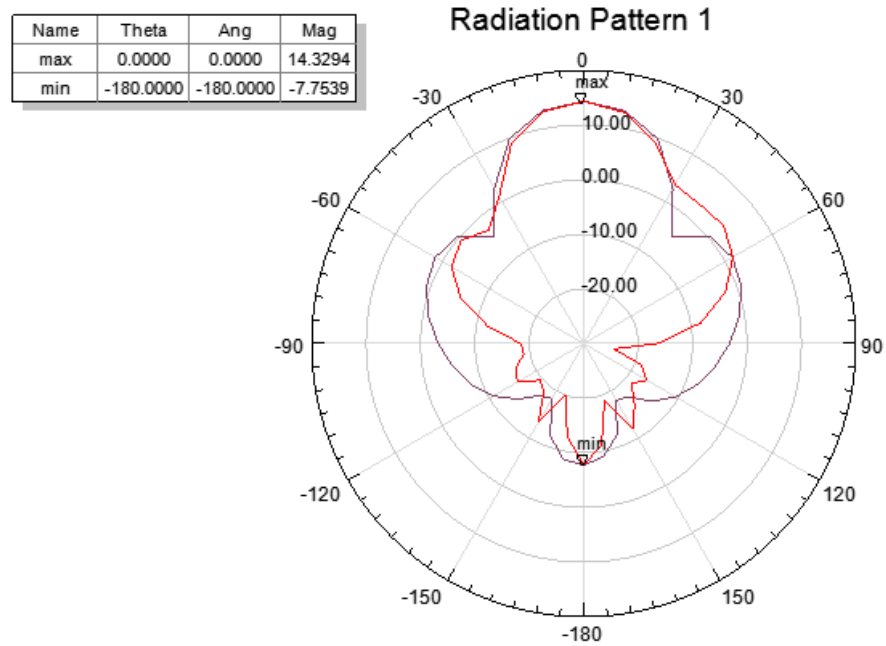


Рисунок 5.1 – Діаграма спрямованості антени в полярній системі координат

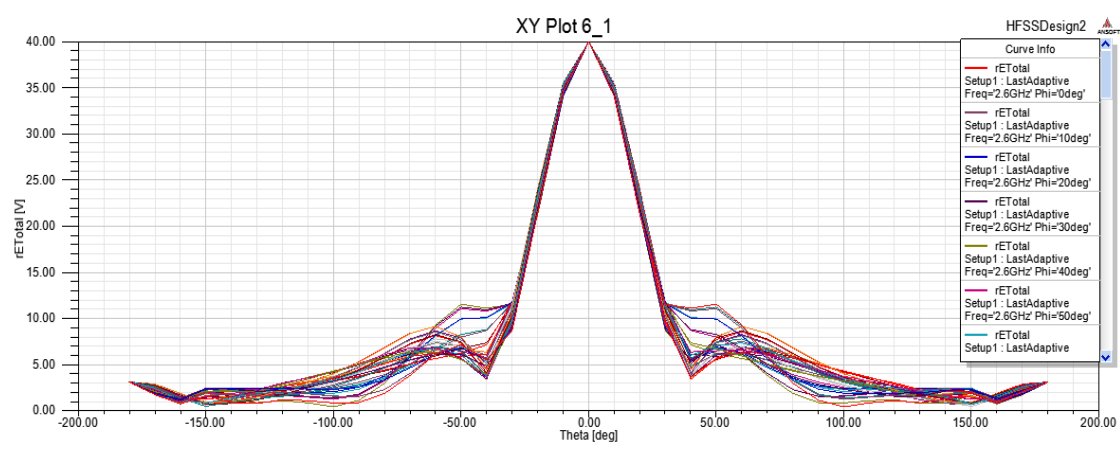


Рисунок 5.2 – Діаграма спрямованості антени в перерізі на частоті 2,6 ГГц з кроком 10 градусів в діапазоні кутів 0...50 градусів

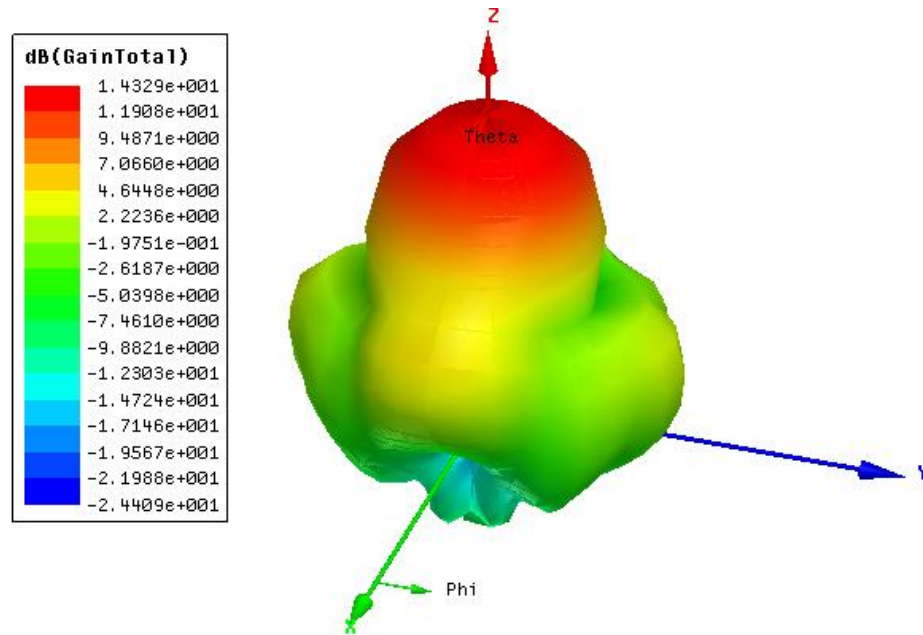


Рисунок 5.3 – Об'ємний вигляд діаграми спрямованості антени

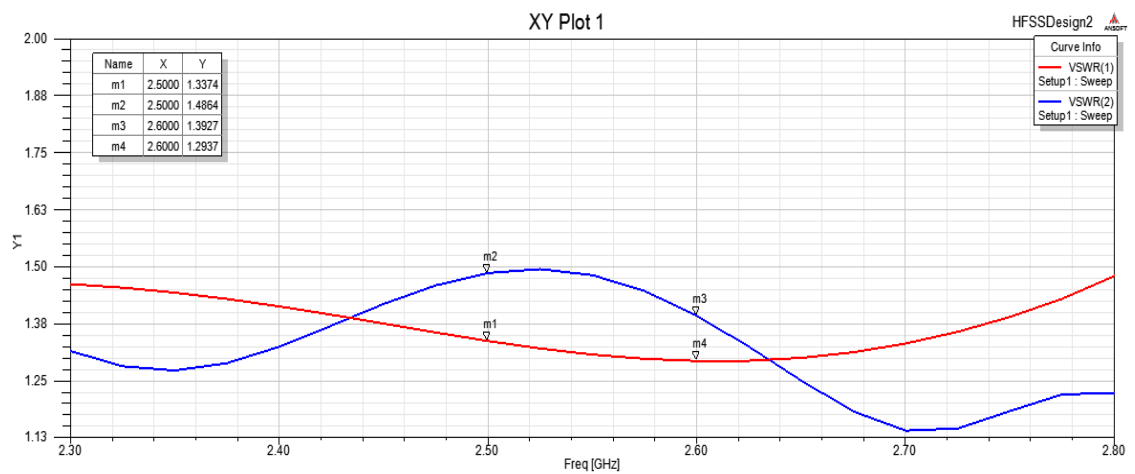


Рисунок 5.4 – Частотна залежність КСХ антени

Таблиця 5.1 – Електричні характеристики побудованої антени

Робочий діапазон частот, МГц	2400-2800
Підсилення антени (LTE), dBi	14.32
Рівень бічних пелюсток, dB	не перевищує -12
Вхідний опір, Ом	50
КСХ (LTE)	1.29
Ізоляція між портами, дБ	30
Допустима потужність, Вт	50
Поляризація	вертикальна / горизонтальна

На рисунку 5.5 зображено частотну залежність модуля коефіцієнта відбиття.

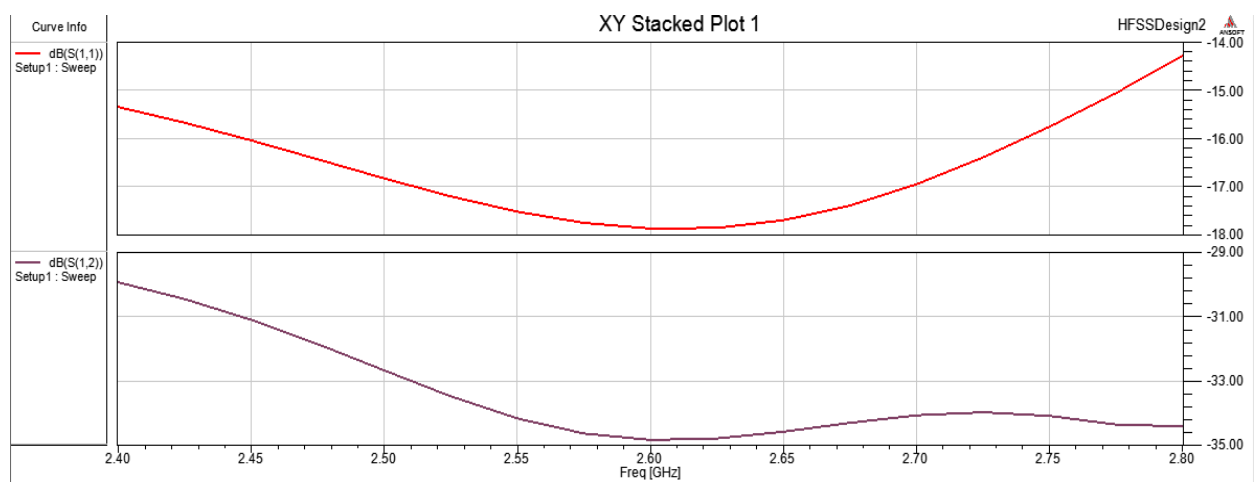


Рисунок 5.5 – Частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття

На рисунку 5.6 зображено годограф вхідного опору антени на номограмі Сміта.

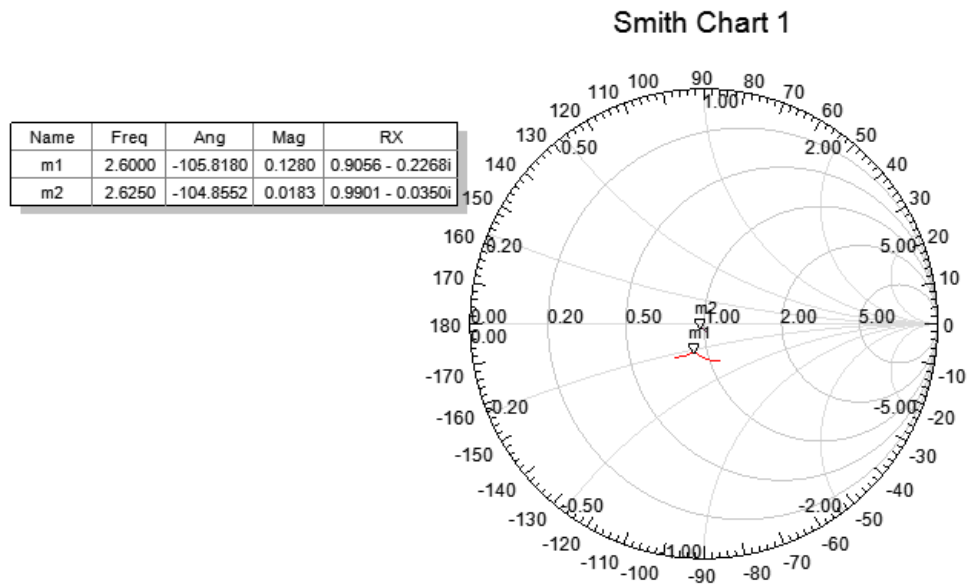


Рисунок 5.6 – Годограф вхідного опору антени на номограмі Сміта

Розглянемо результати моделювання антени AGATA MIMO 2x2 базової конструкції в програмі HFSS. На рисунку 5.7 представлено геометрію антени в HFSS проекті.

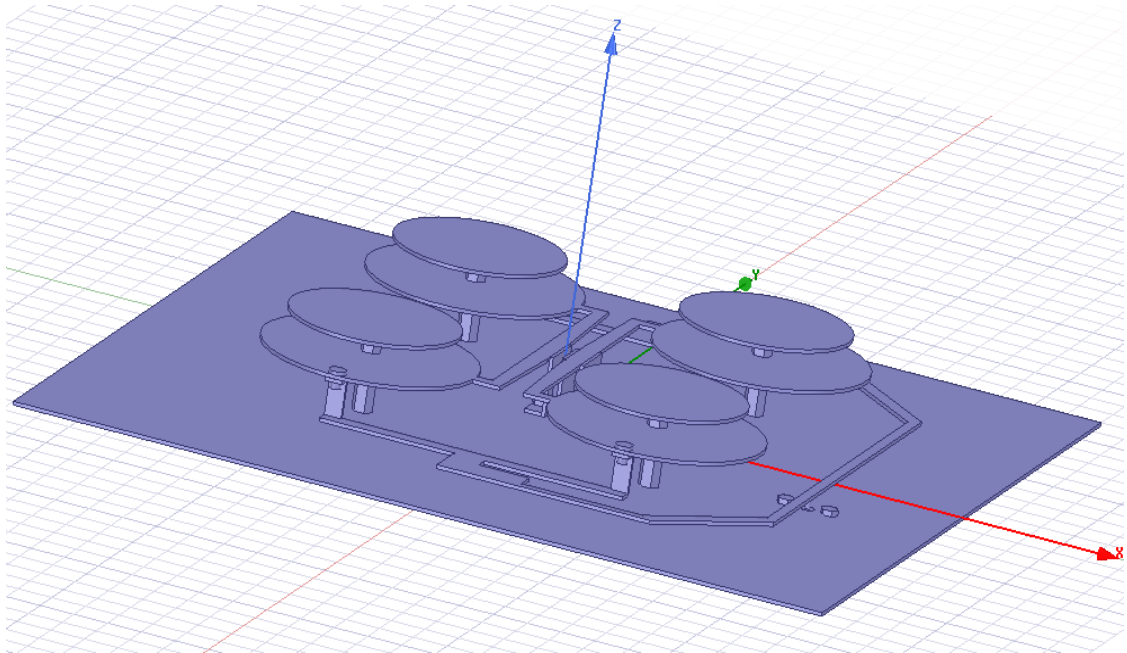


Рисунок 5.7 – Геометрія антени AGATA MIMO 2x2 в HFSS

Рисунок 5.8 представляє 3D діаграму спрямованості антени AGATA MIMO 2x2, яка розрахована в HFSS на частоті 2,6 ГГц.

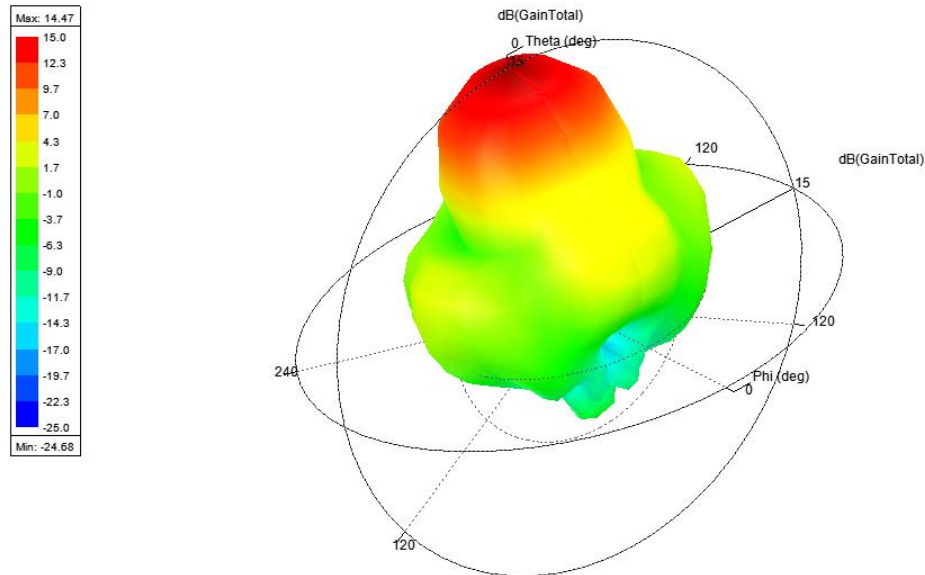


Рисунок 5.8 – 3D діаграма спрямованості антени AGATA MIMO 2x2
на частоті 2,6 ГГц

На рисунку 5.9 можна бачити 2D діаграму спрямованості в перерізах в площині вектора E , які відповідають різним просторовим кутам кутомісцевої площини на тій самій частоті. З рис. 5.9 очевидно, що бічні пелюстки по більшості кутових напрямів не перевищують рівня -13...- 15 дБ. При цьому загальний коефіцієнт підсилення антени складає 14,47 дБ на частоті 2, 6 ГГц.

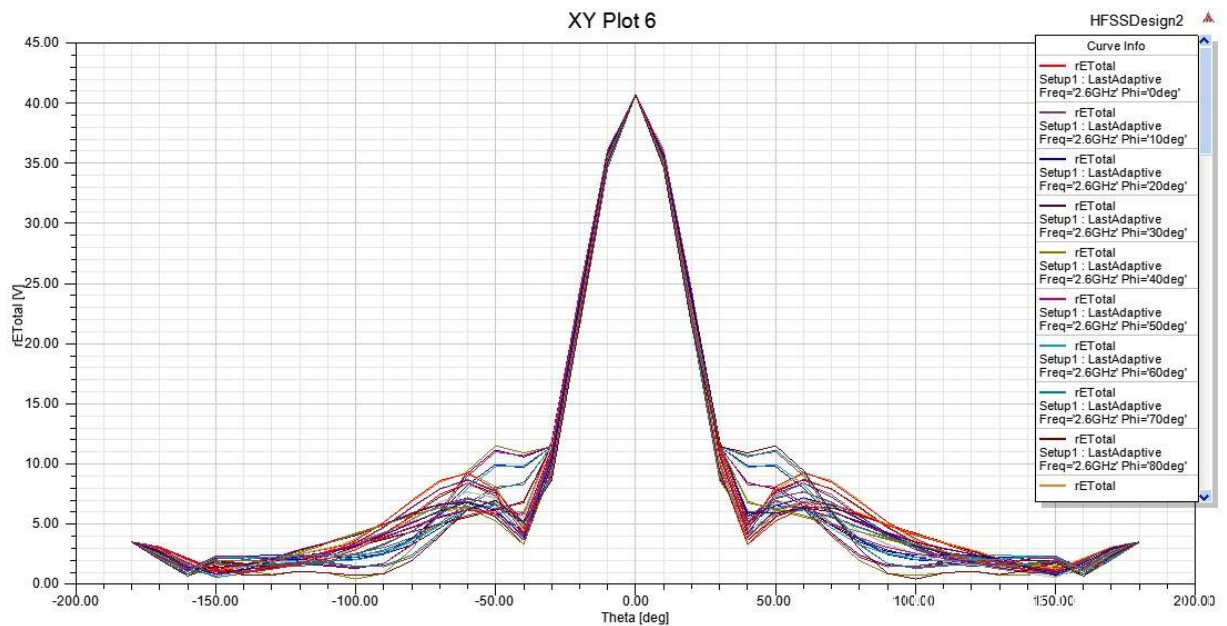


Рисунок 5.9 – 2D діаграма спрямованості антени в перерізах, які відповідають різним просторовим кутам в площині вектора E

Далі дослідимо характеристики узгодження антени з трактом живлення, оскільки саме від цих характеристик залежить коефіцієнт корисної дії антени і її підсумковий коефіцієнт підсилення, а відтак, і дальність дії пристрою, в складі якого функціонує ця антена.

Основними характеристиками узгодження є коефіцієнти відбиття від входів 1 і 2, а також коефіцієнти стоячої хвилі від цих входів. На рисунках 5.10, 5.11, 5.12 зображено результати моделювання в програмі HFSS параметрів узгодження з живильним трактом в діапазоні частот 2,2...3,2 ГГц.

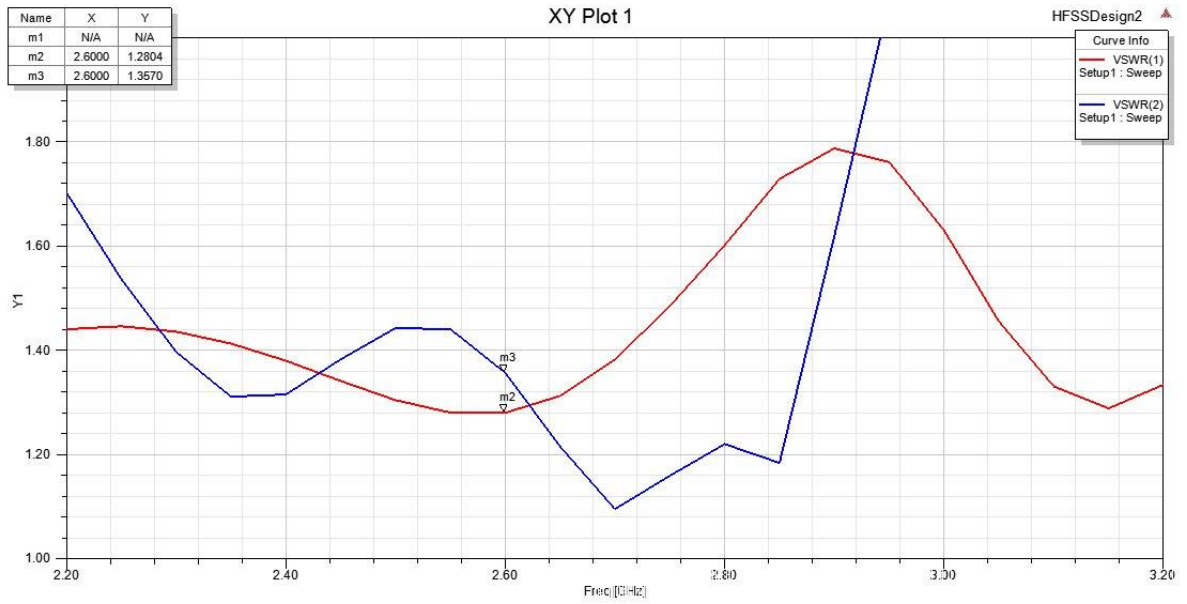


Рисунок 5.10 – Частотна залежність коефіцієнта стоячої хвилі від входів 1 і 2

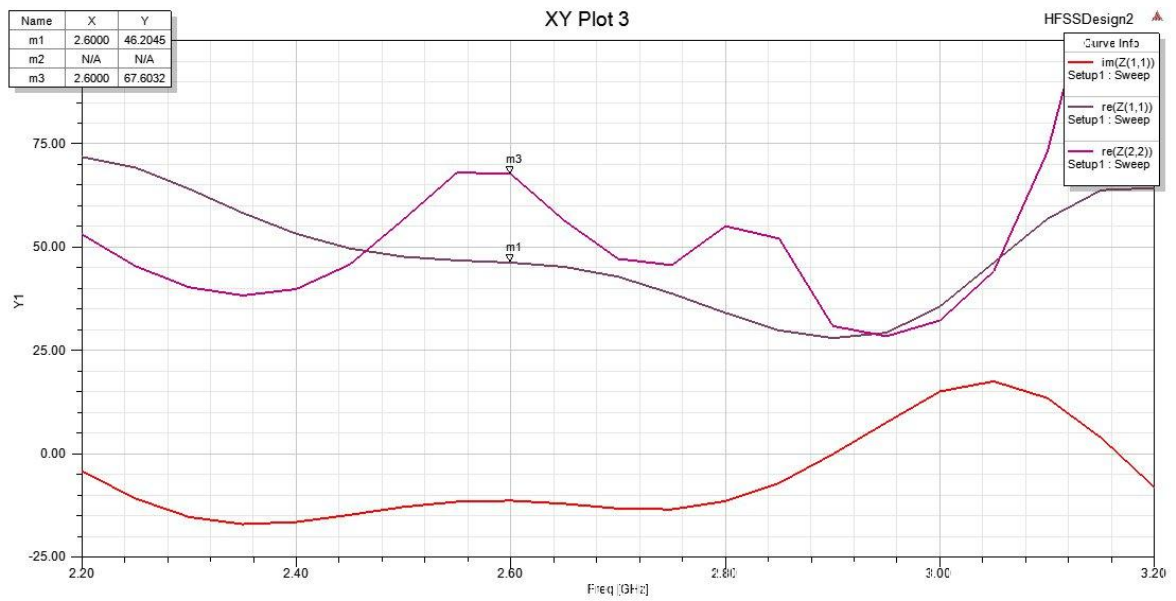


Рисунок 5.11 – Вхідний опір з боку входів 1 і 2

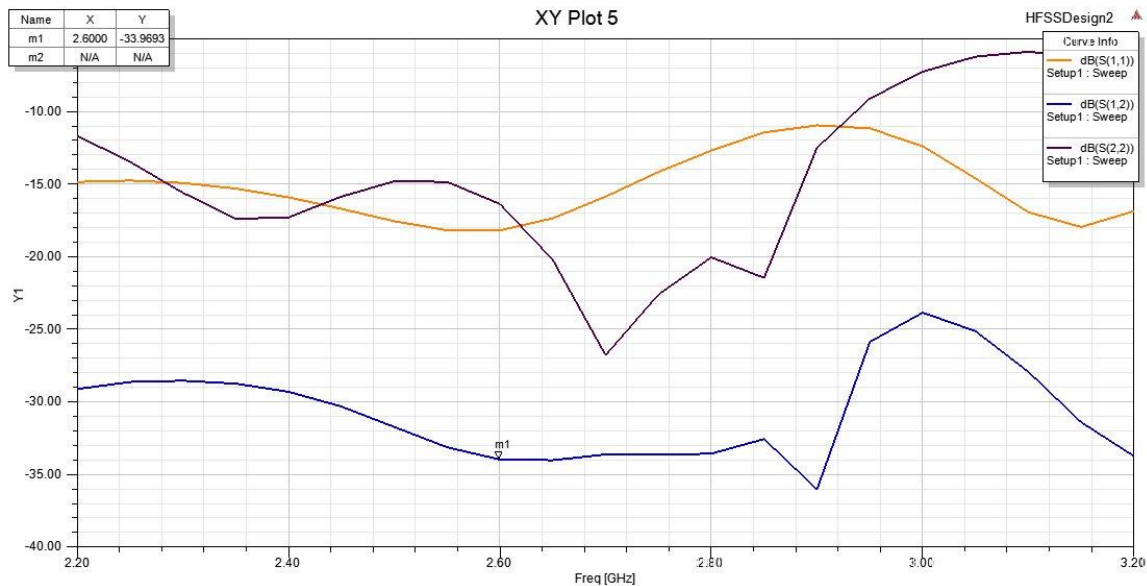


Рисунок 5.12 – Частотна залежність коефіцієнтів відбиття та зворотного проходження потужності в діапазоні частот 2,2 ... 3,2 ГГц

З рисунків 5.10...5.12 видно, що не на всіх частотах досліджуваного діапазону узгодження антени досягає задовільного рівня (-15...-20 дБ). Особливо це стосується високочастотної частини діапазону (вище 2,9 ГГц). Тому є доцільним додавання до базової конструкції рефлектора у вигляді метаматеріалу, який розширить діапазон узгодження до вказаних вище меж і надасть можливість використання антени у недалекій перспективі не тільки у діапазоні 3G, також у 5G і 6G діапазонах.

5.2 AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури першої модифікації

Особливістю першої модифікації метаструктури є застосування розподілених еквівалентних коливальних контурів зі зменшеною товщиною струмопровідних смужок і великою відстанню між цими елементами. Фрагмент рефлектора антени з комірками метаматеріалу показано на рисунку

5.13, а на рисунку 5.14 показано вікно для задання параметрів елементів метаматеріалу.

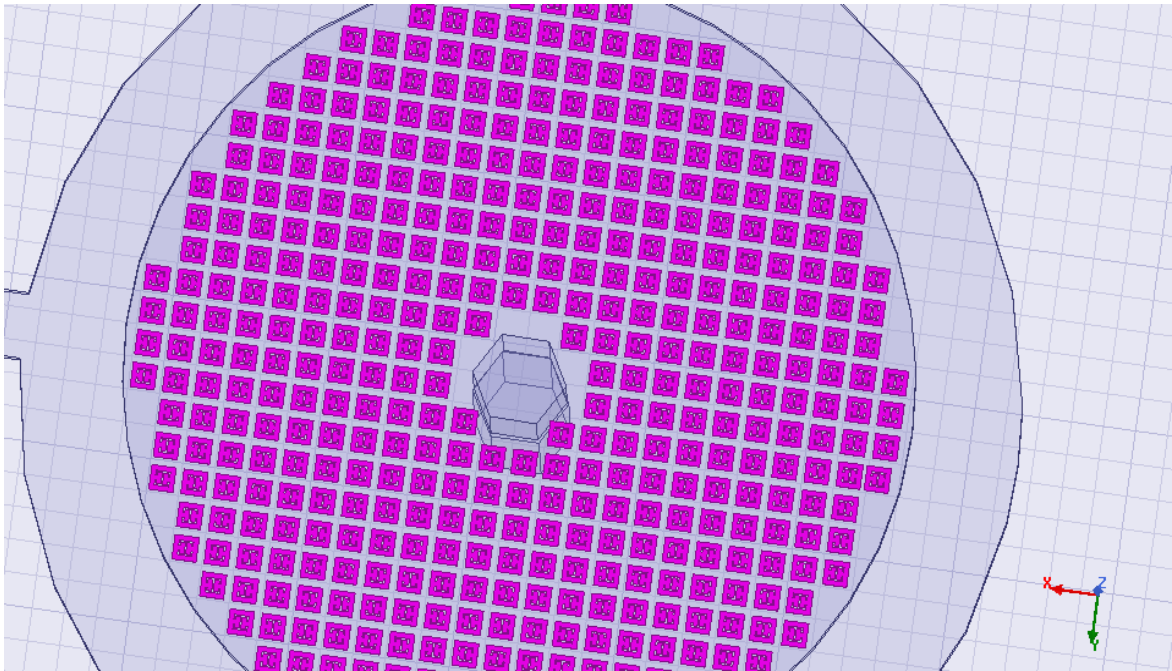


Рисунок 5.13 – Фрагмент конструкції зі метаматеріалом 1 типу

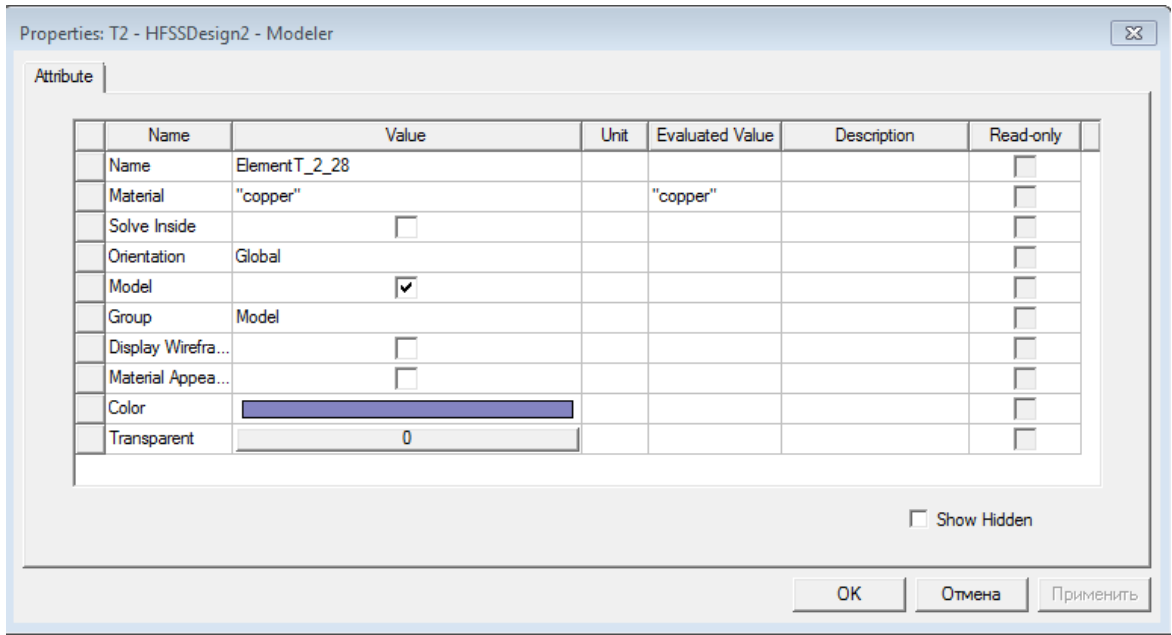


Рисунок 5.14 – Вікно завдання параметрів елементу метаматеріалу

На рисунках 5.15, 5.16 представлено параметри аналізу покращеної антени. Хоча робочий діапазон оригінальної антени 2400-2800ГГц, аналіз усіх видозмінених варіантів проводився в діапазоні частот 2200-3000ГГц, з кроком 100МГц. Для обчислень S-матриць було взято середньоквадратичне відхилення 0,01.

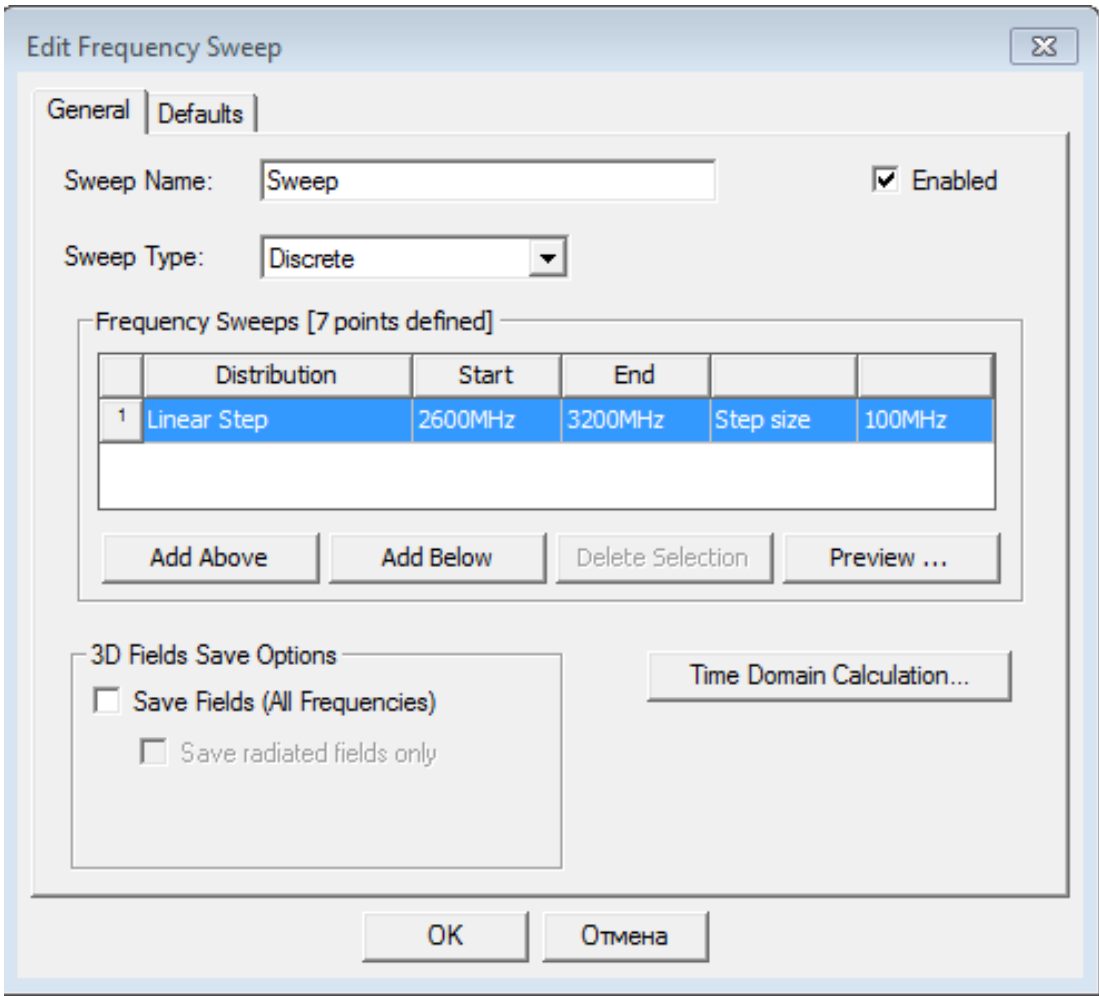


Рисунок 5.15 – Вікно встановлення частотного діапазону аналізу параметрів базової антени

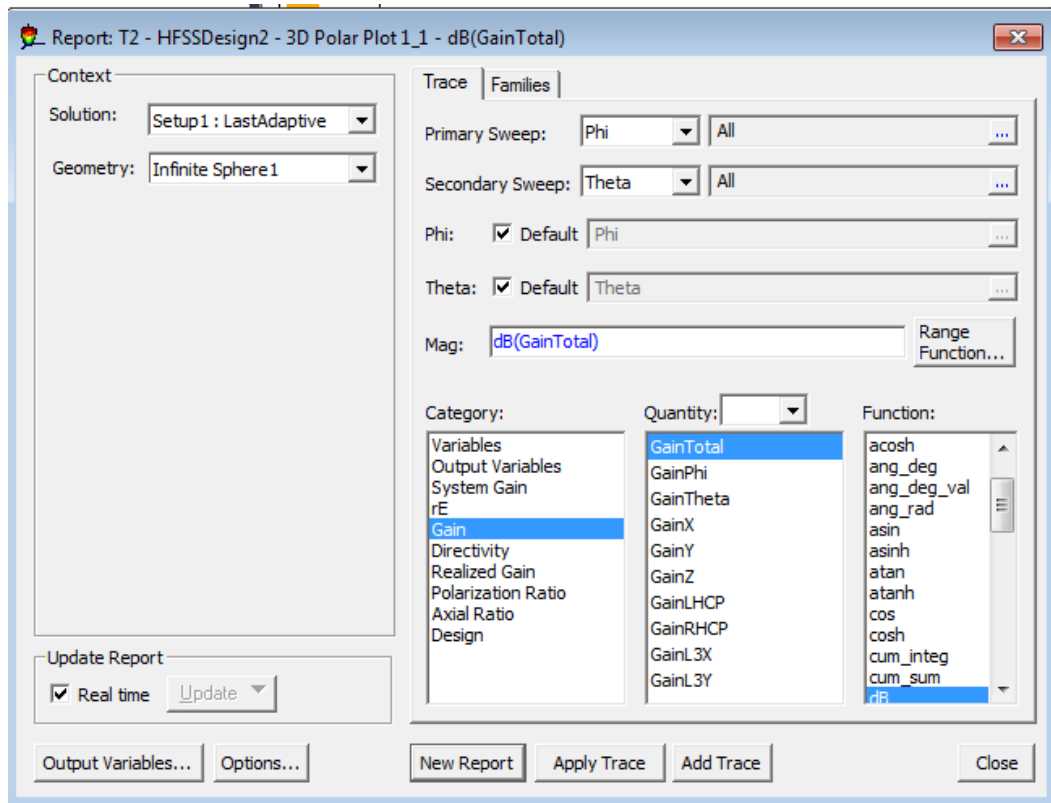


Рисунок 5.16 – Вікно встановлення типу характеристики
спрямованості базової конструкції

На рисунку 5.17 зображено вікно встановлення параметрів загального аналізу базового проекту.

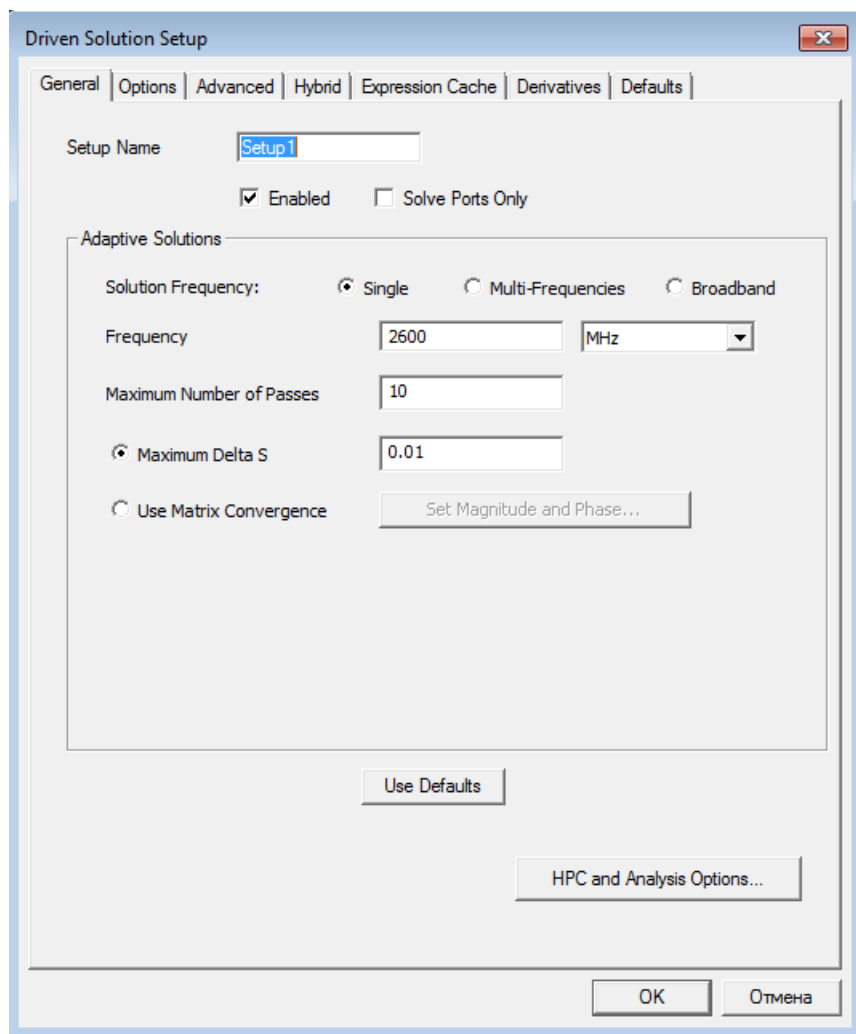


Рисунок 5.17 – Вікно встановлення параметрів загального аналізу базового проекту

Результати розрахунку діаграм спрямованості, вхідних опорів та коефіцієнтів стоячої хвилі та відбиття і зворотного зв'язку представлені на рисунках 5.18-5.21.

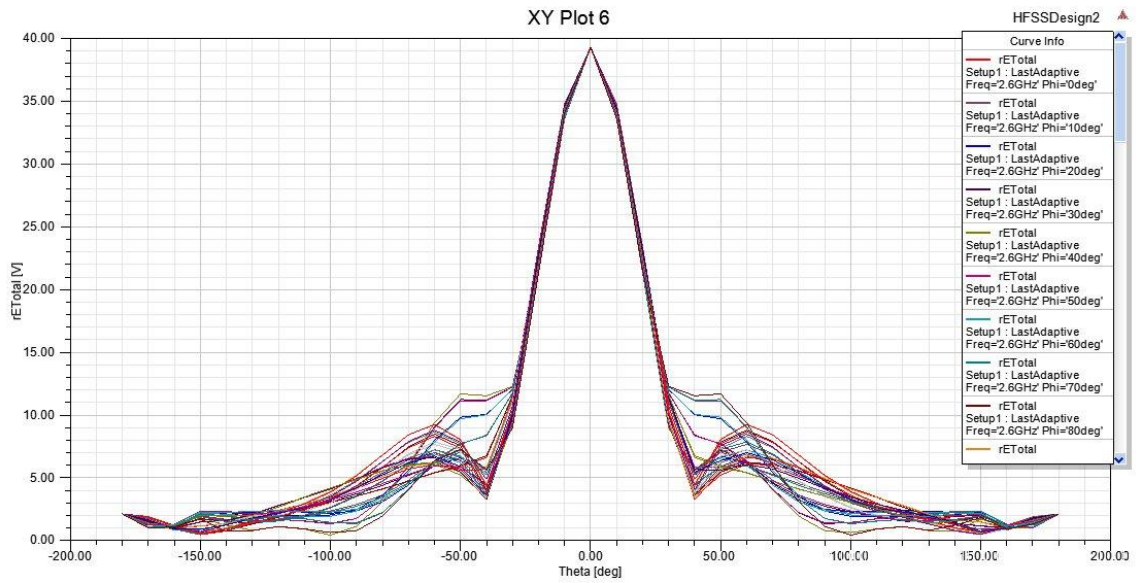


Рисунок 5.18 – Діаграма спрямованості антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури першої модифікації

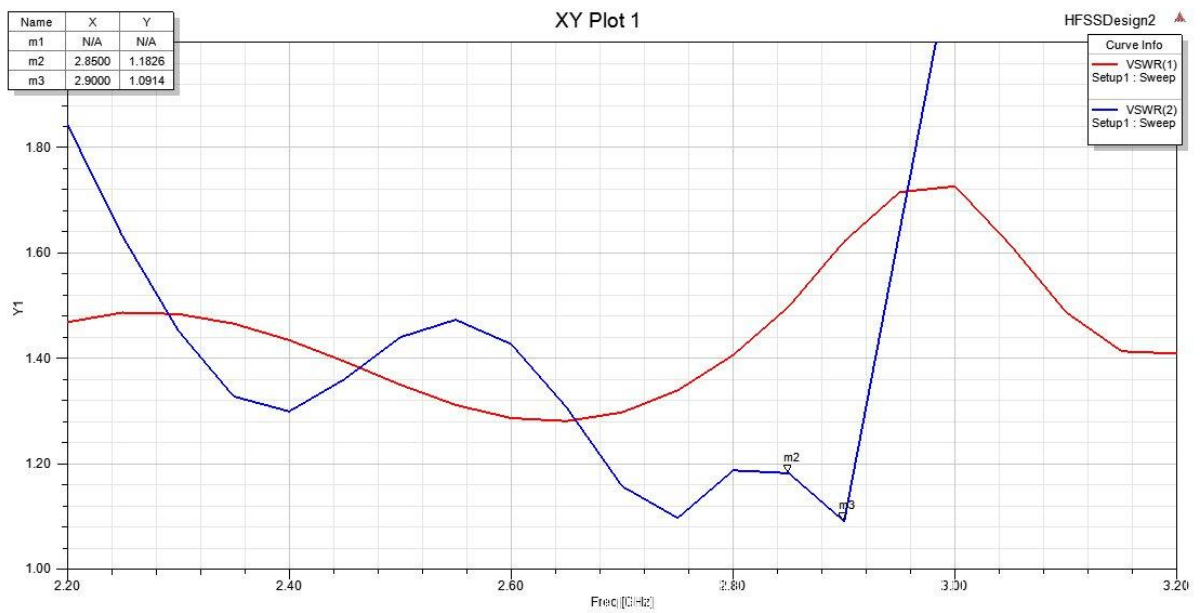


Рисунок 5.19 – Коефіцієнти стоячої хвилі антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури першої модифікації

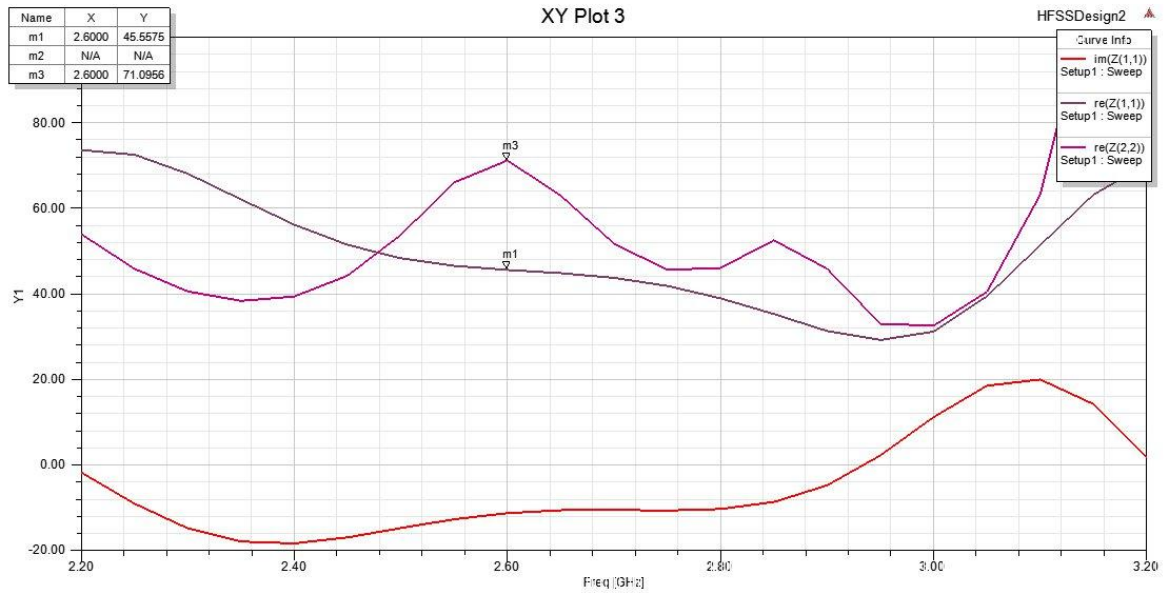


Рисунок 5.20 – Вхідні опори антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури першої модифікації в діапазоні частот 2,2 ... 3,2 ГГц

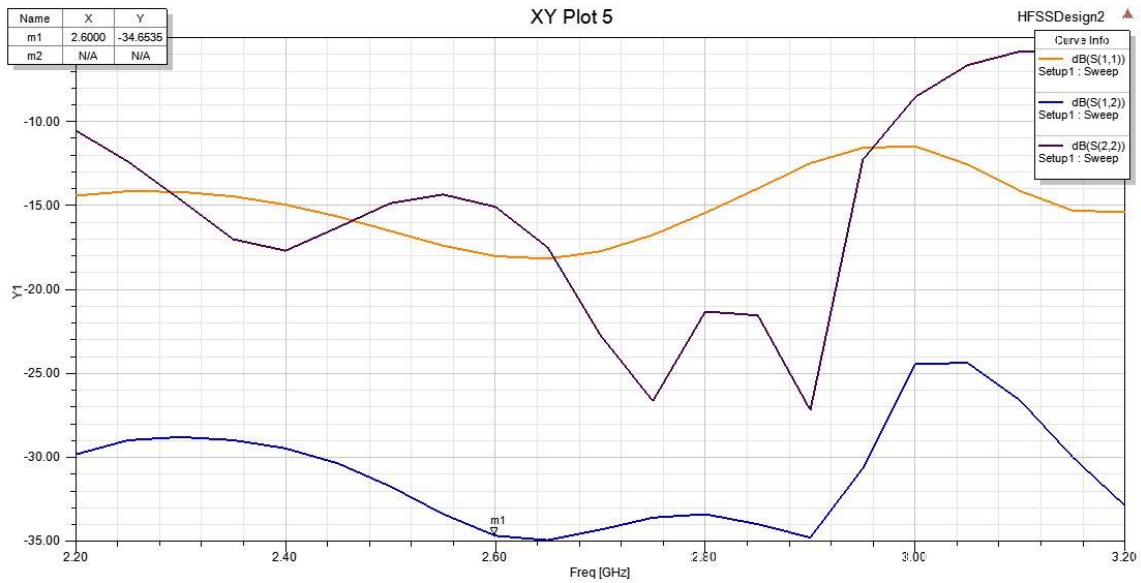


Рисунок 5.21 – Елементи матриці розсіювання, які відповідають коефіцієнтам відбиття та зворотної передачі антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури першої модифікації

На рисунку 5.22 зображено повне підсилення (просторовий розподіл) антени з метаматеріалом 1 типу на частоті 2600 ГГц.

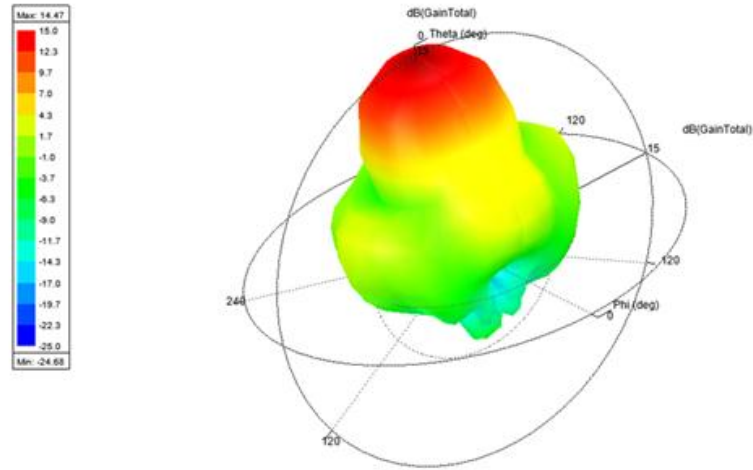


Рисунок 5.22 – Повне підсилення (просторовий розподіл) антени з метаматеріалом 1 типу на частоті 2600 ГГц

З рисунків 5.18-5.22 видно, що параметри узгодження суттєво не покращилися.

Тому розглянемо конструкцію антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури другої модифікації.

5.3 AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури другої модифікації

Суть модифікації метаматеріалу полягає в потовщенні струмопровідних смужок всіх елементів метаматеріалу, і, відповідно в зменшенні відстані між сусідніми елементами.

Геометрію видно з рисунку 5.23. Результати розрахунку діаграм спрямованості, входних опорів, коефіцієнтів стоячої хвилі, відбиття та зворотного зв'язку можна бачити на рисунках 5.24-5.28.

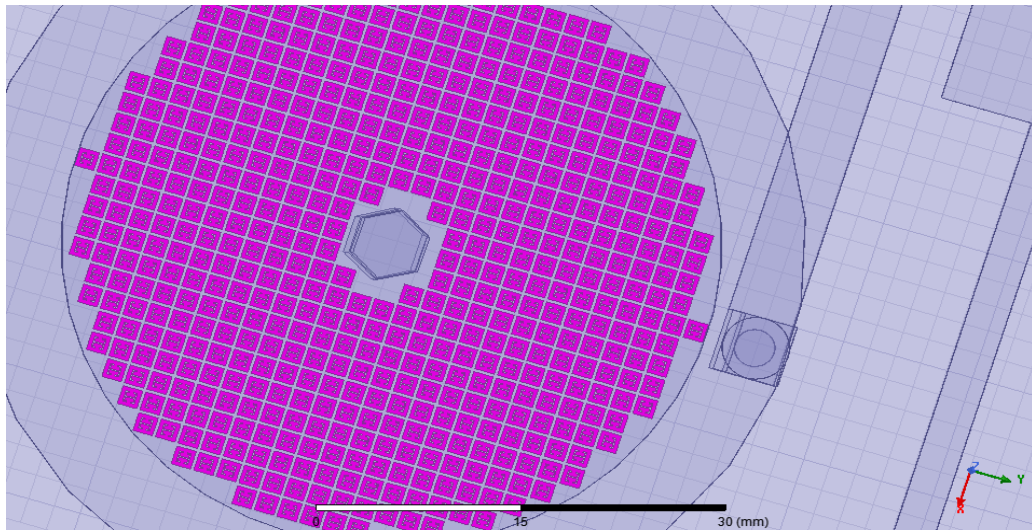


Рисунок 5.23 – Фрагмент конструкції другої модифікації в проєкті HFSS

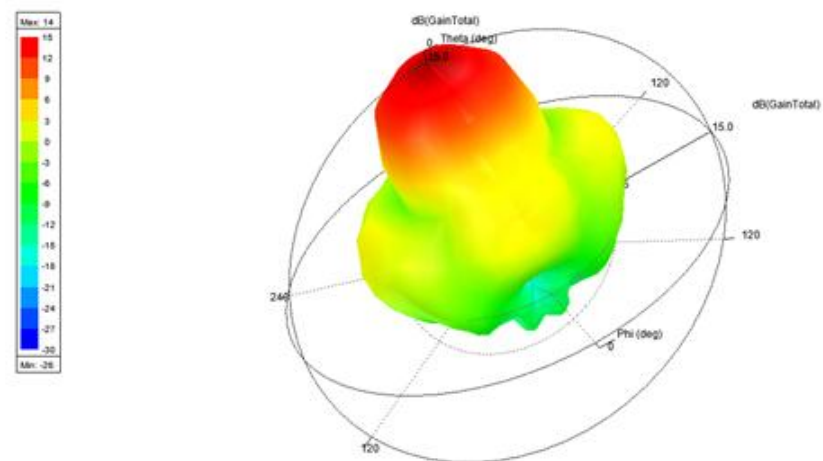


Рисунок 5.24 – Діаграма спрямованості 3D антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури другої модифікації

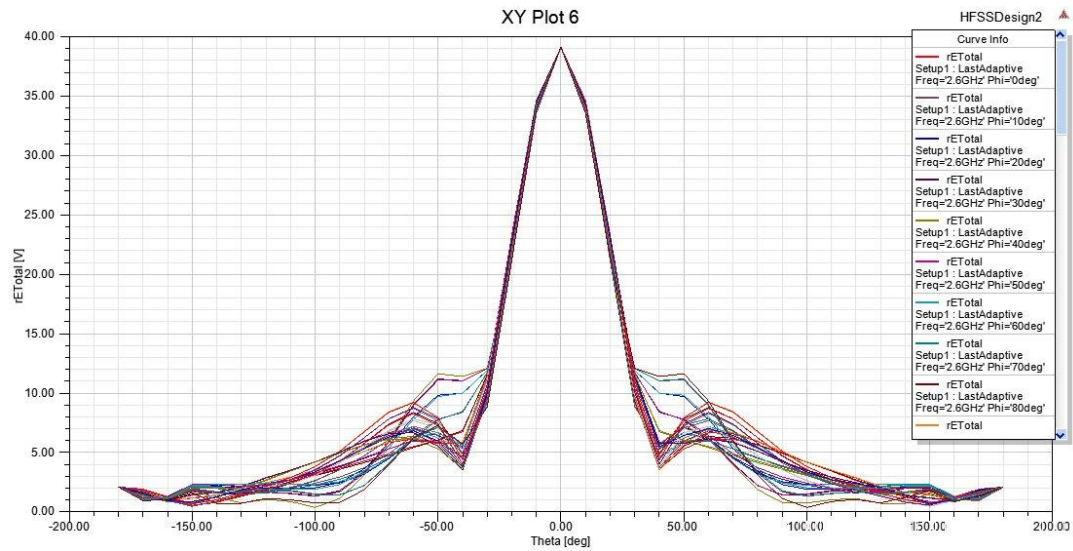


Рисунок 5.25 – Діаграма спрямованості 2D антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури другої модифікації

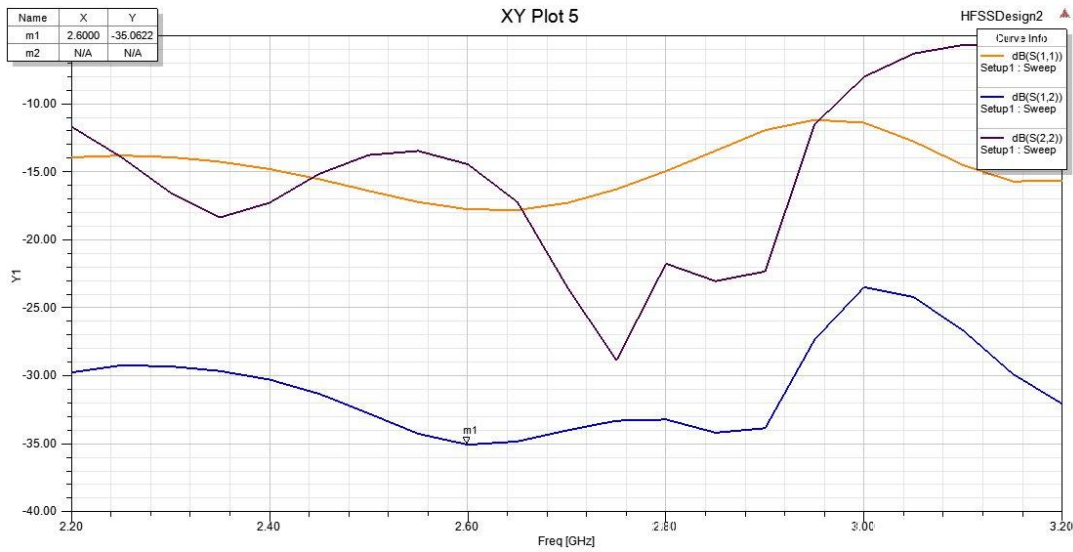


Рисунок 5.26 – Елементи матриці розсіювання, які відповідають коефіцієнтам відбиття та зворотної передачі антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури другої модифікації

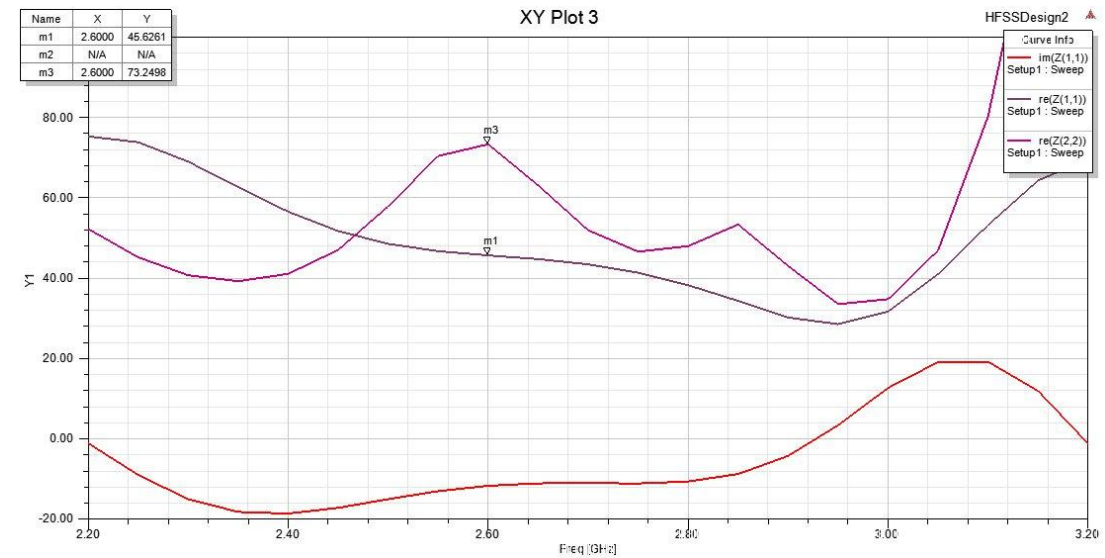


Рисунок 5.27 – Вхідні опори антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури другої модифікації в діапазоні частот 2,2 ... 3,2 ГГц

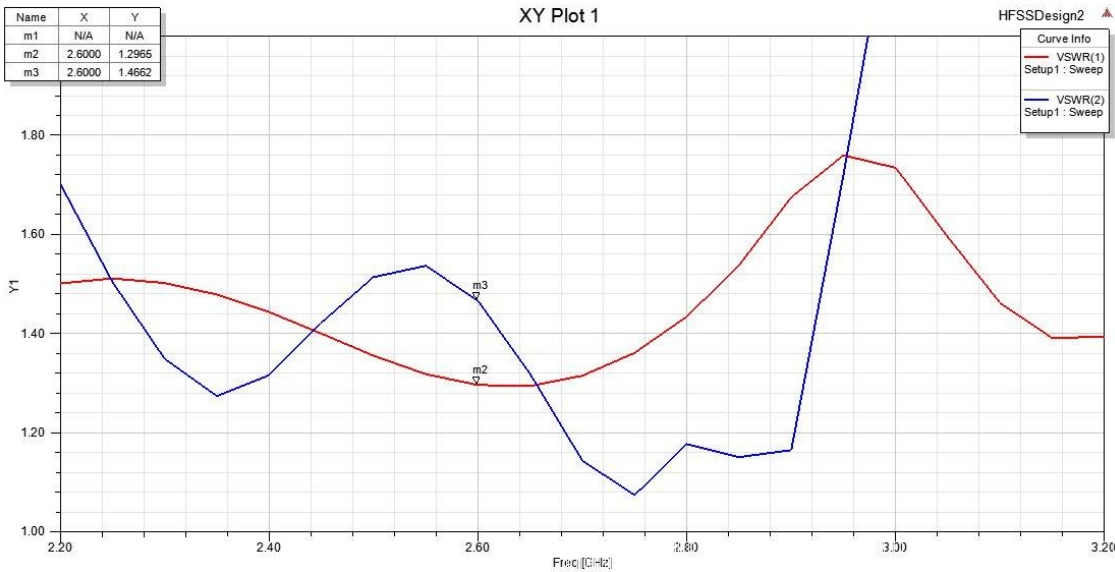


Рисунок 5.28 – Коефіцієнти стоячої хвилі антени AGATA MIMO 2x2 з рефлектором з метаматеріалу у вигляді ENG структури другої модифікації

5.4 Порівняння характеристик спрямованості та узгодження антен всіх розглянутих конструкцій

В якості характеристик узгодження доцільно використовувати коефіцієнти стоячої хвилі як найуніверсальний параметр узгодження. На рис. представлені для порівняння частотні залежності коефіцієнтів стоячої хвилі антен двох вказаних модифікацій. З рисунку 5.29 видно, що найліпшого узгодження проекти з метаматеріалами досягають в частотному діапазоні 2,7...2,9 ГГц з коефіцієнтами стоячої хвилі для першого каналу 1,1...1,2, в той час як базова конструкція в цьому ж діапазоні частот має коефіцієнти стоячої хвилі першого каналу на рівні 1,4 ...1,7, що значно гірше.

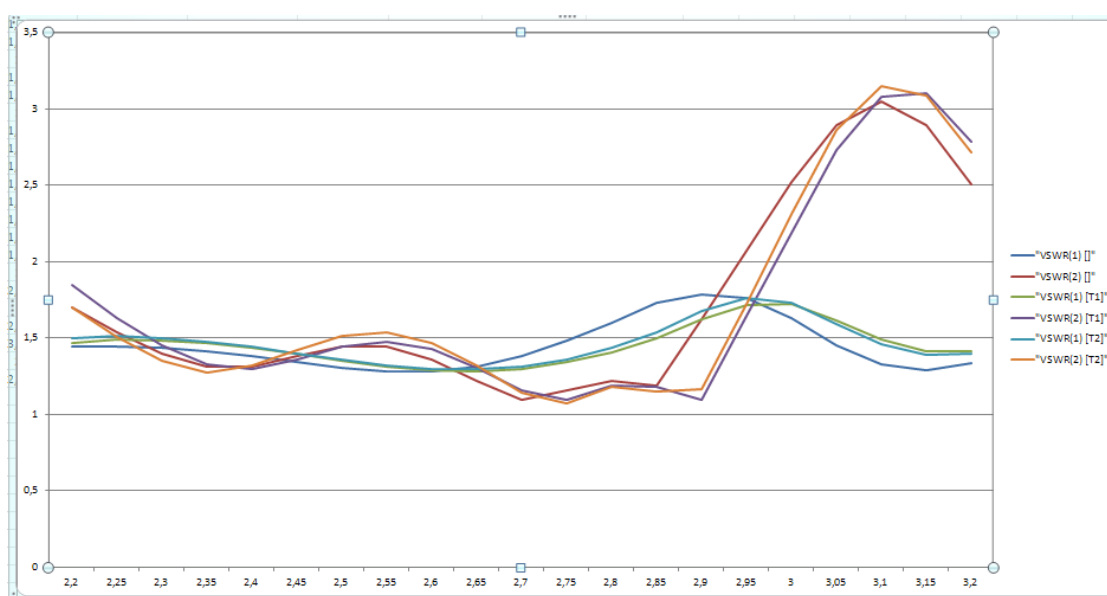


Рисунок 5.29 – Порівняння частотних залежностей коефіцієнтів стоячої хвилі антен розглянутих модифікацій

З рисунку 5.30 видно, що найліпший коефіцієнт передачі все ж має оригінальна конструкція антени. Цей ефект можна пояснити втратними у діелектрику, на який було нанесено метаматеріал. У частотному діапазоні 2,7 ... 2,9 ГГц коефіцієнт передачі оригінальної антени у першому каналі складає

-15,8... -11 дБ, в той час як для модифікованої -17...-12 дБ. Для другого каналу відповідно -26...-12 в оригінальній, проти -22...-27 у модифікованої. Також треба відзначити що використання метаматеріалу майже не вплинуло на рівень розв'язки між двома портами.

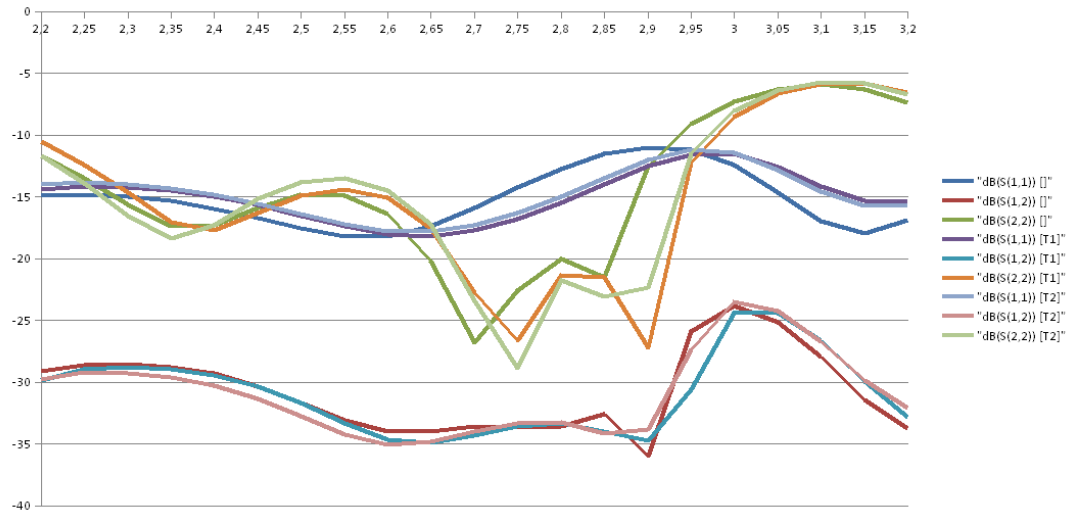


Рисунок 5.30 – Порівняння частотних залежностей S-параметрів антен розглянутих модифікацій

На рисунку 5.31 зображено порівняння частотних залежностей активної та реактивної складових вхідних опорів входів 1 та 2 антен розглянутих модифікацій.

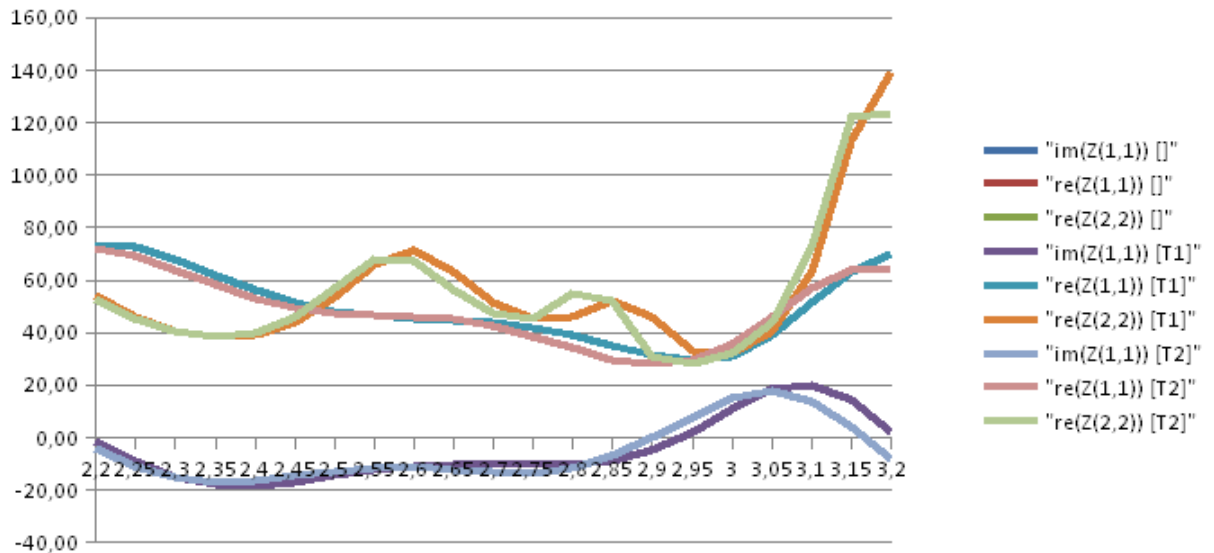
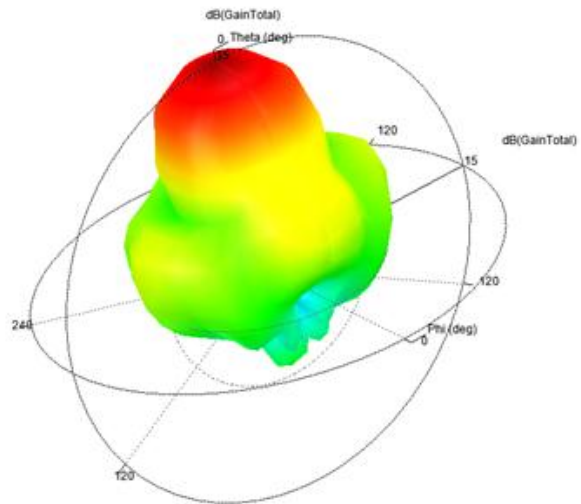
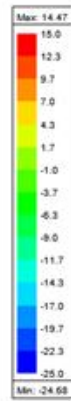


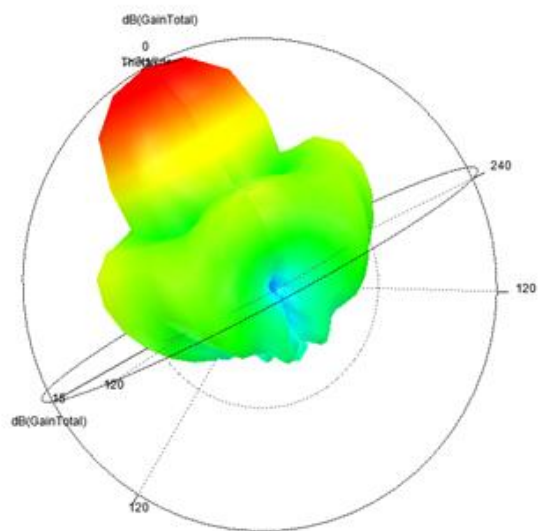
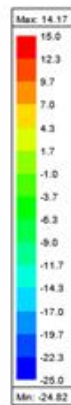
Рисунок 5.31 – Порівняння частотних залежностей активної та реактивної складових входних опорів входів 1 та 2 антен розглянутих модифікацій

Що стосується характеристик спрямованості на рисунку 5.32, то суттєвих змін у діаграмах та їх чисельних параметрах (ширина головної пелюстки, рівень бічних пелюсток) не відмічалось, хоча дещо трохи знизився рівень першої бічної пелюстки на 1,5 дБ. Показано, що в процесі модифікації проекту антени дещо змінювався загальний коефіцієнт підсилення, який впливає на дальність зв'язку в межах (14,0 ... 14,47 дБ).

Загальне підсилення за рахунок поліпшення характеристик узгодження збільшилось на 2 дБ, або в 1,58 рази.



a)



b)

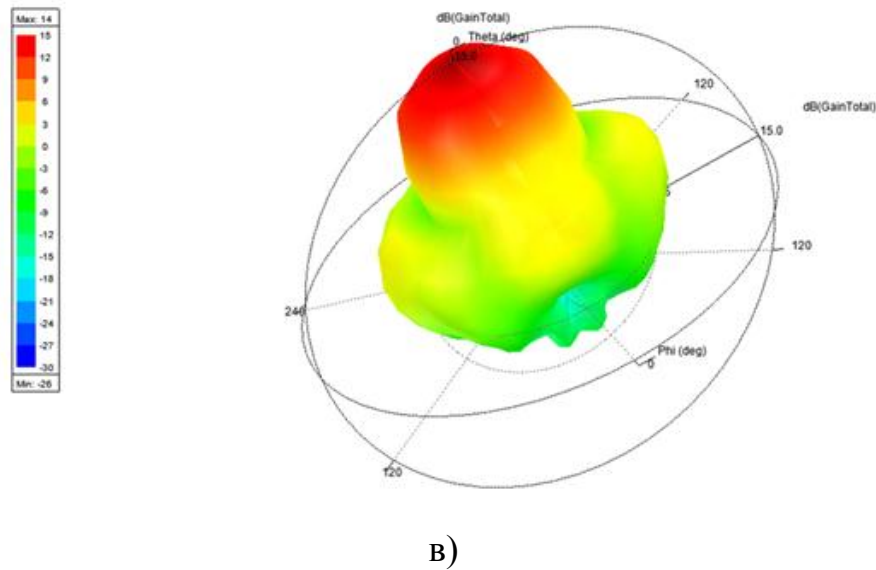


Рисунок 5.32 – Порівняння загального підсилення антен всіх розглянутих модифікацій

Слід зазначити, що напрямки можливих подальших досліджень на тернистому шляху покращення параметрів та характеристик антени AGATA MIMO 2x2 доцільно визначити наступним чином.

По-перше, треба вивчити поведінку антени в високочастотній частині діапазону.

По-друге, розрахувати або методом оптимізації знайти вдалу геометрію елементів метаструктури.

По-третє, спробувати інші (зокрема, MNG) елементи метаструктур.

По-четверте, дослідити вплив форми патч-елемента на спрямовані властивості та узгодженість MIMO антени.

ВИСНОВКИ

Виконано теоретичні і експериментальні дослідження антени AGATA MIMO 2x2. На основі отриманих даних було розроблено спосіб покращення електричних та масо-габаритних параметрів за допомогою метаматеріалу ENG – типу. Для покращеної антени проведено аналогічні з AGATA MIMO 2x2 дослідження. Порівнюючи отримані характеристики антени з додатковим елементом із метаматеріалу і звичайної антени AGATA MIMO 2x2 можна відзначити наступне.

Впродовж дослідження запропонованих структур за допомогою середовища електродинамічного 3D аналізу HFSS 17.2 вдалося виявити, що шляхом зміни розмірів, конфігурації та типу елементів метаматеріалу можна налаштовувати відповідну резонансну частоту антени і узгоджувати її з фідером живлення. Товщина елементів і відстань між ними регулюють ступінь металізації метаматеріалу, а значить, і рівень взаємодії з електромагнітним полем випромінювача. Значні зміни характеру впливу матеріалу також відбуваються при переході від елементів MNG-типу ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$), де переважають струми провідності, до матеріалу ENG-типу ($\epsilon < 0$, $\mu > 0$), де переважають струми зміщення. Встановлено, що в діапазоні 1,8 ... 2,7 ГГц розміри елементів повинні знаходитись у межах 2...1,5 мм, а відстань між ними повинна бути порядку 250...500 мкм.

Внаслідок застосування метаматеріалів в складі MIMO антен відбувається зміщення усіх характеристик антени у бік більш високих частот. При цьому робочий діапазон частот антени розширюється до меж 1,8...3 ГГц, покращується узгодження антени з фідером (внаслідок чого коефіцієнт стоячої хвилі не перевищує значення 1,21). Потенційних виробників та споживачів цього інноваційного продукту можуть зацікавити зменшені лінійні розміри та маса антени MIMO у порівнянні з наявними аналогами на ринку антен з просторовим рознесенням.

Частотні залежності антени після введення підкладки із метаматеріалу змістилися у бік більш високих частот за рахунок відповідної зміни електрофізичних параметрів підкладки з метаматеріалу.

Збільшилась відносна ширина робочих частот антени.

З'явилася можливість зменшити масо-габаритні характеристики антени.

Результати роботи обговорювались на міжнародних науково-практичних конференціях, Тижнях науки – 2020, 2021 [7] та захищались на Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт у квітні 2021 року в ХНУРЕ, м. Харків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Слюсар В.И. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы [Текст] / В.И. Слюсар. – К.: Первая миля, 2009. – 25 с.
2. Бугрова Т.І., Поляруш Д.А. Антенна широкосмугового доступу до інтернету з використанням технології МІМО // Тиждень науки-2019. Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 15-19 квітня 2019 р. [Електронний ресурс] / Редкол.: В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 1 електрон. опт.диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана. ISBN 978-617-529-223-5. – С.22-23.
3. M.antex-ru/stone AGATA MIMO 22 BOX – широкополосная панельная антенна с боксом для модема 4G/3G/2G (15-17 dBi). [Електронний ресурс]: Режим доступу <https://m.antex-ru/store/39023/?pos=914749>.
4. Enghetaand R. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations [Текст] / R. Enghetaand, W. Ziolkowski. – NY.: Wiley-IEEE Press, 2006. – 876 с.
5. Банков С.Е. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft [Текст] / С.Е Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. – 256 с.
6. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства: учебник для ВУЗов [Текст] / Г.Н Кочержевский и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
7. Бугрова Т.І., Баранов В.А. Роль метаматеріалів у конструкції МІМО антен // Тиждень науки-2021. Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 21-23 квітня 2021 р. [Електронний ресурс] / Редкол.: В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ ЗП, 2021. – 1 електрон. опт.диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.