

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І
ТЕХНОЛОГІЙ МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ Володимир ШУТКО
« ____ » _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 171 «ЕЛЕКТРОНІКА»
ОПП «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

**Тема: «Електронна система інформаційного обміну з БПЛА на основі
двodiaпазонної антенної решітки»**

Виконавець
студент групи ЕС-407Б _____ Лепська Яна Яківна

Керівник
д.т.н., професор _____ Яновський Ф.Й.

Нормоконтролер _____ Сініцин Р.Б.

КИЇВ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ
171 «ЕЛЕКТРОНІКА», ОПП«ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
_____ Шутко В.М.
«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання дипломної роботи

Лепська Яна Яківна

(П.І.Б., випускника)

1. Тема дипломної роботи: «Електронна система інформаційного обміну з БПЛА на основі дводіапазонної антенної решітки» затверджена наказом ректора від «23» березня 2023 р. № 387/ст.
2. Термін виконання роботи: з «24» березня 2023 р. По «15» червня 2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: Виконати огляд літературних джерел, пов'язаних з розробкою електронних антенних систем для інформаційного обміну з БПЛА. Виконати моделювання дводіапазонної мікросмужкової планарної антенної решітки для частот бездротових систем на 2.4 ГГц та 5.8 ГГц для системи інформаційного обміну з БПЛА.
4. Зміст пояснювальної записки: 1 Електронні системи інформаційного обміну з БПЛА, 2 Побудова мікросмужкових антен прямокутної форми для діапазонів частот бездротових систем, 3 Дослідження мікросмужкових антенних решіток для діапазонів частот бездротових систем.
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстрованого) матеріалу: таблиці, рисунки, графіки.

6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання етапів	Відмітка про виконання
1.	Затвердження теми бакалаврської роботи	23.03.2023 р	
2.	Вивчення літератури	24.03.2023 – 07.04.2023	
3.	Електронні системи інформаційного обміну з БПЛА	08.04.2023 – 24.04.2023	
4.	Побудова мікросмужкових антен прямокутної форми для діапазонів частот бездротових систем	25.04.2023 – 12.05.2023	
5.	Дослідження мікросмужкових антенних решіток для діапазонів частот бездротових систем	13.05.2023 – 29.05.2023	
6.	Оформлення та усунення недоліків дипломної роботи	30.05.2023 – 15.06.2023	

Дата видачі завдання: «24» березня 2023 р.

Керівник дипломної роботи _____
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Яновський Ф. Й.

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випусника)

Лепська Я. Я.
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Електронна система інформаційного обміну з БПЛА на основі дводіапазонної антенної решітки» містить: 62 сторінки, 45 рисунків, 6 таблиць, 15 формул, 19 використаних джерел.

Актуальність теми полягає у необхідності забезпечення стабільного та надійного інформаційного обміну між дистанційним керуванням та БПЛА в умовах використання засобів радіоелектронної боротьби.

Об'єкт дослідження – бездротовий зв'язок між дистанційним керуванням та БПЛА з використанням антенної решітки.

Предмет дослідження – дводіапазонна антенна решітка для частот бездротових систем.

Мета роботи – створити модель та дизайн дводіапазонної антенної решітки на основі друкованої технології.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання планарних антен для роботи в частотних діапазонах 2.4 ГГц та 5.8 ГГц, методи теорії інформації, методи чисельного математичного моделювання, методи математичного аналізу.

Ключові слова: БПЛА, ДКЛА, ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ, КВАДРОКОПТЕР, МІКРОСМУЖКОВА АНТЕНА, АНТЕННА РЕШІТКА, РАДІОЕЛЕКТРОННИЙ ЗВ'ЯЗОК, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ, КОЕФІЦІЄНТ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ, КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ З БПЛА.....	11
1.1. Класифікація безпілотних літальних апаратів (БПЛА).....	11
1.2. Структура електронних систем інформаційного обміну з БПЛА.....	15
1.3. Параметри антенних систем.....	16
1.4. Класифікація антенних систем інформаційного обміну з БПЛА.....	18
1.5. Висновки до розділу.....	22
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕН ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ ДЛЯ ДІАПАЗОНІВ ЧАСТОТ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ.....	23
2.1. Принципи побудови мікросмужкових планарних антен	23
2.2. Програмні середовища для моделювання електродинамічних пристроїв та систем.....	27
2.3. Моделювання одинарної мікросмужкової планарної антени для частотного діапазону 2.4 ГГц	31
2.4. Моделювання одинарної мікросмужкової планарної антени для частотного діапазону 5.8 ГГц	35
2.5. Висновки до розділу.....	39

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК ДЛЯ ДІАПАЗОНІВ ЧАСТОТ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ.....	40
3.1. Принципи побудови мікросмужкових антенних решіток.....	40
3.2. Моделювання мікросмужкової антенної решітки для частоти 2.4 ГГц.....	41
3.3. Моделювання мікросмужкової антенної решітки для частоти 5.8 ГГц.....	45
3.4. Моделювання дводіапазонної мікросмужкової антенної решітки для частот 2.4 ГГц та 5.8 ГГц.....	51
3.5. Дальність дії системи інформаційного обміну з БПЛА	54
3.6. Фізична модель компонентів системи зв'язку з БПЛА.....	55
3.7. Висновки до розділу.....	56
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

БАС – безпілотні авіаційні системи

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ДПЛА – дистанційно пілотований летальний апарат

ДКЛА – дистанційно керований летальний апарат

БПАЛА – безпілотний автоматичний літальний апарат

РЕБ – засоби радіоелектронної боротьби

АР – антенна решітка

ДС – діаграма спрямованості

КП – коефіцієнт підсилення

КСД – коефіцієнт спрямованої дії

КБВ - коефіцієнт біжучої хвилі

МСА – мікросмужкова антена

ВСТУП

Сьогодні використання БПЛА стало дуже актуальним і важливим. Призначення сучасних безпілотників не обмежується професійною відеозйомкою та комерційною діяльністю. Вони знайшли застосування в таких сферах як нафтогазова промисловість, транспорт, будівництво, сільське господарство, телекомунікації, моніторинг навколишнього середовища тощо. Це надає додатковий імпульс розвитку безпіотної авіаційної техніки в дослідницькій та охоронній діяльності.

Актуальність використання безпілотних авіаційних систем (БАС) полягає у їх потужному потенціалі для здійснення низки завдань, які раніше вимагали значних зусиль та ресурсів. Вони забезпечують гнучкість, маневреність та високу мобільність у повітряному просторі, дозволяючи досліджувати раніше недосяжні місця та збирати інформацію з високою точністю та ефективністю.

Розвиток новітніх технологій та зростання попиту спричинили появу великої кількості виробників та розробників безпілотних авіаційних систем (БАС), що призвело до покращення автопілотних систем, мініатюризації електроніки та датчиків. Зазначені системи стали економічно доступнішими, ніж літаки та гвинтокрили, а відсутність пілота дозволила зменшити масу і габарити БПЛА, збільшити діапазон допустимих перевантажень та інших факторів, що впливають на тривалість польоту [1].

Безпілотні та дистанційно пілотовані літальні апарати стають все більш ефективним інструментом у вирішенні завдань забезпечення військової безпеки та боротьби з тероризмом. За допомогою них проводиться аеророзвідка вздовж лінії фронту, коригування артилерійського вогню, виявлення ворожих позицій та техніки, нанесення стратегічних ударів.

Однак, сьогодні, у використанні БПЛА є ряд невирішених технічних завдань та обмежень: регуляторні норми, захист каналів радіозв'язку, ефективність,

життєвий цикл батарей, ненадійність зв'язку та інші конструктивні недоліки. Це робить їх вразливими до умов навколишнього середовища та засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), зокрема:

- Спуфінг.

Телеметричні послання передають дані до/з дрону через з'єднання послідовних портів. Дане з'єднання характеризується слабким, нестабільним зв'язком та в більшості випадків не шифрується. Ця вразливість у каналі передачі даних дозволяє за допомогою спуфінгу GPS перехоплювати, замінювати та виводити інформацію з БПЛА [2].

- Радіоелектронне придушення.

БПЛА вразливі до радіозавад, створених активним використанням електромагнітного спектру. Це призводить до втрати з'єднання між дистанційним керуванням користувача та літальним апаратом або до виведення з ладу електроніки літального апаратуру, внаслідок силового ураження [3].

Через підвищення використання засобів радіоелектронної боротьби з БПЛА, були представлені різні рішення для забезпечення надійного зв'язку між дистанційним керуванням та літальним апаратом. Одним із таких методів є використання електронних систем інформаційного обміну, які допомагають підвищити стабільність сигналу та збільшити дальність передачі сигналу.

Антенна електронної системи інформаційного обміну з БПЛА відіграє ключову роль. Вона має відповідати наступним вимогам: простота виробництва, низька вартість виготовлення, невеликі габарити, направленість, широкий частотний діапазон.

Всі ці характеристики задовольняються мікросмушковою планарною антеною [4]. Шляхом зміни форми патч-елементу, матеріалу підкладки та використання різних методів живлення можна покращити характеристики антенної системи. Ефективність патч-антени може бути додатково підвищена шляхом проектування антенної решітки (АР) з патч-елементів [4].

Серед недоліків мікросмужкової планарної антени можна виділити вузьку смугу пропускання, роботу з низькою потужністю та паразитне випромінювання [4]. Існують різні способи розширення смуги частот даної антени, серед них можна виділити наступні: збільшення товщини підкладки, покращення узгодження вхідного опору, використання підкладок з меншим показником діелектричної проникності, використання багато-частотних режимів роботи [5].

Тому метою даної кваліфікаційної роботи є створення надійної електронної апаратури інформаційного обміну з БПЛА з детальною розробкою антенної системи. В роботі представлено принципи побудови та, моделювання та порівняльний аналіз характеристик одинарних мікросмужкових антен з АР 2×2 для діапазонів частот 2.4 ГГц та 5.8 ГГц, та з дводіапазонною АР для електронної системи інформаційного обміну з БПЛА.

РОЗДІЛ 1.

ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ З БПЛА

1.1. Класифікація безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

Безпілотні авіаційні системи (БАС) - цільові авіаційні системи, які включають літальний апарат без екіпажу, засоби наземного забезпечення, підготовки і застосування відповідно до призначення літального апарата [6]. За своїм загальним призначенням літальні апарати в БАС поділяться на види, представлені на Рис. 1.1.1.

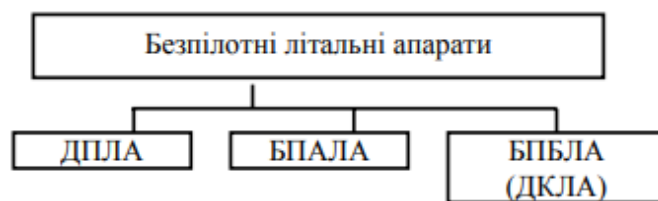


Рис. 1.1.1. Класифікація БПЛА за загальним призначенням

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – це літальний апарат, який багаторазово реалізовує своє функціональне призначення без безпосереднього розміщення людини на борту з метою управління [6].

Дистанційно пілотований літальний апарат (ДПЛА) – безпілотний літальний апарат з безперервним управлінням, яке здійснюється тим або іншим способом з нерухомого або рухомого пункту управління [6].

Безпілотний автоматичний літальний апарат (БПАЛА) – безпілотний літальний апарат, що реалізовує своє функціональне призначення в автоматичному режимі відповідно до закладених у нього алгоритмів і програм функціонування (крилаті ракети, літаки-розвідники) [6].

Дистанційно керований літальний апарат (ДКЛА) – це безпілотний літальний апарат, що реалізовує своє функціональне призначення в основному автономно, при епізодичному втручанні оператора управління для перенацілювання або перепрограмування системи управління літальним апаратом [6].

Основні технічні характеристики, за якими класифікують БПЛА можна розподілити за наступними категоріями [7]:

За габаритно-ваговими характеристиками:

- мікро – від 0 до 9 кг;
- надмалі – від 9 до 15 кг;
- малі – від 15 до 200 кг;
- середні – 200 – 2000 кг;
- великі – 2000 – 5000 кг.

За аеродинамічною схемою:

- літакового типу – швидкість польоту 50 – 60 км/год;
- гелікоптерного типу – швидкість польоту до 100 км/год .

За способом старту:

- катапультного типу;
- що, запускаються з руки;
- запускаються зі злітної смуги.

За способом посадки:

- літаковим способом;
- що спускаються на парашуті;
- уловлювані різними пристосуваннями.

За виглядом базування пускової установки:

- наземні;

- повітряні;
- морські.

За висотою застосування:

- надмалі висоти – до 300 м;
- малі висоти – 300 – 1000 м;
- середні висоти – 1 – 4 км;
- висотні – 4 – 12 км.

За дальністю дії:

- надмалої дальності – до 40 км;
- малої дальності – до 70 км;
- середньої дальності – до 300 км;
- великої дальності – до 1500 км.

За часом отримання зібраної інформації:

- в масштабі реального часу;
- періодично в ході сеансів зв'язку;
- після посадки.

За тривалістю польоту:

- малої – менше 6 год;
- середньої – 6 – 12 год;
- великої – більше 12 год.

За кількістю двигунів:

- одnodвигунні;
- дводвигунні;
- мультдвигунні;
- бездвигунні.

Сьогодні найпоширенішим та найбільш доступним видом БПЛА є квадрокоптер, Рис 1.1.2. Він відноситься до мультидвигунних мікро БПЛА надмалої дальності, а тривалість його польоту складає до 6 годин. Дані телеметрії та зображення з камери квадрокоптера передаються на дистанційне керування протягом реального часу.

Основа використання БПЛА базується на різній бортовій апаратурі, оснащій телевізійними камерами, біохімічними, радіаційними, акустичними та іншими спеціалізованими датчиками, що дозволяє використовувати його в будь-якій сфері людської діяльності.



Рис. 1.1.2. Квадрокоптери Mini 3 Pro, Mavic 3, Matrice 300 RTK.

Як вже зазначалося, архітектура більшості безпілотних авіаційних систем складається з безпілотного літального апарату, наземної станції управління (дистанційного керування) та лінії зв'язку, за допомогою якої відбувається обмін інформації між БПЛА та дистанційним керуванням [2].

В даній архітектурі використовується наземний тип зв'язку, який характеризується стандартизованими протоколами передачі даних Bluetooth та Wi-Fi 802.11. Частотний діапазон цих бездротових комунікацій відповідає 2.4 ГГц, 5 ГГц та 5.8 ГГц, та не має відповідного шифрування, що робить літальний апарат вразливим до спуфінгу, перехоплення кадру, радіозавад та блокування сигналу GPS.

1.2. Структура електронних систем інформаційного обміну з БПЛА

Електронні системи підсилення інформаційного обміну з БПЛА мають інтегровану або каскадну структуру (Рис. 1.2.1.), забезпечуючи підсилення сигналу та покращення швидкості передачі даних.

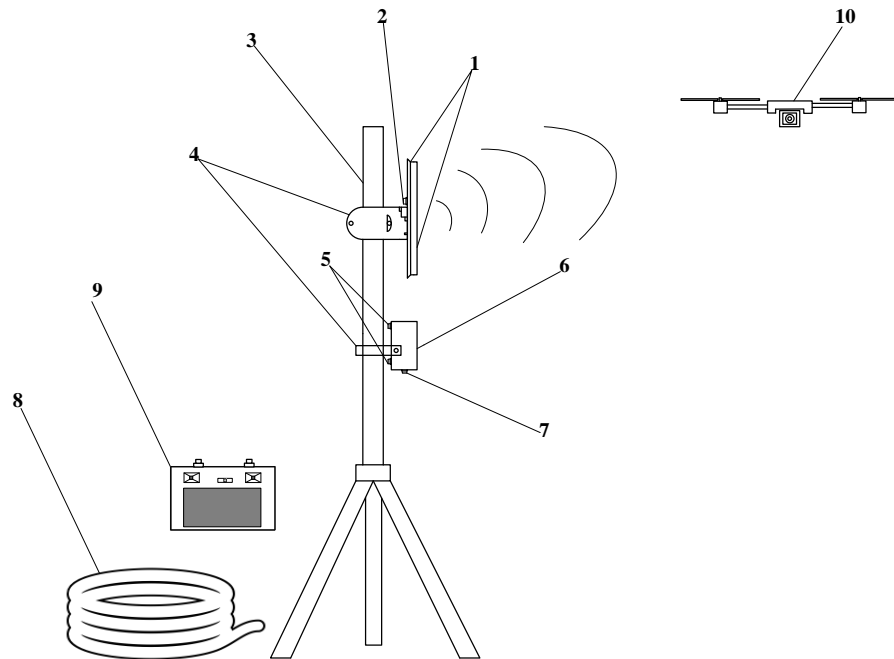


Рис. 1.2.1. Схема каскадної електронної системи інформаційного обміну на основі планарної антени: 1 – антенна конструкція та випромінювач; 2 – конектор живлення антени; 3 – штатив для антени; 4 – кронштейни; 5 – конектори для частотних діапазонів підсилювача; 6 – підсилювач; 7 – вихід підсилювача; 8 – фідер; 9 – модифікований пристрій дистанційного керування; 10 – БПЛА.

Конструкція антени може мати різні форми, такі як патч-антена, диполь, спіраль тощо, та саме вона визначає характеристику направленості та поляриність антени.

Антенний випромінювач - це елемент, який випромінює електромагнітні хвилі у простір та приймає радіосигнал. Він може бути реалізований у вигляді металевої пластини, дроту, спіралі або іншої форми, залежно від типу антени.

Фідер – кабель або провід, який з'єднує антенну конструкцію з приймачем або передавачем. Фідерна лінія забезпечує передачу сигналу між антеною і рештою системи.

Конектор – це роз'єм або інтерфейс, який дозволяє підключити антенний підсилювач до дистанційного керування або іншого пристрою. Він забезпечує механічний та електричний зв'язок.

Принцип дії електронної системи інформаційного обміну базується на використанні квантових ефектів в антенній системі, а також на електромагнітних характеристиках антени і підсилювача.

Коли радіосигнал надходить до антени, вона перетворює його на електричний сигнал. Підсилювач збільшує потужність електричного сигналу перед його проходженням через передавач або інші пристрої. Це забезпечує покращення стабільності зв'язку між БПЛА та дистанційним керуванням.

1.3. Параметри антенних систем

В складних природніх умовах, при застосуванні засобів радіоелектронної боротьби, у віддалених населених пунктах та місцевостях, для покращення стабільності зв'язку, зменшення впливу радіозавад і шумів, збільшення дальності передачі сигналу між БПЛА та дистанційним керуванням використовують системи антенних підсилювачів інформаційного обміну.

Вибір антени визначається радіотехнічними показниками її роботи. Для передавальних антен вони відображають залежність створюваного ними електромагнітного поля від напрямку випромінювання й частоти випромінюваних коливань [8].

До первинних радіотехнічних характеристик передавальних антен відносяться:

- коефіцієнт корисної дії (ККД) – це відношення потужності випромінювання до всієї активної потужності, підведеної до антени;
- опір випромінювання – це коефіцієнт, який пов’язує потужність випромінювання антени з квадратом діючого значення струму в точці антени;
- вхідний опір – це відношення напруги високої частоти на затискачах антени до струму живлення антени;
- гранична потужність випромінювання антени [9].

До вторинних радіотехнічних параметрів антен відносяться:

- максимальний коефіцієнт спрямованої дії (КСД) – відношення густини потоку потужності випромінюваною антеною у даному напрямі до густини потоку потужності, яка випромінювалася б у тому ж напрямі ізотропним випромінювачем або іншою еталонною антенною за умови рівності повних потужностей випромінювання порівнюваних антен. Чим вузча головна пелюстка ДН та менший рівень паразитних пелюсток, тим більший КСД [9];
- максимальний коефіцієнт підсилення (КП) – добуток КСД на ККД антени;
- рівень паразитних пелюсток – це відношення максимуму найбільшої бічної пелюстки до максимуму випромінювання [9];
- діюча довжина – це відношення ЕРС, індукованої в антені, до тангенціальної складової напруженості електричного поля перетинаючої її хвилі;
- ширина діаграми спрямованості антени – це кутовий сектор, який охоплює ту частину променя головної пелюстки діаграми направленості, на границях якого густина потоку потужності менша за максимальну у задану кількість раз (-3 дБ/-10 дБ). Ширину діаграми спрямованості на рівні «половинної потужності», на рівні 0,707 за напруженістю поля, позначають як $2\Theta_{0.5}$ (Рис. 1.3.1.);

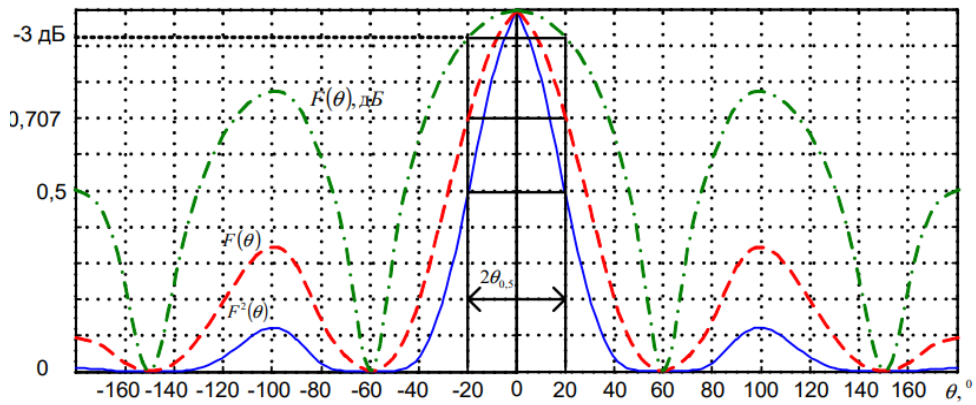


Рис. 1.3.1. Ширина діаграми спрямованості антени на рівні «половинної потужності»

- ефективна площа – відношення максимальної потужності, яку приймає антена, узгоджена з навантаженням, до густини потоку потужності падаючої на неї хвилі.
- поляризаційні параметри антен (коефіцієнт еліптичності, кут нахилу, напрям обертання вектора \vec{E}) [9].

1.4. Класифікація антенних систем інформаційного обміну з БПЛА

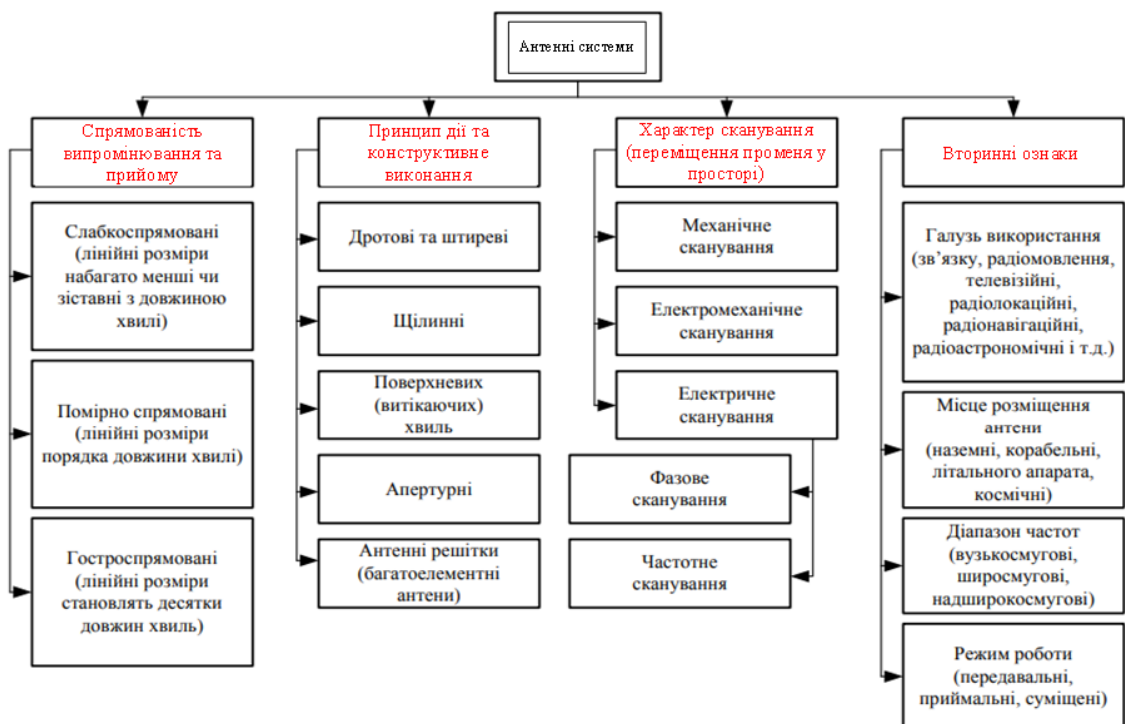


Рис. 1.4.1. Класифікація антенних систем інформаційного обміну за типом антени

На Рис. 1.4.1. наведено класифікацію антенних системи інформаційного обміну можна за характеристиками антени [10].

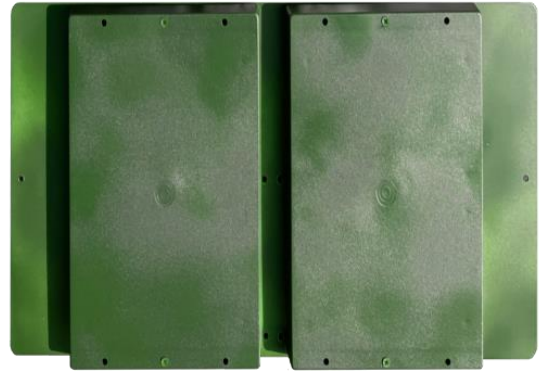
За типом конструкції підсилювача та його дії антенні системи можна поділити наступним чином:

- Каскадні антенні системи використовують кілька підсилювальних ступенів (каскадів), кожен з яких підсилює сигнал на певну величину перед його передачею.
- Інтегральні антенні системи мають безпосередньо вбудований в антену підсилювач, що дозволяє отримати компактний пристрій.
- Активні антенні системи використовують активні елементи (підсилювачі або транзистори) для підсилення радіосигналу перед його випромінюванням. Вони мають власне джерело живлення та потребують електричної енергії;
- Пасивні антенні системи не використовують активних елементів для підсилення сигналу. Замість цього вони використовують геометрію та направленість антен для підсилення сигналу шляхом концентрації енергії у відповідному напрямку.

Як раніше зазначалося, за рахунок універсальності з точки зору забезпечення резонансної частоти, поляризації, діаграми направленості і імпедансу при виборі конкретної форми випромінюваного елемента [11], найрозповсюдженішим типом антенного випромінювача в проектуванні електронних систем інформаційного обміну з БПЛА є мікросмужкова антена. Це спричинило появу великої кількості виробників електронних систем інформаційного обміну на основі патч елементів. На Рис. 1.4.2 зображено зовнішній вигляд найпопулярніших антенних систем, виготовлених за технологією друкованих плат:



а



б



в



г



д

Рис. 1.4.2. Антенні системи: а – Антена 4Hawks; б – АН-234 «Аліса»; в – Alientech Duo II на дистанційному керуванні; г - Interline (MIMO); д - RunBit Square.

У таблиці 1.4 наведено технічні характеристики сучасних антенних систем інформаційного обміну з БПЛА.

Таблиця 1.4

Технічні характеристики антенних систем інформаційного обміну з БПЛА

Параметри системи	Alientech Duo II	Антенна 4Hawks	RunBit Square	АН-234 «Аліса»	Interline (MIMO)
Частотний діапазон, ГГц	2.4 5.8	2.4 5.8	1.7 - 2.7	2.4 5.8	2.4
Тип підсилення	активна спрямована	активна спрямована	активна спрямована	пасивна спрямована	активна секторна
Коефіцієнт підсилення, дБі	2,4 G > 13 ± 1 5,8 G > 15 ± 1	11 ± 1	2,4 G > 14	2.4 ГГц ± 12 5.1-5.8 ГГц ± 15	2,4 G > 7 дБі ± 1
КСВ	< 1.4	< 1.5	< 2.0	< 1.8	< 2.0
Поляризація	Вертикальна	Вертикальна	вертикальна горизонтальна	Вертикальна	вертикальна горизонтальна
Конструкція	інтегрована	каскадна	каскадна	інтегрована	каскадна
Вага, кг	0,480	0,590	0,720	0,490	0,720

Покращити характеристики патч-антени можна шляхом проектування антенної решітки (АР) з патч-елементів. Вона використовується для отримання вужчої діаграми спрямованості (ДС), ніж ДС одного мікросмушкової патч-елементу, а також збільшує коефіцієнт підсилення антени [4].

1.5. Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуто класифікацію, характеристики та сфери застосування безпілотних літальних апаратів. Найрозповсюдженішим типом БПЛА є квадрокоптер. Основними їхніми перевагами є невеликий розмір, низька вартість, маневреності та простота обслуговування. Саме тому вони є важливим інструментом в науково-дослідницькій, військовій, комерційній та інших сферах діяльності людини.

Більшість безпілотних літальних апаратів мають серйозні конструктивні недоліки та незахищені канали зв'язку, через що стають вразливими до застосування РЕБ та змін навколишнього середовища.

Для забезпечення надійності зв'язку БПЛА було запропоновано використання електронних систем інформаційного обміну на основі мікросмужкової антени для підсилення сигналу між дистанційним керуванням та БПЛА. Використання даного виду антен обумовлене її низькому профілю, невеликим габаритам, сумісності з плоскими і неплоскими поверхнями, простоті й низькій вартості виготовлення з використанням сучасних друкованих технологій.

Планарні АР забезпечують порівняно більшу спрямованість та коефіцієнт підсилення, ніж одинарна мікросмужкова антена.

Після розгляду декількох моделей антенних систем можна стверджувати, що вони влаштовані ідентично: якщо антена відноситься до панельного типу, то її конструкція включає екран і випромінювач, виконаний у формі прямокутника і встановлений на деякій відстані від екрану, та підсилювач потужності, розміщений на штативі або інтегрований в систему. Варто зазначити, що вартість даних пристроїв є високою. З метою розв'язання даних питань, було вирішено спроектувати власну версію електронної системи інформаційного обміну з БПЛА для діапазонів частот 2.4 ГГц та 5.8 ГГц, використовуючи один та чотири патч-елементи, а також спроектувати дводіапазонну антенну решітку.

РОЗДІЛ 2.

ПОБУДОВА МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕН ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ ДЛЯ ДІАПАЗОНІВ ЧАСТОТ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ

2.1. Принципи побудови мікросмужкових планарних антен

Конструкція найпростішої мікросмужкової патч-антени складається з випромінювача (патча), який розташований на одному боці діелектричної підкладки, і з заземлюючою плоскою пластиною на іншому боці діелектричної підкладки [11], як показано на Рис. 2.1.1.

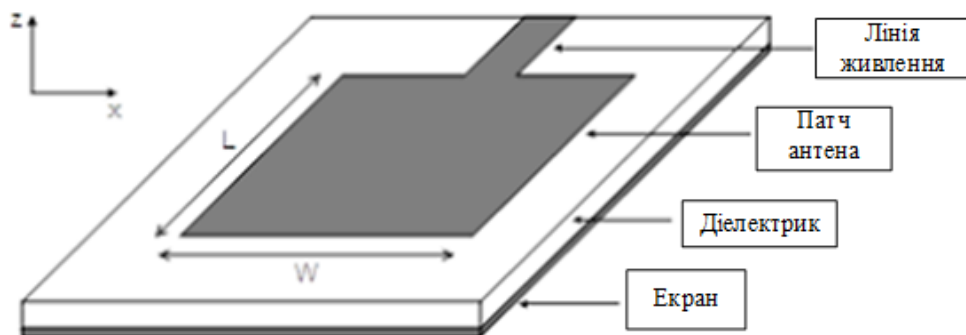


Рис. 2.1.1. Конструкція одинарної прямокутної мікросмужкової антени

Патч-елемент представляє собою пластину, виготовлену з провідного матеріалу (мідь, срібло або золото) і може бути будь-якої форми. Квадратна, прямокутна, кругла та дипольна форми патчів є найбільш поширеними через простоту їх аналізу та виготовлення, а також завдяки характеристикам випромінювання і особливо низькому рівню крос-поляризаційного випромінювання [11].

Проектування мікросмужкової патч-антени вимагає ґрунтовного підходу до вибору матеріалу діелектричної підкладки, на якій друкується антена, її товщини, матеріалу пластини, та розрахунку її розмірів. Для того щоб отримати високу ефективність випромінювання та спрямованість, необхідно, щоб відносна

діелектрична проникність матеріалу складала $\epsilon_r \leq 3$ [4]. Товщина діелектричного матеріалу підкладки h повинна бути $h \leq 1,5$ мм для антен з робочою частотою менше за 10 ГГц [4].

Таким чином, у якості діелектричного матеріалу підкладки ідеально підходить матеріал Rogers RT5880, параметри якого $\epsilon_r = 2,2$ і $h = 1,5$ мм. Однак, враховуючи вартість та доступність даного матеріалу, для отримання наближених до реальних результатів моделювання, діелектричною підкладкою було обрано склотекстоліт FR-4 з вихідними параметрами $\epsilon_r = 4,4$ і $h = 1$ мм. Тангенс кута втрат матеріалу складає 0,017.

На Рис. 2.1.2. зображено конструкцію одинарної досліджуваної мікросмушкової антени з лінійною поляризацією, яка живиться за допомогою коаксіальної лінії передачі [4].

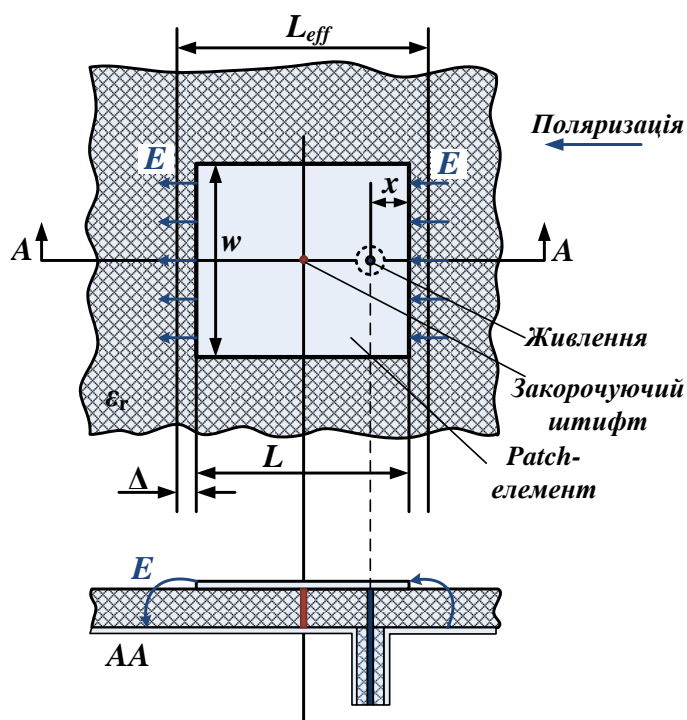


Рис. 2.1.2. Конструкція одинарної прямокутної мікросмушкової антени з лінійною поляризацією

Якщо відома робоча частота антени f_0 , товщину діелектричної підкладки можна розрахувати за формулою,

$$h \leq \frac{0,3c}{2\pi f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м – швидкість світла.

Так як електричне поле зазнає вигину по краях патч-елементу, електричні розміри мікросмужкової патч-антени стають ширшими в порівнянні з фізичними розмірами [4]. Цей ефект враховується в резонансній частоті у вигляді ефективної діелектричної проникності ϵ_{eff} , яка описується рівнянням:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2}. \quad (2.2)$$

Ширину патч-елементу знаходимо за виразом:

$$w = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}. \quad (2.3)$$

Збільшення електричної довжини патч елемента (ΔL) можна отримати наступним чином:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(w/h + 0.262)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(w/h + 0.813)}. \quad (2.4)$$

Ефективну довжину патч-елементу L_{eff} та фізичну довжину L розраховуємо, використовуючи рівняння:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} = L + 2\Delta L, \quad (2.5)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L. \quad (2.6)$$

Живлення антени реалізується за допомогою мікросмужкової лінії. Така лінія живлення складається з провідної смужки меншої ширини, яка з'єднана з патчем. Це рішення має ряд переваг: низька вартість виготовлення, простота узгодження за допомогою вибору місця розташування підключення. Слід враховувати, що зі збільшенням товщини підкладки збільшується паразитне випромінювання, що обмежує ширину робочої смуги МСА [11].

Точку підключення коаксіального кабелю з опором 50 Ом для належного узгодження з вхідним опором патч-елементу знаходимо, розрахувавши наступні параметри:

- вхідний опір на ребрі антени

$$R_p = \frac{1}{2G}, \quad (2.7)$$

де $G = \frac{\pi w}{W_c \lambda_0} \left[1 - \frac{(kh)^2}{24} \right]$ – випромінююча провідність;

$W_c = 120\pi$ Ом – хвильовий опір середовища (вільний простір);

λ_0 – довжина хвилі у вільному просторі;

$k = 2\pi/\lambda_0$ – хвильове число.

- вхідний опір патч-антени

$$R_{\text{вх}} = R_p \cos^2 \frac{\pi x}{L}, \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad (2.8)$$

де x – відстань від ребра антени.

- точка підключення з необхідним вхідним імпедансом:

$$x = \frac{L}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{R_{\text{вх}}}{R_p}}. \quad (2.9)$$

Важливим аспектом у виготовленні патч антен є їхня мініатюризація. Існує багато методів зменшення розмірів патч антени:

1. використання підкладок з високою діелектричної проникністю;
2. модифікація форми патча;
3. коротке замикання патча на площину заземлення;
4. комбіновані методи, які об'єднують вище зазначені [11].

В даній роботі було використано метод коригування форми прямокутної мікросмушкової патч антени для дводіпазонної схеми на частотах 2.4 ГГц та 5.8 ГГц.

2.2. Програмні середовища для моделювання електродинамічних пристроїв та систем

Сьогодні наукові дослідники та інженери використовують різноманітні програмні пакети для моделювання та дослідження електродинамічних середовищ. Детальніше опишемо декілька з них.

CST Studio Suite - професійне тривимірне програмне забезпечення для електромагнітного (EM) аналізу, призначене для проектування та оптимізації електромагнітних компонентів та систем [12]. Інтерфейс програми зображено на Рис. 2.2.1.

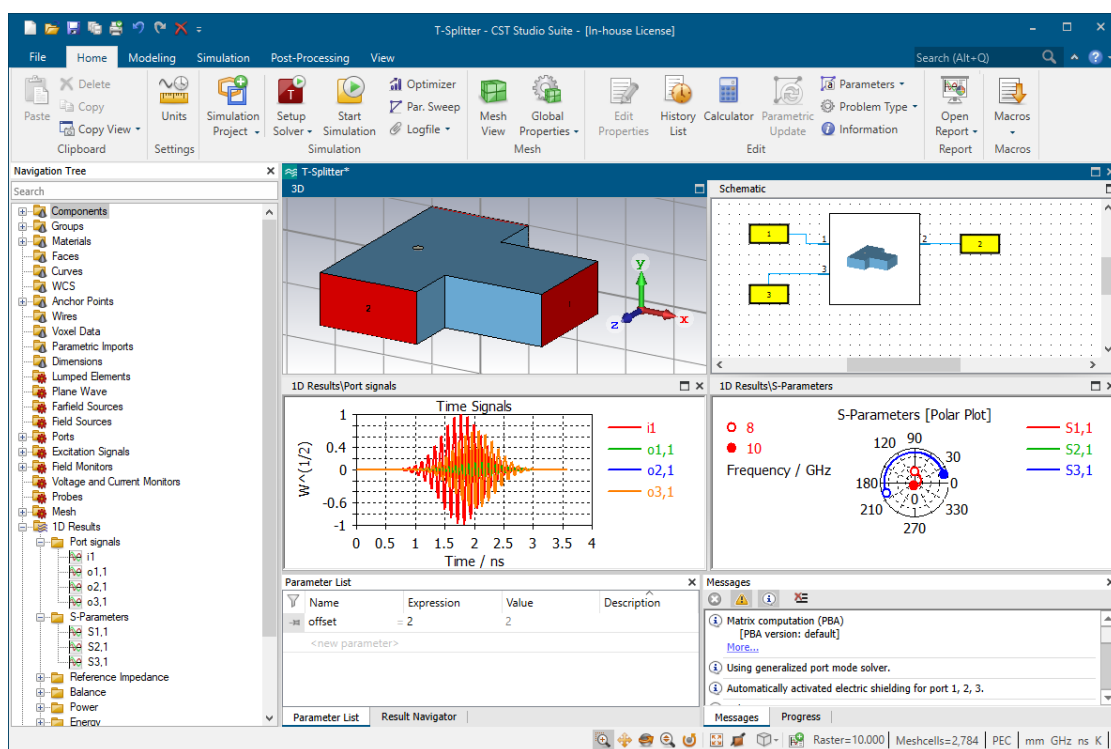


Рис. 2.2.1. Інтерфейс програми CST Studio Suite

Програмне забезпечення дозволяє моделювати антени, мікросмужкові лінії, фільтри; аналізувати електромеханічні та теплові ефекти в двигунах та пристроях високої потужності; аналізувати електромагнітну сумісність та перешкоди. Для вирішення питань EM та НВЧ моделювання, програма використовує наступні методи: метод скінченних різниць елементів у часовій області, метод матриці ліній передач та метод кінцевої інтеграції.

COMSOL Multiphysics – це потужне тривимірне програмне середовище, яке створено для моделювання фізичних процесів, описаних диференціальними рівняннями в частинних похідних: завдання механіки рідини і газу, теорії пружності і пластичності, електрики і магнетизму, поширення хвиль, акустики, хімічної технології, геофізики, електрохімії [13, 14]. На Рис. 2.2.2. продемонстровано графічний інтерфейс програмного середовища.

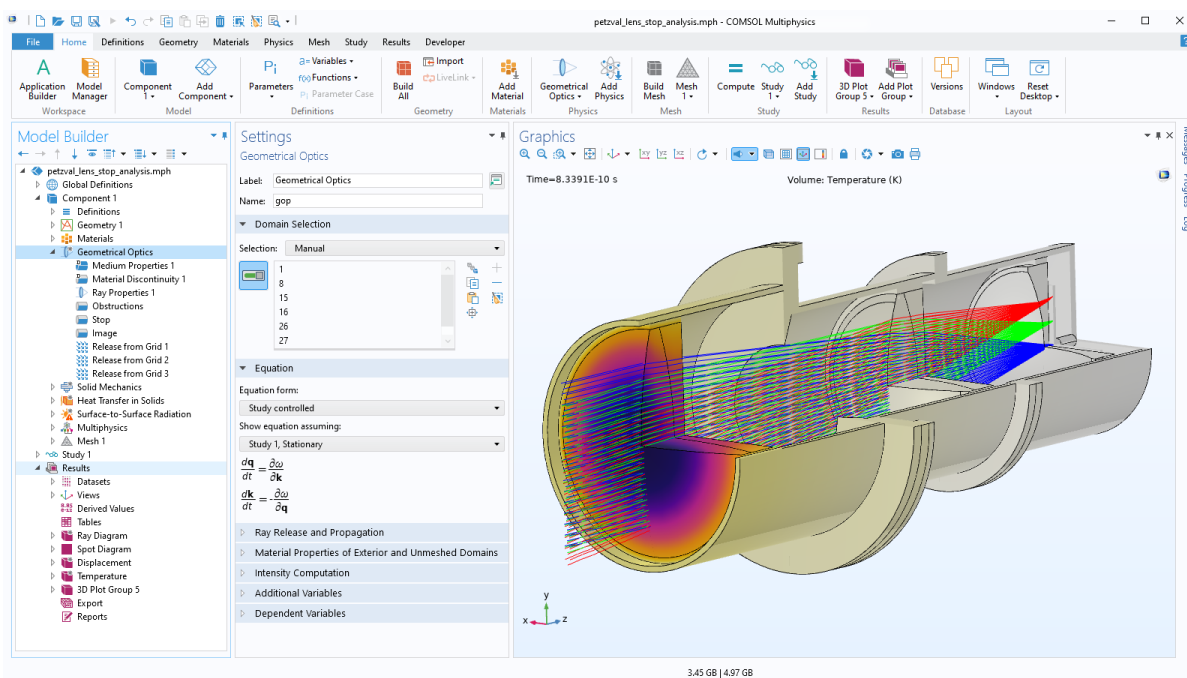


Рис. 2.2.2. Інтерфейс програмного середовища COMSOL Multiphysics

В даному програмному пакеті можливо розв’язувати задачі, функції та моделі залежні або незалежні від часу, шукати фізичні величини в точках. Для цього програма використовує метод кінцевих елементів. Цей метод дозволяє точно моделювати складні геометрії та матеріальні властивості, а також враховувати різні типи взаємодії електромагнітних полів зі структурами. Слід враховувати, що складність та тривалість розв’язку залежить від розмірності задачі.

COMSOL Multiphysics дозволяє комбінувати різні фізичні моделі і моделі різних розмірностей, а також дозволяє додавати до моделей власні рівняння. За початкових умов, не використовуючи детерміновані інтерфейси, є можливість реалізувати задачу в формі системи рівнянь, яка може містити алгебраїчні та диференціальні рівняння [14].

OpenEMS – загальнодоступне тривимірне програмне забезпечення для моделювання та дослідження електромагнітного середовища, призначене для проєктування антен, фільтрів та інших електронних пристроїв. На Рис. 2.2.3. зображено інтерфейс даної програми та діаграма спрямованості рупорної антени на частоті 15 ГГц [15].

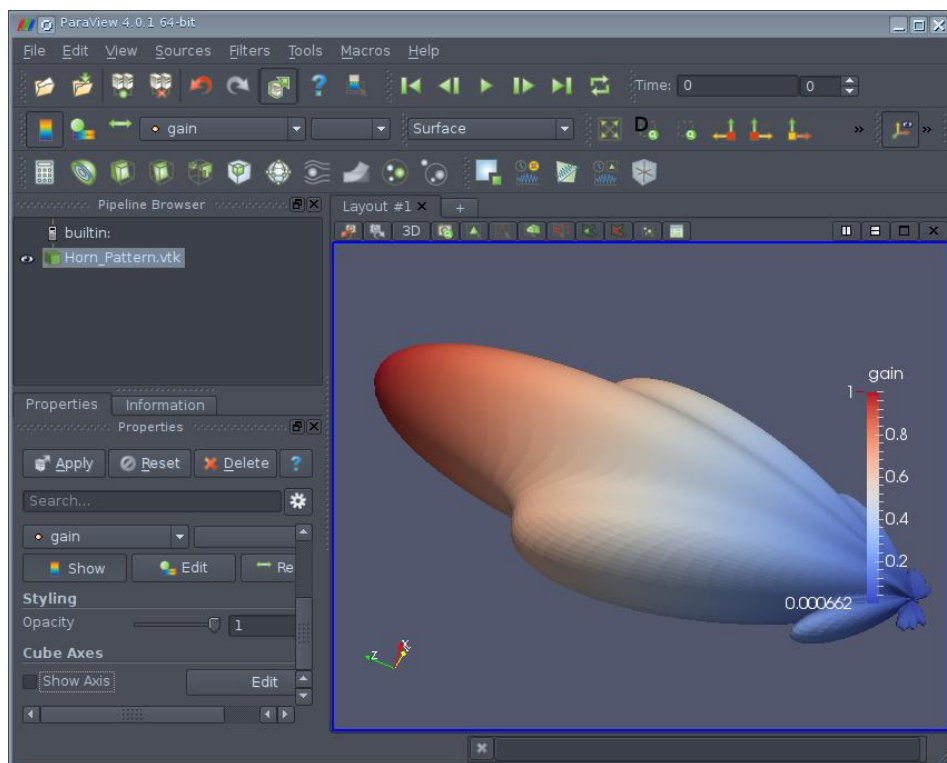


Рис. 2.2.3. Інтерфейс програмного забезпечення OpenEMS

Програма є крос-платформною: працює під операційними системами Linux і Windows. Вирішення задач моделювання реалізовано за допомогою методу скінченних різниць у часовій області.

Особливістю OpenEMS є те, що у симулятора відсутній власний графічний інтерфейс, він інтегрується в Octave або Matlab, завдання на моделювання є їхнім скриптом, а відображення результатів відбувається за допомогою графічного пакету Paraview.

Електромагнітний симулятор призначений для розрахунку, розподілу електромагнітного поля в різних системах, збуджуваних як від джерела змінної напруги, так і зовнішнім електромагнітним полем.

Можливості OpenEMS:

- Розрахунок електромагнітного поля методом FDTD;
- Розрахунок S-параметрів електромагнітних систем;
- Розрахунок електромагнітного поля в ближній і дальній зоні;
- Розрахунок діаграм спрямованості антен [15].

Altair FEKO – це тривимірний програмний пакет для аналізу електромагнітних полів, призначений для моделювання антен, розсіювачів, кабелів, хвилеводів тощо. FEKO має потужні алгоритми для чисельного розрахунку поля, а також для оптимізації та аналізу електромагнітних систем (Рис. 2.2.4.).

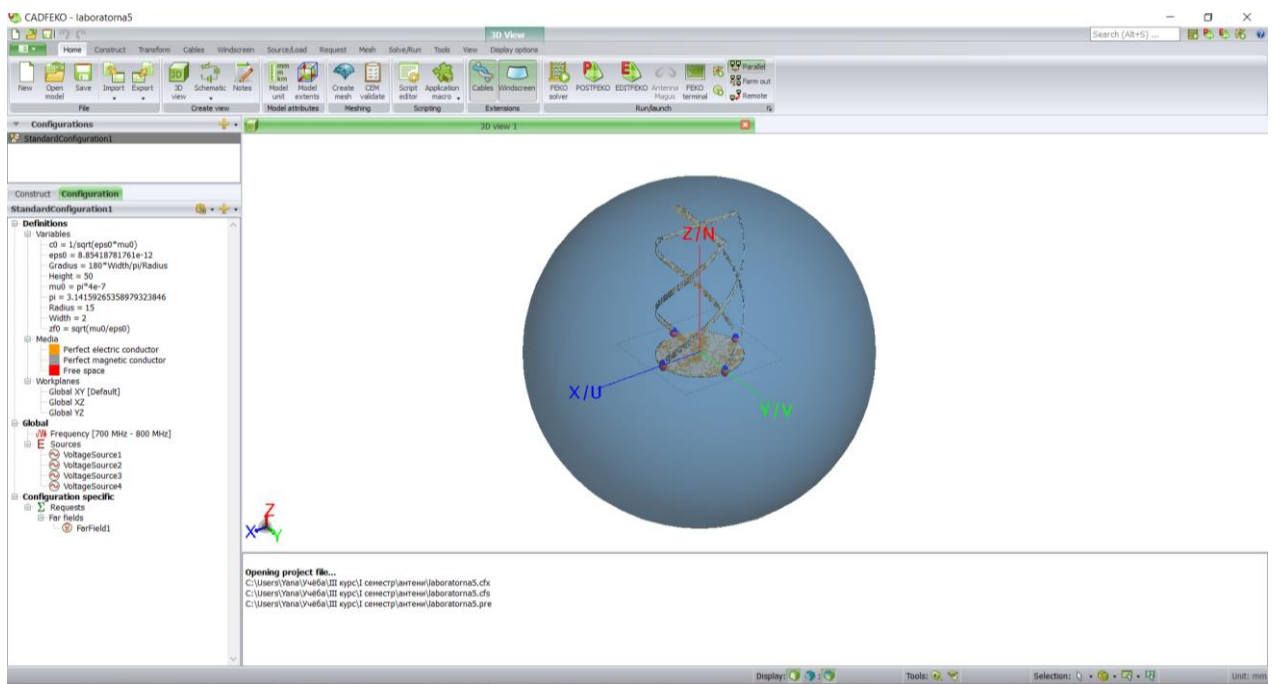


Рис. 2.2.4. Графічний інтерфейс програмного пакету Altair FEKO

В порівнянні з вище описаними програмними середовищами для електродинамічного аналізу моделей, ядро FEKO використовує значно більше чисельних методів: метод кінцевих елементів, метод моментів, метод скінченних різниць у часовій області, метод геометричної оптики, метод фізичної оптики, багаторівневий метод швидких мультиполів, метод загальної теорії дифракції. Це дозволяє отримувати точні результати комп'ютерного моделювання

високочастотних структур, зменшуючи втрати ресурсів при моделюванні об'єктів, розміри яких більше за довжину хвилі [4].

Дана програма має зручний інтерфейс, який поділяється на підпрограми CADFEKO та POSTFEKO. У CADFEKO відбувається моделювання об'єктів: внесення даних для розрахунку електромагнітних полів, розмірів випромінюваного елемента, метод живлення тощо. POSTFEKO призначене для перегляду результатів моделювання.

Таким чином, внаслідок проведеного порівняльного аналізу програмних середовищ для моделювання електродинамічних пристроїв та систем, для моделювання мікросмужкових патч антен та антенних решіток, які буде досліджено в даній кваліфікаційній роботі, було обрано програму Altair FEKO.

2.3. Моделювання одинарної мікросмужкової планарної антени для частотного діапазону 2.4 ГГц

Використовуючи формули для розрахунку розмірів мікросмужкової прямокутної патч-антени (2.2) - (2.9), розраховуємо параметри патч антени для роботи на частоті Wi-Fi системи 2,4 ГГц.

Як зазначалося раніше, в якості діелектричної підкладки під антену оберемо склотекстоліт FR-4 з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 4,4$ і товщиною $h = 1$ мм. Отримані розміри зведено в таблиці 2.3 і зображено на Рис. 2.3.1.

Таблиця 2.3

Розміри одинарної мікросмужкової антени прямокутної форми

Розмір	Товщина h , мм	Ширина w , мм	Довжина L , мм	Точка підключення живлення x , мм	Вхідний опір на ребрі антени, Ом
Значення	1	38	29	9.8	197.201

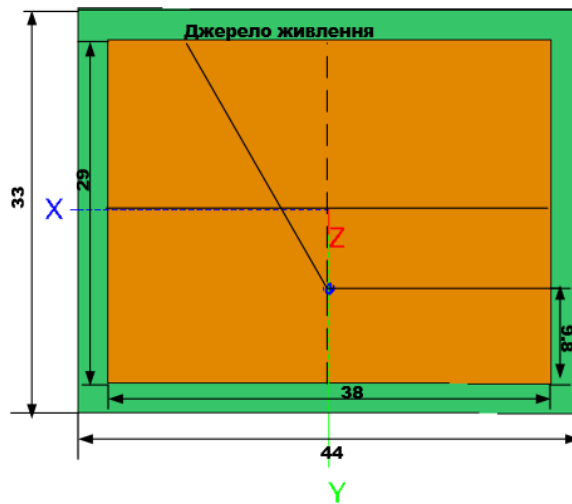


Рис. 2.3.1. Розміри одинарної мікросмушкової антени прямокутної форми

Після моделювання розрахованої конструкції антени отримуємо графіки основних параметрів: діаграми спрямованості (Рис. 2.3.2, Рис. 2.3.3), коефіцієнту підсилення (КП) та коефіцієнту спрямованої дії (КСД) (Рис. 2.3.4), комплексного вхідного опору (Рис. 2.3.5), коефіцієнту стоячої хвилі за напругою (КСХН) (Рис. 2.3.6), коефіцієнту відбиття (Рис. 2.3.7) [4].

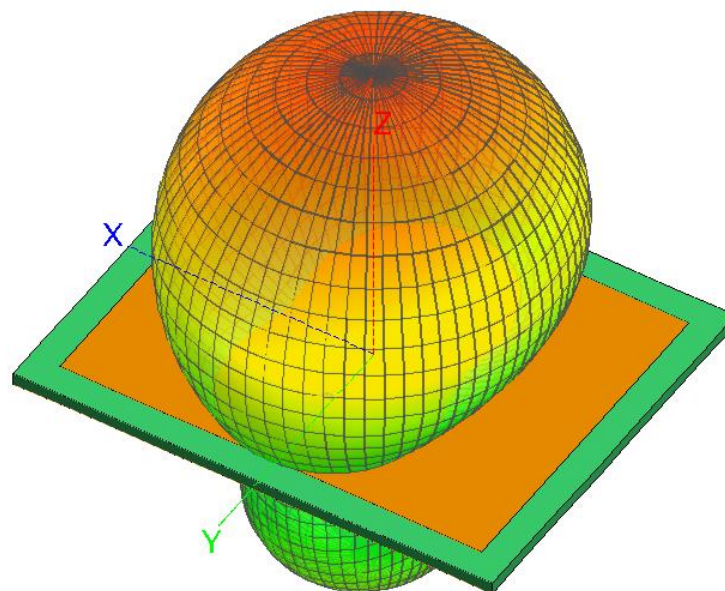


Рис. 2.3.2. 3D діаграма спрямованості одиночного елемента мікросмушкової антени на центральній частоті роботи 2,4 ГГц

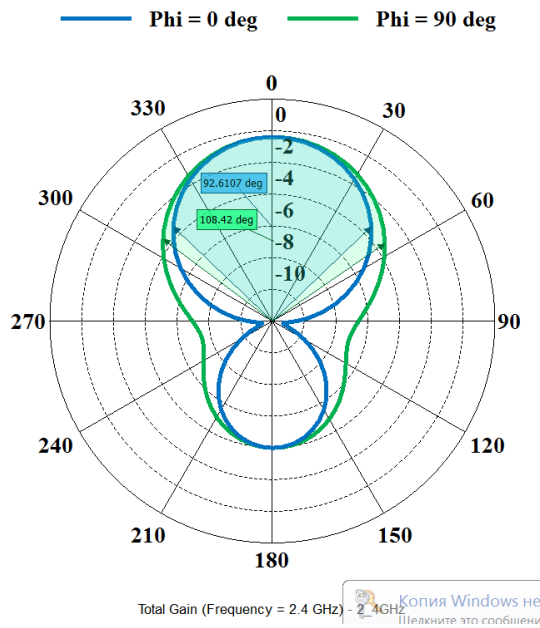


Рис. 2.3.3. Діаграма спрямованості одиночного елемента мікросмужкової антени на центральній частоті роботи 2,4 ГГц в полярній системі координат

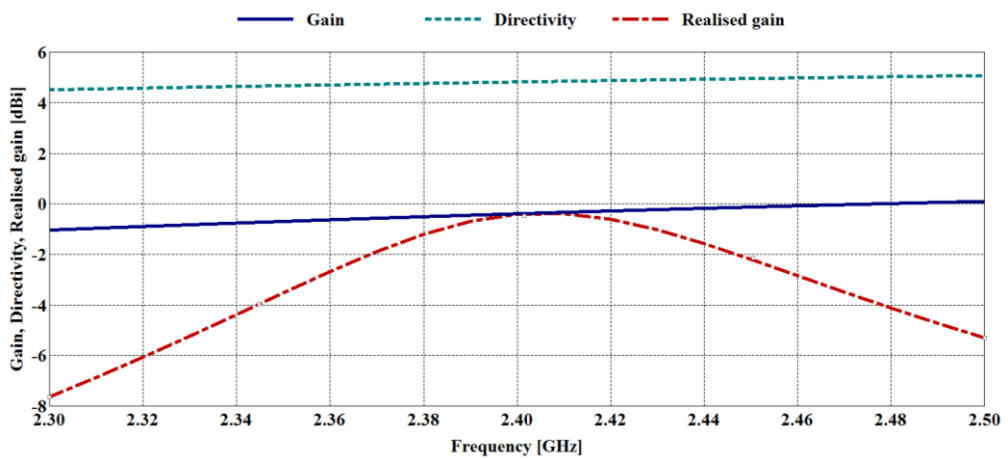


Рис. 2.3.4. Залежність КП та КСД одиночного елемента мікросмужкової антени від частоти роботи

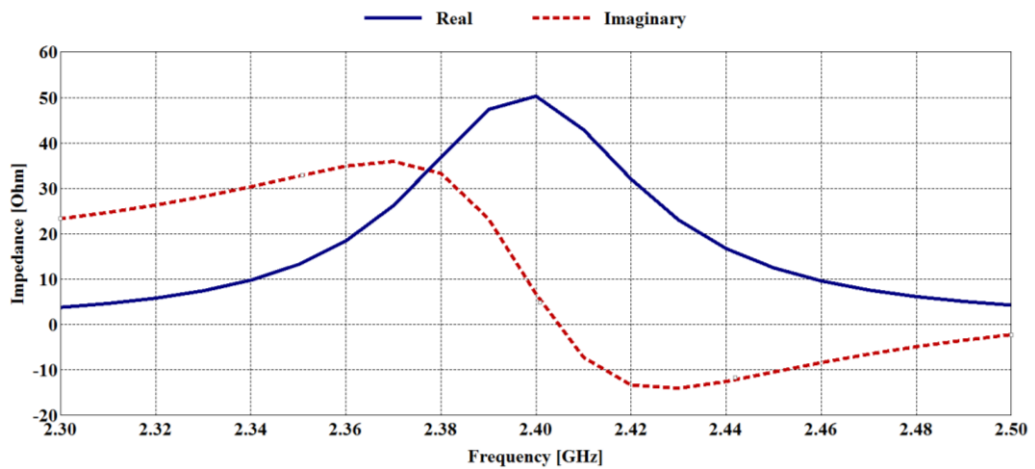


Рис. 2.3.5. Залежність вхідного опору одиночного елемента мікросмужкової антени від частоти роботи

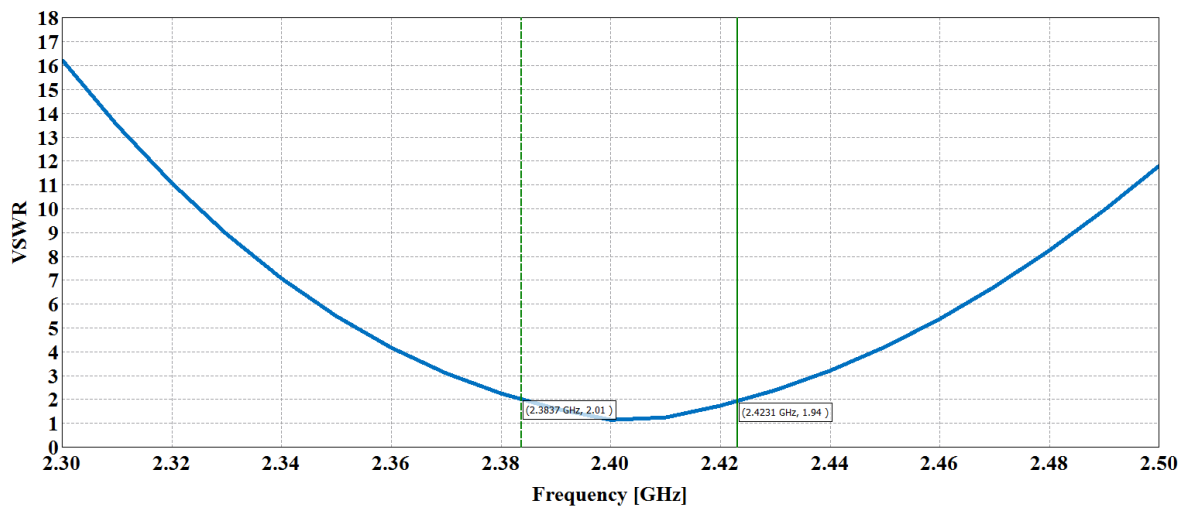


Рис. 2.3.6. Залежність коефіцієнту стоячої хвилі за напругою одиночного елемента мікросмужкової антени від частоти роботи

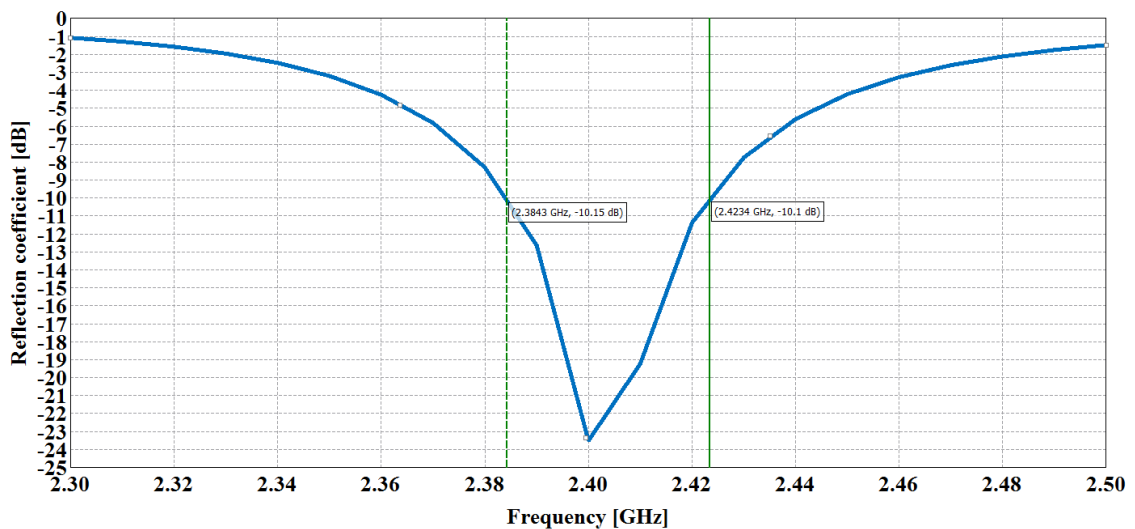


Рис. 2.3.7. Залежність коефіцієнту відбиття одиночного елемента мікросмужкової антени від частоти роботи

Коефіцієнт відбиття, отриманий одиночного елемента мікросмужкової антени на частоті 2,4 ГГц, становить -23,5 дБ, що менше -10 дБ, отже, узгодження опору між лінією живлення та антеною є задовільним.

Значення КСХН (VSWR) повинно знаходитися в діапазоні від 1 до 2. Значення виміряного коефіцієнта складає 1,3.

Отримана ДС вказує на те, що антена має спрямованість і ширина її головної пелюстки за рівнем половинної потужності випромінювання становить близько 92 градуси.

Коефіцієнт підсилення і коефіцієнт спрямованої дії на центральній частоті роботи дорівнюють -0,5 дБі та 4,82 відповідно.

Коефіцієнт корисної дії випромінювання може бути розрахований за допомогою наступної формули:

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{-0,5}{4,82} = -10\%$$

З отриманих результатів можна сказати, що розроблена одинарна мікросмужкова патч-антена є не ефективною у використанні.

2.4. Моделювання одинарної мікросмужкової планарної антени для частоти 5.8 ГГц

Використовуючи вище вказані формули та особливості матеріалу діелектричної підкладки, проведемо розрахунок розмірів мікросмужкової прямокутної патч-антени для роботи в частотному діапазоні 5.8 ГГц.

Отримані дані наведено в таблиці 2.4 і зображено на Рис. 2.4.1.

Таблиця 2.4

Розміри одинарної мікросмужкової антени прямокутної форми

Розмір	Товщина h , мм	Ширина w , мм	Довжина L , мм	Точка підключення живлення x , мм	Вхідний опір на ребрі антени, Ом
Значення	1	15.7	12	4	197.301

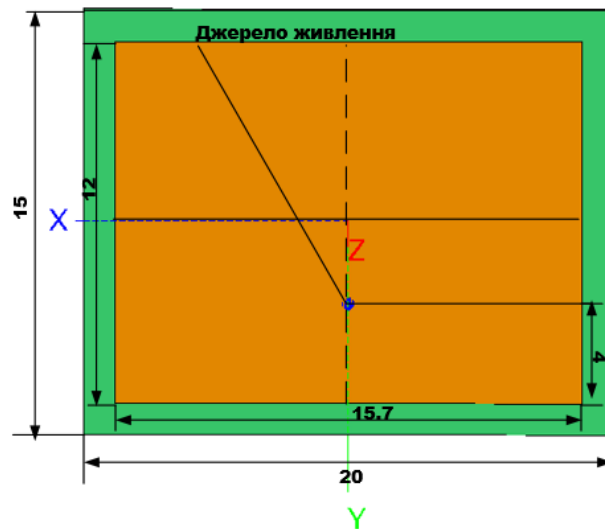


Рис. 2.4.1. Розміри одинарної мікросмужкової антени прямокутної форми

В результаті моделювання розрахованої конструкції антени отримуємо графіки основних параметрів: ДС (Рис. 2.4.2, Рис. 2.4.3), КП та КСД (Рис. 2.4.4), комплексного вхідного опору (Рис. 2.4.5), КСХН (Рис. 2.4.6), коефіцієнту відбиття (Рис. 2.4.7).

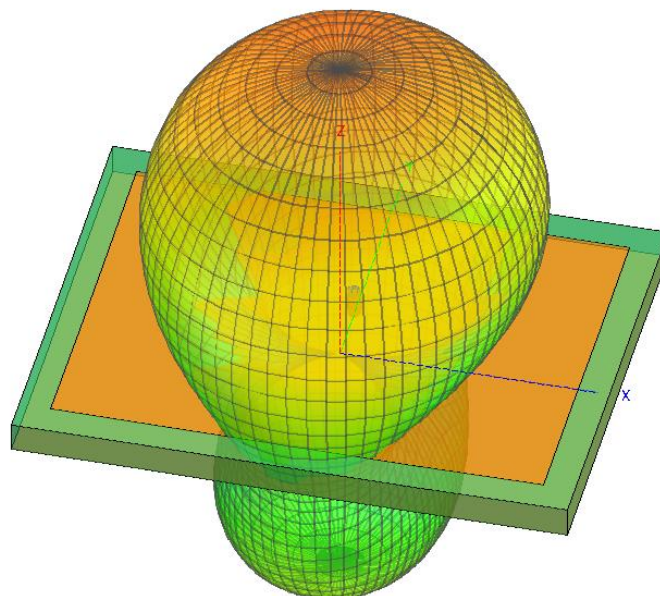


Рис. 2.4.2. 3D діаграма спрямованості одиночного елемента мікросмужкової антени на центральній частоті роботи 5.8 ГГц

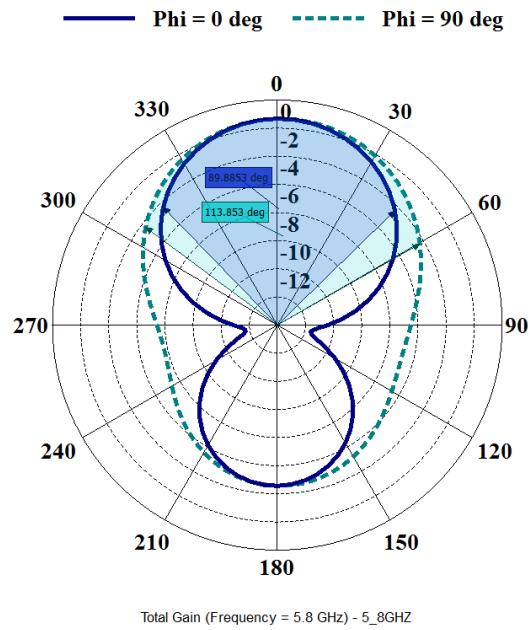


Рис. 2.4.3. Діаграма спрямованості одиночного елемента мікросмушкової антени на центральній частоті роботи 5.8 ГГц в полярній системі координат

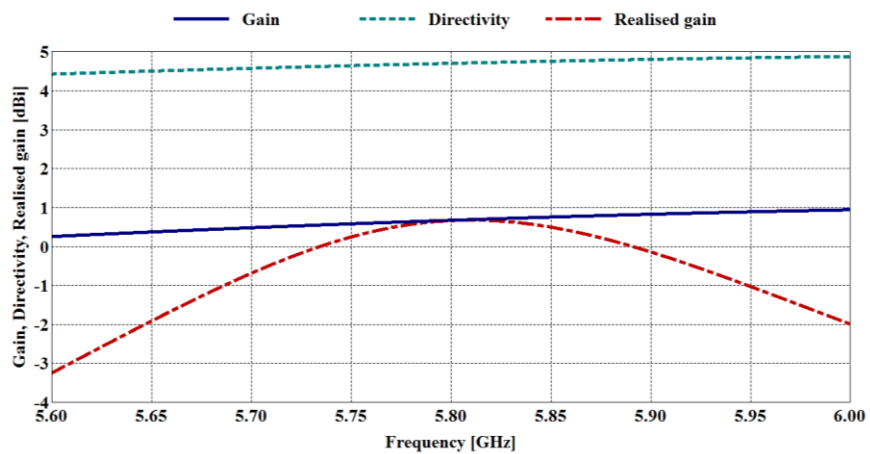


Рис. 2.4.4. Залежність КП та КСД одиночного елемента мікросмушкової антени від частоти роботи

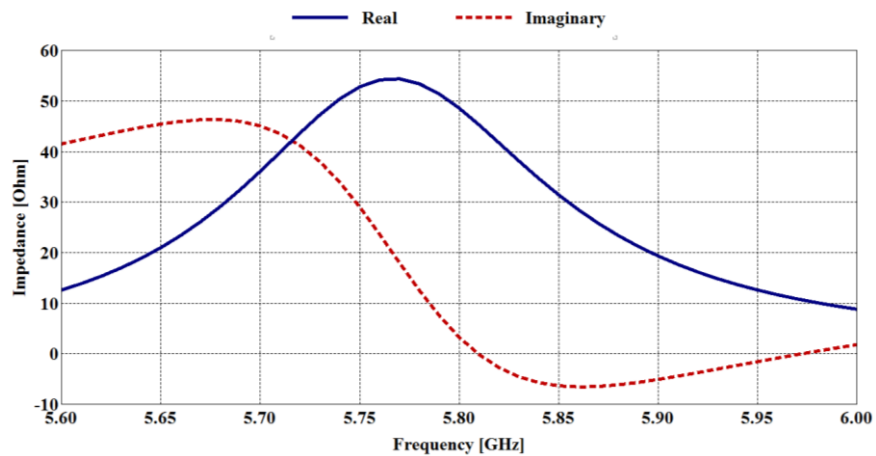


Рис. 2.4.5. Залежність вхідного опору одиночного елемента мікросмушкової антени від частоти роботи

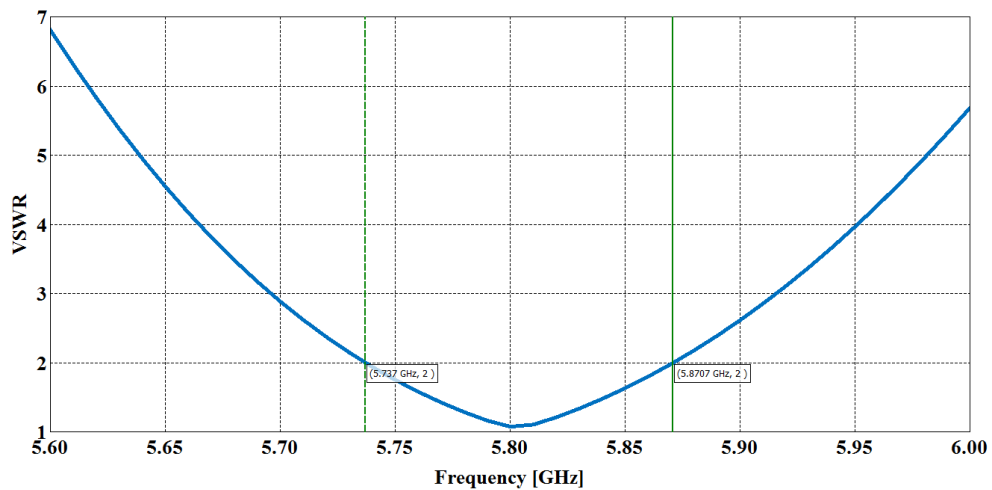


Рис. 2.4.6. Залежність коефіцієнту стоячої хвилі за напругою одиночного елемента мікросмужкової антени від частоти роботи

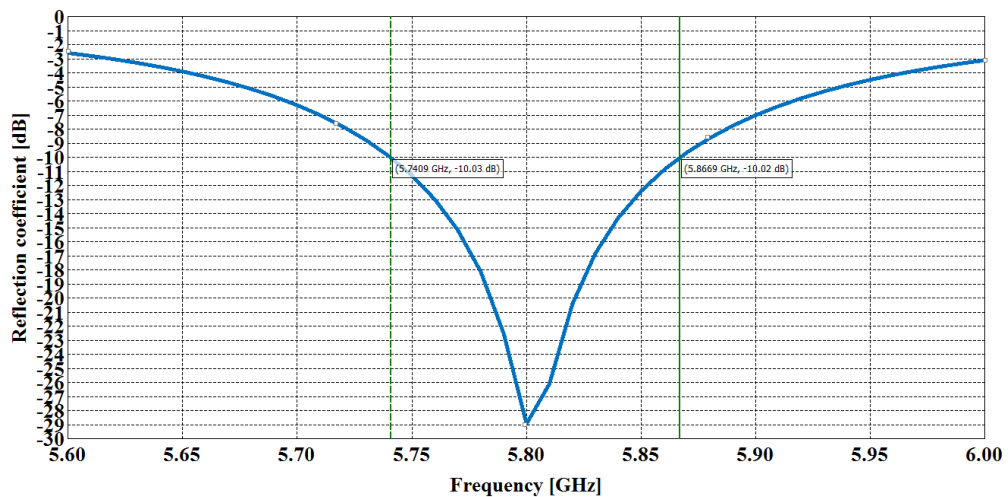


Рис. 2.4.7. Залежність коефіцієнту відбиття одиночного елемента мікросмужкової антени від частоти роботи

Коефіцієнт відбиття, отриманий для одиночного елемента мікросмужкової антени на частоті 5.8 ГГц, становить -29 дБ, що менше -10 дБ, узгодження опору між лінією живлення та антеною є задовільним.

Значення КСХН (VSWR) повинне знаходитися в діапазоні від 1 до 2. Вимірне значення коефіцієнта антени складає 1,32.

Отримана ДС вказує на те, що антена має спрямованість і ширина її головної пелюстки за рівнем половинної потужності випромінювання становить близько 89 градусів.

Коефіцієнт підсилення і коефіцієнт спрямованої дії на центральній частоті роботи дорівнюють відповідно 0,85 дБі та 4,75 дБі.

Розраховуємо коефіцієнт корисної дії випромінювання:

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{0,85}{4,75} = 17,9\%$$

Отримані результати свідчать, що розроблена одинарна мікросмужкова патч антена має мінімальну ефективність випромінювання.

2.5. Висновки до розділу

В даному розділі було ознайомлено з програмними середовищами для моделювання електродинамічних явищ. В результаті проведеного порівняльного аналізу можливостей програми та зручності інтерфейсу, для моделювання мікросмужкових антенних систем було обрано програмне середовище FEKO.

Було досліджено принципи побудови мікросмужкових антен прямокутної форми та, на основі розрахунків, виконано моделювання одинарних патч-елементів для частотних діапазонів 2.4 ГГц та 5.8 ГГц.

Внаслідок використання в якості діелектричної підкладки найрозповсюдженішого матеріалу – склотекстоліту FR-4 – з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 4,4$, було отримано незадовільні характеристики роботи мікросмужкових планарних антен. Незважаючи на значення коефіцієнту стоячої хвилі нижче 2 (1,3 / 1,32) в робочих смугах частот 2.4 ГГц та 5.8 ГГц, що дає гарне узгодження з лінією живлення в 50 Ом, коефіцієнт підсилення досягає значень -0,5 дБі та 0,85, а ККД – -10 % та 17,9 % відповідно. Отримані результати свідчать про неефективність випромінювання одинарних патч антен для заданих частотних діапазонів.

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК ДЛЯ ДІАПАЗОНІВ ЧАСТОТ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ

3.1. Принципи побудови мікросмужкових планарних антенних решіток

Принципи побудови мікросмужкової антенної решітки ідентичні до побудови одиничних патч-елементів. Різниця полягає в тому, що в АР до кожного окремого випромінювача підводиться мікросмужкова лінія живлення, а вся антена підключена коаксіальною лінією живлення.

Відстані між центрами патч-елементів в АР по горизонталі і вертикалі становлять $3/4$ центральної довжини хвилі робочого діапазону.

Джерело [4] зазначає: « ... важливим моментом в проектуванні АР є узгодження патч-елементів з мікросмужковими лініями живлення та коаксіальною лінією живлення. Для цього слід двічі виконати розрахунок ширини мікросмужкових ліній b у відповідності із заданим вхідним опором $Z_{\text{вх}}$, товщиною та матеріалом діелектричної підкладки...».

Для цього обчислюються величини:

$$A = \frac{Z_{\text{вх}}}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right), \quad (3.1)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_{\text{вх}}\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3.2)$$

$$C = \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}. \quad (3.3)$$

Розрахуємо ширину смужки:

$$\frac{b}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A}-2}, & \text{якщо } \frac{b}{h} < 2 \\ 2\pi \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} C \right], & \text{якщо } \frac{b}{h} > 2 \end{cases} \quad (3.4)$$

3.2. Моделювання мікросмушкової антенної решітки для частоти 2.4 ГГц

Враховуючи отримані результати розрахунків одиничного планарного елемента, змінимо діелектричну проникність склотекстоліту FR-4 $\varepsilon_r = 3,85$. Тангенс кута втрат такого матеріалу підкладки дорівнює 0,025; товщина матеріалу $h = 1$ мм. Розрахуємо розмір одного випромінювача для антенної решітки з чотирьох елементів для частотного діапазону 2.4 ГГц. Отримані дані наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Розміри одинарного мікросмушкового випромінювача прямокутної форми

Розмір	Товщина h , мм	Ширина w , мм	Довжина L , мм	Точка підключення живлення x , мм	Вхідний опір на ребрі антени, Ом
Значення	1	40,1	31,6	10	186.89

За допомогою формул (3.1)-(3.4) розрахуємо ширину мікросмушкової лінії живлення для патч-елементів антенної решітки. При вхідному опорі на ребрі антени 186.89 Ом, [4] ширина мікросмушкової лінії живлення для кожного випромінювача AP складає 0,05 мм. Ширина загальної коаксіальної лінії живлення для вхідного опору в 50 Ом складає 2,11 мм. Схема антенної решітки з чотирьох випромінюючих елементів зображена на Рис. 3.2.1.

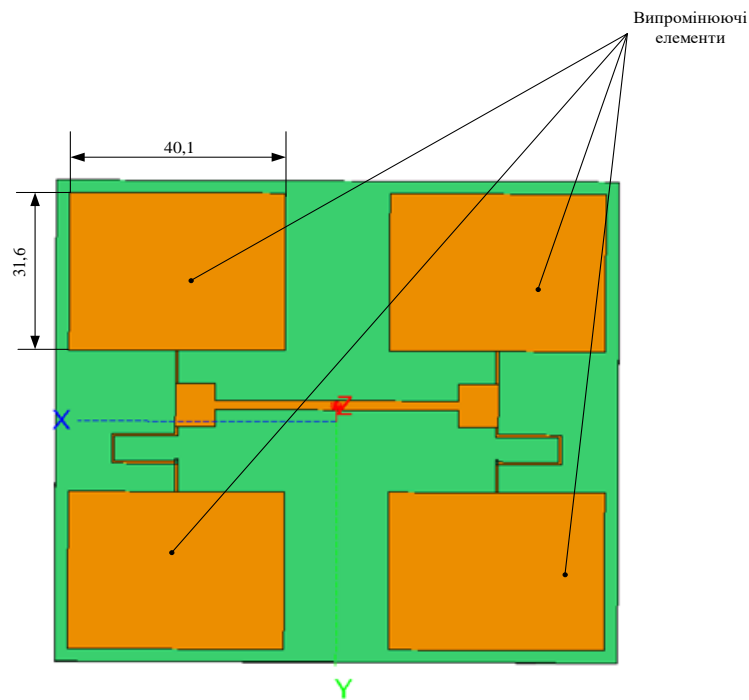


Рис. 3.2.1. Схема мікросмушкової антенної решітки з чотирьох випромінюючих елементів прямокутної форми

Внаслідок моделювання розрахованої конструкції антенної решітки отримуємо графіки основних параметрів: ДС (Рис. 3.2.2, Рис. 3.2.3), КП та КСД (Рис. 3.2.4), комплексного входного опору (Рис. 3.2.5), КСХН (Рис. 3.2.6), коефіцієнту відбиття (Рис. 3.2.7) [4].

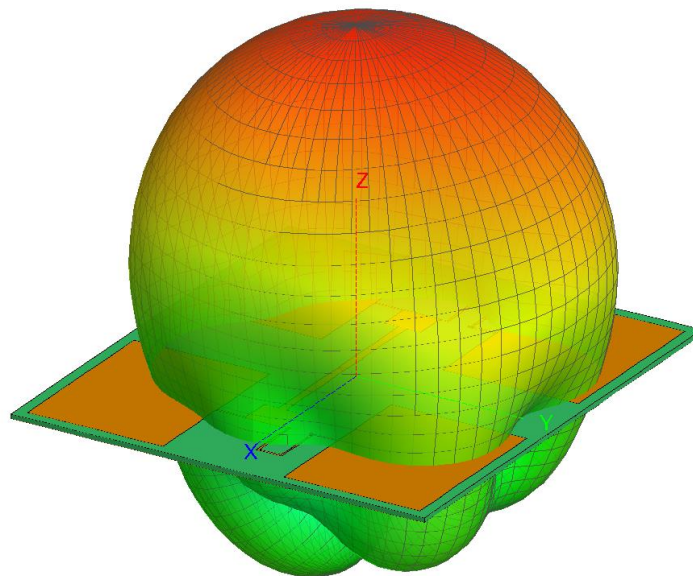


Рис. 3.2.2. 3D діаграма спрямованості мікросмушкової антенної решітки на центральній частоті роботи 2.4 ГГц

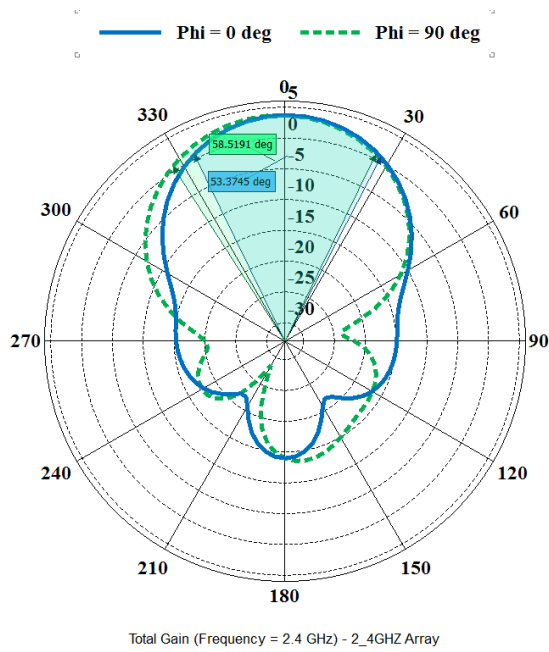


Рис. 3.2.3. Діаграма спрямованості мікросмушкової антенної решітки на центральній частоті роботи 2.4 ГГц в полярній системі координат

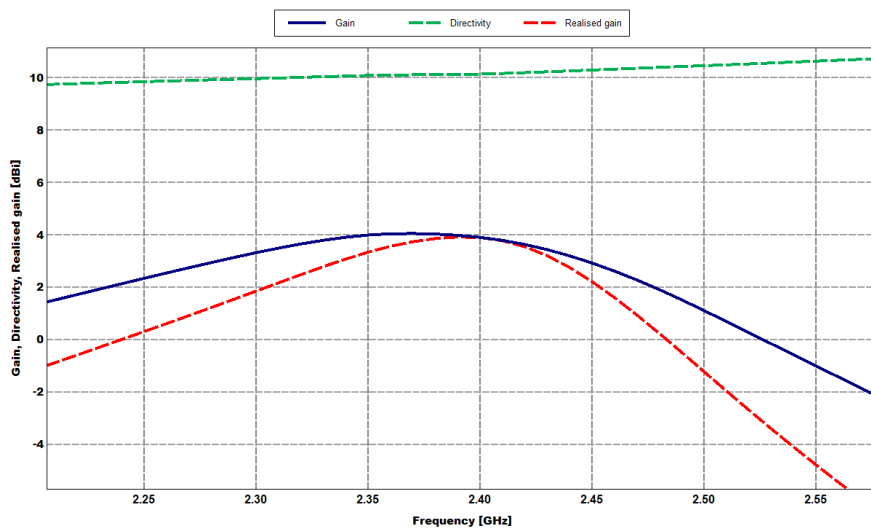


Рис. 3.2.4. Залежність КП та КСД мікросмушкової антенної решітки від частоти роботи

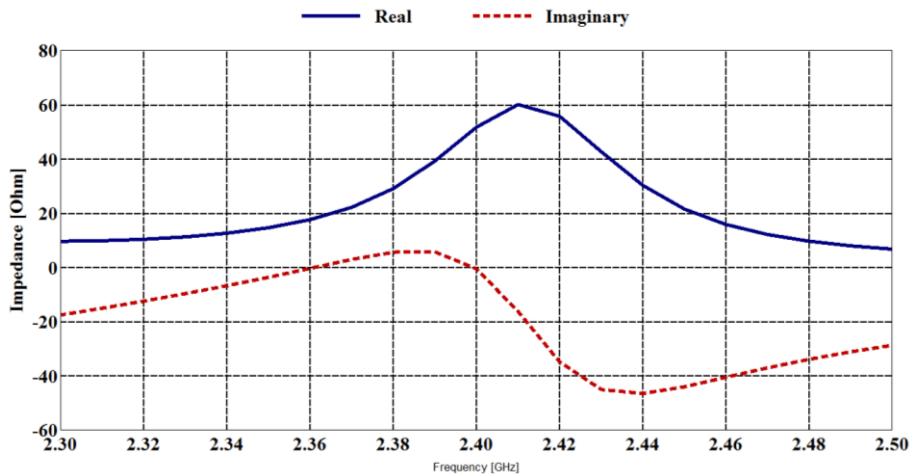


Рис. 3.2.5. Залежність вхідного опору мікросмушкової антенної решітки від частоти роботи

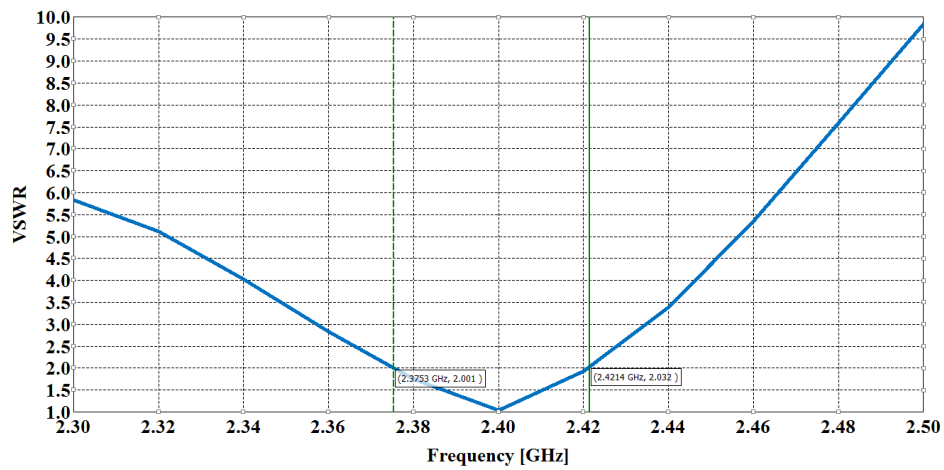


Рис. 3.2.6. Залежність коефіцієнту стоячої хвилі за напругою мікросмужкової антенної решітки від частоти роботи

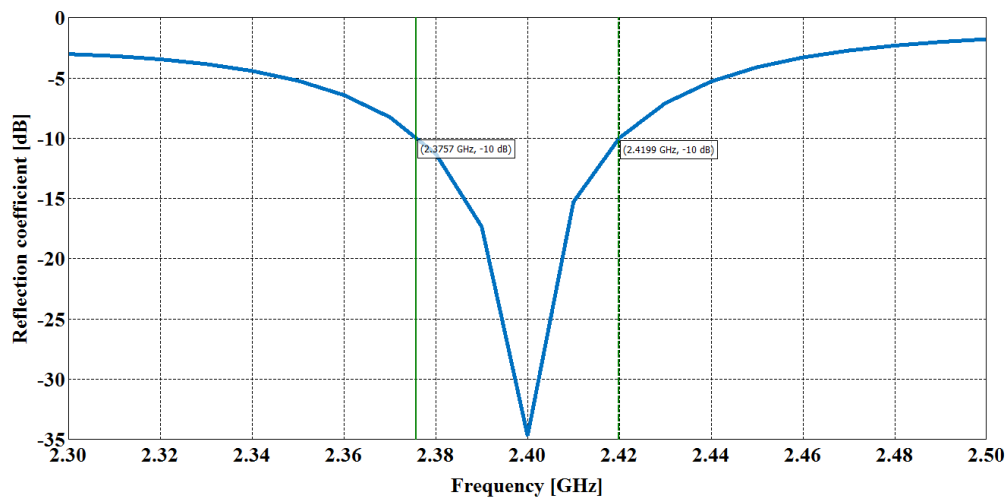


Рис. 3.2.7. Залежність коефіцієнту відбиття мікросмужкової антенної решітки від частоти роботи

Коефіцієнт відбиття, отриманий для АР на частоті 2.4 ГГц, становить -35 дБ, що менше -10 дБ, узгодження опору між лінією живлення та антеною є високим.

Значення отриманого КСХН (VSWR) складає 1,35 та відповідає допустимому діапазону значень від 1 до 2.

Отримана ДС вказує на те, що антена має спрямованість і ширина її головної пелюстки за рівнем половинної потужності випромінювання становить близько 53 градусів, що є непоганим показником спрямованості для досліджуваного типу антени.

Коефіцієнт підсилення і коефіцієнт спрямованої дії на центральній частоті роботи складають 3,95 дБі та 10,05 дБі відповідно.

Розраховуємо коефіцієнт корисної дії випромінювання:

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{3,95}{10,05} = 39,3\%$$

Проаналізувавши результати, можна зробити висновок, що зі зменшенням діелектричної проникності матеріалу та збільшенням кількості патч-елементів до чотирьох, ефективність випромінювання мікросмушкової антени для частотного діапазону 2.4 ГГц збільшилася приблизно на 50%.

3.3. Моделювання мікросмушкової антенної решітки для частоти 5.8 ГГц

Для моделювання мікросмушкової антенної решітки з чотирьох елементів для частотного діапазону 5.8 ГГц використаємо матеріал діелектричної підкладки, який використовувався для моделювання АР для частотного діапазону 2.4 ГГц: діелектрична проникність склотекстоліту FR-4 $\epsilon_r = 3,85$. Тангенс кута втрат матеріалу підкладки складає 0,025; товщина матеріалу $h = 1$ мм. . Розрахуємо розмір одного пат-елементу антенної решітки. Отримані результати розрахунків зведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Розміри одинарного мікросмушкового випромінювача прямокутної форми

Розмір	Товщина h , мм	Ширина w , мм	Довжина L , мм	Точка підключення живлення x , мм	Вхідний опір на ребрі антени, Ом
Значення	1	14	12,7	4,2	186.98

За допомогою формул (3.1) - (3.4) розрахуємо ширину мікросмушкової лінії живлення для патч-елементів антенної решітки. При вхідному опорі на ребрі антени 186.98 Ом, ширина мікросмушкової лінії живлення для кожного випромінювача AP складає 0,054 мм. Ширина загальної коаксимальної лінії живлення для вхідного опору в 50 Ом складає 2,11 мм. Схема антенної решітки з чотирьох випромінюючих елементів зображена на Рис. 3.3.1.

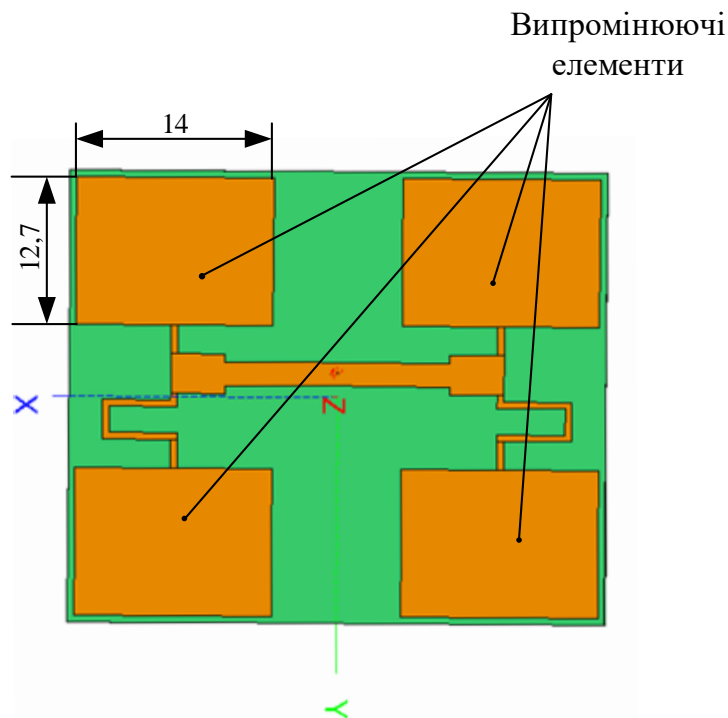


Рис. 3.3.1. Схема мікросмушкової антенної решітки з чотирьох випромінюючих елементів прямокутної форми

Внаслідок моделювання розрахованої конструкції антенної решітки отримуємо графіки основних параметрів: ДС (Рис. 3.3.2, Рис. 3.3.3), КП та КСД (Рис. 3.3.4), комплексного вхідного опору (Рис. 3.3.5), КСХН (Рис. 3.3.6), коефіцієнту відбиття (Рис. 3.3.7).

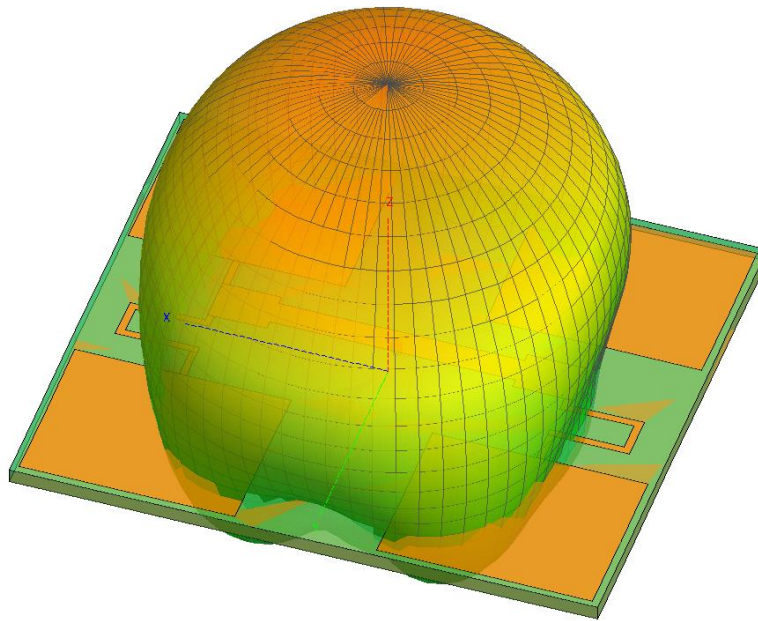


Рис. 3.3.2. 3D діаграма спрямованості мікросмушкової антенної решітки на центральній частоті роботи 5.8 ГГц

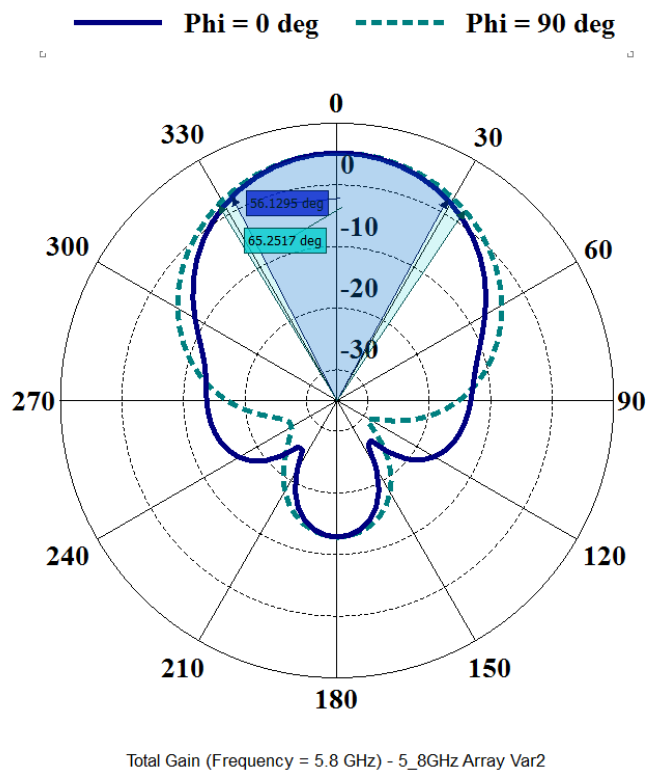


Рис. 3.3.3. Діаграма спрямованості мікросмушкової антенної решітки на центральній частоті роботи 5.8 ГГц в полярній системі координат

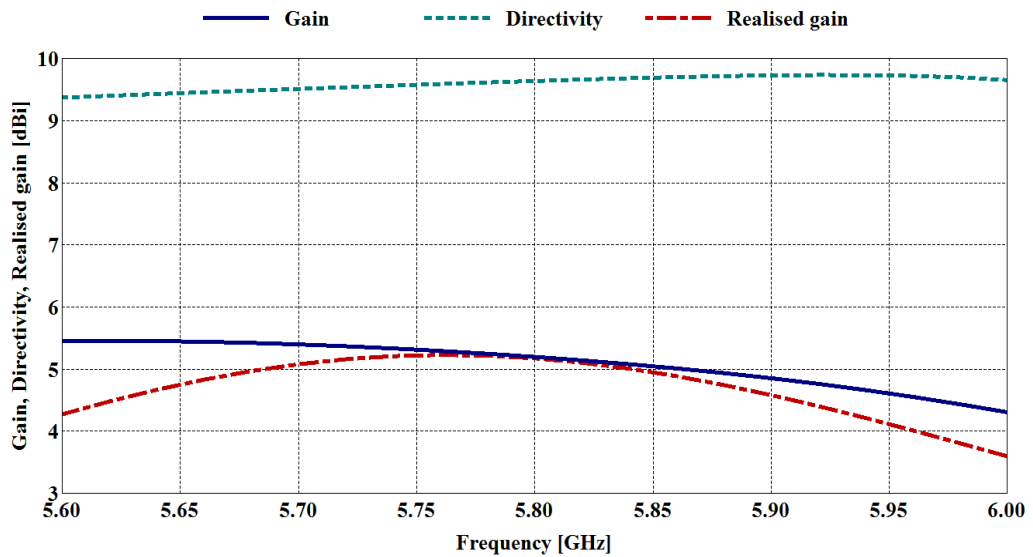


Рис. 3.3.4. Залежність КП та КСД мікросмувкової антенної решітки від частоти роботи

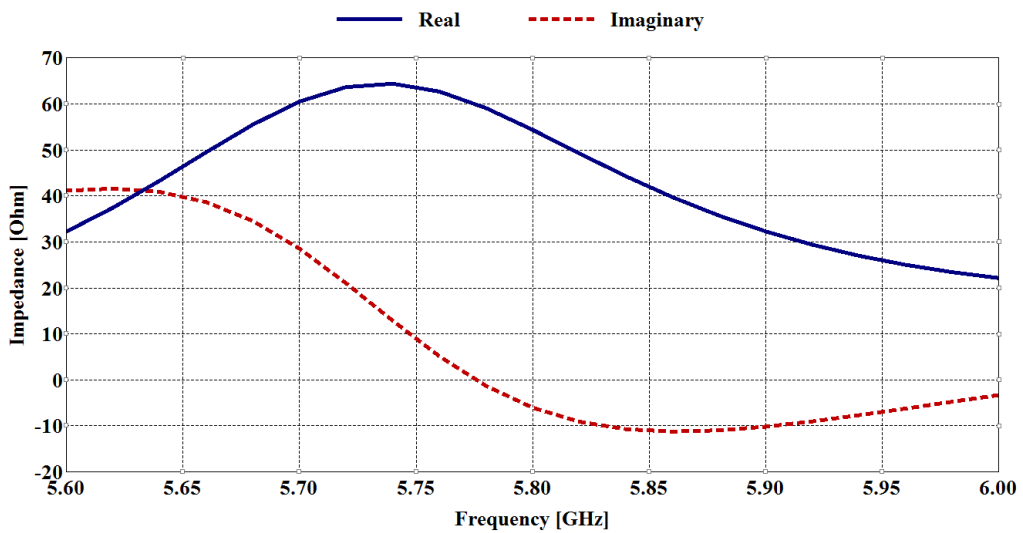


Рис. 3.3.5. Залежність вхідного опору мікросмувкової антенної решітки від частоти роботи

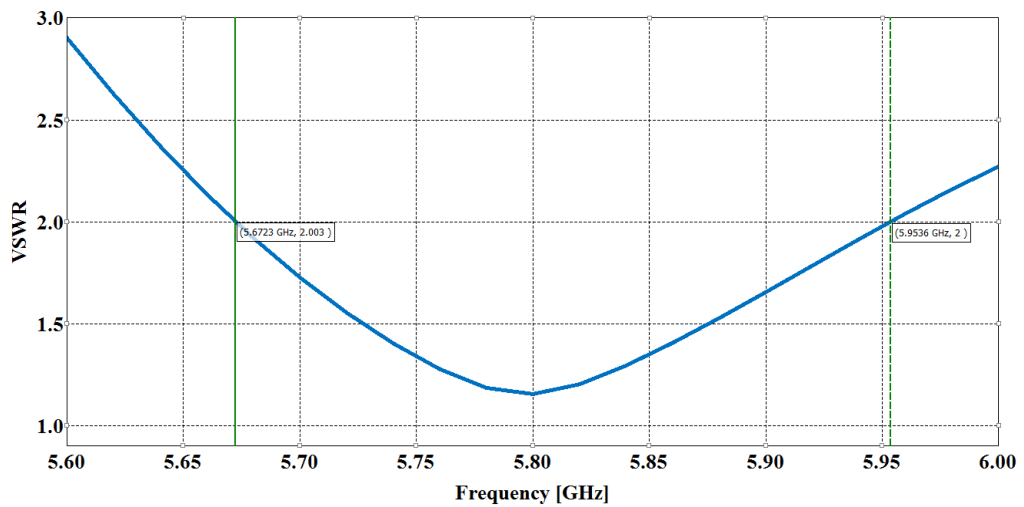


Рис. 3.3.6. Залежність коефіцієнту стоячої хвилі за напругою мікросмувкової антенної решітки від частоти роботи

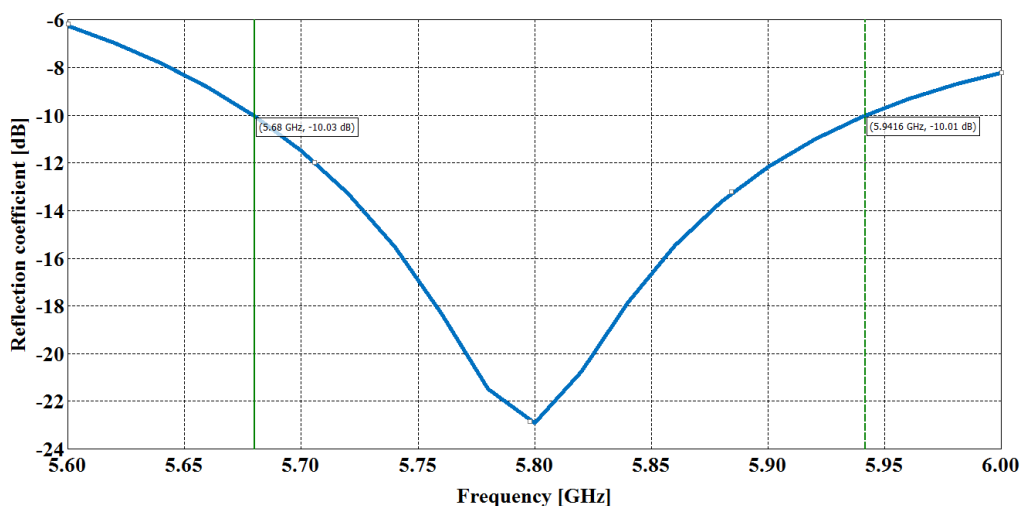


Рис. 3.3.7. Залежність коефіцієнту відбиття мікросмужкової антенної решітки від частоти роботи

Коефіцієнт відбиття, отриманий для АР на частоті 5.8 ГГц, становить -23 дБ, що менше -10 дБ, отже, узгодження опору між лінією живлення та антеною є високим.

Значення отриманого КСХН (VSWR) складає 1,37 та відповідає допустимому діапазону значень від 1 до 2.

Отримана ДС вказує на те, що антена має спрямованість і ширина її головної пелюстки за рівнем половинної потужності випромінювання становить близько 56 градусів, що є непоганим показником спрямованості для планарної антени.

Коефіцієнт підсилення і коефіцієнт спрямованої дії на центральній частоті роботи складають 5,25 дБі та 9,75 дБі відповідно.

Розраховуємо коефіцієнт корисної дії випромінювання:

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{5,25}{9,75} = 53,7 \%$$

Можна зробити висновок, що ефективність випромінювання мікросмужкової антенної решітки з чотирьох патч-елементів для частотного діапазону 5.8 ГГц збільшилася на 35,8 %.

Ширший огляд отриманих результатів моделювання одинарних мікросмужкових випромінювачів та антенних решіток для різних частотних діапазонів наведено в порівняльній таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Характеристики одинарного мікросмужкового випромінювача та АР для частотних діапазонів 2.4 ГГц та 5.8 ГГц

Параметри	Одинарний патч-елемент, 2.4 ГГц	Мікросмужкова АР 2×2, 2.4 ГГц	Одинарний патч-елемент, 5.8 ГГц	Мікросмужкова АР 2×2, 5.8 ГГц
КП, дБі	-0,5	3,95	0,85	5,25
КСД, дБі	4,82	10,05	4,75	9,75
КСХН	1,3	1,35	1,32	1,37
Ширина ДС за половинною потужністю випромін., град	92	53	89	56
ККД випромінювання, %	-10 %	39,3 %	17,9%	53,7%
Коефіцієнт відбиття, дБ	-23,5	-35	-29	-23
Вхідний опір, Ом	50,3+2i	51-2i	49,4+4i	54-6i

3.4. Моделювання дводіапазонної мікросмужкової антенної решітки для частот 2.4 ГГц та 5.8 ГГц

Сьогодні конструкція більшості дводіапазонних антенних систем має містити в собі дві окремі антенні решітки для діапазонів частот на 2,4 ГГц та 5,8 ГГц та підсилювач потужності сигналу, каскадний або інтегрований в систему. На Рис. 3.4.1 та Рис. 3.4.2 зображено будову антенної системи Alientech Duo II: мікросмужкові антенні решітки для робочих частот на 2,4 ГГц та 5,8 ГГц, двокаскадний підсилювач потужності сигналу .

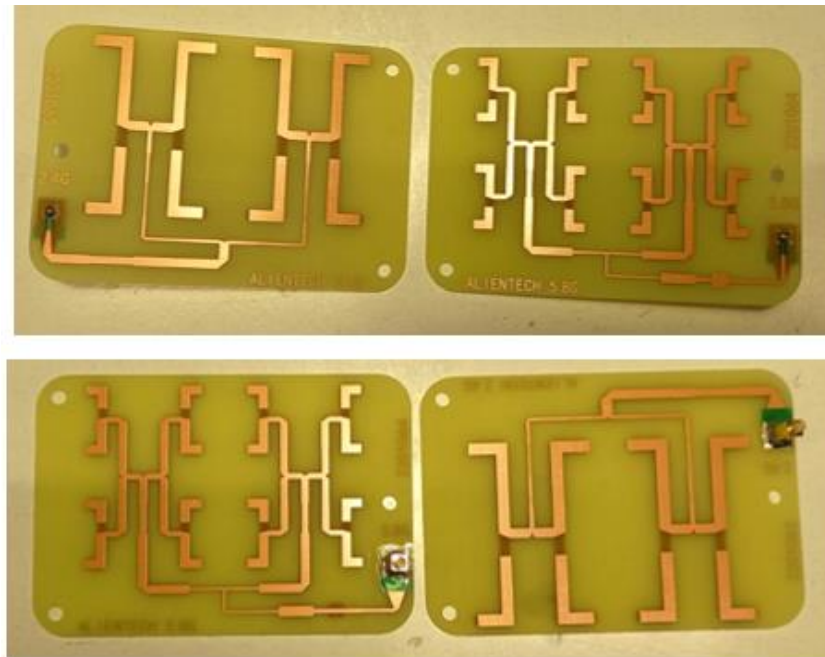


Рис. 3.4.1. Антенні решітки ALIENTECH DUO II для робочих частот на 2,4 ГГц та 5,8 ГГц

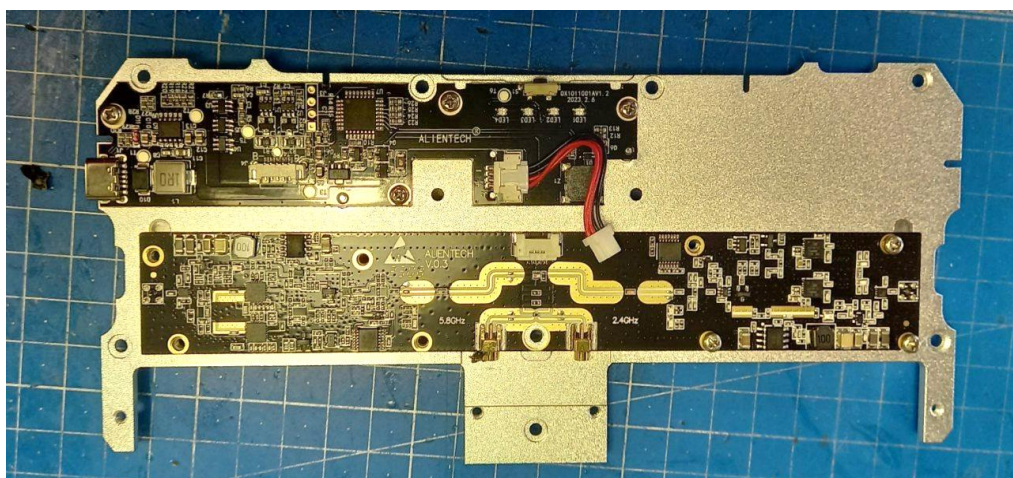


Рис. 3.4.2. Підсилювальний каскад антенної системи та плата контролю живлення.

Перевагами моделювання дводіпазонної мікросмужкової антенної решітки для діапазонів частот на 2,4 ГГц та 5,8 ГГц є мініатюризація розмірів та ваги, зменшення втрат по потужності на конекторах та фідері, скорочення часової затримки передачі даних.

Дводіпазонна мікросмужкова антенна решітка складається з окремих мікросмужкових АР для відповідних робочих частот, які було змодульовано в попередніх розділах.

Складність задачі моделювання полягає у тому, що електромагнітні хвилі та струми робочих частотних діапазонів резонують на суміжних частотах у різних фазах, внаслідок чого паразитне випромінювання утворюється в діаграмах спрямованості обох АР. Для усунення даного явища використано ЕВГ-структури.

Electromagnetic band-gap (ЕВГ) – це структура, яка створює смугу затримки для блокування електромагнітних хвиль певних частотних діапазонів (2,4 ГГц або 5,8 ГГц), що максимально підвищує ефективність випромінювання на відповідних частотах [16]. ЕВГ утворює масив невеликих металевих пластин на діелектричній підкладці .

В якості діелектричного матеріалу підкладки використовуємо склотекстоліт FR-4, діелектрична проникність якого дорівнює $\epsilon_r = 3,85$. Тангенс кута втрат такого матеріалу підкладки становить 0,025; товщина матеріалу $h = 1$ мм. Квадратні ЕВГ-елементи, розміром 3 мм^2 розміщуємо на зворотному шарі діелектрику. Вони мають відстань один між одним 0,5 мм та закорочені на землю вертикальними отворами для блокування діапазону частот 5, 8 ГГц [16]. В центрі кожного з ЕВГ-елементів було утворено отвір, за допомогою яких відбувається смугова затримка для блокування паразитного випромінювання.

На Рис. 3.4.3. відображена схема мікросмужкової дводіпазонної антенної решітки з випромінюючих елементів прямокутної форми.

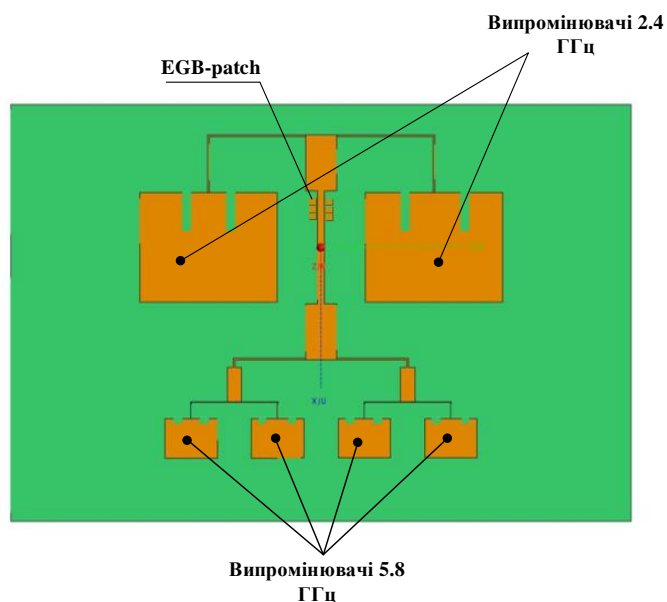


Рис. 3.4.3. Схема мікросмушкової дводіпазонної антенної решітки.

В результаті моделювання конструкції дводіпазонної антенної решітки, було отримано ідентичні графіки основних характеристик до графіків окремих мікросмушкових антенних решіток в частотних діапазонах на 2,4 ГГц та 5,8 ГГц. Однак, істотно відрізняється графік залежності коефіцієнту відбиття від частоти (Рис. 3.4.4).

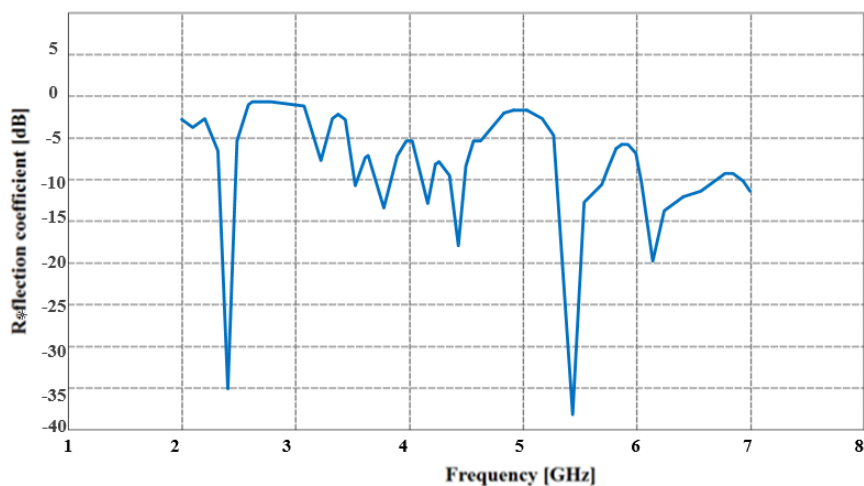


Рис. 3.4.4. Залежність коефіцієнту відбиття дводіпазонної мікросмушкової антенної решітки від частоти

Коефіцієнт відбиття, отриманий для дводіпазонної АР на частоті 5.8 ГГц, становить -37,5 дБ, а на частоті 2.4 ГГц – 35 дБ. Так як обидва показники менше -10 дБ, можна сказати, що узгодження опору між лінією живлення та антенною решіткою є високоякісним.

3.5. Дальність дії системи інформаційного обміну з БПЛА

Однією з основних задач моделювання, на сьогодні, залишається оцінка дальності дії зв'язку антенної системи. Окрім робочої частоти та коефіцієнта підсилення, дане значення залежить від здатності системи генерувати та спрямовувати електромагнітні хвилі; вибору середовища розташування антени, а ширина сегменту випромінювання залежить від ширини діаграми спрямованості за половинною потужністю випромінювання $2\theta_{0,5}$ [4].

Так, наприклад, дальність дії інформаційного обміну електронної системи з БПЛА у вільному середовищі розраховується за допомогою виразу:

$$P_{\text{вхРПП}} = P_{\text{вихРПД}} + G1 + G2 - g\phi1 - g\phi2 - L, \quad (3.5)$$

де $P_{\text{вхРПП}}$ – потужність вхідного сигналу приймача; $P_{\text{вихРПД}}$ – вихідна потужність випромінювання досліджуваної антенної системи; $G1$ – коефіцієнт підсилення досліджуваної антени; $G2$ – коефіцієнт підсилення приймальної антени; $g\phi1$, $g\phi2$ – втрати фідерах в приймального та передавального трактів (можна знехтувати); L – рівень втрат при розповсюдженні радіохвилі [4].

Рівень втрат при розповсюдженні радіохвилі у вільному просторі визначається формулою:

$$L = 32,45 + 20 \lg r_{km} + 20 \lg f_{MHz}, \quad (3.6)$$

де r_{km} – відстань від передавача до приймача (в кілометрах); f_{MHz} – частота роботи системи (в мегагерцах).

Під час вибору місця розташування антенної системи слід враховувати неабиякий вплив рельєфу місцевості на поширення радіохвиль у просторі: гірські схили, ліси, висока щільність забудови міст, зміни висоти відносно рівня моря можуть спричинити блокування прямої лінії передачі даних між антеною приймача та передавача, що призведе до втрати керування над БПЛА.

Іншими важливими факторами забезпечення стабільного з'єднання є наявність радіозавад, електромагнітна сумісність випромінювачів, розташованих в радіусі дії антенної системи, втрати антенної системи (фідера, діелектричних матеріалів) та рівень підсилення потужності сигналу.

3.6. Фізична модель компонентів системи зв'язку з БПЛА

На основі виконаних розрахунків, було створено фізичну модель антенної решітки для частотного діапазону 2.4 ГГц з чотирьох патч-елементів (Рис. 3.6.1.)

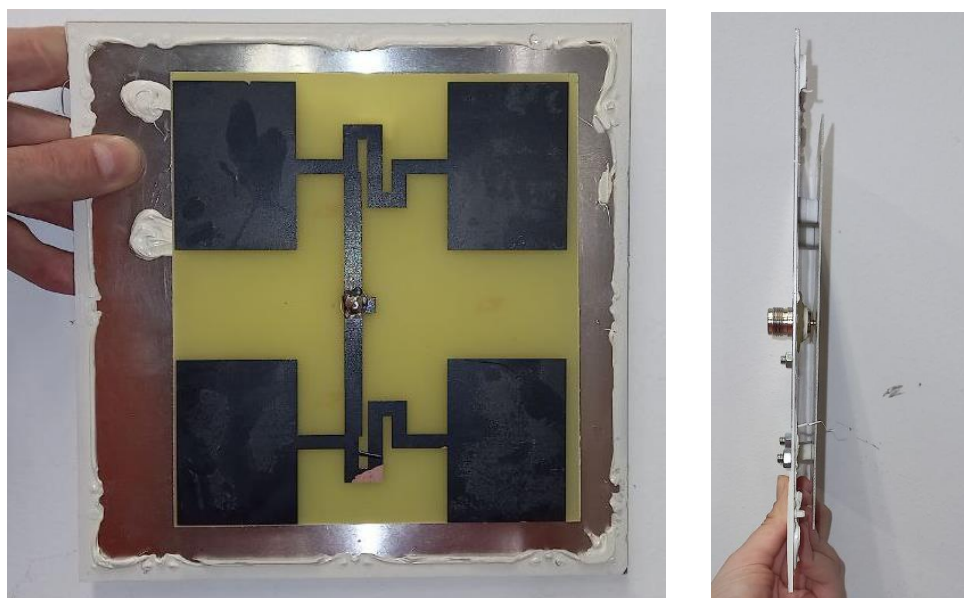


Рис. 3.6.1. Фізична модель планарної АР для частотного діапазону 2.4 ГГц .

У якості матеріалу діелектричної підкладки використано склотекстоліт FR-4, патч-елементи виготовлені з міді. Для підключення антени використовується фідер з вхідним опором 50 Ом.

За допомогою спектроаналізатору, частотний діапазон якого 137,5 – 2700 МГц, було виміряно коефіцієнт стоячої хвилі виготовленої моделі (Рис. 3.6.2)

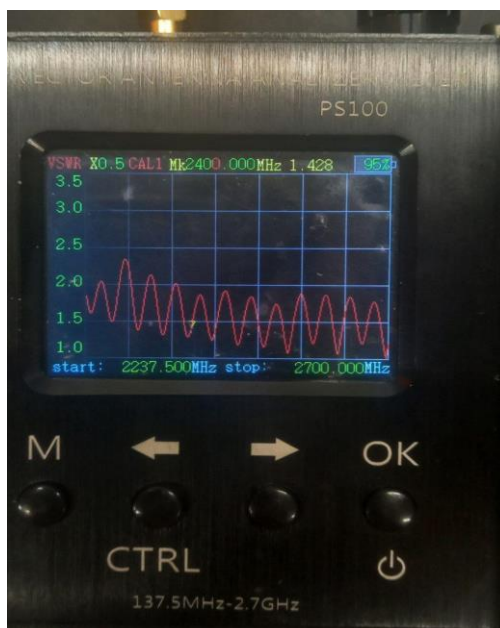


Рис. 3.6.2. Залежність коефіцієнту стоячої хвилі за напругою моделі антенної решітки від частоти

Значення КСХН (VSWR) повинно знаходитися в діапазоні від 1 до 2. Як бачимо, на частоті 2.4 ГГц значення КСВ антени складає 1,428. Внаслідок цього, можна стверджувати, що узгодження опору між лінією живлення та антенною решіткою є якісним.

3.7. Висновки до розділу

В даному розділі було досліджено принципи побудови мікросмушкових антенних решіток та, на основі розрахунків, виконано моделювання АР з чотирьох патч-елементів прямокутної форми для частотних діапазонів 2.4 ГГц та 5.8 ГГц.

Було виконано порівняльний аналіз отриманих характеристик одинарних патч антен та антенних решіток для відповідних частот.

Внаслідок зміни діелектричної проникності підкладки склотекстоліту FR-4 на $\epsilon_r = 3,85$, та збільшенням кількості елементів було отримано задовільні характеристики роботи планарних антен. Коефіцієнт підсилення в робочих смугах

частот 2.4 ГГц та 5.8 ГГц досягає значень 3,95 дБі та 5,25 дБі, а ККД – 39,3 % та 53,7 % відповідно. Значення коефіцієнту стоячої хвилі становить нижче 2 (1,35 / 1,37), що дає гарне узгодження з лінією живлення в 50 Ом. Ширина діаграми спрямованості за половинною потужністю випромінювання для АР обох частотних діапазонів зменшилася вдвічі, збільшивши гостроту спрямованості. Отримані результати свідчать про збільшення ефективності випромінювання мікросмужкових антенних решіток для заданих частотних діапазонів.

Було виконано моделювання дводіапазонної антенної решітки за рахунок впровадження в схему ЕВГ-елементів. Коефіцієнт відбиття, отриманий для дводіапазонної АР на робочій частоті 5.8 ГГц, становить -37,5 дБ, а на робочій частоті 2.4 ГГц – 35 дБ. Отже узгодження з лінією живлення в 50 Ом на даних частотах є високоякісним. Так як на інших частотах не спостерігається значних розходжень значення коефіцієнта відбиття, можна стверджувати, що вплив паразитного випромінювання було усунуто.

Використовуючи друковані технології, було створено фізичну модель АР для частотного діапазону 2.4 ГГц, та визначено коефіцієнт стоячої хвилі за напругою.

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі було розглянуто класифікацію, характеристики та сфери застосування безпілотних літальних апаратів. Сьогодні БПЛА залишається важливим інструментом в науково-дослідницькій, військовій, охоронній, комерційній та інших сферах діяльності людини.

Незважаючи на невеликі розміри та простоту обслуговування безпілотні літальні апарати мають серйозні конструктивні недоліки, що визначається незахищеністю їхніх каналів зв'язку.

Для забезпечення надійності зв'язку БПЛА було представлено використання електронних систем інформаційного обміну на основі мікросмужкової антени для підсилення сигналу між дистанційним керуванням та БПЛА. Використання даного типу антен обумовлено їхніми невеликими габаритами, простотою й низькою вартістю виготовлення з використанням друкованих технологій.

Було досліджено декілька сучасних моделей антенних систем. Вони влаштовані ідентично: конструкція мікросмужкових антен включає екран, випромінювач, виконаний у формі прямокутника і встановлений на деякій відстані від екрану, та підсилювач потужності, розміщений на штативі або інтегрований в систему.

За допомогою програмного пакету FEKO було розроблено власну версію антенної системи інформаційного обміну з БПЛА для діапазонів частот 2.4 ГГц та 5.8 ГГц, використовуючи один та чотири патч-елементи, а також розроблено дводіапазонну антенну решітку.

Результати моделювання продемонстрували, що планарні антенні решітки забезпечують порівняно більшу спрямованість та коефіцієнт підсилення, ніж одинарна мікросмужкова антена. Характеристики антени залежать від діелектричної проникності матеріалу підкладки, кількості та розмірів патч-елементів, узгодження лінії живлення.

Моделювання дводіапазонної мікросмугової антенної решітки було виконано за рахунок впровадження в схему EBG-елементів. Дане рішення дозволило зменшити вплив електромагнітних хвиль та струмів робочих частотних діапазонів, які резонують на суміжних частотах у різних фазах, на характеристики діаграм спрямованості антен, коефіцієнт підсилення та коефіцієнт стоячої хвилі. Коефіцієнт відбиття, отриманий для дводіапазонної AP на робочій частоті 5.8 ГГц, становить -37,5 дБ, а на робочій частоті 2.4 ГГц – 35 дБ. Дані показники свідчать, що узгодження з лінією живлення в 50 Ом на даних частотах є високоякісним.

Було визначено, що дальність дії, стабільність та надійність зв'язку електронної системи інформаційного обміну з БПЛА залежить від наявності радіозавада (спуфінг, перехресні спотворення, явище блокування), електромагнітна сумісність випромінювачів, розташованих в радіусі дії антенної системи; втрати антенної системи (фідера, діелектричних матеріалів) та рівень підсилення потужності сигналу, а також особливості рельєфу місцевості та природного середовища.

Використовуючи друковані технології, було створено фізичну модель AP для частотного діапазону 2.4 ГГц, як складової електронної системи інформаційного обміну з БПЛА, та визначено коефіцієнт стоячої хвилі за напругою: узгодження з лінією живлення в 50 Ом на даній частоті є високоякісним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. «Забезпечення Кіберзахисту Лінії Управління Дистанційно Пілотованої Авіаційної Системи (ДПАС)» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://Er.Nau.Edu.Ua/Bitstream/NAU/45018/1/%D0%A8%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%A2%D0%90..Pdf>
2. «МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ЗАХИСТУ РАДІОКАНАЛУ УПРАВЛІННЯ ВІД ПЕРЕХОПЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: https://Dut.Edu.Ua/Uploads/P_2097_28742908.Pdf
3. «Радіоелектронна боротьба» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%8C%D0%B1%D0%B0>
4. «Мікросмужкова Антенна Решітка Для Wi-Fi Систем» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://Er.Nau.Edu.Ua/Handle/NAU/45082>
5. «Design of an 8X1 Square Microstrip Patch Antenna Array» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Design%20of%20an%208X1%20Square%20Microstrip%20Patch%20Antenna%20Array.pdf
6. «Класифікація безпілотних літальних апаратів» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/878899d8-b7a7-4481-af22-9835c0748ba0/content>
7. «КЛАСИФІКАЦІЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/20928/4901.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

8. «Розділ 1. Основні характеристики й параметри антен» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://studfile.net/preview/9973013/>
9. «Параметри так характеристики антен» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/219141/mod_resource/content/1/%D0%86%D0%92-%D0%A2%D0%A0-AT_TK%D0%9C-T1-2.pdf
10. «Антенна техніка ТК мереж та її призначення» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/217689/mod_resource/content/1/%D0%86%D0%92-%D0%A2%D0%A0-AT_TK%D0%9C-T1-1.pdf
11. «ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБОРУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ВІД РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ БЕЗПРОВІДНОГО ЖИВЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/783beb87-f45a-4ca8-a0f1-8b8eada557aa/content>
12. «CST STUDIO SUITE» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://softprom.com/ua/vendor/dassault-systemes/product/cst-studio-suite>
13. «ТЕМА 5. КОМП'ЮТЕРНІ ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8%20%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE/%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%205.pdf>
14. «Основи моделювання в COMSOL Multiphysics» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: http://geometry.karazin.ua/resources/documents/20190113222059_d9f77bc6.pdf
15. «OpenEMS — електромагнітний симулятор с открытым исходным кодом» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://habr.com/ru/articles/255317/>

16. «ELECTROMAGNETIC BAND GAP STRUCTURES INCORPORATE WITH DUAL BAND MICROSTRIP ANTENNA ARRAY» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: [https://www.researchgate.net/publication/245554016 ELECTROMAGNETIC BAND GAP STRUCTURES INCORPORATE WITH DUAL BAND MICROSTRIP ANTENNA ARRAY#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/245554016_ELECTROMAGNETIC_BAND_GAP_STRUCTURES_INCORPORATE_WITH_DUAL_BAND_MICROSTRIP_ANTENNA_ARRAY#fullTextFileContent)
17. «Dual-Band Microstrip Patch Antenna For Wireless Application» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: [https://www.researchgate.net/publication/321096444 Dual-Band Microstrip Patch Antenna For Wireless Application](https://www.researchgate.net/publication/321096444_Dual-Band_Microstrip_Patch_Antenna_For_Wireless_Application)
18. «Повний посібник із КСВ від FMUSER» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: <https://uk.fmuser.net/content/?2220.html>
19. Д.А. Навроцкий «Криптографічна система захисту радіоканалів БПЛА від несанкціонованого втручання» [Електронний Ресурс]. – Режим Доступу: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=bezin_2014_20_3_8