

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

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікацій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2021 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

Спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Проектування друкованої патч-антени діапазону 2,4 ГГц»
«Design of Printed Patch Antenna for 2.4 GHz Band»

Виконав: студент _____4_____ курсу, групи _____ТМ-71_____

(шифр групи)

Алексишин Антон Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник Професор, к.т.н., Якорнов Євгеній Аркадійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант Доцент, к.т.н., Трубаров Ігор Володимирович

(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент Професор, д.т.н., Трубін Олександр Олексійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Алексишину Антону Олександровичу

1. Тема роботи : «Проектування друкованої патч-антени діапазону 2,4 ГГц»

«Design of Printed Patch Antenna for 2.4 GHz Band»

керівник роботи _____Якорнов Євгеній Аркадійович, професор, к.т.н_____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 14 квітня 2021 р. № 1007-с

2. Термін подання студентом роботи 10.06.2021

3. Вихідні дані до роботи

Необхідно спроектувати планарну дворезонаторну патч-антену з мікросмушковим живленням. Основні параметри антени:

- Тип антени: планарна прямокутна мікросмушкова патч-антена з мікросмушковим живленням, англ. Planar Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna
- Центральна частота: 2442 МГц
- Вхідний опір: 50 Ом
- КСВН ≤ 2 в діапазоні частот 2400...2483 МГц.

Антенa повинна забезпечувати приймання/передавання радіохвиль в діапазоні каналів 1 – 13 стандарту Wi-Fi (див. [1]).

Антенa реалізується за мікросмужковою технологією. Параметри мікросмужкової лінії, на основі якої виконується антенa

- Виробник: Rogers. Марка: RT/Duroid 5880
- Діелектрична проникність ($\varepsilon = 2.2$).
- Висота підкладки: $h = 1.575 \text{ mm}$.
- Тангенс діелектричних втрат: $\tan\delta = 0.0009$.
- Товщина смужки: $t = 0.018 \text{ mm}$.
- Матеріал провідників: мідь.

4. Зміст роботи

Огляд літературних джерел

Розрахунок параметрів однорезонаторної патч-антени

Моделювання та оптимізація однорезонаторної патч-антени

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Огляд літературних джерел з тематики проектування мікросмужкових антен	<u>Трубаров Ігор Володимирович, доцент, к.т.н.</u>	23.01.2021	21.03.2021
Розрахунок основних параметрів мікросмужкової антени	<u>Трубаров Ігор Володимирович, доцент, к.т.н.</u>	22.03.2021	31.03.2021
Моделювання прямокутної планарної однорезонаторної патч-антени	<u>Трубаров Ігор Володимирович, доцент, к.т.н.</u>	1.04.2021	1.05.2021

7. Дата видачі завдання 23.01.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір літератури з теми дослідження	23.01.2021-12.02.2021	
2	Написання розділу: «ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ТЕМАТИКИ ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕН»	13.02.2021-21.03.2021	
3	Розрахунок основних параметрів однорезонаторної прямокутної патч-антени з мікросмужковою лінією	22.03.2021-31.03.2021	
4	Моделювання та оптимізація однорезонаторної прямокутної патч-антени з мікросмужковою лінією за допомогою ПЗ ANSYS Electronics Desktop	1.04.2021-1.05.2021	
5	Написання розділу: «Розрахунок основних параметрів однорезонаторної прямокутної патч-антени з мікросмужковою лінією»	1.05.2021-15.05.2021	
6	Написання розділу: «МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАНАРНОЇ ОДНРЕЗОНАТОРНОЇ ПАТЧ-АНТЕНИ З МІКРОСМУЖКОВИМ ЖИВЛЕННЯМ»	16.05.2021-05.06.2021	

Студент

Антон Алексишин

Керівник

Ігор Трубаров

РЕФЕРАТ

Робота містить 75 сторінок, 4 таблиці та 59 рисунки. Було використано 13 джерел.

Мета роботи: Спроектувати та оптимізувати характеристики патч-антени з повітряним діелектриком, що працює у неліцензованому частотному діапазоні 2.4 ГГц, використовуючи для оптимізації її параметрів систему автоматизованого проектування як засіб чисельного моделювання електромагнітного поля антени.

Методи: аналіз патч-антен та із різновидів, розрахунок параметрів прямокутної патч-антени за допомогою програмного забезпечення MATLAB, моделювання прямокутної патч-антени та дослідження її властивостей за допомогою програмного забезпечення ANSYS Electronics Desktop HFSS.

Об'єкт дослідження: Планарна однорезонаторна прямокутна патч-антена з мікросмужковою лінією в діапазоні WiFi

Предмет дослідження: Модель однорезонаторної прямокутної патч-антени з мікросмужковою лінією

Результат: За допомогою програмного забезпечення MATLAB та формул з джерела [12] було розраховано параметри антени. За допомогою ANSYS Electronics Desktop HFSS було побудовано модель та оптимізовано її для задоволення початкових умов до антени (коефіцієнт відбиття та робоча частота).

Ключові слова: Патч-антена, Однорезонаторна патч-антена, KCXH, коефіцієнт відбиття, діаграма спрямованості, мікросмужкова антена, ANSYS Electronics Desktop HFSS, MATLAB.

ABSTRACT

The work consists of 75 pages 4 tables and 59 figures. 13 references are used

The purpose of the diploma: to acquire skills and knowledge for the calculation, design and optimization of patch antennas on a microstrip line in the WiFi range.

Methods: analysis of patch antennas and varieties, calculation of rectangular patch antenna parameters using MATLAB software, modeling of rectangular patch antennas and study of its properties using ANSYS Electronics Desktop HFSS software.

Object of research Planar single-cavity rectangular patch antenna with microstrip line in the WiFi range

Subject of research Model of a single-cavity rectangular patch antenna with a microstrip line

Result: Antenna parameters were calculated using MATLAB software and formulas from the source [12]. With ANSYS Electronics Desktop HFSS, a model was built and optimized to meet the initial conditions for the antenna (reflection coefficient and operating frequency).

Keywords: Patch antenna, Single-cavity patch antenna, KSHN, reflection coefficient, radiation pattern, microstrip antenna, ANSYS Electronics Desktop HFSS, MATLAB.

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ТЕМАТИКИ ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕН.....	11
1.1. Класифікація антен.....	11
1.2. Основні характеристики патч антен	13
1.2.1. Методи живлення антени	16
1.2.2. Діапазон частот.....	17
1.2.3. Компактні мікросмужкові патч-антени	18
1.2.4. Патч-антени класичних форм	19
1.2.5. Патч-антена кругової поляризації	20
1.2.6. Диска мікросмужкова антенна.....	23
1.3. Методи живлення патч антен	24
1.3.1. Живлення методом мікрополоскової лінії.....	25
1.3.2. Коаксіальна подача (Coplanar Feed)	26
1.3.3. Безконтактне з'єднання.....	27
1.4. Методи аналізу патч антен	28
1.4.1. Модель лінії передачі.....	28
1.4.2. Режим порожнини	30
1.5. Основні чисельні методи розрахунку антен	32
1.5.1. Метод скінченних елементів (Finite Element Method – FEM)	32
1.5.2. Метод скінченних різниць у часовій області	35
Висновки до першого розділу:	38

2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОДНОРЕЗОНАТОРНОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ПАТЧ-АНТЕНИ З МІКРОСМУЖКОВОЮ ЛІНІЄЮ	39
2.1. Вхідні данні	39
2.2. Розрахунки параметрів антени.....	41
2.2.1. Коефіцієнти та параметри	41
2.2.2. Розрахунок ширини патча – W_p	42
2.2.3. Розрахунок ефективної діелектричної проникності підкладки – ϵ_{eff}	43
2.2.4. Розрахунок нормованого розширення довжини – ΔL	44
2.2.5. Розрахунок довжини патча – L_p	45
2.2.6. Розрахунок опору планарної патч-антени – R_{in}	46
2.2.7. Розрахунок точки включення – d	49
2.2.8. Розрахунок ширини виїмки – g	50
2.2.9. Розрахунок ширини мікросмушкової лінії	52
Висновки по розрахункам	53
3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАНАРНОЇ ОДНРЕЗОНАТОРНОЇ ПАТЧ-АНТЕНИ З МІКРОСМУЖКОВИМ ЖИВЛЕННЯМ.....	55
3.1. Моделювання за розрахованими параметрами	56
3.2. Оптимізація однорезонаторної антени.....	61
3.3. Результати моделювання:	69
Висновки до моделювання:.....	70
ВИСНОВКИ:.....	71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	72
ДОДАТКИ.....	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

KCXH (VSWR)	Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою
FEM (MCE)	Finite element method - Метод скінченних елементів
MoM	Method of Moments - метод моментів
FDTD	Finite Difference Time Domain - Метод скінченних різниць у часовій області
ПЗ	Програмне забезпечення
EMX	Електромагнітна хвиля
MCA (MPA)	Мікросмужкова антена
ПА	Патч-антена
TLM	матриця ліній передачі

ВСТУП

Зі стрімким зростанням технологічного рівня постає потреба в підвищенні ефективності антенних пристроїв.

На сьогоднішній день можна зустріти все більше й більше пристроїв телекомунікації для яких зі зростанням технологій постає потреба вдосконалення антен, зокрема WiFi та інших широко розповсюджених бездротових технологіях.

Мета роботи: Спроекувати та оптимізувати характеристики патч-антени з повітряним діелектриком, що працює у неліцензованому частотному діапазоні 2.4 ГГц, використовуючи для оптимізації її параметрів систему автоматизованого проектування як засіб чисельного моделювання електромагнітного поля антени.

Актуальність роботи Про актуальність досліджень в цій галузі говорить популярність цих технологій, що стала очевидною з огляду на усі переваги бездротового зв'язку. Зокрема значної мобільності пристроїв та стрімкого зростання швидкостей, що наближаються до тих, що забезпечують дротовий зв'язок.

Методи дослідження: аналіз патч-антен та із різновидів, розрахунок параметрів прямокутної патч-антени, моделювання прямокутної патч-антени та дослідження її властивостей за допомогою програмного забезпечення ANSYS Electronics Desktop HFSS.

Практична цінність Розроблена ознорезонаторна патч-антена з мікросмужковою лінією в діапазоні WiFi може використовуватися для подальшого дослідження антенних виробів та бездротової передачі даних. Також даний пристрій можна використовувати в громадському та військовому обладнанні зв'язку. Розглянута патч-антена з мікросмужковою лінією може використовуватися у телекомунікаційних мережах.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ТЕМАТИКИ ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕН

Найважливіше питання організації безперебійно діючого високоякісного радіозв'язку - це вибір робочої хвилі (частоти) і антени для конкретних умов місцевості, пори року і географічного розташування. Особливо важливо це при використанні рухомих радіостанцій, передавачі яких мають обмежені можливості регулювання потужності.[1]

При експлуатації таких радіостанцій поліпшити технічні дані передавача або приймача неможливо, тоді як вибір антени і робочої частоти і правильне їх використання можуть вплинути на радіозв'язок.

Будь-яка лінія радіозв'язку, крім передавача і приймача, має антени, пов'язані між собою електромагнітними хвилями (радіохвилями), що поширюють у навколишньому середовищі.

Передавальна антена живиться високочастотним струмом від генератора передавача. Цей струм, що протікає по дротах антени, є джерелом електромагнітного поля, яке створюється навколо антени і поширюється від неї у вигляді електромагнітних хвиль зі швидкістю 300000 км / св навколишній простір. Іншими словами, передавальна антена перетворює енергію високочастотного струму в енергію електромагнітного поля.

У приймальній антени, що знаходиться в електромагнітному полі, створеному передавальною антеною, під дією змін цього поля виникає високочастотний струм. Отже, приймальня антена перетворює енергію електромагнітного поля в енергію електричного струму тієї ж частоти.

Антена - це радіотехнічне пристрій, призначений для перетворення електромагнітних коливань високої частоти в електромагнітні хвилі і випромінювання її у вільний простір на передачу і навпаки на прийом. [1]

1.1.Класифікація антен

Антени можна класифікувати за функціональним призначенням, робочому діапазону хвиль, з вигляду поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ), спрямованості дії і способу харчування. [1]

За функціональним призначенням антени діляться на:

- передавальні;
- приймальні;
- приймально-передавальні.

По конструкції і принципу дії:

- лінійні;
- апертурні;
- антенні решітки.

Антени лінійного типу характерні тим, що розміри поперечного перерізу у них малі в порівнянні з довжиною хвилі. Зазвичай такі антени виконуються з відрізка проводу або декількох проводів, або у вигляді стрижня.

Апертурні антени мають розкривши (апертуру), через який проходить потік випромінюваної (прийнятої) енергії. У свою чергу, лінійні і апертурні антени можуть бути представлені як безперервні системи, що складаються з елементарних випромінювачів: диполів (вібраторів) Герца, елементарних рамок або джерел Гюйгенса.

Антенна решітка - це сукупність ідентичних випромінюючих (Прийомних) елементів, розташованих в певному порядку і живляться від одного або декількох когерентних джерел.

За поляризації:

- антени з лінійною поляризацією;
- антени з обертовою поляризацією.

За смузі пропускання:

- вузькосмугові;
- широкосмугові;
- широкодіапазонні.

За діапазону радіохвиль:

- антени діапазону ДВЧ (МВ);
- антени діапазону УВЧ (ДМВ);
- антени діапазону СВЧ (СМВ);
- антени діапазону КВЧ (ММВ).

За напрямленими властивостями:

- ненаправлення;
- цілеспрямовані.

За місцем установки:

- наземні (стаціонарні);
- бортові (рухливі).

За призначенням радіотехнічних пристроїв:

- зв'язкові;
- навігаційні;
- радіолокаційні .

1.2. Основні характеристики патч антен

Друковані антени (ПА), які отримали в англійській літературі назву patch антен активно досліджуються, починаючи з п'ятдесятих років ХХ століття [1]. В українській літературі використовується термін Мікрополоскова антена [2]. Їх можна обґрунтовано віднести до числа одних з найбільш добре вивчених типів НВЧ антен.

Стимулом для дослідження мікросмужкових антен, зокрема, послужило активний розвиток космічної техніки, де питання зниження габаритів стоїть особливо гостро. Штучні супутники Землі 60-70-х років мали до 120 антен зі складною і розгалуженою антенно-фідерною системою. При цьому вона займала до 20% площі об'єкта. Очевидно, що виконати численні і жорсткі вимоги до антенно-фідерної системи можна при наявності друкованих конформних антен малої товщини. Мікрополоскових антени забезпечують високу повторюваність розмірів, низьку вартість, малі

металоємність, габаритні розміри, вартість. Завдяки друкованій технології виготовлення стало простіше налагодити серійний випуск антен.[2]

Мікрополоскова антена, ймовірно, є найуспішнішою і революційною технологією за всю історію. Її успіх зумовлений добре відомими перевагами.[3] І він також має деякі обмеження, найбільш відомими з яких є вузька смуга пропускання, вузьке опір, низьке осьове відношення (AR), мале посилення, більш низька пропусканна здатність по потужності і низька ефективність. Кілька методів були розроблені для збільшення смуги пропускання. Мікрополоскова антена була винайдена Дешамом в 1953 році в США. У 1955 році Гултон і Бассиніу Франції запатентували; Я «плоска» антена, яку можна використовувати в діапазоні УВЧ. Конструкція мікрополоскового випромінювача не використовувати до перших 1970-х років, коли відразу з'явилася потреба в низькопрофільних конформних антенах на підростаючих ракетах нового покоління. Перший мікрополосковий радіатор був сконструйований Байроном на початку 1970-х років. Цей приймальний провід був направляючу смугу довжиною в кілька довжин хвиль і шириною в половину довжини хвилі, ізольовану від площини заземлення діелектричної смуги. Смуга харчувалася з перервами з використанням коаксіальних з'єднувачів вздовж вихідних країв і використовувалася в якості масиву. Мансон в 1974 р продемонстрував новий клас мікросмужкових антен, придатних для ракет, що використовують мікросмужкові випромінювачі і мікросмужкові схеми живлення на одній підкладці.

Починаючи з середини 1980-х і протягом 1990-х років, велика кількість досліджень було присвячено розширенню смуги пропускання патч-антен за рахунок використання широкосмугових методів. Способи, розроблені для проектування ефективних широкосмугових патч-антен, мають одну або кілька з таких особливостей: використовуються товсті підкладки з низькою діелектричною проникністю; схема розроблена для зменшення проблеми невідповідності, пов'язаної з товстими підкладками; за допомогою

паразитних елементів або пазів або нові резонанси вводяться поруч з основним резонансом, або існуючі резонанси зближуються один з одним, так що в цілому виходить більш широка смуговий характеристика.

Часто мікросмужкові антени також називаються патч-антенами. Випромінюючі елементи та лінії подачі зазвичай знаходяться над діелектричною підкладкою. Випромінювальний патч може мати квадратну, прямокутну форму, бути тонкою смугою (дипольний), мати кругову, еліптичну, трикутну або будь-якою іншу конфігурацію. [2]

Квадратні, прямокутні, дипольні (смуги) і кругові є найбільш поширені через легкість їх аналізу та виготовлення, а також їх привабливі характеристики випромінювання, особливо низьке міжполярне випромінювання. Мікросмужкові диполі є привабливими, оскільки вони за своєю природою мають велику пропускну здатність і займають менше місця, що робить їх привабливими для антенних решіток. Лінійні та кругові поляризації можуть бути досягнуті за допомогою окремих елементів або решіток мікросмужкових антен. Решітки мікросмужкових елементів, з одним або декількома каналами, також можуть бути використані для введення можливостей сканування та досягнення більшої спрямованості. [3]

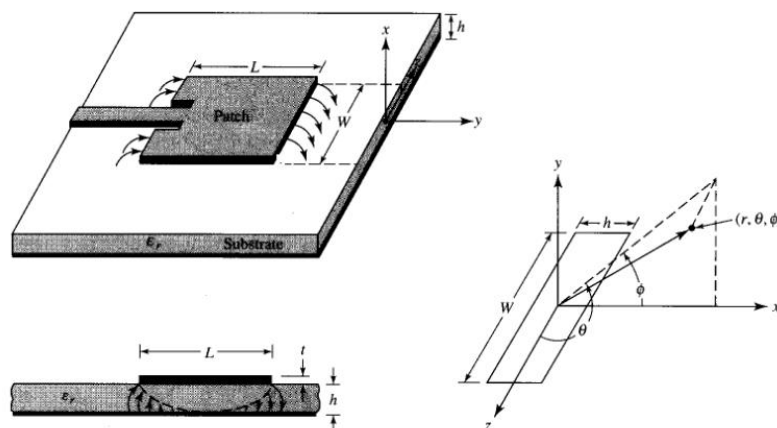


Рисунок 1.1 – Мікросмужкова антена та система координат

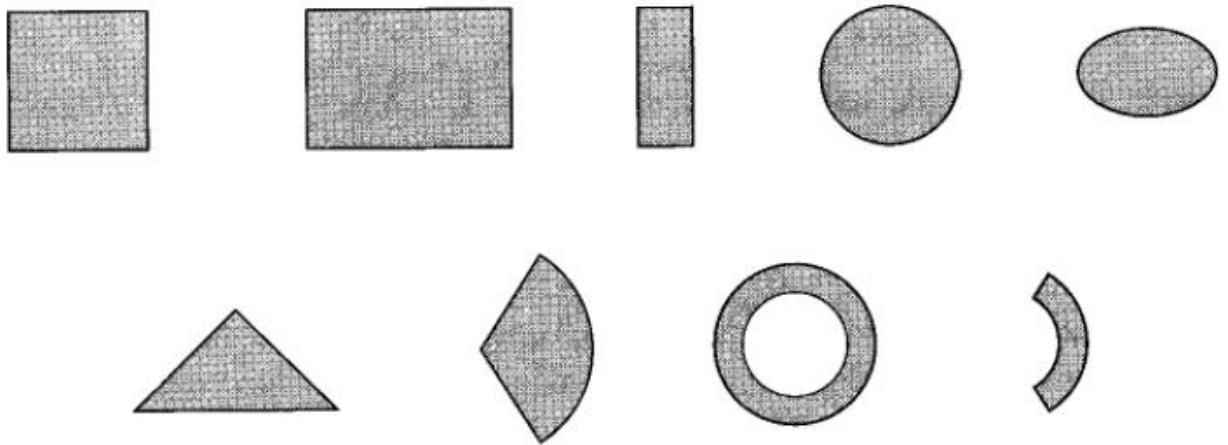


Рисунок 1.2 – Репрезентативні форми елементів мікросмужкових патчів

1.2.1. Методи живлення антени

Є багато конфігурацій, які можуть використовуватися для подачі енергії мікросмужковим антенам. Чотири найбільш популярні: мікросмужкова лінія, коаксіальний зонд, апертурне з'єднання та близьке з'єднання. Вони показані на рис. 1.3. Лінія живлення мікросмужкових антен є провідною смугою, яка звичайно має набагато меншу ширину порівняно з патчем. Корпус мікросмужкових ліній легко виготовити, він простий у моделюванні. Однак, товщина діелектричної підкладки збільшує поверхневі хвилі та зменшує випромінювання, що для практичних конструкцій обмежується пропускною здатністю (як правило, 2-5%).

Широко використовуються також коаксіальні лінії живлення, де внутрішній провідник коаксіального кабелю приєднується до патча, а зовнішній провідник кабелю до площини заземлення. Коаксіальний кабель живлення також легко виготовити. Однак він також має вузьку смугу пропускання, і його моделювання складніше, особливо для товстих підкладок. Як лінія живлення у вигляді мікросмужкової лінії має властивості асиметрії, і може крос-поляризоване випромінювання. Для

подолання цього недоліку розроблені безконтактні подачі електромагнітної енергії. [4]

Зазвичай для тонка підкладка має високу діелектричну проникність, а товста — низьку діелектричну сталу. Пластина заземлення при безконтактному збудженні справляє дію на випромінювальний елемент та мінімізує перешкоди для формування необхідної поляризації. Для цієї конструкції для можуть використовуватися електричні параметри підкладки, ширина лінії подачі та розмір і позиція «слотів».

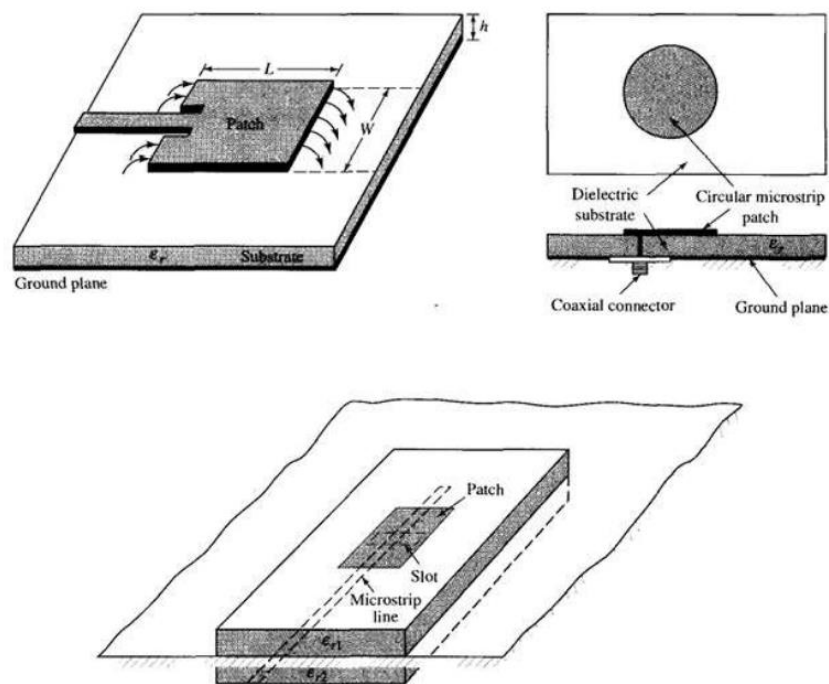


Рисунок 1.3 – Типові види живлення мікросмужкових антен

Якщо «слот» знаходиться в центрі нижче патча, де ідеально для передачі електромагнітної енергії та утворення режиму випромінювання. В цьому випадку смуга пропускання може складати до 13%. Проте технологічне виконання такого виду живлення дещо складніше.

1.2.2. Діапазон частот

Мікрополоскові патч-антени широко використовуються за останні 50 років в різних корисних додатках в галузі зв'язку. Тому багато програм охоплюють широкий діапазон частот приблизно від (100 МГц до 100 ГГц). Різні чинники визначають практичний діапазон робочих частот, в яких може

працювати антена. Фізичні властивості антени (розмір і вага) часто є обмежуючими факторами на більш низьких частотах, в той час як механічні допуски і електричні втрати часто домінують в конструкції антени на більш високих частотах.

Існує безліч опублікованих проектів МРА, що працюють на частотах від 1 до 60 ГГц, з розмірами від декількох сантиметрів до декількох міліметрів і діелектричної проникністю приблизно від $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$.

Частота 450 МГц - це найнижча опублікована частота, для якої була розроблена і виготовлена мікросмугова патч-антена . МРА має відмінні характеристики поширення сигналу, що робить їх ідеальним вибором для сільських мереж зв'язку. Була успішно розроблена патч-антена з невідомим значенням діелектричної проникності. Найвища опублікована частота для мікрополоскової патч-антени в даний час складає 60 ГГц, де розміри патч-антени отримані методом збільшення розміру, в якому антена виходить з одним зі своїх ТЕМ-режимів більш високого порядку, атрибути найближче відповідають основній моді, де антенна решітка має розмір (5,54 мм x 4,44 мм x 0,127 мм), витравлений на підкладці друкованої плати з низькими втратами з використанням симетричних прямокутних прорізів, вирізаних на стороні патча.

1.2.3. Компактні мікросмужкові патч-антени

За останні роки бездротовий зв'язок прогресував дуже швидко, і багато мобільних пристроїв стає все меншим і меншим. Для задоволення вимог до мініатюризації потрібні компактні антени. Багато програм, особливо для споживчих бездротових програм, вимагають інтеграції компактних антен у невеликі пакети, такі як портативний комп'ютер та смартфони чи інші портативні пристрої.

Для компактної та широкосмугової патч-антенної розробки було розроблено різноманітні широкосмугові методи з використанням трьох підходів до зменшення Q, узгодження імпедансу та множинних езонансів. Відомо, що основними факторами, що впливають на пропускну здатність

мікросмушкової патч-антени, є форма випромінювача, схема подачі, підкладка та розташування випромінюючих та паразитних елементів.

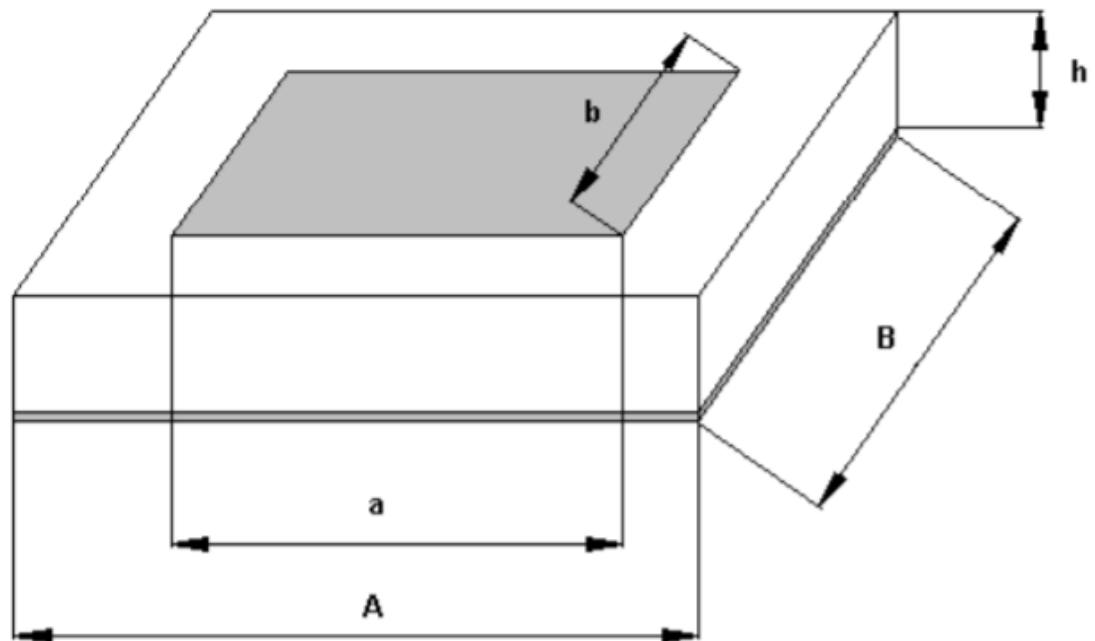
Простий прийом, який використовують дослідники, - це сорти щілин або клаптиків або ґрунтових живців. Існує цілий ряд антен, що використовують цю техніку, оскільки слоти різної форми впливають на поточні шляхи на плямі і призводять до різних режимів на резонансних частотах.

1.2.4. Патч-антени класичних форм

До них відноситься, в першу чергу, напівхвильова прямокутна ПА (див. рис. 1.1), яка має максимальний габаритний розмір a , наближено визначається наступним співвідношенням [2]:

$$a \approx \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon}},$$

де λ – довжина хвилі на робочій частоті, ϵ – відносна діелектрична проникність матеріалу, з якого виконана ПА. Також до ПА класичної форми слід віднести круглу і кільцеву ПА.

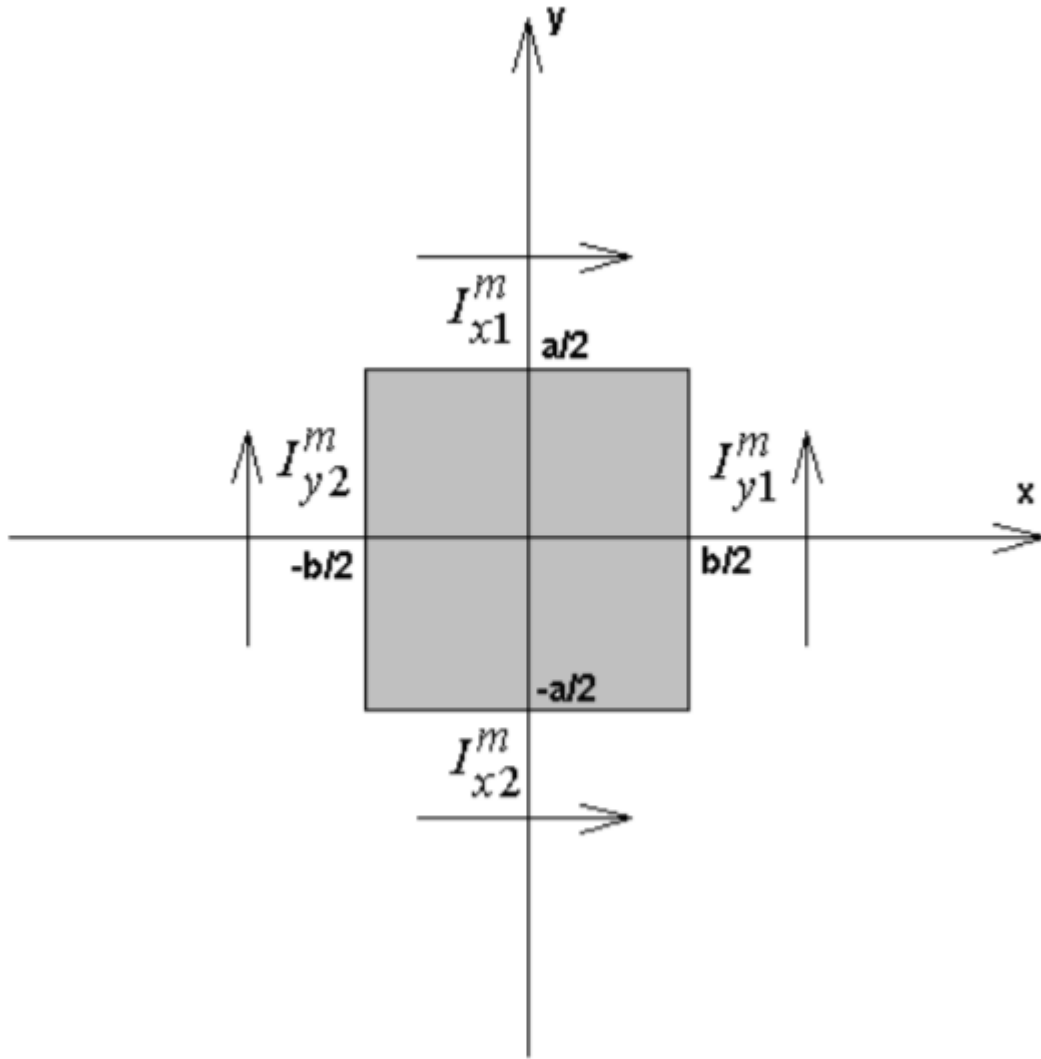


Мал. 1.4. Напівхвильовий випромінювач

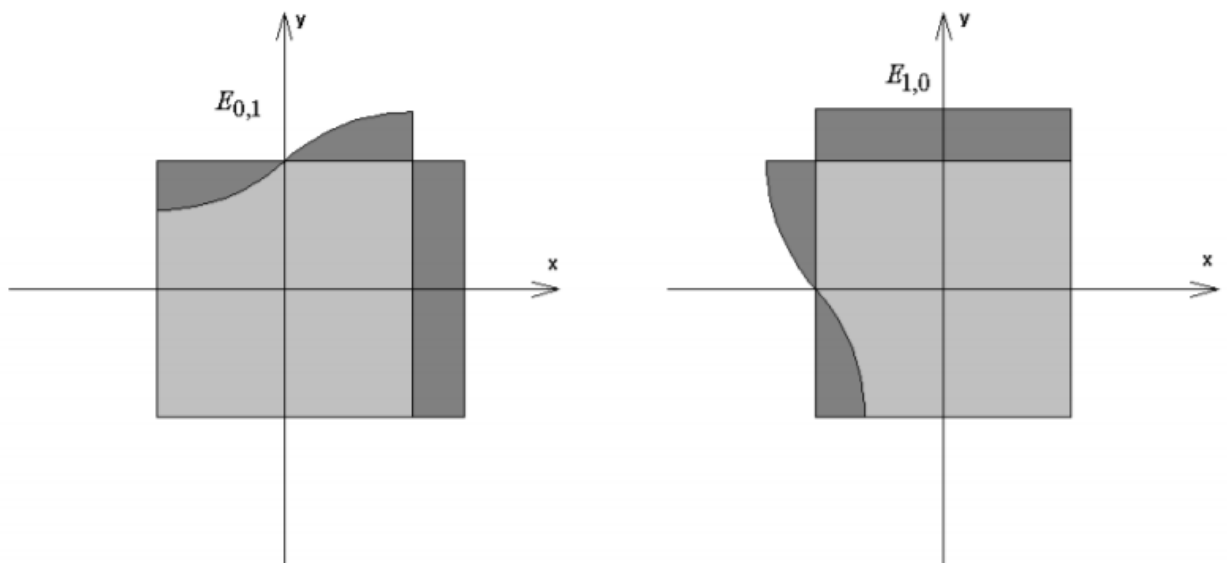
1.2.5. Патч-антена кругової поляризації

У багатьох додатках потрібно прийом хвиль кругової поляризації. Антени, що вирішують цю задачу мають суттєві особливості порівняно з антенами лінійної поляризації. Тому має сенс розглянути їх окремо.[5]

Поле кругової поляризації формується при випромінюванні двох схрещених лінійних електричних або магнітних струмів, порушених із зсувом фаз на 90° . Відповідно до концепції ПА, її поле випромінювання можна наближено представити полем магнітних струмів, поточних вздовж бічних граней. Структура таких струмів в прямокутній напівхвильовій ПА показана на рис. 1.2 а. Важливо відзначити, що струми, поточні уздовж осі Ox і уздовж осі Oy створюються різними коливаннями прямокутної ПА. Структура полів основних ортогональних коливань антени показана на рис. 1.3 . Коливання E_{01} створює струми $m_y I$, а коливання E_{10} струми $m_x I$. Таким чином, ми бачимо, що для формування поля випромінювання кругової поляризації в ПА необхідно одночасно порушити зі зрушенням фаз на 90° обидва основні коливання.



Мал. 1.5. Структура струмів в прямокутній напівхвильовій ПА.

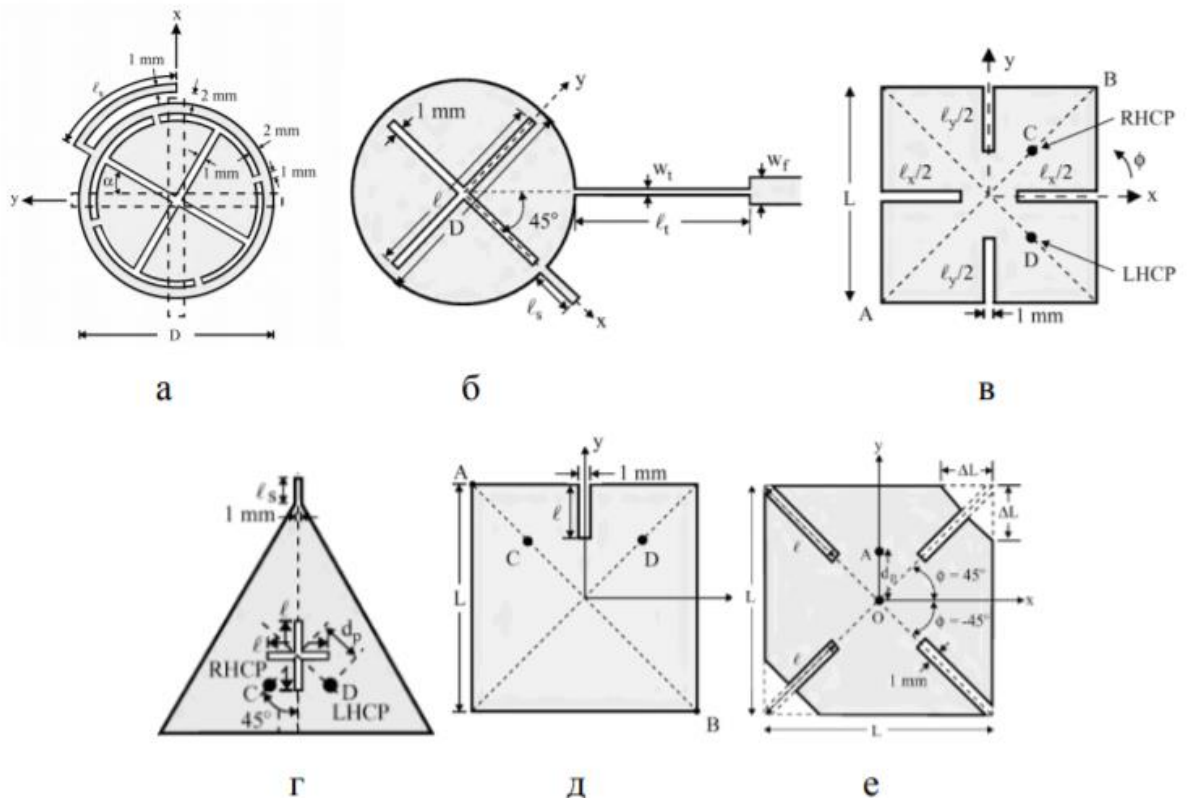


Мал. 1.6. Структура полів основних ортогональних коливань антени.

Завдання порушення основних коливань вирішується за допомогою спеціальних схем збудження або схем живлення. Елемент порушення ПА, що зв'язує антену зі схемою збудження часто виконується у вигляді металевого штиря. Його розташування в площині антени можна охарактеризувати однією точкою. Тому часто використовуються терміни одноточкове і багатоточкове збудження ПА і, відповідно, одноточкові багатоточкові схеми живлення.

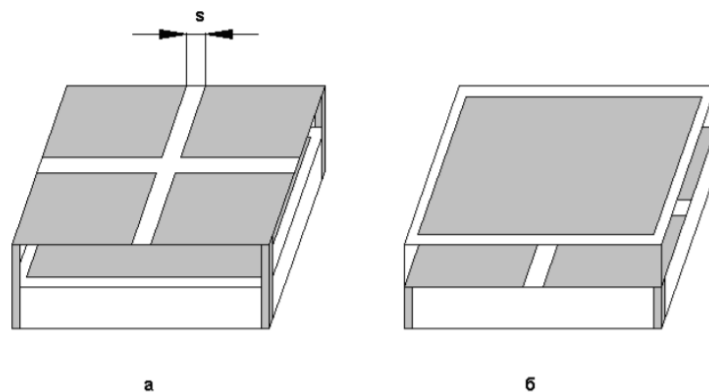
ПА кругової поляризації має суттєві особливості в порівнянні з антенами лінійної поляризації.

Розглянемо більш докладно показану на рис. 1.4 е ПА з чотирма діагональними щілинами і парою зрізаних кутів [6]. Щілини подовжують шляху протікання струмів, а зрізані кути порушують симетрію, збуджуючи два ортогональних коливання. Антена збуджується в одній точці А, що лежить на осі Oy .



Мал. 1.7. Конструкції мініатюрних ПА кругової поляризації

Зміна довжини щілин і глибини зрізу кута дозволяє змінювати коефіцієнт еліптичності і ширину смуги пропускання. Так само щілини дозволяють знизити резонансну частоту. Багатошарові мініатюрні ПА кругової поляризації мають істотно більш складну конструкцію в порівнянні з такими ж антенами лінійної поляризації.[6]



Мал. 1.8. Двошарові мініатюрні ПА кругової поляризації

1.2.6. Диска мікросмужкова антена

Крім прямокутної антени, наступною найбільш популярною конфігурацією мікросмужкових антени є дискова мікросмужкова антена (круговий патч чи диск), як показано на рис. 1.5. Режими випромінювання, які підтримуються круглою патч-антеною, можна знайти шляхом вибору розміру патча, заземлення та матеріалу між цими двома площинами. Як і в прямокутному патчі, режими випромінювання визначаються розміром круглої мікросмужкової антени, висота підкладки (h). Тут складова електромагнітного поля ТМ, а z обирається перпендикулярно до патча. Що стосується розмірів патча, то для прямокутної мікросмужкової антени є дві ступені свободи керування (довжина та ширина). Тому порядок режимів можна змінити, змінюючи відносні розміри ширини та довжини прямокутного патча (відношення ширини до довжини).[7]

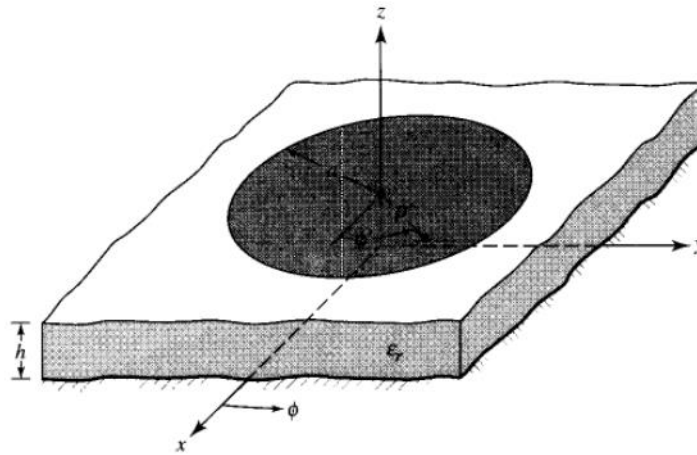


Рисунок 1.9 – Геометрія дискової мікросмужкової антени

Проте для дискової антени щоб знайти поля всередині діелектрику порожнини, ми використовуємо теорію векторного потенціалу. Для z ТМ нам потрібно спочатку знайти магнітний векторний потенціал A_z , який у циліндричних координатах повинен задовольнити однорідне хвильове рівняння

$$\nabla^2 A_z(\rho, \phi, z) + k^2 A_z(\rho, \phi, z) = 0.$$

1.3. Методи живлення патч антен

Існує багато методів живлення мікросмужкової антени.

Найпопулярнішими методами є:

- Мікрополоскова лінія.
- Коаксіальний зонд (копланарна подача).
- Безконтактна зв'язок.
- Апертурна муфта.

Оскільки антена випромінює з одного боку підкладки, її легко живити з іншого боку (заземляючої площині) або з боку елемента. Найважливіша річ, яку слід враховувати, - це максимальна передача потужності (узгодження фідера лінії з вхідним опором антени), це буде обговорюватися пізніше в

розділі узгодження імпедансу. Багато хороші зразки були відкинуті через погане харчування. Розробник може побудувати антену з хорошими характеристиками, хорошими параметрами випромінювання і високою ефективністю, але при поганому харчуванні загальна ефективність може бути знижена до низького рівня, що призведе до відмови від всієї системи.

1.3.1. Живлення методом мікрополоскової лінії.

Цей спосіб живлення дуже широко використовується, оскільки його дуже просто проектувати та аналізувати, а також дуже легко виготовляти. На рисунку (1.10) показано патч з подачею лінії мікрополоскових стрічок збоку патча.

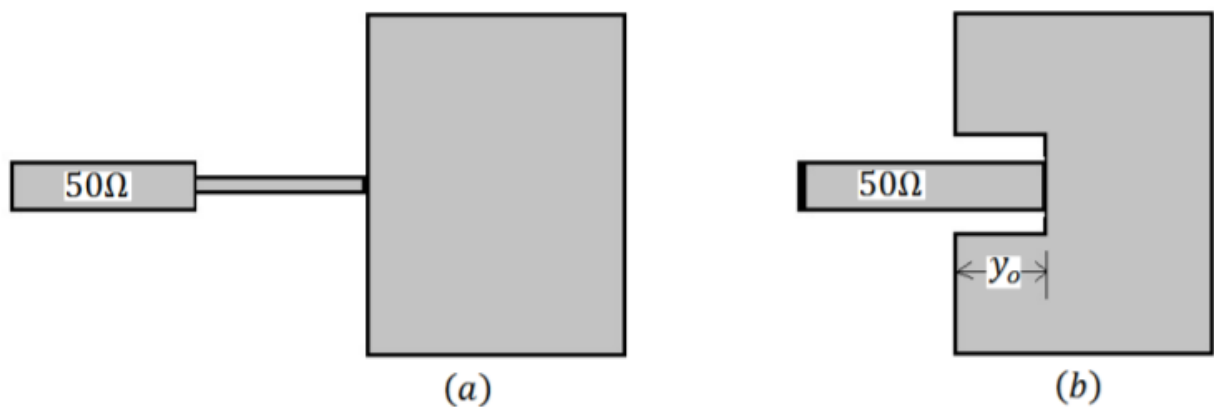


Рисунок 1.10 – патч-антена з боковим живленням

Імпеданс патча визначається як:

$$Z_a = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2$$

Характерний імпеданс перехідної секції повинен бути:

$$Z_T = \sqrt{50 + Z_a}$$

Ширина лінії переходу обчислюється :

$$Z_T = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{8d}{W_T} + \frac{W_T}{4d}\right)$$

Ширину подачі мікросмужки 50 Ом можна знайти, використовуючи рівняння нижче:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left(1.393 + \frac{W}{h} + \frac{2}{3} \ln\left(\frac{W}{h} + 1.444\right) \right)}$$

Де $Z_0 = 50\Omega$,

Довжину смуги можна знайти з:

$$R_{in(x=0)} = \cos^2\left(\frac{\pi}{L} x_0\right)$$

Довжина лінії переходу дорівнює чверті довжини хвилі:

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

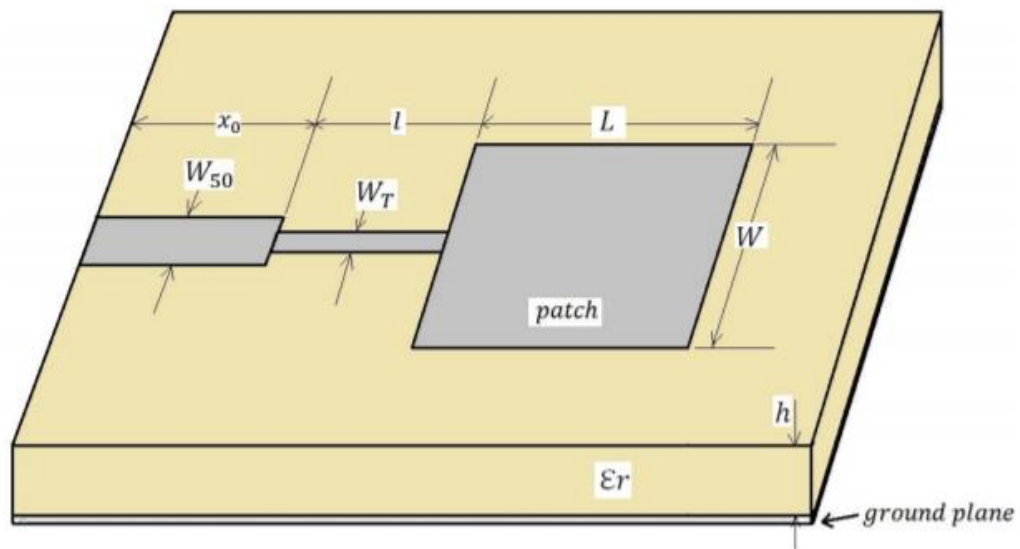


Рисунок 1.11 – Прямокутна патч-антена

1.3.2. Коаксіальна подача (Coplanar Feed)

Підключення живлення до патч-антени через зонд - це дуже простий, дешевий та ефективний спосіб. Якщо дизайнер налаштовує точку подачі на 50 Ом, то йому просто потрібно використовувати 50 Ом коаксіальний кабель із коаксіальним роз'ємом типу N. N-коаксіальний роз'єм з'єднаний із задньою стороною мікросмужкової антени (заземлення), а центральний роз'єм коаксіального пройде через підкладку і припаяний до пластиру, як показано на малюнку:

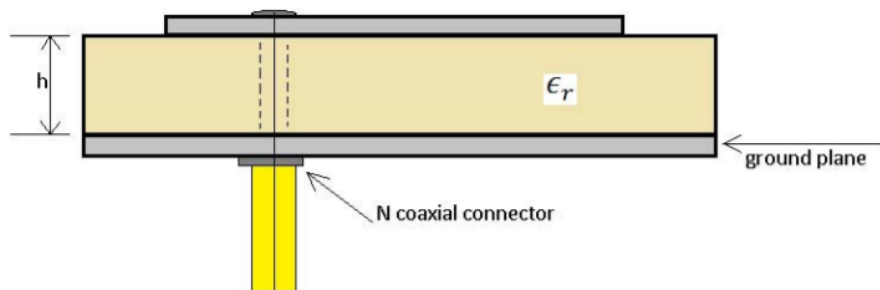


Рисунок 1.12 – Коаксиальна лінія подачі

1.3.3. Безконтактне з'єднання

Безконтактне з'єднання - це використання двох підкладок. Патч буде вгорі, пластина заземлення внизу, а мікрополоскова лінія підключена до джерела живлення і проходить між двома підкладками, як показано на малюнку (1.13). Цей тип відомий також як «Мікросмугова подача з електромагнітної зв'язком». Принцип цього механізму полягає в тому, що поведінка між патчем і смугою харчування є ємнісним. Аналіз і проектування такої антени трохи складніше, ніж інші, обговорювані в попередніх розділах, тому що розробник повинен враховувати вплив конденсатора зв'язку між Полоскова фідерної лінією і патчем s , а також еквівалентний RL-С резонансний контур, що представляє латочку і розрахунок двох підкладок. Конденсатор зв'язку цієї антени може бути розроблений для узгодження імпедансу антени.

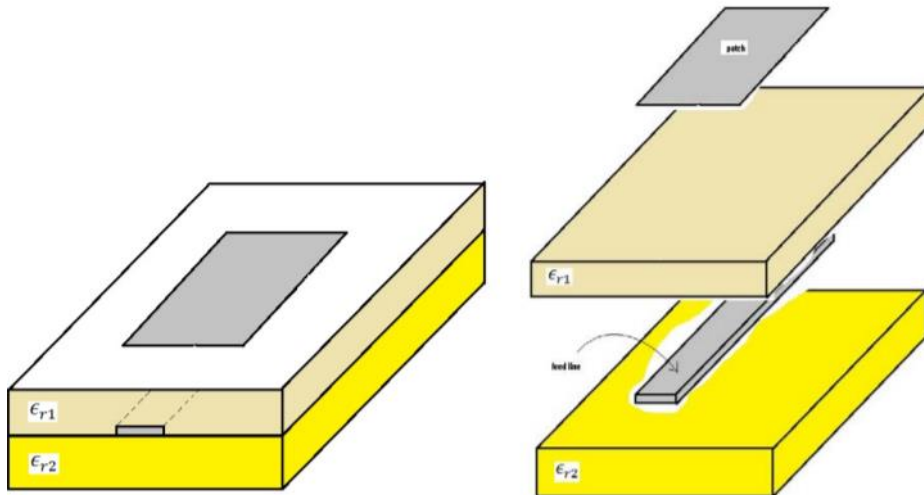


Рисунок 1.13 – Безконтактне з'єднання

1.4. Методи аналізу патч антен

Існує безліч методів аналізу патч антени. Найбільш популярні лінії передачі (в яких ми припускаємо, що патч є лінією передачі або частиною лінії передачі). Другий метод - це режим порожнини (тут ми припускаємо, що патч є навантажений діелектриком резонатор). Метод лінії передачі - це найпростіший спосіб вивчення мікросмужкових антен. [9]

1.4.1. Модель лінії передачі

Метод лінії передачі - найпростіший спосіб вивчити мікросмужкових антену. У цьому методі модель лінії передачі являє Микрополосковая патч-антену двома слотами, розділеними лінією передачі з низьким опором довжиною L . Отримані нами результати не є найбільш точними в порівнянні з іншими методами, але вони досить гарні для проектування антени.

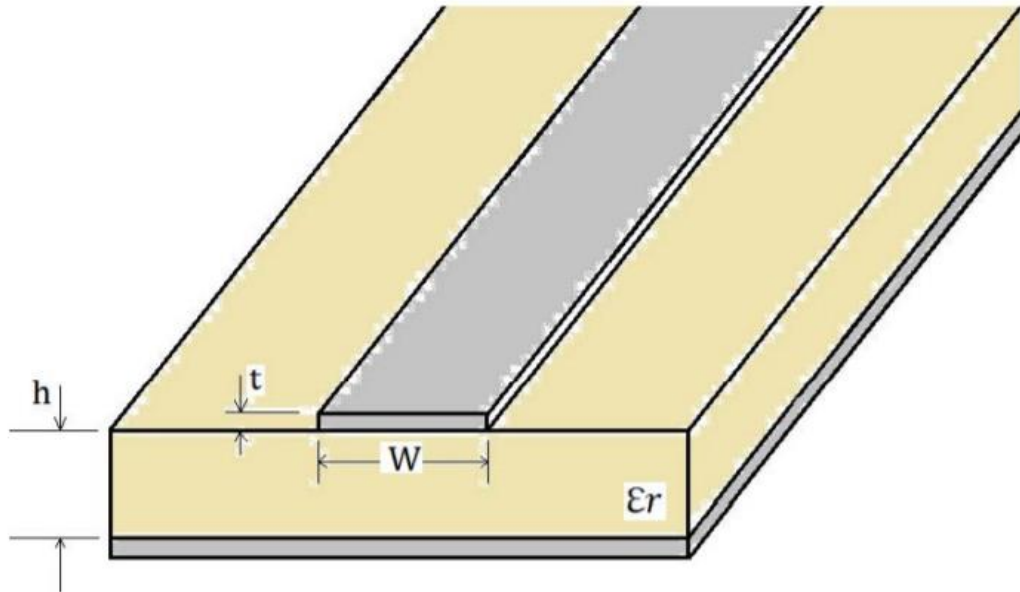


Рисунок 1.14 – Мікросмужкова лінія

Для вивчення теорії мікрополоскової лінії передачі у нас є два різні випадки:

- $W/h < 1$ (вузькосмугова лінія), і це не те, що нас цікавить.
- Второй случай $w / h \gg 1$ и $\epsilon_r < 1$ (более широкая линия передачи),

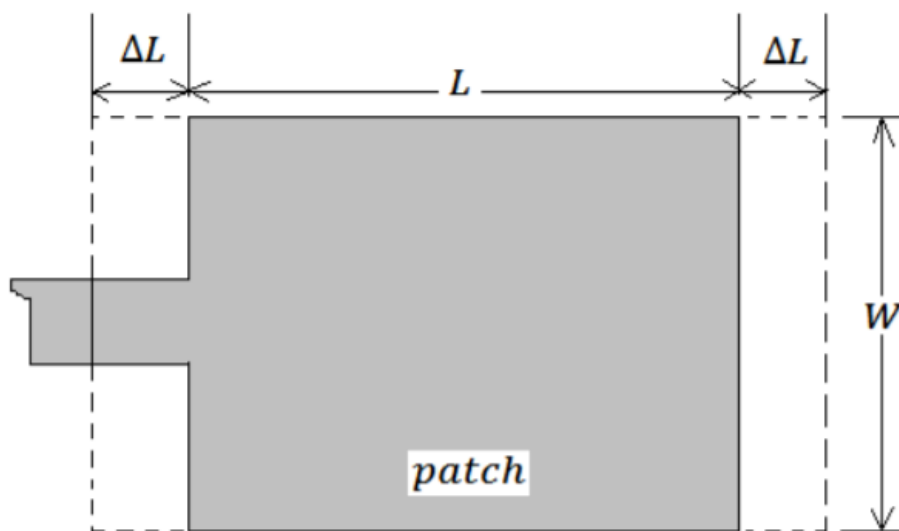


Рисунок 1.15 – фізична і ефективна довжина мікрополоскової заплатки

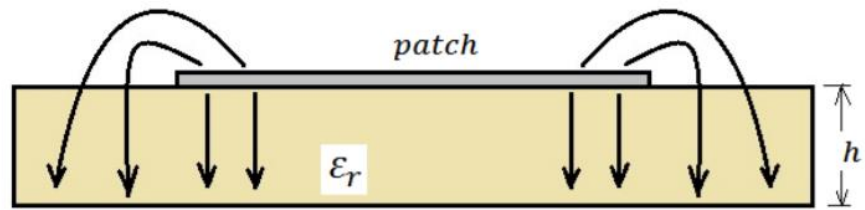


Рисунок 1.16 – Лінії електричного поля

Перше наближення, яке ми робимо, - це припустити, що товщина провідника t , що утворює лінію, не впливає на наші розрахунки, тому що він дуже тонкий в порівнянні з підкладкою h , ($h \gg t$); тому ми використовуємо тут емпіричні формули, які залежать тільки від розмірів лінії: ширина W , довжина L , висота h і діелектрична проникність підкладки.[9]

Характерний опір мікросмужкової лінії можна записати так: [1, 3, 4, 5, 6 і 8]

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left(1.393 + \frac{W}{h} + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right)}$$

Ширина мікросмужкової лінії визначається: [1, 3, 4, 5, 6 і 8]

$$W = \frac{1}{2fr\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = \frac{v_0}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}}$$

Патч-антена на мікросмузі на малюнку (1.15 та 1.16) виглядає довше своїх фізичних розмірів через ефект окантовки. Отже, ефективна довжина відрізняється від фізичної на ΔL . Дуже популярне наближення для розрахунку подовження довжини пластиру дано [1, 4, 5, 6, 7 та 8].

$$\frac{\Delta L_{eff}}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)}$$

1.4.2. Режим порожнини

Модель порожнини при аналізі мікросмушкових антен заснована на припущенні, що область між мікрополоскової смугою і площиною заземлення являє собою резонансну порожнину, обмежену стелею і підлогою з електричних провідників і магнітних стінок уздовж краю провідника, як показано на малюнку.

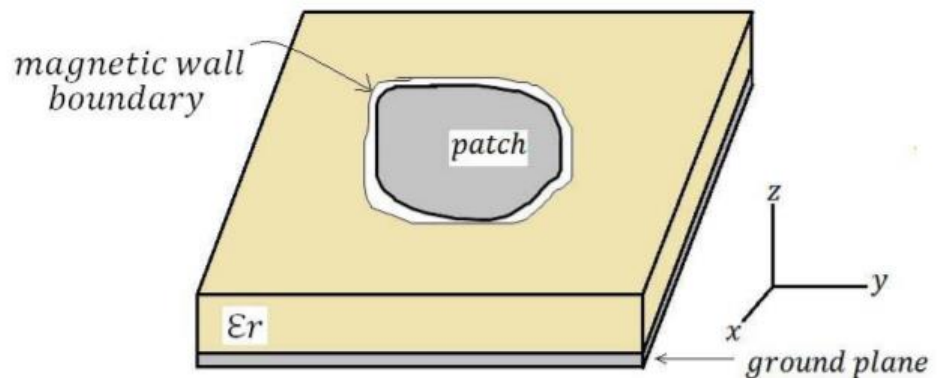


Рисунок 1.17 – Магнітна настінна модель мікросмушкової патч-антени

Наведене вище припущення базується на спостереженні:

В області, обмеженою порожниною, є тільки три компоненти поля: компонента E по осі z і дві компоненти по осях x і y . Оскільки h (висота підкладки) дуже тонка ($h \ll \lambda$), поле у внутрішній області не змінюється з координатами z для всіх частот. Електричний струм в мікрополосковій області не має нормальної до краю області компонента в будь-якій точці. Ця модель є досить хорошою при вивченні мікросмушкових резонаторів, де край трохи розширюється, щоб врахувати поле окантовки.[9]

Коли Мікрополосковая антена підключена до джерела мікрохвиль, розподіл заряду буде встановлюватися на верхній і нижній площинах антени. Розподіл заряду контролюється двома механізмами; привабливий і відштовхуючий. Сила тяжіння виникає між протилежними зарядами на пластині і на площині заземлення, вона створює щільність струму всередині діелектрика в нижній частині пластиру. Сила відштовхування між

однаковими зарядами прагне підштовхнути заряди від нижньої частини пластиру по краю пластиру до верхньої частини пластиру, це створить щільність струму.

1.5. Основні чисельні методи розрахунку антен

Кілька методів чисельного моделювання були використані для розробки мікросмужкових структур патч-антени. Це методи кінцевих різниць у часовій області (FDTD), матриця ліній передачі (TLM), метод кінцевих елементів (FEM) та метод моментів (MoM). Також існує декілька корегувань для збільшення ширини смуги пропускання антени, включаючи збільшення товщини підкладки, використання підкладки з низькою діелектричною проникністю, різні методи узгодження імпедансу і подачі.

1.5.1. Метод скінченних елементів (Finite Element Method – FEM)

Моделювання кінцевих елементів (FEM) - це потужна обчислювальна техніка для досягнення розв'язку диференціальних та інтегральних рівнянь. Дану область можна розглядати як набір простих геометричних сутностей, які називаються кінцевими елементами, що генерують функції наближення.[10]

Методика FEM дискретизує проблему за допомогою скінченних елементів, які є чотирикутником або трикутником для розв'язання двовимірних задач, і тетраедральних, шестигранних або призмових елементів для вирішення тривимірних задач. Моделі FEM дають хороші результати в швидкі терміни з точними рішеннями, вирішуючи множинні диференціальні рівняння за допомогою кускового наближення. Точність можна покращити за допомогою вузлових функцій базового рівня першого порядку та основи їх реберних елементів. Для тривимірного моделювання мікросмужкової патч-антени використовують рівняння часових гармонійних векторних хвиль. Оскільки антена має справу з електромагнітними хвилями, рівняння

Максвелла слід розглянути для отримання рівнянь векторних хвиль і проілюструвати, як показано нижче.

$$\nabla \times B = -j\omega B,$$

$$\nabla \times H = J_s + \sigma E + j\omega D$$

$$D = \varepsilon'_r \varepsilon_0 E$$

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

У наведених рівняннях H - напруженість магнітного поля, E - напруженість електричного поля, ω - робоча частота. Крім того, ε_0 та μ_0 - це діелектрична проникність та проникність вільного простору, тоді як, ε_r та μ_r - відносна діелектрична та відносна проникність відповідно. Рівняння векторних хвиль для E та H задано формулою.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right) - k_0^2 \varepsilon_r E = -jk_0 \eta_0 J_s$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \nabla \times H \right) - k_0^2 \mu_r H = \nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} J_s \right)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \text{ and } k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$$

Давайте розглянемо розміри підкладки такі, що висота підкладки h дуже мала в порівнянні з довжиною хвилі λ всередині діелектрика. Таким чином, зміна поля по висоті вважається постійною через дуже малу висоту основи. Оскільки електричне поле є нормальним до поверхні плями, отже, розглядається лише поперечний магнітний режим (ТМ). Отже, електричне поле буде нормальним до поверхні земної площини. Верхня і нижня стінки пластиру є ідеально електричними провідними шарами, а чотири бічні стінки будуть ідеально проводити магнітні стінки. Нехай ε_r - діелектрична

проникність підкладки і менша, ніж краї пластиру. Однорідне хвильове рівняння для векторного потенціалу A_x задано формулою: $\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0$

Рішення цього рівняння з використанням поділу змінні подано як[10]:

$$A_x = \left[A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) \right] \cdot \left[A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y) \right] \cdot \left[A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z) \right]$$

де k_x , k_y та k_z - хвильові числа вздовж напрямку x , y та z відповідно. Їх можна визначити, використовуючи граничні умови. Електричне та магнітне поле, пов'язане з векторним потенціалом A_x , визначається як:

$$E_x = -j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x,$$

$$E_y = -j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \cdot \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y},$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \cdot \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z},$$

$$H_x = 0, H_y = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A_x}{\partial z}, H_z = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A_x}{\partial y}$$

Іншим важливим параметром для аналізу кінцевих елементів є параметр розсіювання, який можна отримати з використанням коефіцієнта відбиття S_{11} з розрахункового електричного поля. Таким чином, вхідний опір можна розрахувати як:

$$Z = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$$

де Z_0 - характеристика або відповідний імпеданс.

Деякі важливі параметри антени можуть бути розраховані методом лінії передачі і пояснюються, як показано нижче :

$$w = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}}$$

де c - швидкість світла у вільному просторі, f_0 - резонансна частота, а ϵ_r - діелектрична проникність підкладки.

1.5.2. Метод скінченних різниць у часовій області

З моменту свого першого впровадження в 1966 році метод кінцевих різниць у часовій області (FDTD) широко використовується як інструмент для вирішення складних електромагнітних проблем.

Для FDTD рівняння Максвелла дискретизовані в просторі і часі, і він дуже гнучкий при моделюванні складних структур. Перші заявки FDTD в основному трансливалися. Але останнім часом ряд дослідників застосували цей метод для аналізу широкого кола електромагнітних проблем: електромагнітна сумісність, відображення надр, передача радіолокаторами до біоелектромагнітного, включаючи проблеми антен. Алгоритм FDTD може бути використаний для аналізу будь-якої форми антени.[11]

Метод FDTD заснований на чисельному рішенні рівнянь Максвелла. Він полягає у наближенні до пунктуально виведеним просторовим і тимчасовим параметрам, які з'являються в цих рівняннях, за допомогою зосереджених кінцевих різниць.

Для формулювання простору досліджень UPML досліджується як анізотропна середа, так і порівняння Максвелла виражається наступним чином:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= j\omega\epsilon\vec{E} \\ \nabla \times \vec{E} &= -j\omega\mu\vec{H}\end{aligned}$$

Де E і H - електричне та магнітне поля. S - діагональна тензорна діелектрична проникність.

Просторова дискретизація досягається шляхом поділу обчислювального простору на комірки, звані осередками $\mathcal{V}_i$ (рис.1.18). Кожна осередок позначена індексами (i, j, k) , а просторові кроки Δx , Δy і Δz яких залежать від меншої довжини хвилі в смузі частот аналізу тестованої структури.

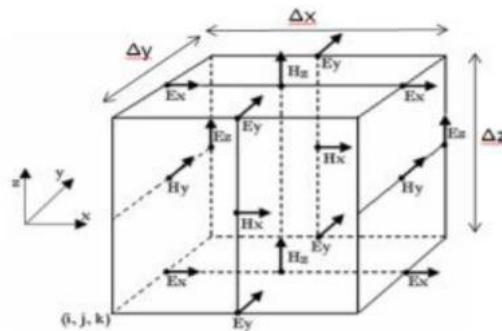


Рисунок 1.18 – Впровадження компонентів електричного та магнітного полів

У комірці кожен магнітний вузол оточений чотирма електричними вузлами, а кожен електричний вузол - чотирма магнітними вузлами. Отже, центрована похідна використовується для всіх просторових похідних, присутніх у рівняннях Максвелла.[11]

Для рівномірної дискретизації часу з кроком вибірки Δt та індексом n , який відповідає реальному часу $n \cdot \Delta t$. В інших побічних складових електричного поля та електричного потоку розраховуються для кількох однорівників $\Delta t / 2$, тоді як компоненти магнітного поля та магнітного потоку розраховуються для непарних кратних $\Delta t / 2$.

Таким чином, рейтинги будуть використані, як у наступних двох прикладах:

- Для компонента електричного поля:

$$E_z \Big|_{i,j,k+0.5}^n \rightarrow E_z(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z + 0.5\Delta z; n\Delta t)$$

- Для компонента магнітного поля:

$$H_y \Big|_{i+0.5,j,k+0.5}^{n+0.5} \rightarrow H_y(i\Delta x + 0.5\Delta x, j\Delta y, k\Delta z + 0.5\Delta z; n\Delta t + 0.5\Delta t)$$

Ми застосували метод FDTD для моделювання прямокутної патч-антени, розміри якої показані на малюнку 1.19.

Отже, нас цікавить рішення 12 рівнянь щодо варіації компонент поля, які обчислюються в такому порядку: $D_x, D_y, D_z, E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z, H_x, H_y, H_z$.

Обчислювальний простір складається з двох частин: одна для антени, а друга для умов UPML, яка оточена поверхневим типом PEC (Perfect Conductor Electric), де електричне поле повинно бути нульовим, що дозволяє оновлювати поля в розрахунках. алгоритм.

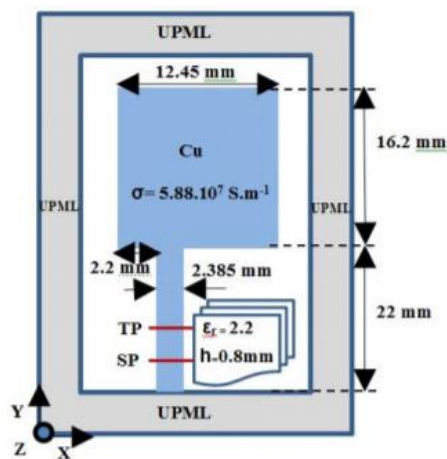


Рисунок 1.18 – Структура прямокутного патча

Умова стійкості алгоритму методу FDTD задається нерівністю:

$$\Delta \leq \frac{\lambda_{min}}{10} \text{ and } \Delta t \leq \frac{\Delta}{c_0 \sqrt{n}}$$

Або λ_{min} - мінімальна довжина хвилі, що відповідає максимальній частоті, що підтримується досліджуваною структурою, а c_0 - швидкість світла у вакуумі. Таким чином, для тривимірних ($n = 3$) ми можемо взяти $\Delta t = \frac{\Delta}{2c_0}$.

Як джерело збудження в плані SP (Source Plane) можна вибрати гаусів імпульс. Він буде додано до всіх компонентів E_z в алгоритмі FDTD. При $t_0 = 120 \cdot \Delta t$ і $t_w = 30 \cdot \Delta t$ для генерації хвилі в режимі TEM.

$$E_z(t) = \exp \left(- \left[\left(\frac{t-t_0}{t_w} \right) \right]^2 \right)$$

Максимально підтримувана частота досліджуваної структури становить близько 50 ГГц, дискретизація просторового і тимчасового кроків, прийнята для цього випадку, складе $\Delta = 0,256$ мм і $\Delta t = 0,441$ пс.[11]

Висновки до першого розділу:

В інженерії антена пережила надзвичайно плідний період протягом останніх декількох десятиліть. Відповідальним за його виконання став технічний прогрес в деяких нових антенах, наприклад, антена міліметрового діапазону, широкосмугова, двох / багатодіапазонними або реконфігурованих структура, зменшення розміру, компактність, низький профіль, смуга пропускання повного опору, високу посилення або лінійна і кругова поляризаційні додатки і тому подібне.

Патч антени мають такі переваги перед іншими типами антен: простота конструкції та низька вартість виготовлення. Проте даний тип антен відноситься до досить вузько смугових антен і потребує ретельного дослідження при використанні різних робочих частот. У зв'язку з розширенням робочих частот існує потреба у розробці мікросмужкових дискових антен для застосування не тільки на частоті 2.4 ГГц, а й на частоті 5.2 ГГц.

2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОДНОРЕЗОНАТОРНОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ПАТЧ-АНТЕНИ З МІКРОСМУЖКОВОЮ ЛІНІЄЮ

В ході роботи була спроектована дворезонаторна патч-антена з мікросмужковим живленням. Для того, щоб створити модель дворезонаторну патч-антену спочатку треба розрахувати та спроектувати однорезонаторну патч-антену з мікросмужковим живленням, що буде основою для подальшого проектування.

2.1. Вхідні данні

На початку роботи були дані основні параметри антени (таблиця 2.1):

Таблиця 2.1 Основні параметри антени

Тип антени:	планарна прямокутна мікросмужкова патч-антена з мікросмужковим живленням, англ. Planar Inset-Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna
Центральна частота:	$f = 2442$ МГц
Вхідний опір:	50 Ом
$K_{СВН} \leq 2$	в діапазоні частот 2400...2483 МГц.

Антена реалізується за мікросмужковою технологією. Тому необхідно врахувати при проектуванні параметри мікросмужкової лінії, на основі якої виконується антена (параметри лінії в таблиці 2.2).

Таблиця 2.2 Параметри підкладки та мікросмужкової лінії

Виробник:	Rogers
Марка:	RT/Duroid 5880
Діелектрична проникність:	$\epsilon = 2.2$
Висота підкладки:	$h = 1.575$ mm
Тангенс діелектричних втрат:	0.0009

Товщина смужки:	$t = 0.018 \text{ mm}$
Матеріал провідників:	мідь

Зовнішній вигляд однорезонаторної прямокутної патч-антени представлено на рис. Рис. 2.1.1.

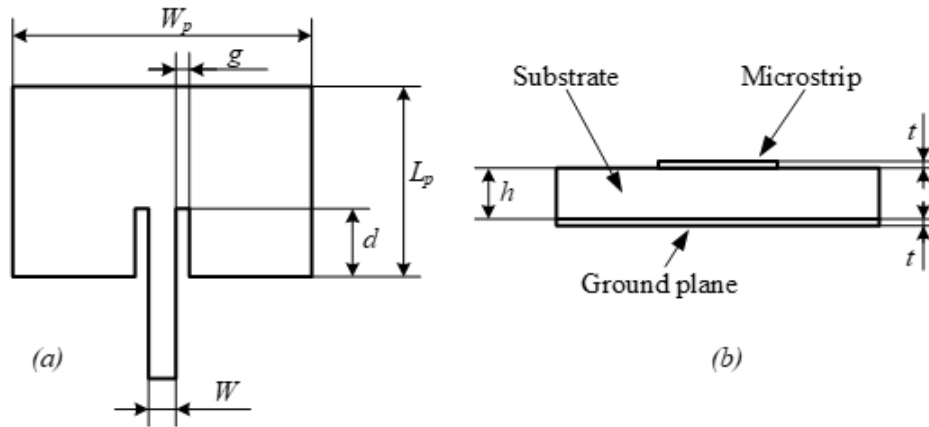


Рис. 2.1.1. Одноелементна прямокутна патч-антена з мікросмужковим живленням

Зовнішній вигляд дворезонаторної планарної патч-антени представлено на рис. Рис.2.1.2.

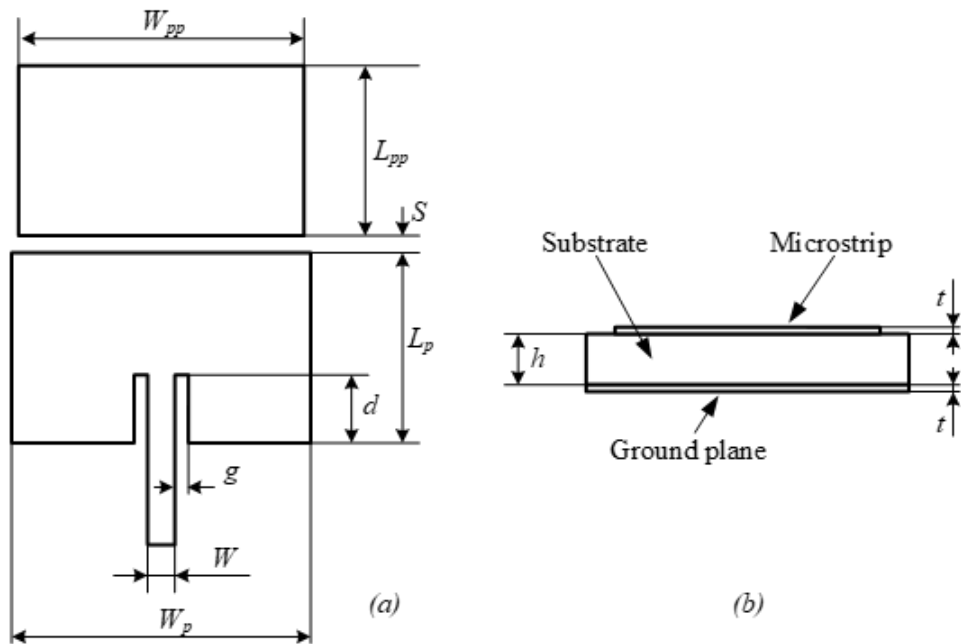


Рис. 2.1.2. Дворезонаторна планарна прямокутна патч-антена з мікросмушковим живленням

2.2. Розрахунки параметрів антени

Для того щоб спроектувати антену спочатку треба розрахувати параметри антени яких не вистачає: W_p , L_p , d , g , W . Розрахунки усіх параметрів та коефіцієнтів (окрім W) буде проходити у середовищі MATLAB за допомогою спеціально розробленого скрипта, що буде рахувати усі формули (див. Додаток 1).

2.2.1. Коефіцієнти та параметри

2.2.1.1. Довжина хвилі

Для початку необхідно розрахувати довжину хвилі з якої буде взаємодіяти антена, так як даний параметр системи буде використаний далі в розрахунках. Розрахунок довжини хвилі проводиться за формулою:

$$\lambda = \frac{v_0}{f_r} \quad (1)$$

Де λ - Довжина хвилі, v_0 - швидкість світла ($3 \cdot 10^{11}$ мм/с), а f_r - центральна частота робочого діапазону антени (2442 МГц). Розрахуємо:

$$\lambda = v_0 / f_r = 3 \cdot 10^{11} / 2,442 \cdot 10^9 = 122,8501 \text{ мм}$$

```
>> lam=v0/fr

lam =

    122.8501
```

Рис. 2.2.1.1 Скріншот результату розрахунку довжини хвилі за допомогою ПЗ MATLAB

2.2.1.2. Хвильове число – параметр K_0

Для подальших розрахунків нам також знадобиться хвильове число – k_0 (2).

Яке розраховується за формулою:

$$k_0 = 2 * \frac{\pi}{\lambda} \quad (2)$$

Де k_0 - це необхідний розрахунковий коефіцієнт, а λ - довжина хвилі з якою працює антена.

При розрахунках за формулою отримуємо наступний результат, який дедалі допоможе в розрахунках:

$$K_0 = 2 * 3,14 / 122.8501 = 0.0511$$

```
>> k0=2*pi/lam
k0 =
    0.0511
```

Рис 2.2.2.1 Скріншот результату розрахунку коефіцієнту K_0 за допомогою ПЗ MATLAB

2.2.2. Розрахунок ширини патча – W_p

Ширина патч-антени (3) - дуже важливий параметр, що в першу чергу впливає на передаючі властивості патч-антени. Ширина патч-антени не формує робочу частоту антени, тому це стала величина, що буде використовуватися щоб задати геометрію антени та є ключовим при проектуванні моделі антени в програмному забезпеченні ANSYS Electronics Desktop HFSS, що буде задіяно далі.

Розрахунок ширини патч-антени прозводиться за формулою:

$$W_p = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (3)$$

Де W_p – ширина патча, v_0 – швидкість світла, f_r – центральна частота робочого діапазону антени, ε_r – діелектрична проникність підкладки.

Завдяки цьому було розраховано ширину патча в ідеальних умовах:

$$W_p = 3 \cdot 10^{11} / (2 \cdot 2.442 \cdot 10^9) \cdot \sqrt{2 / (2.2 + 1)} = 48.5608 \text{ мм}$$

```
>> Wp=V0/(2*fr)*sqrt(2/(Er+1))
Wp =
    48.5608
```

Рис 2.2.3.1 Скріншот результату розрахунку ширини патча за допомогою ПЗ MATLAB

2.2.3. Розрахунок ефективної діелектричної проникності підкладки

– ε_{reff}

За значеннями ε_r середовища, що є діелектриком розглядаємої патч-антени, а патч-антена це фрагмент мікрополоскової лінії. Мікрополоскова лінія відноситься до класу неоднорідних, тому її характеризують так званою **ефективною діелектричною проникністю**, в деякому сенсі усереднюють відносну діелектричну проникність середовища, що є підкладкою патч-антени з урахуванням її поперечних розмірів та іншим діелектриком (у нашому випадку – повітря).

Розрахуємо ефективної діелектричну проникність підкладки за формулою :

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Де ε_{reff} – ефективна діелектрична проникність, ε_r – діелектрична проникність підкладки (задана у вхідних даних), h – висота підкладки, W_p – ширина однорезонаторної патч-антени.

$$\varepsilon_{reff} = (2,2+1)/2 + (2,2-1)/2 * [1+12*(1,575/48.5608)]^{(-1/2)} = 2,1091$$

```
>> Ereff=(Er+1)/2+(Er-1)/2*(1+12*h/Wp)^(-1/2)

Ereff =

    2.1091
```

Рис 2.2.4.1 Скріншот результату розрахунку ефективної діелектричної проникності підкладки за допомогою ПЗ MATLAB

2.2.4. Розрахунок нормованого розширення довжини – ΔL

Даний коефіцієнт надалі потрібен для розрахунку довжини основного резонатору патч-антени.

ΔL виводиться з формули (5):

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \quad (5)$$

$$\Delta L = 0.412 * h * \frac{(\varepsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \quad (6)$$

Де ΔL – нормованого розширення довжини, h – висота підкладки, W_p – ширина однорезонаторної патч-антени.

Після проведення розрахунків та обчислення результат

$$\Delta L = 0.412 * 1.575 * \frac{(2,1091 + 0.3) \left(48. \frac{5608}{1} .575 + 0.264 \right)}{(2,1091 - 0.258) \left(48. \frac{5608}{1} .575 + 0.8 \right)} = 0.8302$$

(див. рис 2.2.5.1)

```
>> DL=0.412*((Ereff+0.3)*(Wp/h+0.264)/((Ereff-0.258)*(Wp/h+0.8)))*h
DL =
    0.8302
```

Рис 2.2.5.1 Скріншот результату розрахунку коефіцієнту K_0 за допомогою ПЗ MATLAB

2.2.5. Розрахунок довжини патча – L_p

Довжина патча L_p – основний параметр при побудові однорезонаторної патч-антени. Від довжини патча залежить робоча частота антени, через це дедалі завдяки зміні цього параметру можливо буде оптимізувати антену для досягнення оптимального показника коефіцієнту стоячої хвилі та коефіцієнту відбиття.

Даний параметр планарної патч-антени розраховується за формулою (7) :

$$L_p = \frac{v_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (7)$$

Де L_p – довжина патч-антени, v_0 – швидкість світла ($3 \cdot 10^{11}$ мм/с), f_r – центральна частота робочого діапазону антени, ϵ_{reff} – ефективна діелектрична проникність, ΔL – нормоване розширення довжини.

Розрахунок за формулою (7) призводить до наступних результатів:

$$L_p = 3 * \frac{10^{11}}{2 * 2.442 * 10^9 * \sqrt{2.1091}} - 2 * 0.8302 = 40.6358 \text{ (мм)}$$

Лістинг данного розрахунку в ПЗ MATLAB зображено на рис.2.2.6.1

```
>> Lp=V0/(2*fr*sqrt(Ereff))-2*DL

Lp =

    40.6358
```

Рис 2.2.6.1 Скріншот результату розрахунку довжини планарної патч-антени L_p за допомогою ПЗ MATLAB

2.2.6. Розрахунок опору планарної патч-антени – R_{in}

R_{in} – власний опір планарної однорезонаторної патч-антени. Даний опір повинен бути узгодженим з хвильовим опором лінії передачі для того, щоб в системі не було режиму змішаних хвиль та уся хвиля поглиналася антеною, а не відбивалася від неї. Тобто власний опір повинен максимально наближений до $Z_0 = 50 \text{ Ом}$, що заданий в Таблиці 2.1.

Слід уточнити, що прямокутний мікросмужковий патч може бути представлений у вигляді масиву з двох випромінюючих прорізів, кожен шириною W_p , висотою стрілки, розділеною відстанню pL . Кожен слот еквівалентний паралельному еквівалентному допуску Y з провідністю G та сприйнятливістю B . Еквівалентна схема передаючого ланцюга мікросмужкової патч-антени показана на рис.2.2.7.1. [12]

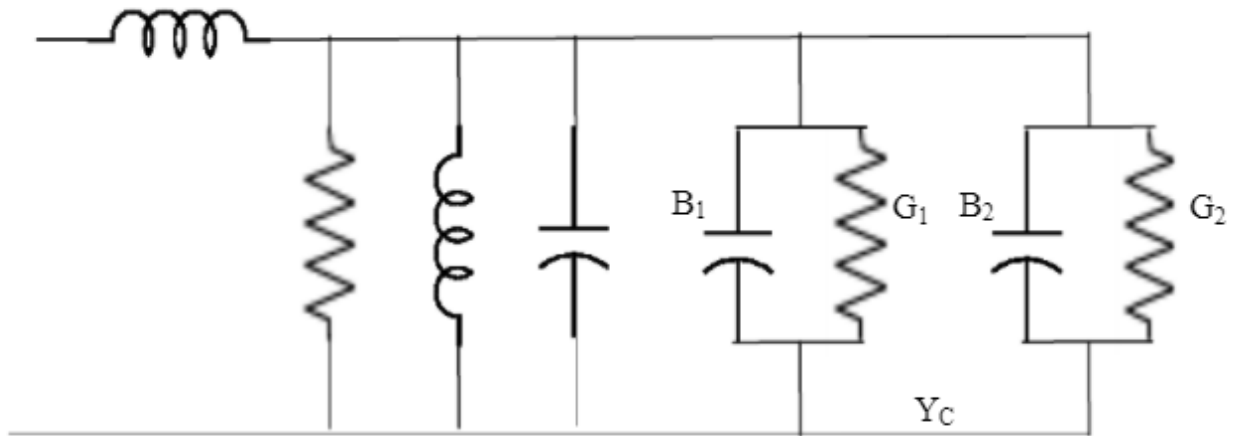


Рис. 2.2.7.1 Еквівалентна схема передаючого ланцюга мікросмушкової патч-антени

Провідність одного слота можна отримати, використовуючи наступне рівняння (8)

$$G_1 = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W_p}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3\theta d\theta \quad (8)$$

Взаємну провідність G_{12} можна розрахувати за допомогою формули (9):

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W_p}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 * J_0(k_0 L \sin\theta) \sin^3\theta d\theta \quad (9)$$

Де J_0 – функція Бесселя першого виду порядку 0.

Взаємна провідність, отримана за допомогою рівняння (8), мала в порівнянні з самопровідністю. Беручи до уваги взаємні ефекти між слотами, опір антени можна розрахувати за формулою (10):

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \quad (10)$$

Де R_{in} – опір планарної антени, G_1 та G_{12} – коефіцієнти провідності антени.

В данній роботі ці параметри були розраховані методом трапецій при розрахунку інтегралів, скрінінги дивіться рис. 2.2.7.2 , рис. 2.2.7.3 та рис. 2.2.7.4:

$$G_1 = 0.0012 \text{ См (сіменсів)}$$

```
>> dx1=pi/100;
x1= 0:dx1:pi;
y=((sin(k0.*Wp/2.*cos(x1))/cos(x1)).^2.*(sin(x1)).^3);
I1=trapz(x1,y);
G1=1/(120*pi^2)*I1

G1 =

    0.0012
```

Рис. 2.2.7.2 Розрахунок провідності одного слота за допомогою програмного забезпечення MATLAB

$$G_{12} = 0.00036713 \text{ См (сіменсів)}$$

```
>> dx2=pi/100;
x2= 0:dx2:pi;
y1=((sin(k0.*Wp/2.*cos(x2))/cos(x2)).^2.*besselj(0,(k0*Lp*sin(x2))).*(sin(x2)).^3);
I2=trapz(x2,y1);
G2=1/(120*pi^2)*I2

G2 =

    3.6713e-04
```

Рис. 2.2.7.3 Розрахунок взаємної провідності за допомогою програмного забезпечення MATLAB


```

 $R_{in} = 151.88 \text{ Ом}$ 

>> Rin = 1/(2*(G1 + G2))

Rin =

151.8800

```

Рис. 2.2.7.4 Розрахунок опору антени за допомогою програмного забезпечення MATLAB

2.2.7. Розрахунок точки включення – d

Параметр d – це точка включення мікросмужкової лінії в патч (див. рис. 2.2.8.1). Данна глибина занурення мікросмужкової лінії в патч-антену дозволяє узгодити опір антени з опором лінії передачі.

Для данної роботи точка включення один із найважливіших параметрів, тому що для отримання необхідного рівня КСХ треба ідеально узгодити патч-антену.

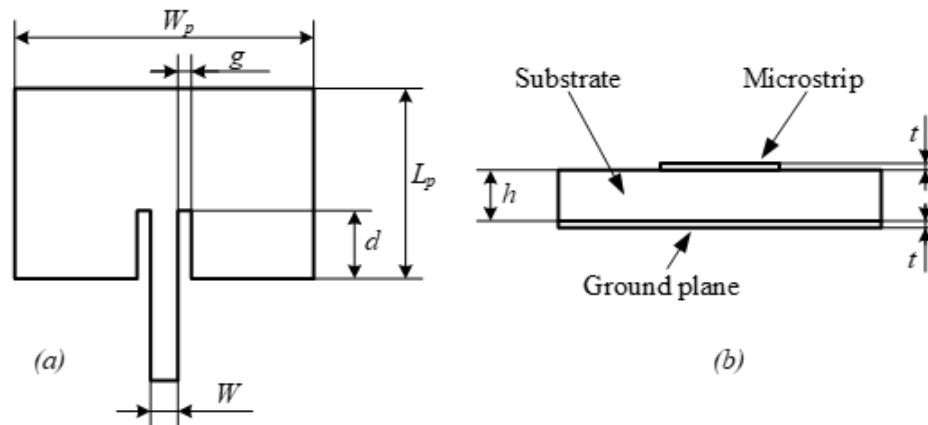


Рис. 2.2.8.1 Одноелементна прямокутна патч-антена з мікросмужковим живленням.

Параметр d розраховується через рівняння для знаходження хвильового опору (11), однак хвильовий опір нам дан в умовах (див. Таблиця 2.1).

$$Z_0 = R_{in} \cos^2 \left(\frac{\pi}{L_p} d \right) \quad (11)$$

Де Z_0 – хвильовий опір мікросмужкової лінії, Де R_{in} – опір планарної антени, L_p – довжина патча.

Виходячи з рівняння (11) розрахуємо точку включення за формулою (12)

$$d = \frac{\arccos\left(\sqrt{\frac{Z_0}{R_{in}}}\right) L_p}{\pi} \quad (12)$$

Знаючи значення усіх параметрів у данному рівнянні отримуємо значення параметра d:

$$d = \arccos\left(\sqrt{\frac{50}{151.88}}\right) \frac{40.6358}{3.14159265359} = 12.4135 \text{ мм}$$

```
>> d=acos(sqrt(Z/Rin))*Lp/pi
d =
    12.4135
```

Рис. 2.2.8.2 Розрахунок точки включення за допомогою програмного забезпечення MATLAB

2.2.8. Розрахунок ширини виїмки – g

Параметр ширини виїмки – g , характеризує відстань між мікросмужковою лінією та краями патч-антени протягом усієї довжини d до місця підключення лінії до патчу.

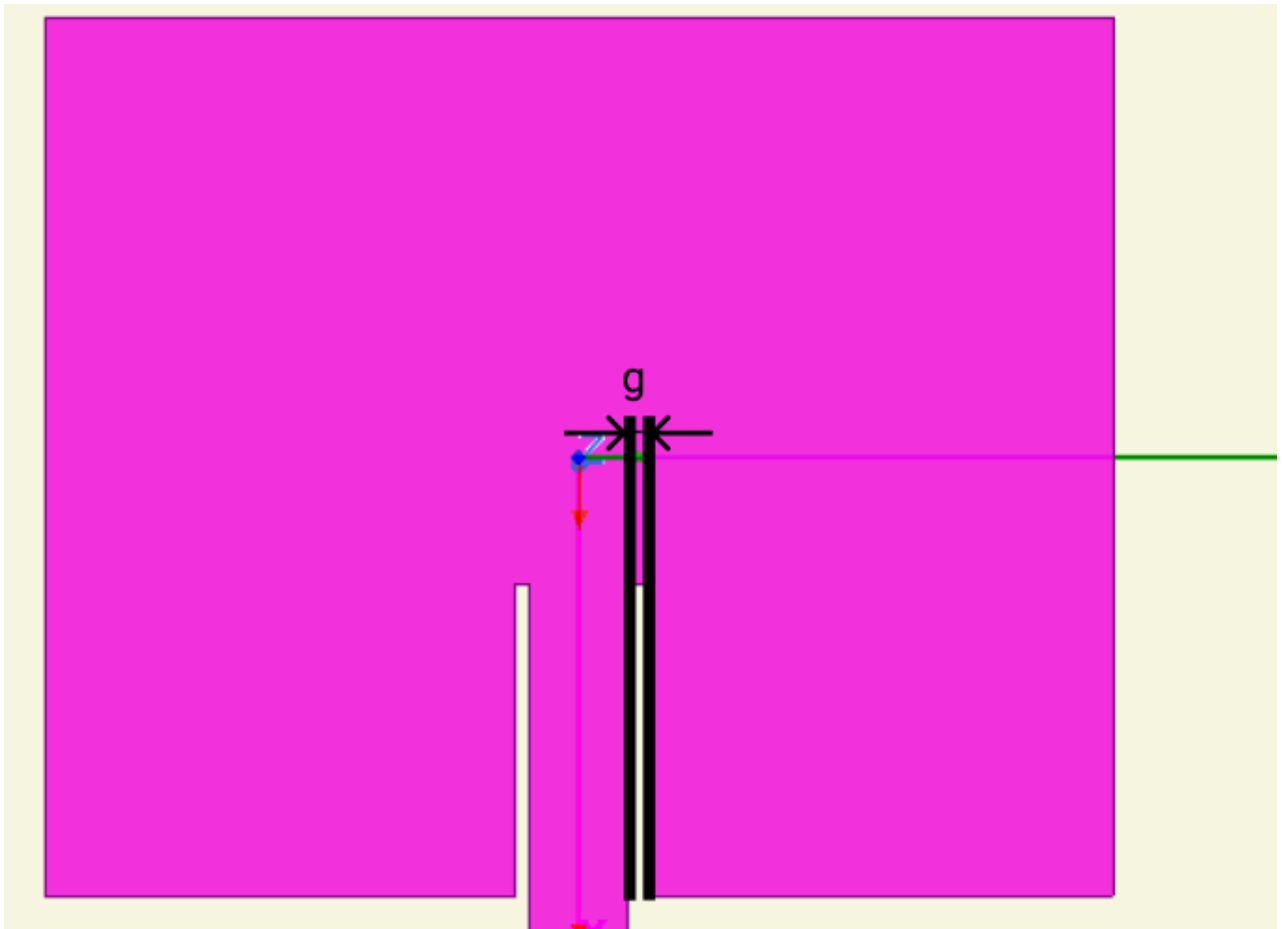


Рис. 2.2.9.1 Зображення ширини вїмки на моделі однорезонаторої патч-антени

Цей параметр потрібно розрахувати та використовувати в подальшому для моделювання для того, щоб отримати необхідну форму антени для роботи на цільовій частоті.

Розрахувати цей параметр потрібно з формули (13)

$$f_r = \frac{v_0}{\sqrt{2 * \epsilon_{reff}}} * \frac{4.6 * 10^{-14}}{g} + \frac{f}{1.01} \quad (13)$$

Для отримання резонансу повинно діяти рівняння $f_r = f$, тому формула буде мати наступний вид (14):

$$f_r = \frac{v_0}{\sqrt{2 * \varepsilon_{reff}}} * \frac{4.6 * 10^{-14}}{g} + \frac{f_r}{1.01} \quad (14)$$

В формулі (14) ми вже маємо лише одну невідому – g , тому виразимо формулу за якою можливо знайти цей параметр (15, 16, 17):

$$f_r - \frac{f_r}{1.01} = \frac{v_0}{\sqrt{2 * \varepsilon_{reff}}} * \frac{4.6 * 10^{-14}}{g} \quad (15)$$

$$f_r \left(1 - \frac{1}{1.01} \right) = \frac{v_0}{\sqrt{2 * \varepsilon_{reff}}} * \frac{4.6 * 10^{-14}}{g} \quad (16)$$

$$g = \frac{v_0}{\sqrt{2 * \varepsilon_{reff}}} * \frac{4.65 * 10^{-12}}{f_r} \quad (17)$$

(17) це остаточна формула розрахунку параметру ширини виїмки.

Обчисливши за цією формулою (17) параметр g було отримано наступні результати:

$$g = 1.3465 \text{ мм}$$

```
>> g=(V0/(sqrt(2*Ereff)))*(4.65*10^(-12))/fr
g =
    1.3465
```

Рис. 2.2.9.2 Розрахунок параметру g за допомогою програмного забезпечення MATLAB

2.2.9. Розрахунок ширини мікросмужкової лінії

Ширина мікросмужкової лінії потрібна для розрахунку хвильового опору лінії та для моделювання антени з такою лінією.

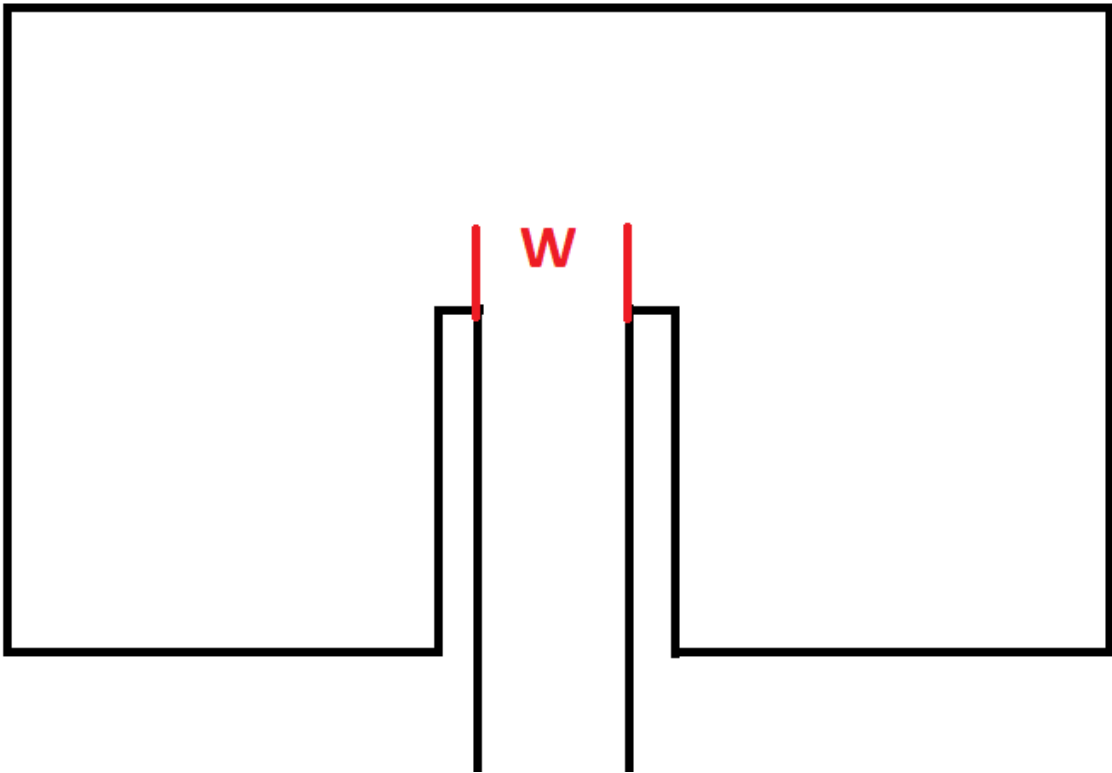


Рис. 2.2.9.1 Ширина мікросмужкової лінії

Для данної роботи ширина мікросмужкової лінії була розрахована за допомогою спеціального калькулятора.[13]

Ширина мікрополоскового 'фидера' Wt: 4.46 мм

Рис. 2.2.9.2 Результат обчислення Ширини мікрополоскової лінії

Висновки по розрахункам

Завершивши розрахунки параметрів антени (Таблиця 2.3.1) було отримано усі необхідні данні для моделювання однорезонаторної планарної патч-антени.

Таблиця 2.3.1 Результати розрахунків параметрів антени

Параметр	Значення
----------	----------

Ширина патча	$W_p = 48.5608 \text{ мм}$
Довжина патча	$L_p = 40.6358 \text{ мм}$
Точка включення	$d = 12.4135 \text{ мм}$
Ширина виїмки	$g = 1.3465 \text{ мм}$
Ширина мікросмужки	$W = 4.46 \text{ мм}$

Надалі буде перенесено ці данні в програмне середовище ANSYS Electronics Desktop HFSS для створення моделі та аналізу властивостей антени.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОКУТНОЇ ПЛАНАРНОЇ ОДНРЕЗОНАТОРНОЇ ПАТЧ-АНТЕНИ З МІКРОСМУЖКОВИМ ЖИВЛЕННЯМ

Другим етапом роботи після розрахунків є моделювання антени. Це потрібно для того щоб бути впевненими в тому, що наші розрахунки були вірними. Також це необхідно для того, щоб не втрачати багато часу на створення справжніх антен.

В данній роботі моделювання прямокутної однорезонаторної патч-антени з мікросмужковим живленням буде проводитися за допомогою програмного забезпечення ANSYS Electronics Desktop HFSS 2020R2.

На Рис. _ зображени введені параметри антени у спеціальне поле для легкої їх зміни при оптимізації. Зазначимо, що $main$ – границя робочої зони (підкладки), h – висота діелектричної підкладки, w_{50} – ширина мікросмужкової лінії, QW та $L1$ – проміжні параметри, що були необхідні для первинної побудови антени, x_0 – параметр d (точка включення), y_0 – ширина вирізу в патчі ($W+2*g$), L_p – довжина патч-антени, W_p – ширина патч-антени, H_p – товщина патч-антени та мікросмужкової лінії (t в Таблиці 2.2).

Name	Value	Unit
main	100	mm
h	1.575	mm
QW	15	mm
w50	4.46	mm
L1	8	mm
x0	12.41	mm
y0	7.14	mm
Lp	40.64	mm
Wp	48.53	mm
Hp	0.018	mm

Рис 3.1 Початкові параметри антени

3.1.Моделювання за розрахованими параметрами

Після заповнення усіх змінних в систему ANSYS Electronics Desktop HFSS необхідно смоделювати на їх основі прямокутну планарну патч-антену (рис. 3.1.1).

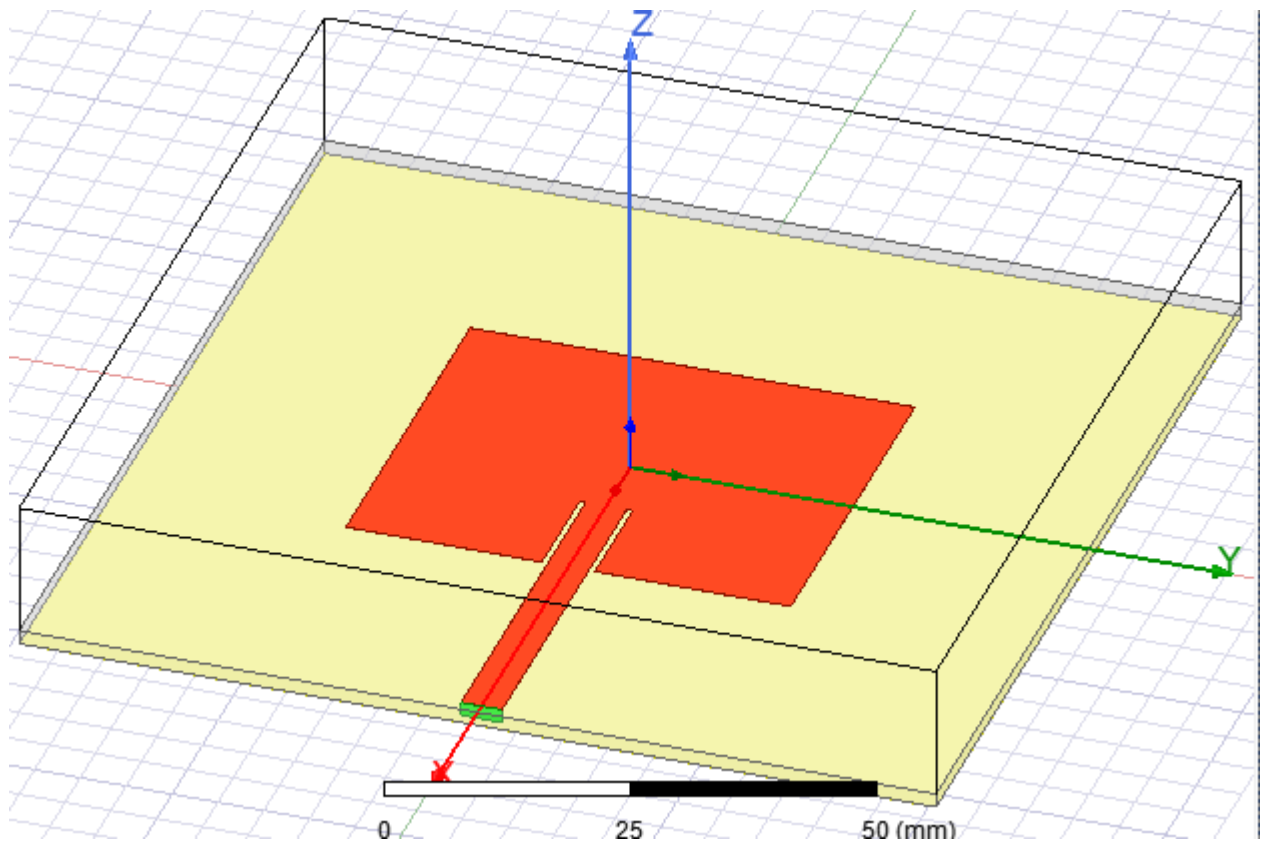


Рис. 3.1.1 Патч-антена побудована за заданими в п.3 параметрами

Окрім самої патч-антени в моделі є рівень основи та джерело живлення, що поєднує два цих елемента.

На Рис.3.1.2 показано елементи моделі, а також обрано матеріал, з якого вони виготовлені. Елемент повітря не було створено, адже в для наших розрахунків параметри повітря можна дорівняти до параметрів вакуума.

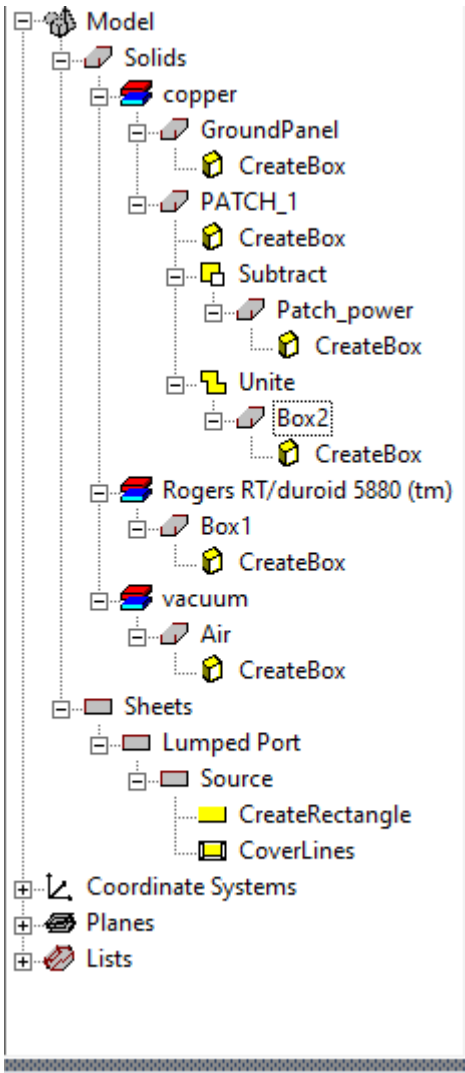


Рис.3.1.2 Елементи моделі розбиті на групи по матеріалам

Після проектування антени, в програмному середовищі було задано зону випромінення на рис.3.1.3. Це потрібно, щоб програмне середовище змогло розрахувати випромінюючі здатності антени

	Name	Type	Description
	RADIATION	Radiation	Type = Radiation

Рис 3.1.3 Параметри налаштування випромінення

Також було задано джерело електромагнітного сигналу (Рис.3.1.4-3.1.5) Джерело потрібно для того, щоб програмне середовище знало, звідки йде сигнал.

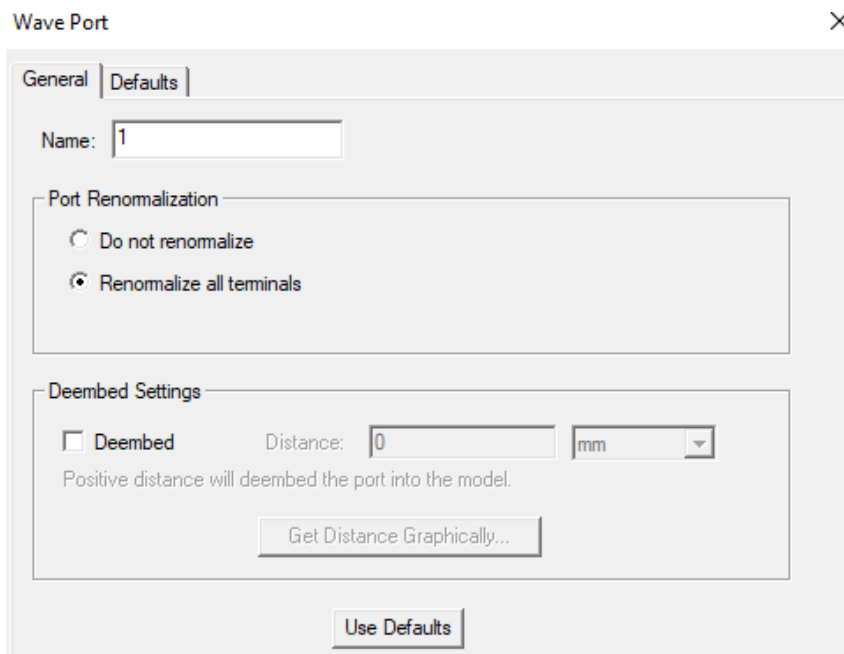


Рис. 3.1.4 Налаштування джерела 1

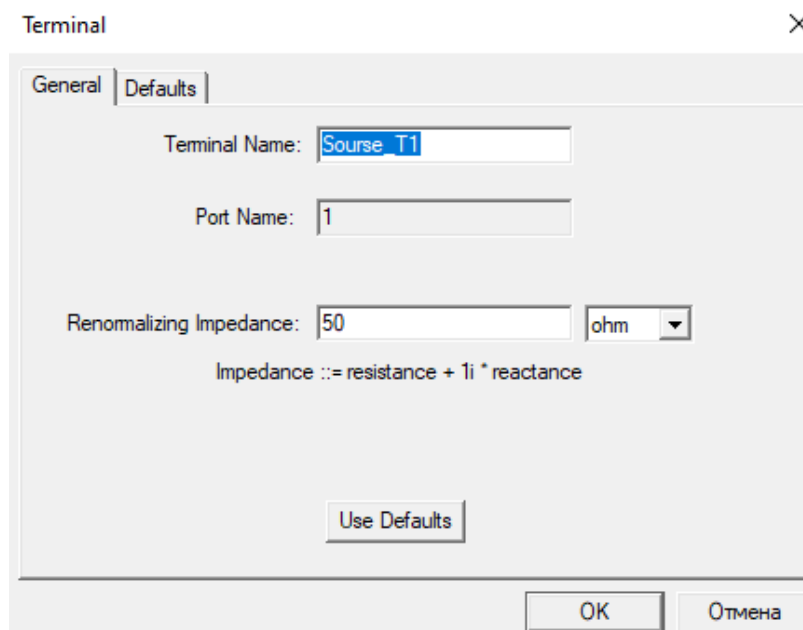


Рис. 3.1.5 Налаштування джерела 2

Було запущено аналіз антени, а також побудовано графіки коефіцієнту відбиття (Рис.3.1.6), коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН) (Рис.3.1.7), а також тривимірна діаграма спрямованості (Рис.3.1.8)

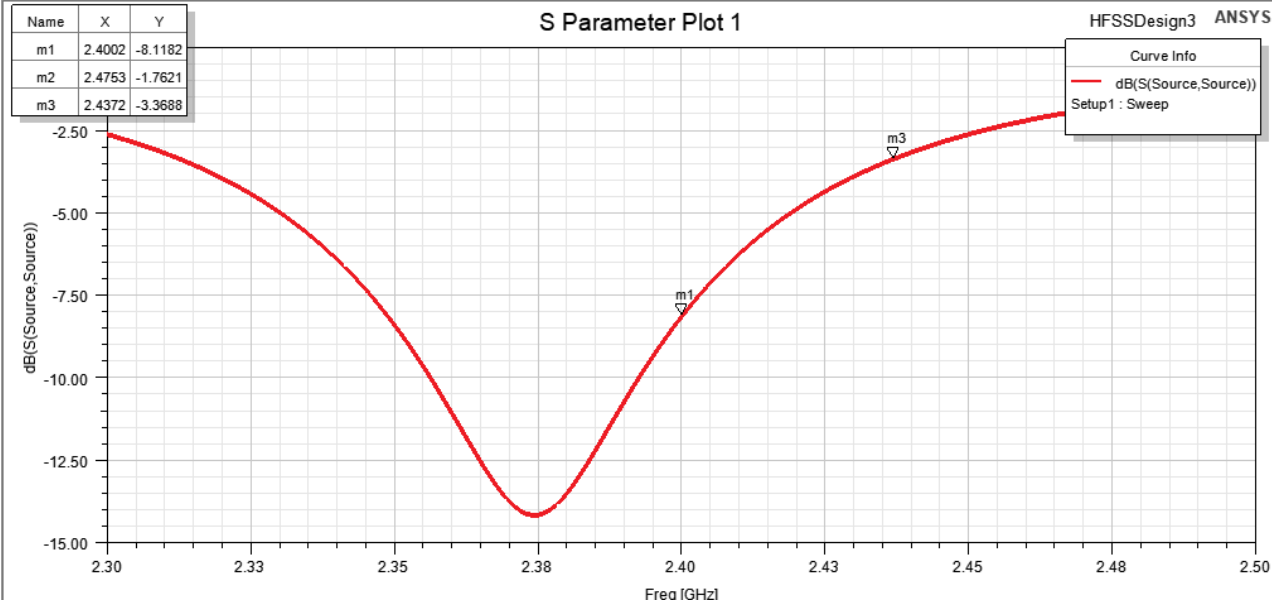


Рис.3.1.6 Частотна залежність коефіцієнта відбиття неоптимізованої однорезонаторної патч антени

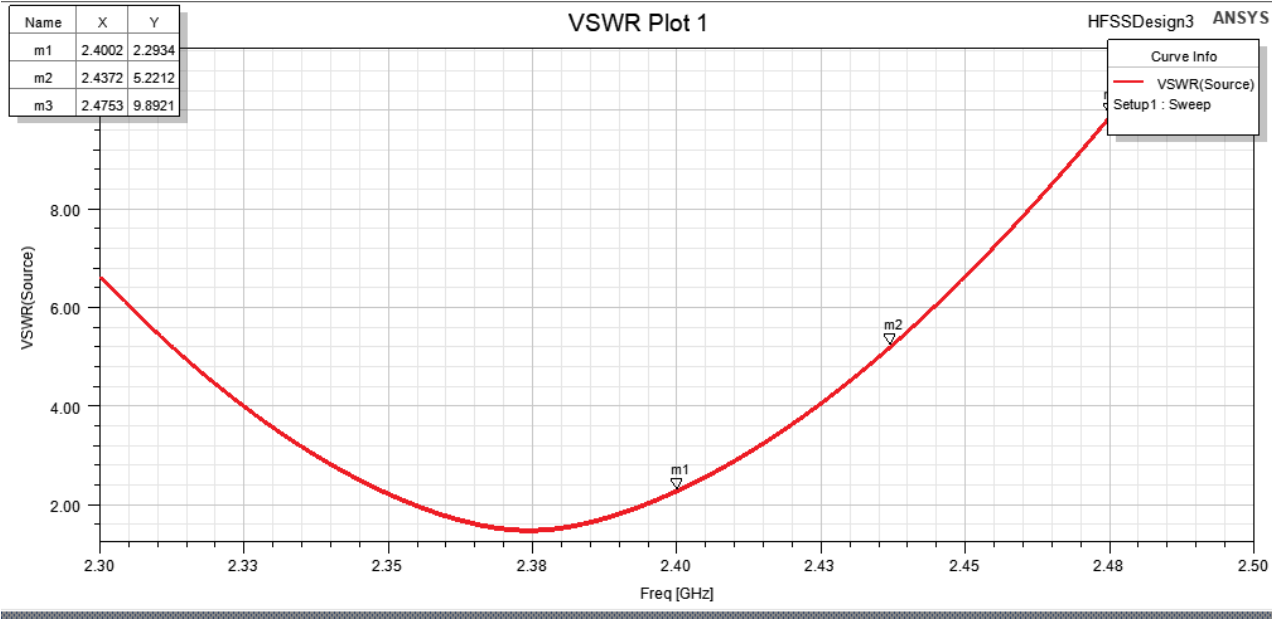


Рис.3.1.7 Графік КСХН неоптимізованої однорезонаторної патч антени

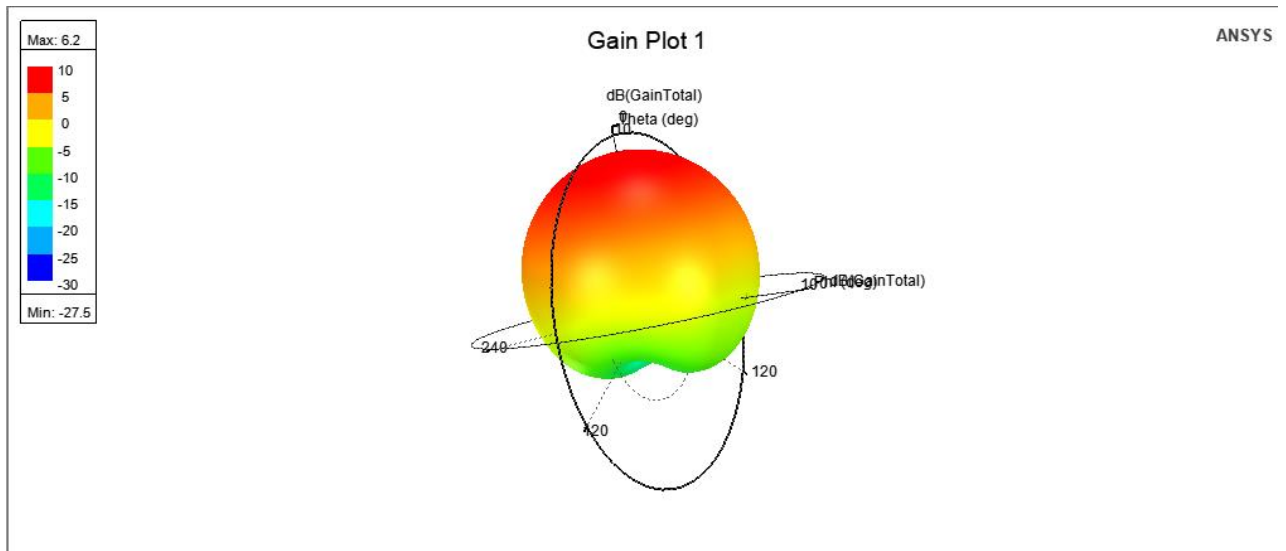


Рис.3.1.8 Діаграма спрямованості неоптимізованої однорезонаторної патч антени на центральній частоті (2442 МГц)

Як видно, на перших двох графіках, антена не відповідає умовам завдання ($K_{СХН} < 2$, коефіцієнт відбиття хоча б менше за 40дб, а також пік знаходиться не на центральній частоті(2442 МГц)), тому необхідно провести оптимізацію антени.

3.2.Оптимізація однорезонаторної антени

Для того, щоб антена відповідала необхідним умовам була проведена оптимізація цієї антени поочередно змінюючи параметри L_p та x_0 (в розрахунках d) за алгоритмом (рис. 3.2.1):

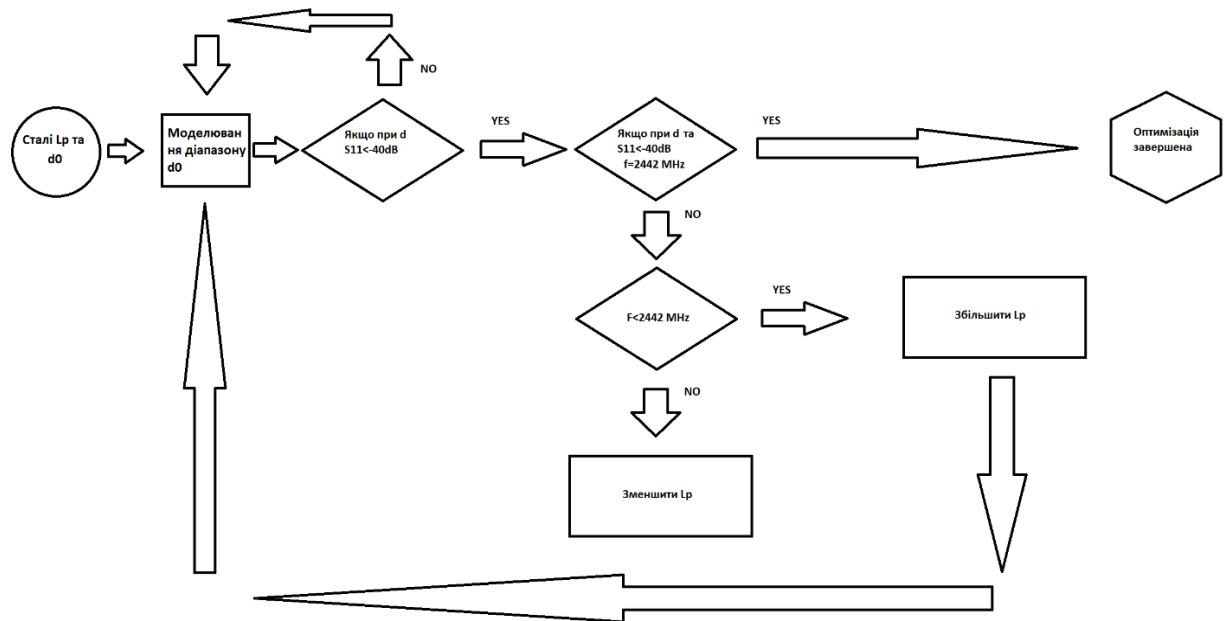


Рис.3.2.1 Алгоритм оптимізації однорезонаторної патч-антени

Опис алгоритму оптимізації:

- 1) Зафіксувати L_p (початкове значення).
- 2) Виповнити моделювання для кількох значень параметрів d . Це можна зробити або за допомогою Параметричний аналіз, або вручну.

Ціль: знайти значення $d = d_{opt}$, при якому $S_{11} < -40$ дБ. Якщо розраховане значення d_0 , можна взяти діапазон значень $d = d_0 - 5\text{mm} \dots d_0 + 5\text{mm}$ (перевірити, щоб $d_0 - 5\text{mm} > 0$) із шагом 0,5 mm.

- 3) Якщо для найвищого значення d_{opt} найчастіша резонанс f_r равна центральна частота робочого діаграми $f_0 = 2442$ МГц з точністю ± 1 МГц (тобто $f_0 - 1\text{MHz} < f_r < f_0 + 1$ МГц або 2441 МГц $< f_r < 2443$ МГц), то оптимізація завершена.

Якщо для найвищого значення d_{opt} частота резонансу f_r відрізняється від $f_0 = 2442$ МГц при точності ± 1 МГц, до:

- 3.1) Якщо $f_r < f_0$, то зменшити L_p і повернутися на шаг 2.

3.2) Якщо $f_r > f_0$, щоб збільшити L_p і повернутися на шаг 2.

Пройшовши по цьому алгоритму шляхом підбору параметрів були знайдені оптимальні параметри антени (рис 3.2.2):

Name	Value	Unit
main	100	mm
h	1.575	mm
QW	15	mm
w50	4.46	mm
L1	8	mm
x0	14	mm
y0	7.14	mm
L_p	39.434	mm
W_p	48.53	mm
H_p	0.018	mm

Рис 3.2.2 Параметри оптимізованої антени

Після оптимізації коефіцієнт відбиття став $<40\text{dB}$, а КСХН став ближче до шуканого. (рис 3.2.3-3.2.4)

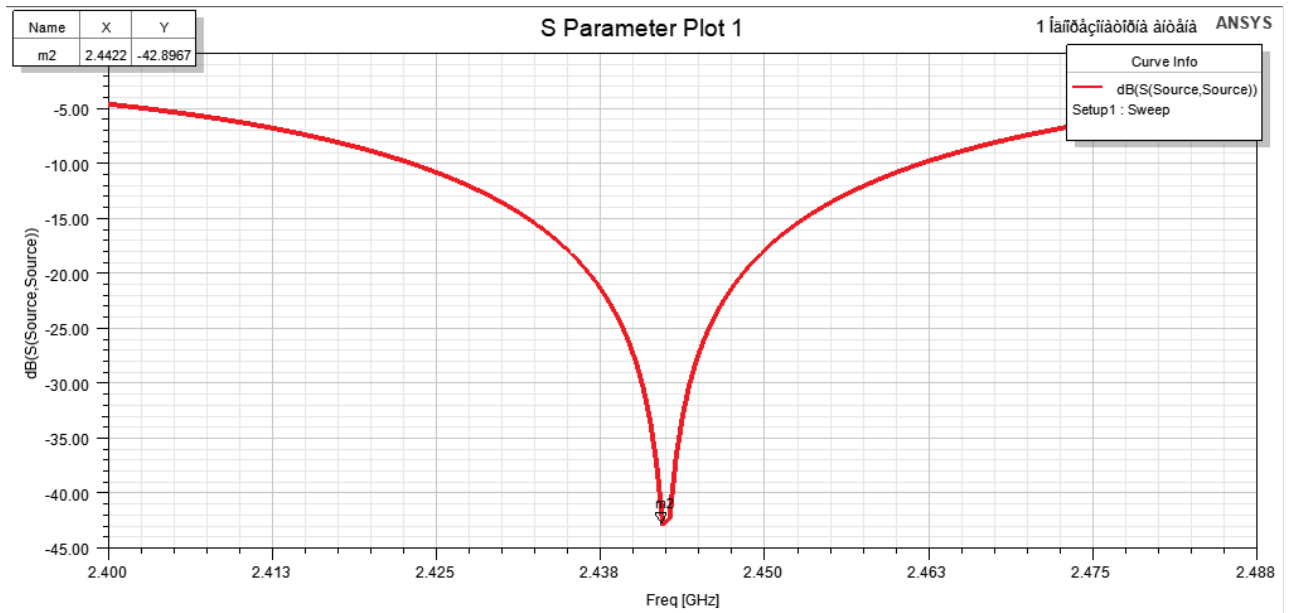


Рис.3.2.3 Частотна залежність коефіцієнта відбиття оптимізованої однорезонаторної патч антени

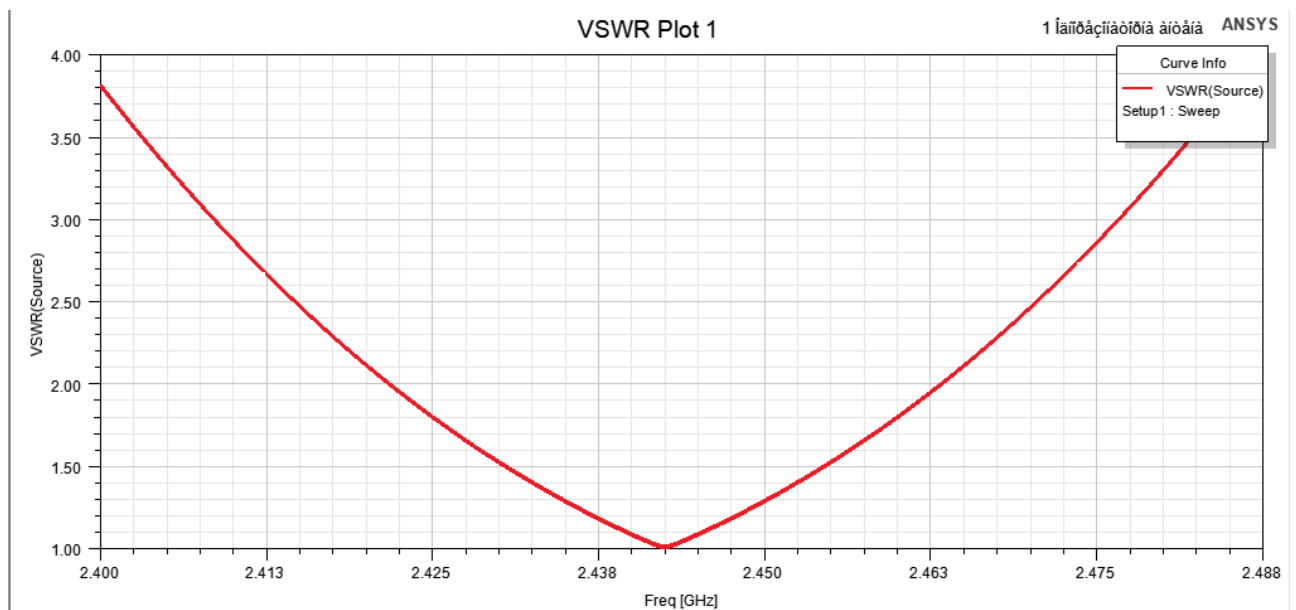


Рис.3.2.4 Графік КСХН оптимізованої однорезонаторної патч антени

Також розглянемо Н- та Е-розрізи діаграми спрямованості для центральної та крайньої частот, а також діаграми спрямованості для крайніх частот для оптимізованої однорезонаторної патч-антени (Рис. 3.2.5-3.2.12)

Для частоти 2442 МГц:

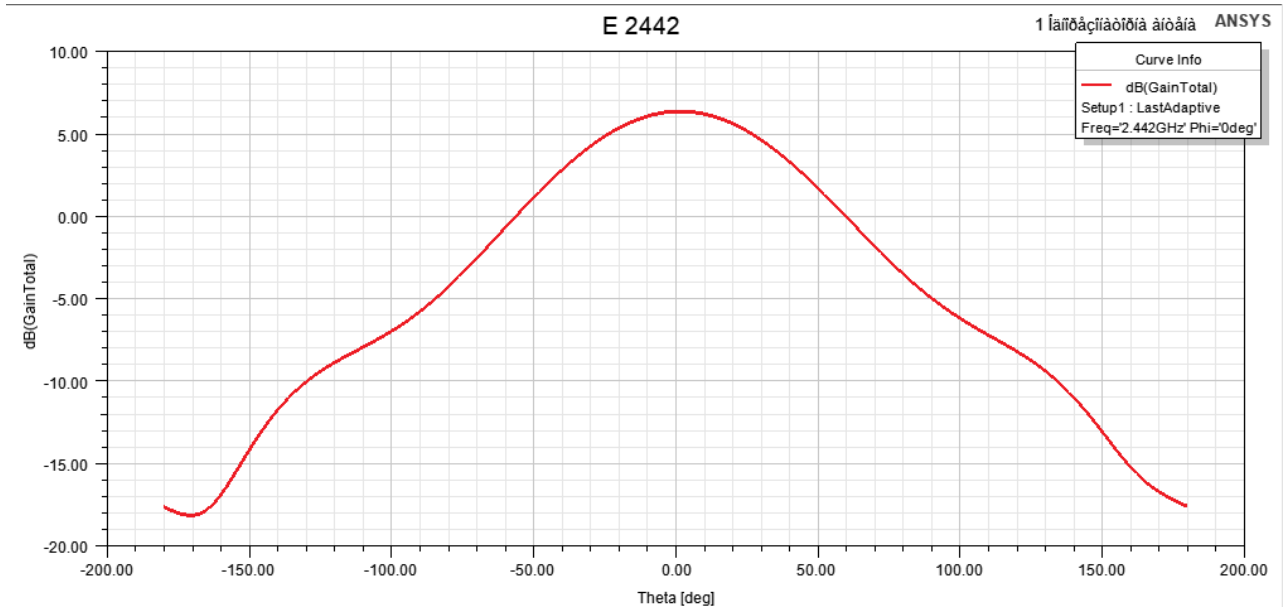


Рис. 3.2.5 Діаграма спрямованості антени у Е-площині на центральній частоті (2442 МГц)

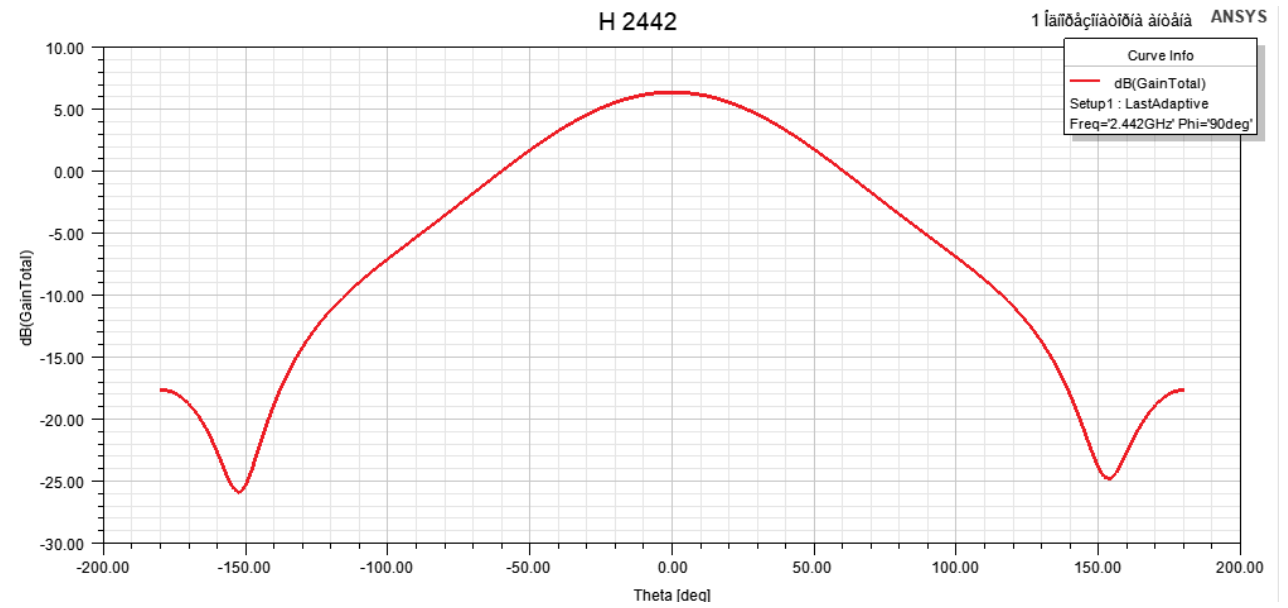


Рис. 3.2.5 Діаграма спрямованості антени у Н-площині на центральній частоті (2442 МГц)

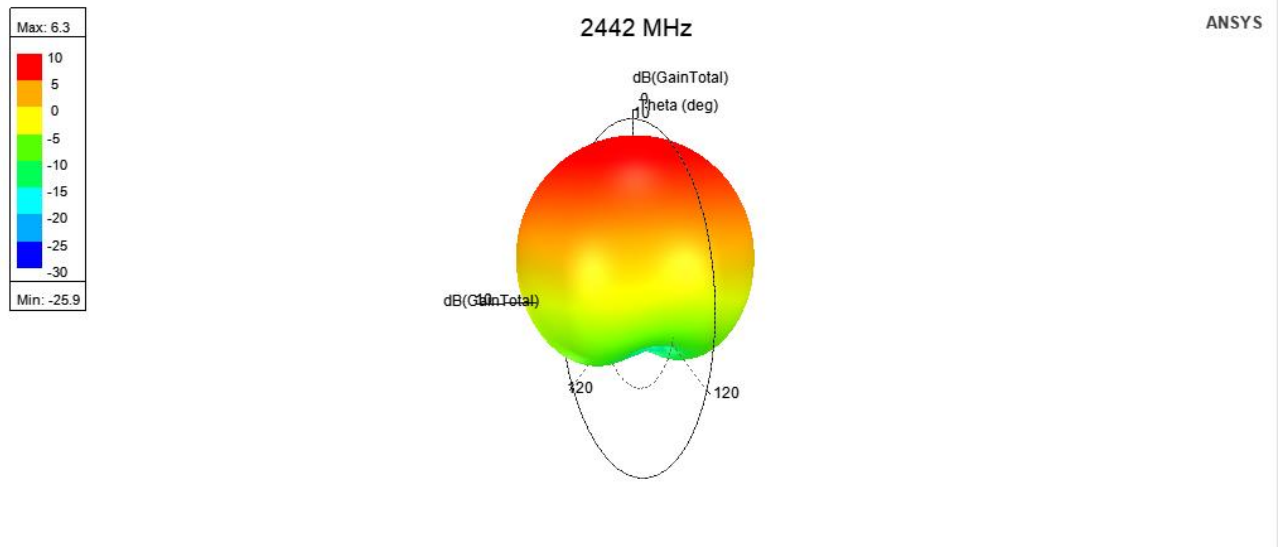


Рис. 3.2.6 Діаграма спрямованості на центральній частоті (2442 МГц)

Для 2400 МГц:

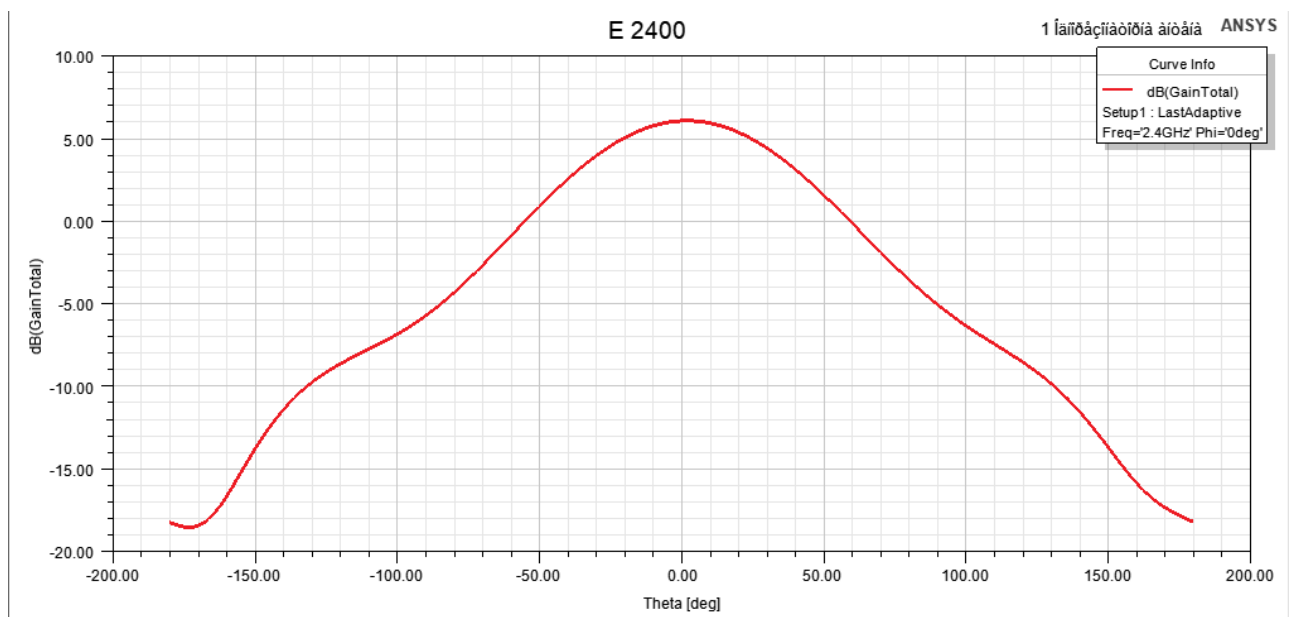


Рис. 3.2.7 Діаграма спрямованості антени у Е-площині на першій крайній частоті (2400 МГц)

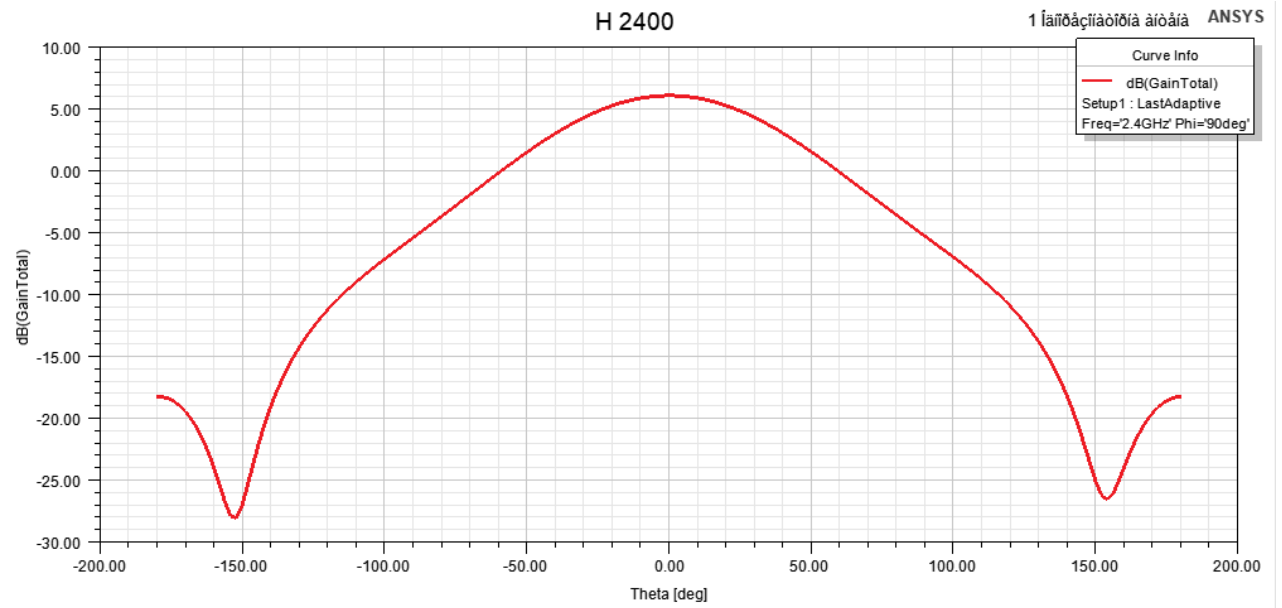


Рис. 3.2.8 Діаграма спрямованості антени у Н-площині на першій крайній частоті (2400 МГц)

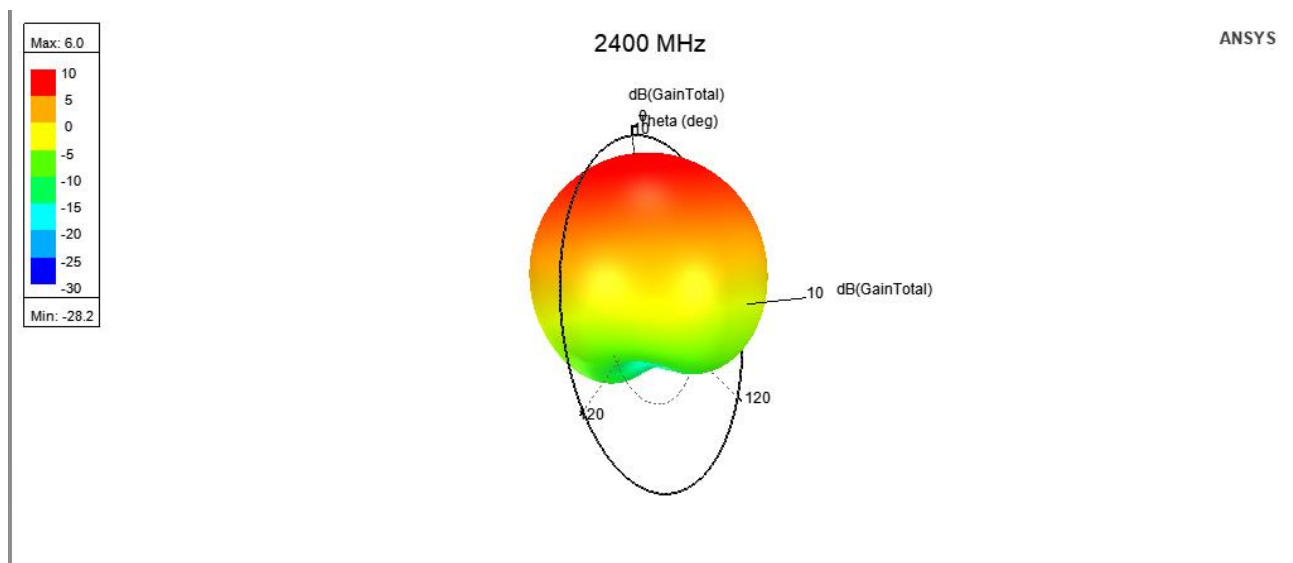


Рис. 3.2.9 Діаграма спрямованості на першій крайній частоті (2400 МГц)

Для 2483 МГц:

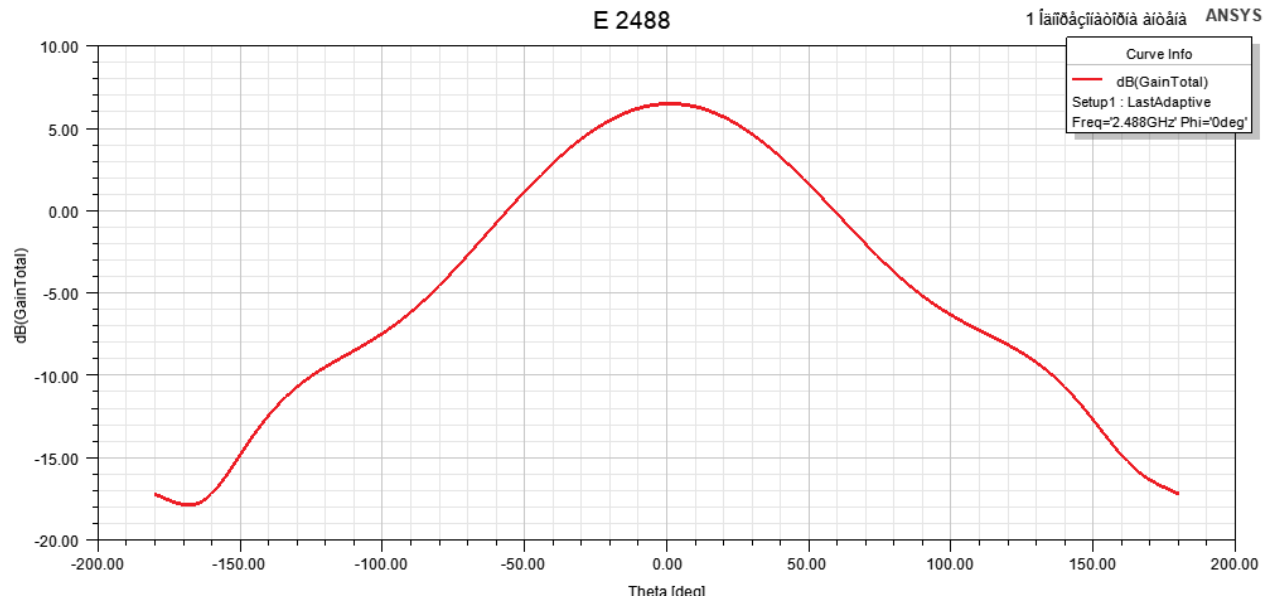


Рис. 3.2.10 Діаграма спрямованості антени у Е-площині на другій крайній частоті (2483 МГц)

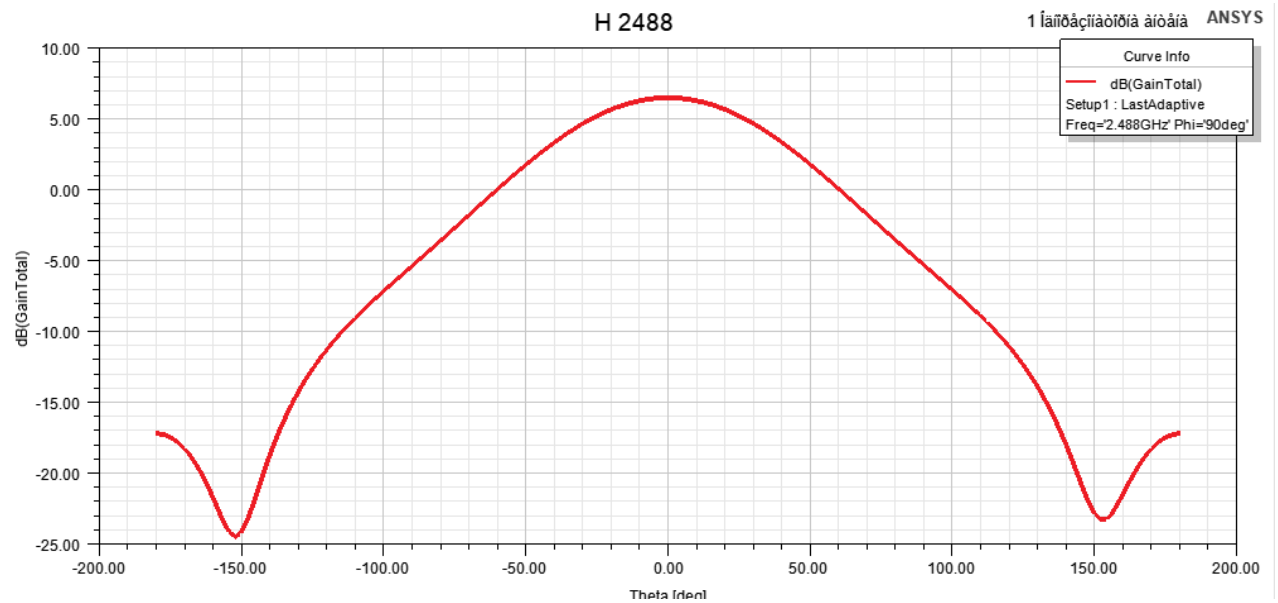


Рис. 3.2.11 Діаграма спрямованості антени у Н-площині на другій крайній частоті(2483 МГц)

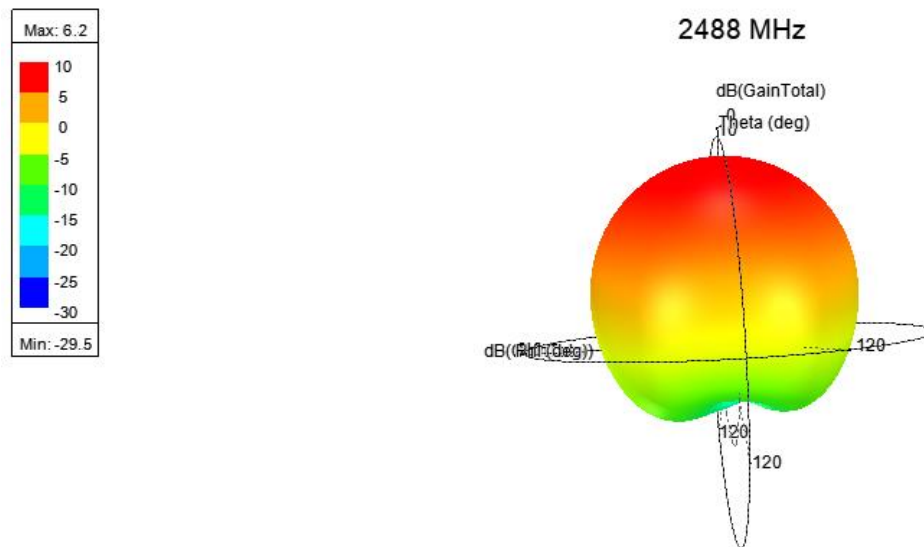


Рис. 3.2.12 Діаграма спрямованості на другій крайній частоті (2483 МГц)

3.3.Результати моделювання:

Після завершення процесу моделювання та оптимізації для того, щоб антена задовольняла умовам. Отримані значення в Таблиці 3.1

Таблиця 3.1 Параметри оптимізованої однорезонаторної патч-антени з мікросмужковою лінією

Параметр	Значення
Ширина антени	$W_p = 48.5608 \text{ мм}$
Довжина антени	$L_p = 39.434 \text{ мм}$
Точка включення	$d = 14 \text{ мм}$
Товщина антени	$t = 0.0018 \text{ мм}$
Мінімальний S_{11}	$S_{11} = -42,9 \text{ dB}$
Максимальний S_{11}	$S_{11} = -4,22 \text{ dB}$
Максимальне значення КСХН	3.8136
Ширина діаграми спрямованості антени в Е-площині 2442 МГц	$\Delta\theta^E = 75.78^\circ$
Ширина діаграми спрямованості антени в Е-площині 2400 МГц	$\Delta\theta^E = 76.74^\circ$
Ширина діаграми спрямованості антени в Е-площині 2483 МГц	$\Delta\theta^E = 74.90^\circ$
Ширина діаграми спрямованості антени в Н-площині 2442 МГц	$\Delta\theta^H = 78.26^\circ$
Ширина діаграми спрямованості антени в Н-площині 2400 МГц	$\Delta\theta^H = 79.59^\circ$
Ширина діаграми спрямованості	$\Delta\theta^H = 78.26^\circ$

антени в Н-площині 2483 МГц	
Коефіцієнт підсилення G антени 2442 МГц	6.3 db
Коефіцієнт підсилення G антени 2400 МГц	6.0 db
Коефіцієнт підсилення G антени 2483 МГц	6.5 db

Висновки до моделювання:

1. Змодельовано прямокутну однорезонаторну патч-антену за розрахованими параметрами проте не задовольняє поставленим умовам для данної антени.
2. Опрацьовано алгоритм оптимізації прямокутної патч-антени для досягнення коефіцієнту відбиття $S_{11} < -40$ dB на центральній частоті робочого діапазону частот - $f_r = 2442$ МГц .
3. Визначено, що оптимізована однорезонаторна патч-антена задовольняє частині умов, які ставляться до виробу, однак $K_{СХН} < 2$ не на всьому діапазоні робочих частот, що призводить до необхідності в розробці дворезонаторної планарної патч-антени.

ВИСНОВКИ:

1. Проаналізовано основні види патч-антен. В першому розділі розглянуті основні відомості про патч-антени, особливості їх використання та відмінності. Розглянуті різноманітні патч-антени та їх частини.
2. Прямокутна однорезонаторна патч-антена була розроблена для випромінювання в діапазоні WiFi частот. Розраховані параметри ширина патча $W_p = 48.5608 \text{ мм}$, довжина патча $L_p = 40.6358 \text{ мм}$, точка включення $d = 12.4135 \text{ мм}$, ширина мікросмужки $W = 4.46 \text{ мм}$ та ширина виїмки.
Ці параметри при ідеальних умовах задають узгодження патч-антени з лінією передачі на центральній частоті робочого діапазону частот.
3. Сemodelьовано прямокутну однорезонаторну патч-антену на основі розрахунків із пункту 2. При перенесенні розрахунків ідеального середовища на моделі реальних об'єктів узгодження не відбувається і оптимальний коефіцієнт відбиття ($S_{11} < -40\text{dB}$) знаходиться не на необхідній частоті $f_r = 2442 \text{ МГц}$ знаходиться на частоті $f_r = 2380 \text{ МГц}$.
Для отримання необхідного результату антену було оптимізовано за алгоритмом наданим у пункті 3.2. Імперицичним шляхом було підібрано параметри L_p та d так, щоб відновити узгодження антени тим самим встановив робочу частоту $f_r = 2442 \text{ МГц}$ та мінімізував рівень відбивання хвилі назад у лінію передачі. Тобто коефіцієнт відбиття S_{11} став меншим за -40dB .

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Основы теории антенн : учебное пособие / А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, А.А. Иванков. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 92 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0981-4..
2. Davidovitz M. Input Impedance of a Probe-fed circular microstrip antenna with thick substrate [Text]/ M. Davidovitz, Y. T. Lo // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1986. – Vol.34, N. 7. – P.905 – 911.
3. Dahele J. S. Effect of Substrate Thickness on the performance of CircularDisk Microstrip Antenna[Text]/ J. S. Dahele, K. F. Lee // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1983. – Vol.31, N. 4. – P.358 – 360.
4. K.-L. Wong, Compact and Broadband Microstrip Antennas, John Wiley & Sons, New York, 2002.
5. Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны // М.: Радио и связь. 1986
6. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Папилов К.Б. Сопоставление печатных антенн круговой поляризации с разными схемами питания // Журнал радиоэлектроники. 2010. №3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar10/2/text.html>
7. Bhal I. J. Microstrip antennas / I. J. Bhal, P. Bhartia. – N.Y.: Artech house, 1980. – 422 p
8. Antenna theory: analysis and design / Constantine A. Balanis, third edition, Hoboken, NJ: Wiley, 2005, ISBN 047166782X (hbk.)
9. Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1312395/FULLTEXT01.pdf>
10. Finite Element Modeling and Design of Rectangular Patch Antenna with Different Feeding Techniques [Электронный ресурс] — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/276494040_Finite_Element_Mode

ling and Design of Rectangular Patch Antenna with Different Feeding Techniques

11. Simulation and Numerical Modeling of a Rectangular Patch Antenna Using Finite Difference Time Domain (FDTD) Method [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CMEM05/CMEM05059FU.pdf>
12. М. А. Matin, А. I. Sayeed. A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna // WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS. – Issue 1, Volume 9, January 2010. – pp. 63—72. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/228897496_A_design_rule_for_inset-fed_rectangular_microstrip_patch_antenna
13. Калькулятор для розрахунку параметрів патч-антен [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3g-aerial.biz/onlajn-raschety/raschety-antenn/raschet-patch-antenny>

ДОДАТКИ

Додаток 1.

Скрипт для розрахунку однорезонаторної антени за допомогою програмного забезпечення MATLAB

//Вхідні данні

$V_0 = 3 \cdot 10^{11}$

$\epsilon_r = 2.2$

$h = 1.575$

$Z = 50$

$f_r = 2.442 \cdot 10^9$

//

$\lambda = V_0 / f_r$

$k_0 = 2 \cdot \pi / \lambda$

//

$W_p = V_0 / (2 \cdot f_r) \cdot \sqrt{2 / (\epsilon_r + 1)}$

$\epsilon_{eff} = (\epsilon_r + 1) / 2 + (\epsilon_r - 1) / 2 \cdot (1 + 12 \cdot h / W_p)^{-1/2}$

$DL = 0.412 \cdot ((\epsilon_{eff} + 0.3) \cdot (W_p / h + 0.264) / ((\epsilon_{eff} - 0.258) \cdot (W_p / h + 0.8))) \cdot h$

$L_p = V_0 / (2 \cdot f_r \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}) - 2 \cdot DL$

$g = V_0 / \sqrt{2 \cdot \epsilon_{eff}} \cdot (4.65 \cdot 10^{-12}) / f_r$

$dx_1 = \pi / 100;$

$x_1 = 0:dx_1:\pi;$

$y = ((\sin(k_0 \cdot W_p / 2 \cdot \cos(x_1)) / \cos(x_1)) \cdot \sin(x_1))^2 \cdot (\sin(x_1))^3;$

$I_1 = \text{trapz}(x_1, y);$

$G_1 = 1 / (120 \cdot \pi^2) \cdot I_1$

$dx_2 = \pi / 100;$

$x_2 = 0:dx_2:\pi;$

$$y1=((\sin(k0.*Wp/2.*\cos(x2))/\cos(x2)).^2.*\text{besselj}(0,(k0*Lp*\sin(x2))).*(\sin(x2)).^3);$$

$$I2=\text{trapz}(x2,y1);$$

$$G2=1/(120*\pi^2)*I2$$

$$Rin=1/(2*(G1+G2))$$

$$d=\text{acos}(\text{sqrt}(Z/Rin))*Lp/\pi$$