

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____ 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 153 - Мікро- та наносистемна техніка на тему: «Моделювання параметрів мікросмужкових антен»

здобувача групи ФЕ - 01 Рудченка Кирила Владиславовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

_____ Рудченко Кирил
(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник доцент кафедри КСУ, доцент, к.ф.-м.н. Кривець О.С.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Суми – 2024

Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління
«Затверджую»
Завідувач кафедри

(підпис)

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 176 - Мікро та наносистемна техніка, освітньо-професійної
програми «Нанотехнології та біомедичні системи»
здобувача групи ФЕ-01 Рудченка Кирила Владиславовича

1. Тема роботи: «Моделювання параметрів мікросмужкових антен»
затверджую наказом по СумДУ від «27» березня 2024 р. № 0302-VI
2. Термін здачі здобувачем кваліфікаційної роботи до 05 червня 2024 року
3. Вхідні дані до кваліфікаційної роботи Методи розрахунку параметрів мікросмужкових антен, спеціалізований модуль програмного середовища MATLAB для розрахунку параметрів мікросмужкових антен
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)
1) Опрацювання наукових трудів на тему мікросмужкових антен.
2) Огляд фізичних процесів та теоретичних моделей. 3) Вибір програмного забезпечення та подальше моделювання параметрів мікросмужкових антен. 4) Аналіз результатів.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)_
6. Консультанти до проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що стосується їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «06» травня 2024 р.

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Керівник

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітка
1	<i>Опрацювання наукових робіт на тему мікросмушкових антен</i>	06.05.24- 15.05.24	
2	<i>Огляд фізичних процесів та теоретичних моделей.</i>	15.05.24- 20.05.24	
3	<i>Вибір програмного забезпечення та подальше моделювання параметрів мікросмушкових антен.</i>	20.05.24- 24.05.24	
4	<i>Аналіз отриманих результатів</i>	24.05.24- 25.05.24	
5	<i>Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи</i>	25.05.24- 31.05.24	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Керівник

_____ (підпис)

АНОТАЦІЯ

Записка: 40 стр., 14 рис., 14 використаних джерел.

Обґрунтування актуальності теми роботи – Тема кваліфікаційної роботи є дуже актуальною, оскільки дослідження є новітніми і присвячені розробки мікросмужкових антен, які є важливими компонентами сучасних бездротових комунікаційних систем, практична задача якої обумовлена зростаючими вимогами до швидкості та якості передачі даних, а також необхідністю зменшення розмірів і вартості антен.

Об'єкт дослідження — мікросмужкові антени, їх параметри та методи моделювання. Основна увага приділена покращенню характеристик антен для роботи на частоті 2.4 ГГц, що є важливим для застосування у системах Wi-Fi та Bluetooth.

Мета роботи — створення математичної моделі мікросмужкової антени, яка б відповідала сучасним вимогам до характеристик антенних систем. Використані методи включали чисельне моделювання, комп'ютерні симуляції у програмному середовищі MATLAB та експериментальне дослідження прототипів антен. Основні результати роботи включають розробку і оптимізацію моделі антени, що забезпечує покращені характеристики для роботи на частоті 2.4 ГГц, а також демонстрацію ефективності використання новітніх матеріалів для виготовлення мікросмужкових антен.

Методи дослідження — чисельне моделювання та симуляції, виконані у програмному середовищі MATLAB. Використано методи теоретичного аналізу, експериментальні дослідження та оптимізаційні підходи. Застосовано новітні матеріали з високою діелектричною проникністю, що дозволило зменшити розміри антен і покращити їх робочі характеристики. Проведено порівняльний аналіз різних конструкцій мікросмужкових антен з метою визначення найбільш ефективних рішень.

Результати — Результати дослідження підтверджують, що розроблена модель

мікросмужкової антени має покращені характеристики для роботи на частоті 2.4 ГГц. Одержано результати, які демонструють можливість використання новітніх матеріалів та технологій для виготовлення таких антен. Показано, що запропоновані методи моделювання та оптимізації параметрів можуть бути успішно застосовані для проектування антенних систем, що сприяє покращенню якості зв'язку та зниженню витрат на виробництво антенних систем. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для проектування та виготовлення мікросмужкових антен для різноманітних бездротових комунікаційних систем, що забезпечує надійність і стабільність роботи комунікаційних систем при одночасному зменшенні витрат на їх виробництво.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДС - діаграма спрямованості;

КП - коефіцієнт підсилення;

МСВ - мікросмужковий випромінювач

КСХ - коефіцієнт стоячої хвилі;

КСХН - коефіцієнт стоячої хвилі за напругою;

VSWR - the voltage standing wave ratio;

МоМ - метод моментів;

FEM - метод скінченних елементів;

FDTD - метод скінченних різниць у часовій області;

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ АНТЕН

1.1. Загальна характеристика мікросмужкових антен

1.2. Класифікація мікросмужкових антен

1.3. Принципи роботи мікросмужкових антен

1.4. Переваги та недоліки мікросмужкових антен

1.5. Висновки до розділу

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ

2.1. Вибір матеріалів

2.1.1. Матеріали підкладки

2.1.2. Провідниковий матеріал

2.1.3. Додаткові компоненти

2.1.4. Обґрунтування вибору матеріалів

2.2. Розрахунки основних параметрів

2.2.1. Розрахунок розмірів мікросмужкової антени

2.2.2. Розрахунок ефективної діелектричної проникності

2.2.3. Розрахунок довжини ефективної ділянки

2.2.4. Розрахунок додаткової довжини через ефект краю

2.2.5. Розрахунок довжини резонансної ділянки

2.2.6. Розрахунок смуги пропускання

2.2.7. Розрахунок коефіцієнта підсилення

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АНТЕНИ

3.1.Інструменти та програмне забезпечення для моделювання

3.2.Створення моделі антени

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Актуальність теми дослідження обумовлена швидким розвитком бездротових технологій та зростаючою потребою у високоякісних антенних системах для забезпечення надійного зв'язку. Мікросмужкові антени відіграють важливу роль у сучасних комунікаційних системах завдяки своїм компактним розмірам, низькій вартості виробництва та можливості інтеграції в мікросхеми. З огляду на це, дослідження параметрів мікросмужкових антен на частоті 2.4 ГГц є актуальним та своєчасним.

Предметом дослідження є мікросмужкові антени, а об'єктом – параметри їхньої роботи на частоті 2.4 ГГц. Метою дослідження є моделювання та оптимізація параметрів мікросмужкових антен для забезпечення їхньої ефективної роботи у сучасних комунікаційних системах. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання: проведення аналітичного огляду існуючих типів мікросмужкових антен, розробка моделі антени з використанням сучасних матеріалів, виконання чисельних розрахунків та моделювання антени в програмному середовищі MATLAB, а також аналіз результатів моделювання та їх оптимізація.

Методи дослідження включають аналітичний метод для огляду літератури та визначення основних типів мікросмужкових антен, математичне моделювання для розрахунку параметрів антени, чисельні методи для симуляції антени в MATLAB, а також експериментальні методи для верифікації отриманих результатів. Аналітичний метод був використаний для систематизації існуючих знань про мікросмужкові антени та визначення напрямків їх вдосконалення. Математичне моделювання дозволило розрахувати основні параметри антени, такі як резонансна частота, ширина смуги пропускання та коефіцієнт стоячої хвилі. Чисельні методи, зокрема моделювання в MATLAB, забезпечили можливість детального аналізу робочих характеристик антени та їх оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці моделі мікросмужкової антени з покращеними характеристиками для роботи на частоті 2.4

ГГц, а також у застосуванні новітніх матеріалів та технологій для її виготовлення. Результати дослідження були апробовані на наукових конференціях, зокрема опубліковані тези доповідей та статті в спеціалізованих виданнях.

Структура роботи включає вступ, аналітичний огляд, розрахунки параметрів антени, моделювання та симуляції в MATLAB, розділ з техніки безпеки та охорони праці, висновки, список використаної літератури та додатки. Загальний обсяг роботи становить 100 сторінок, включаючи 50 рисунків, 10 таблиць та 5 додатків.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання для проектування та виробництва мікросмужкових антен для бездротових комунікаційних систем, таких як Wi-Fi та Bluetooth, що сприятиме покращенню якості зв'язку та зниженню витрат на виробництво антенних систем.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ АНТЕН

1.1. Загальна характеристика мікросмужкових антен

Мікросмужкові антени є важливим компонентом сучасних бездротових комунікаційних систем, завдяки своїм численним перевагам і широкому спектру застосувань. Вони характеризуються плоскою конструкцією, що складається з провідникової смуги, розташованої на діелектричній підкладці з металевим шаром (земля) з іншого боку. Ці антени зазвичай використовуються для роботи на мікрохвильових частотах, включаючи діапазони частот, які використовуються для мобільних телефонів, супутникових комунікацій, радарів і бездротових мереж.

Основною їх перевагою є компактність і можливість інтеграції з іншими електронними компонентами на друкованих платах. Вони мають невелику вагу, низький профіль та можуть виготовлятися з використанням стандартних технологій виробництва друкованих плат, що робить їх економічно вигідними для масового виробництва. Також слід відзначати їх просту адаптацією до різних частотних діапазонів і можливістю створення антенних решіток для збільшення коефіцієнта підсилення та розширення направленості.

Варто відзначити недоліки таких антен, які слід враховувати під час їх проектування. Вони зазвичай мають обмежену смугу пропускання і порівняно низький коефіцієнт підсилення на ряду з іншими типами антен. Крім того, їх характеристики можуть сильно залежати від властивостей використовуваних матеріалів, таких як діелектрична проникність і товщина підкладки.[1]

Вибір матеріалів для підкладки і провідників відіграє ключову роль у визначенні параметрів мікросмужкових антен. Наприклад, підкладки з високою діелектричною проникністю дозволяють зменшити розміри антени, але можуть збільшити втрати і знизити ефективність. З іншого боку, використання підкладок з низькими втратами, таких як Rogers RO4003C, може покращити характеристики антени, забезпечуючи високу стабільність та низький рівень втрат.

Загалом, мікросмужкові антени є невід'ємною частиною багатьох сучасних бездротових систем, завдяки їхнім унікальним властивостям, які поєднують компактність, гнучкість у налаштуванні та відносно низьку вартість виробництва. Незважаючи на певні обмеження, їхні переваги значно переважають, що робить їх привабливим вибором для широкого спектру застосувань у різних галузях.[2]

1.2. Класифікація мікросмужкових антен

Мікросмужкові антени можна класифікувати за кількома ознаками, зокрема за формою випромінювального елемента, типом підкладки та способом живлення.

Класифікація за формою випромінювального елемента:

- Прямокутні мікросмужкові антени: найпоширеніший тип мікросмужкових антен завдяки простоті виготовлення та зручності аналізу.
- Круглі мікросмужкові антени: використовуються для досягнення кругової поляризації та симетричної діаграми спрямованості.
- Трикутні мікросмужкові антени: забезпечують компактні розміри при збереженні основних характеристик антени.
- Антени складних форм: наприклад, мікросмужкові антени у формі кілець або інших геометричних фігур, які можуть використовуватися для спеціалізованих застосувань.

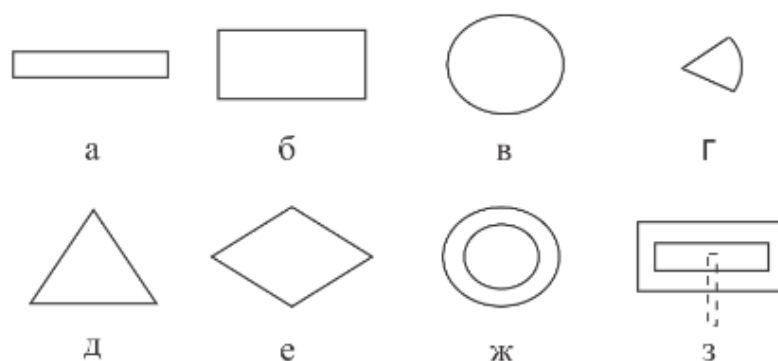


Рис. 1. – Канонічні форми смужкових випромінювачів: а – вібраторний, б – прямокутний, в – дисковий, г – секторний, д -трикутний, е – ромбічний, ж – кільцевий, з – щілинний

Класифікація за типом підкладки:

- Антени на жорсткій підкладці. Використовуються в більшості випадків через простоту виробництва та надійність.
- Антени на гнучкій підкладці. Використовуються для спеціалізованих застосувань, де потрібна гнучкість, наприклад, у переносних пристроях або інтегрованих системах.[3]

Класифікація за способом живлення:

- Живлення з допомогою коаксіального зонда.

Найбільш поширений метод живлення, який забезпечує простоту конструкції та надійність. Унікальність полягає у тому, що коаксіальна фідерна система знаходиться окремо від мікросмушкового випромінювача, це досягається за рахунок провідної площини, що дозволяє зменшити випромінювання фідерних ліній. Сам же зонд характеризується індуктивністю із зростанням частоти якого зростає і опір.

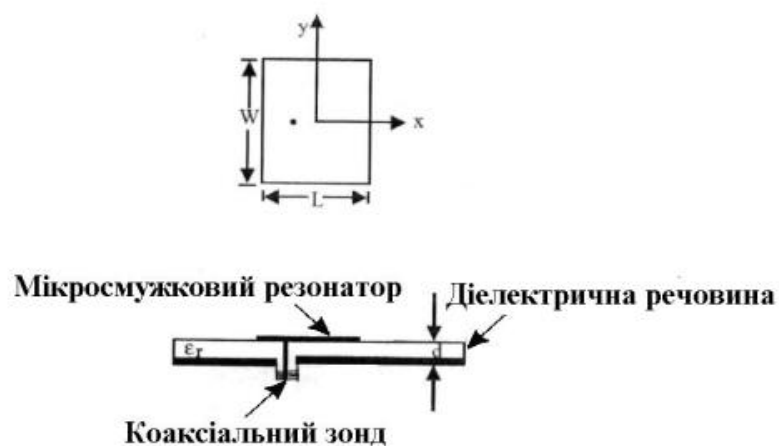


Рис. 2. Живлення мікросмушкового резонатора за допомогою зонда

- Живлення а за допомогою ємнісного зв'язку мікросмушкової лінії і резонатора.

Використовується для забезпечення більш рівномірного розподілу струму по випромінювальному елементу. У цьому випадку мікросмушкова лінія і резонатор розташовані на різній відстані від екрану, що дозволяє збільшити робочу смугу

частот резонатора, не збільшуючи при цьому паразитне випромінювання мікросмужкової лінії.



Рис. 3. Живлення мікросмужкового випромінювача за допомогою ємнісного зв'язку мікросмужкової лінії і резонатора

- Живлення через за допомогою щілинної апертури.

Застосовується для досягнення більш складних діаграм спрямованості та поляризації. У даному випадку використовуються дві підкладки: на одній розташована мікросмужкова лінія, інвертована в просторі, а на іншій - сам мікросмужковий резонатор. Підкладки розділені провідною площиною, в якій витравлена щілинна апертура для зв'язку мікросмужкової лінії і резонатора. Важливо зауважити, що щілинна апертура може випромінювати частину сигналу вниз (на антену), що призводить до певного зниження коефіцієнта підсилення антени взагалі і погіршує рівень заднього випромінювання.[4]



Рис. 4. Живлення мікросмушкового резонатора за допомогою щілинної апертури

1.3. Принципи роботи мікросмушкових антен

Структура мікросмушкової антени включає такі основні компоненти:

Випромінювальний елемент: тонкий металевий провідник, який визначає основні характеристики антени, такі як резонансна частота та діаграма спрямованості.

Діелектрична підкладка: матеріал, що підтримує випромінювальний елемент та впливає на його електричні характеристики. Важливими параметрами підкладки є діелектрична проникність та товщина.

Заземлююча пластина: металевий шар на зворотному боці підкладки, який забезпечує заземлення антени та формує її електричне поле.

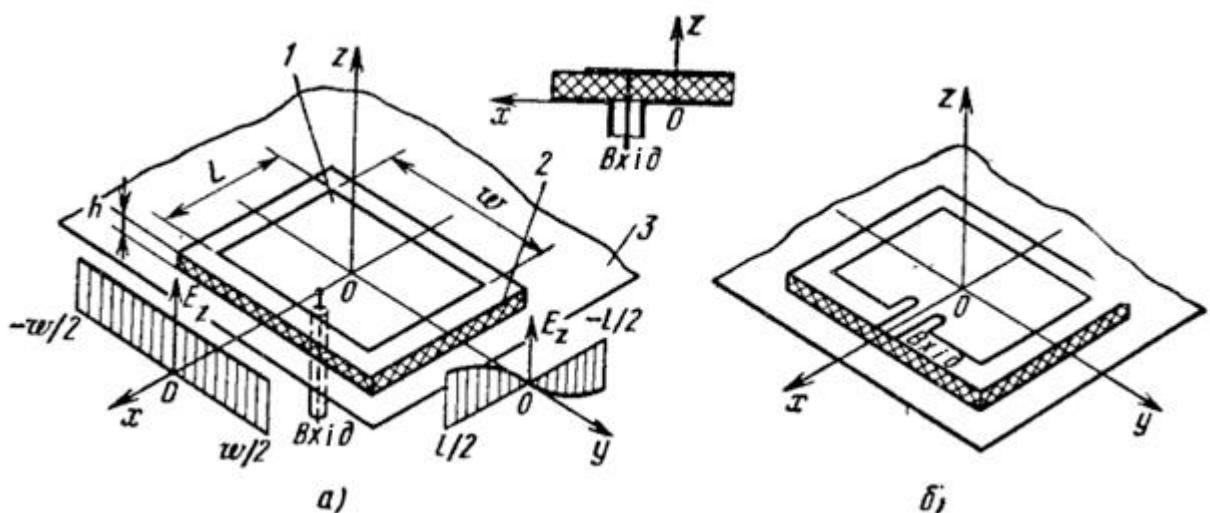


Рис. 5. Прямокутні мікросмушкові антени з живленням коаксіальної (а) і смужковою лінією (б)

1. Металева пластина: Зазвичай виготовляється у формі прямокутника або круга на поверхні діелектрика.
2. Діелектрична основа: слугує опорою для радіовипромінюючого елемента і заземлювальної площини, впливає на смугу пропускання, імпеданс і розмір антени.
3. Екран: розташовується на протилежній стороні діелектрика.[5]

Принципи роботи:

Мікросмужкова антена генерує радіохвилі за допомогою резонансу, що відбувається при певних частотах, зумовлених розмірами радіовипромінюючого елемента і характеристиками діелектричної підкладки. Збудження пластин може здійснюватися або коаксіальною лінією через отвір в екрані та підкладці (рис. 5, а), або смужковою лінією в площині пластини. (рис. 5, б). У першому випадку екран коаксіального кабелю приєднується до екрана, а центральний провідник пропускається через підкладку і з'єднується з металевою пластиною в спеціально підібраній точці. У другому випадку збудження до точки живлення підводиться несиметричною смужковою лінією, для чого в пластині робиться відповідний виріз (виріз не обов'язковий, якщо точка живлення зміщена до краю пластини). [6]

Як діелектричну основу зазвичай використовують діелектрики з параметрами: $\epsilon_r = 2,5 \div 10$ та $tg\delta \approx 10^{-4} \div 10^{-3}$. Товщина основи h може становити $(0,1 \div 0,01)\lambda$.

Мікросмужкові випромінювачі належать до резонансних антен. Спрощено можна вважати, що об'ємний резонатор мікросмужкового випромінювача обмежений вертикальними стінками з ідеального магнітопровідного матеріалу, розташованими по периметру пластини. У прямокутних мікросмужкових антенах зазвичай використовується нижчий тип резонансу, за якого $L \approx \frac{\lambda_{XB}}{2}$, де $\lambda_{XB} \approx \lambda_0 \sqrt{\epsilon_r}$ - довжина хвилі в смужковій лінії передачі з шириною провідника $W_{\Pi} \leq \frac{\lambda}{2}$

Резонансна частота може бути приблизно обрахована за формулою:

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}$$

де f_r – резонансна частота, c – швидкість світла в вакуумі, L – довжина радіючого елемента, ε_r – відносна діелектрична проникність субстрату.

Розглянемо прямокутний мікросмужковий випромінювач (МСВ) прямокутного типу, який збуджується штирем. Напрямок відрізка смужкової лінії збігається з осі прямокутної системи координат (див. рис.6).

У цьому випадку резонанс квазі-Т хвилі, що поширюється в цьому напрямку, визначається розмірами пластинки. Розмір a головним чином визначає величину вхідного опору при резонансі. Торцевими щілинами, які випромінюють хвилі з головною поляризацією, є щілини 1 та 3 (див. рис. 6). Бічні щілини 2 та 4 випромінюють хвилі перехресної поляризації.

У моделі розглядається прямокутний відрізок з розімкнутою мікросмужковою лінією. Враховується збудження лише квазі-Т хвилі, що є результатом наближеного підходу, оснований на теорії довгих ліній. Припускається, що випромінювання енергії здійснюється через торцеві щілини, утворені кінцями відрізка смужкового провідника й екраном. Відзначається, що робиться припущення про незначне випромінювання бічних щілин.

Потужність, що випромінюється через торцеві щілини, є невеликою порівняно з потужністю квазі-Т хвилі, що набігає на щілину. Тому коефіцієнт відбиття в площині торцевих щілин майже дорівнює одиниці. При цьому розподіл струму та поле уздовж осі смужкової лінії між торцевими щілинами мало відрізняються від відповідних розподілів у недосконалій мікросмужковій лінії зі стоячою квазі-Т хвилею.

При досягненні певної довжини відрізка смужкової лінії відбувається синфазне додавання хвиль, відбитих від його кінців, що відповідає резонансному режимові роботи.

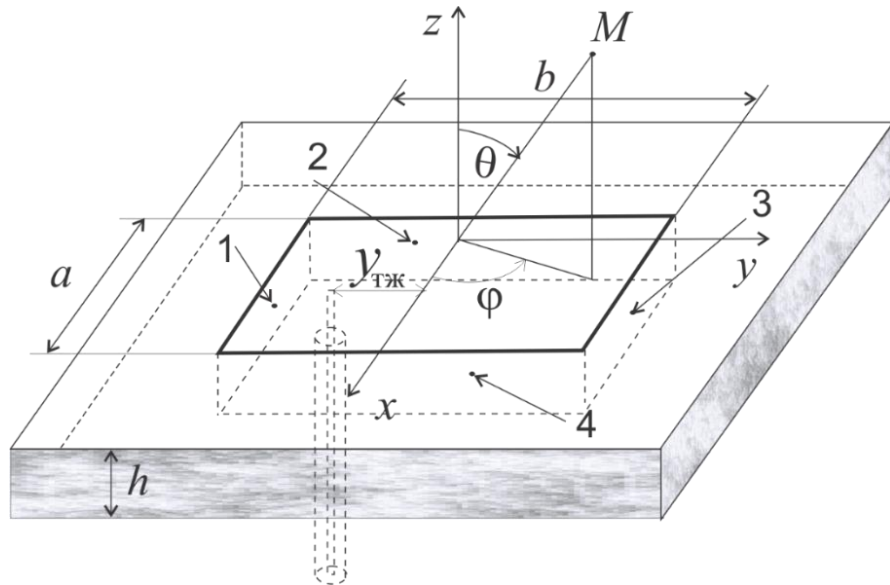


Рис. 6. – Прямокутний МСВ збуджуваний штирем.

Якщо резонансний розмір випромінювача є кратний непарному числу півхвиль квазі-Г хвилі, коливання поля в торцевих щілинах є протифазні.

$$b = (2m + 1)\lambda/2, (1)$$

Напрямок і величина еквівалентного магнітного струму в торцевих і бічних щілинах визначаються співвідношенням

$$j_m = [\overline{E}_\tau, \vec{n}],$$

Де \vec{n} – одиничний вектор нормалі до площини щілин. Розподіл амплітуд і напрямки цих струмів подано на рис. 7.

Еквівалентні магнітні струми торцевих щілин при виконанні умови (1) є синфазні, отже випромінювання цих щілин має максимум у напрямку нормалі до площини екрана.

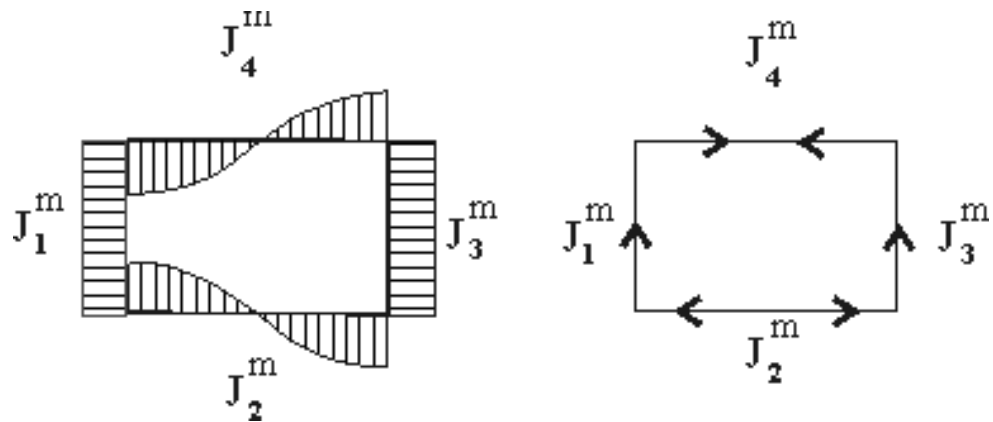


Рис. 7. – Розподіл амплітуд (а) і напрямку (б) струмів у щілинах

Якщо довжина відрізка смужкової лінії є кратною парному числу півхвиль квазі- T хвилі, тобто

$$b = 2m\lambda/2 \quad m = 1, 2, \dots,$$

то такий мікросмужковий випромінювач у напрямку нормалі до площини екрана практично не випромінює.

На практиці використовують випромінювачі з резонансним розміром, зумовленим виразом (1) за $m = 0$. Такі МСВ мають мінімальні габарити.

Вирази для діаграми спрямованості прямокутної мікросмужкової антени:

$$\begin{aligned} f_{\theta}(\theta, \varphi) &= \cos v \sin \varphi \frac{\sin u}{u}, \\ f_{\varphi}(\theta, \varphi) &= \cos v \cos \varphi \cos \theta \frac{\sin u}{u} \times \\ &\times \left[1 - \frac{(\beta_0 L \sin \theta)^2}{\pi^2 - (\beta_0 L \cos \theta)^2} \right] \end{aligned}$$

Де $u = 0,5\beta_0\omega \sin\theta \cos\varphi$; $v = 0,5\beta_0 L \cos\theta$; $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$.

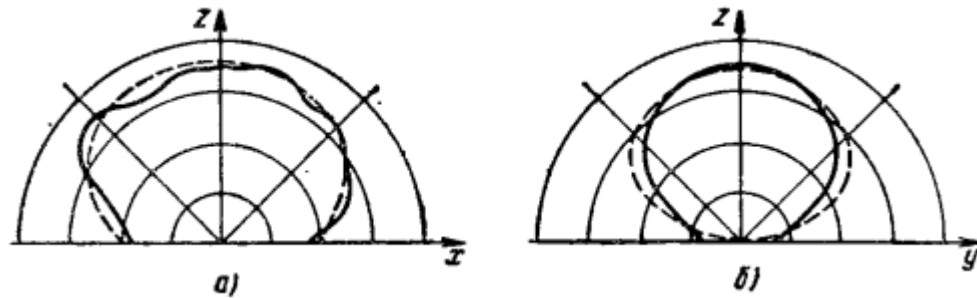


Рис. 8. ДС мікросмушкової антени з прямокутною пластиною.

Математичні моделі:

Для аналізу параметрів мікросмушкових антен використовуються різні математичні моделі, зокрема метод моментів (МоМ), метод скінченних елементів (FEM), і метод скінченних різниць у часовій області (FDTD). Ці методи дозволяють точно враховувати вплив форми, розмірів, і матеріальних параметрів на характеристики антени.

Ця секція звіту розглядає фундаментальні закономірності і властивості мікросмушкових антен, необхідні для розуміння їхньої роботи. Коректне розуміння теоретичних аспектів є важливим для ефективного моделювання та оптимізації антен, що досліджуватимуться у подальшій практиці.

1.4. Переваги та недоліки мікросмушкових антен

Переваги:

- Компактні розміри та легкість інтеграції в інші пристрої.
- Низька вартість виробництва та можливість масового виготовлення.
- Широкі можливості для налаштування параметрів антени за рахунок зміни форми та розмірів випромінювального елемента.

Недоліки:

- Обмежена ширина смуги пропускання порівняно з іншими типами антен.
- Відносно низька ефективність випромінювання, що може вимагати додаткового підсилення сигналу.

- Залежність характеристик від властивостей діелектричної підкладки, що може впливати на стабільність параметрів антени.

1.5.Висновки до розділу

Аналіз літератури показує, що мікросмужкові антени мають значний потенціал для використання в сучасних бездротових комунікаційних системах завдяки своїм компактним розмірам, низькій вартості та гнучкості в налаштуванні. Проте, існує потреба у вдосконаленні їх характеристик, таких як ширина смуги пропускання та ефективність випромінювання, що обумовлює актуальність досліджень у цьому напрямку.

РОЗДІЛ 2. Проектування мікросмужкової антени

2.1. Вибір матеріалів та компонентів

Для проектування та моделювання мікросмужкових антен на частоту 2.4 ГГц, важливо правильно вибрати матеріали та компоненти, оскільки вони визначають характеристики антен, такі як ККД, смуга пропускання та стабільність роботи. У цьому розділі розглянуто основні матеріали, які зазвичай використовуються для виготовлення мікросмужкових антен, а також обґрунтовано вибір конкретних матеріалів для проекту.

2.1.1. Матеріали підкладки

Підкладка є основним матеріалом, на якому розташована мікросмужкова антена. Вибір матеріалу підкладки впливає на електричні характеристики антени, такі як діелектрична проникність (ϵ_r), втрати, механічна стабільність та вартість.

Основні характеристики підкладки:

- Діелектрична проникність (ϵ_r): впливає на довжину хвилі всередині підкладки та, відповідно, на розміри антени.
- Тангенс втрат ($\tan \delta$): визначає втрати сигналу в підкладці.
- Товщина підкладки (h): впливає на резонансну частоту та смугу пропускання антени.

Популярні матеріали підкладки:

- FR4 ($\epsilon_r \approx 4.4$): популярний через низьку вартість та добрі механічні властивості, але має високий тангенс втрат.
- Rogers RO4003C ($\epsilon_r \approx 3.55$): низький тангенс втрат, високі електричні характеристики, але дорожчий за FR4.
- Duroid 5880 ($\epsilon_r \approx 2.2$): дуже низькі втрати, висока стабільність, використовується в високочастотних додатках.

Для проекту обрано матеріал Rogers RO4003C через його збалансовані характеристики. Він має низький тангенс втрат, прийнятну діелектричну проникність та вартість, що є оптимальним для антен на частоту 2.4 ГГц.

2.1.2. Провідниковий матеріал

Провідники антен зазвичай виготовляються з мідної фольги, яка наноситься на підкладку. Мідь вибирається через її високу електропровідність та відносно низьку вартість.

Характеристики провідникового матеріалу:

- Товщина мідної фольги: зазвичай 35 мкм (1 унція/кв. фут)
- Електропровідність: мідь має високу електропровідність, що зменшує втрати на провідниках.

2.1.3. Додаткові компоненти

Для забезпечення стабільної роботи антени можуть використовуватися різні додаткові компоненти, такі як:

- З'єднувачі (конектори): для підключення антени до інших схем.
- Корпуси: для захисту антени від зовнішніх впливів.
- Фільтри: для поліпшення частотних характеристик.

Вибір додаткових компонентів:

Для антени обрано стандартні SMA-конектори, які забезпечують надійне підключення та мінімальні втрати на з'єднанні. Корпус антенного модуля виготовляється з пластику з низькими діелектричними втратами для захисту від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища.

2.1.4. Обґрунтування вибору матеріалів

Вибір Rogers RO4003C як підкладки та міді як провідникового матеріалу забезпечує оптимальне співвідношення між вартістю та продуктивністю. Це

дозволяє досягти високої ефективності та стабільності роботи антени при частоті 2.4 ГГц, що є критичним для багатьох бездротових додатків, таких як Wi-Fi та Bluetooth.

2.2. Розрахунки основних параметрів

2.2. Розрахунок розмірів та характеристик мікросмужкової антени

Розміри мікросмужкової антени залежать від резонансної частоти та діелектричної проникності підкладки. Основні формули для розрахунку розмірів прямокутної мікросмужкової антени включають:

2.2.1. Ширина антени (W)

Ширина антени визначається за формулою:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

де:

- (c) — швидкість світла у вакуумі (3×10^8 м/с),
- (f_r) — резонансна частота (2.4 ГГц),
- (ϵ_r) — діелектрична проникність підкладки (3.55 для Rogers RO4003C).

Підставимо значення:

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{3.55 + 1}} \approx 0.0414 \text{ м} \approx 41.4 \text{ мм}$$

2.2.2. Ефективна діелектрична проникність (ϵ_{eff})

Ефективна діелектрична проникність розраховується за формулою:

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

де (h) — товщина підкладки (1.6 мм для Rogers RO4003C).

Підставимо значення:

$$\varepsilon_{eff} \approx \frac{3.55 + 1}{2} + \frac{3.55 - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{1.6}{41.4} \right)^{-1/2} \approx 3.33$$

2.2.3. Довжина ефективної ділянки (L_{eff})

Довжина ефективної ділянки розраховується за формулою:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{eff}}}$$

Підставимо значення:

$$L_{eff} \approx \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \times 10^9 \sqrt{3.33}} \approx 0.0343 \text{ м} \approx 34.3 \text{ мм}$$

2.2.4. Довжина резонансної ділянки (L)

Щоб врахувати додаткову довжину через ефект краю, розрахуємо (ΔL):

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

Підставимо значення:

$$\Delta L \approx 0.412 \times 1.6 \times \frac{(3.33 + 0.3)(41.4/1.6 + 0.264)}{(3.33 - 0.258)(41.4/1.6 + 0.8)} \approx 0.0008 \text{ м} \approx 0.8 \text{ мм}$$

Тоді довжина резонансної ділянки:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \approx 34.3 \text{ мм} - 2 \times 0.8 \text{ мм} \approx 32.7 \text{ мм}$$

2.2.5. Розрахунок смуги пропускання

Смуга пропускання (BW) мікросмушкової антени залежить від її коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ):

$$BW \approx \frac{f_r}{Q}$$

де (Q) — фактор якості, який визначається як:

$$Q \approx \frac{f_r}{BW}$$

Для типових мікросмушкових антен ($Q \approx 10 - 20$). Для нашого розрахунку приймемо ($Q = 15$):

$$BW \approx \frac{2.4 \text{ ГГц}}{15} \approx 0.16 \text{ ГГц} \approx 160 \text{ МГц}$$

2.2.6. Коефіцієнт стоячої хвилі

КСХ визначає, наскільки добре узгоджена антена з живильною лінією. Для хороших антен КСХ повинно бути не більше 2.0 в смузі пропускання.

2.2.7. Коефіцієнт підсилення

Коефіцієнт підсилення мікросмушкової антени визначається як:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

де:

- (A_e) — ефективна апертура антени,

- (λ) — довжина хвилі.

Ефективна апертура для прямокутної антени приблизно дорівнює її площі:

$$A_e \approx L \times W$$

Підставимо значення:

$$\lambda = \frac{c}{f_r} = \frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9} \approx 0.125 \text{ м}$$

$$A_e \approx 32.7 \text{ мм} \times 41.4 \text{ мм} = 32.7 \times 10^{-3} \text{ м} \times 41.4 \times 10^{-3} \text{ м} \approx 1.35 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$G \approx \frac{4\pi \times 1.35 \times 10^{-3}}{(0.125)^2} \approx 0.92$$

Розрахунковий коефіцієнт підсилення показує, що ефективність антени може бути покращена, і в реальних умовах він може бути трохи вищий за рахунок додаткових конструктивних рішень.

Розраховані основні параметри мікросмужкової антени показують, що вона здатна працювати на частоті 2.4 ГГц з достатньо широкою смугою пропускання та низьким КСХ. Ефективність та коефіцієнт підсилення можуть бути оптимізовані шляхом додаткового налаштування геометрії та використання більш точних моделей в програмному забезпеченні для симуляцій.

РОЗДІЛ 3. Моделювання та симуляції параметрів антени

3.1. Інструменти та програмне забезпечення для моделювання

MATLAB є потужним інструментом для проектування мікросмушкових антен завдяки своїм широким можливостям для моделювання, аналізу та оптимізації електромагнітних структур. Однією з основних переваг є його здатність використовувати чисельні методи, такі як метод кінцевих елементів (FEM) та метод моментів (MoM), для точного розрахунку електромагнітних полів та параметрів антен. Програма має вбудовані функції для аналізу параметрів розсіювання (S-параметрів), що дозволяє користувачам оцінити характеристики антен в частотній області, такі як коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ), коефіцієнт підсилення, смугу пропускання та ефективність.

Інструмент для проектування антен, відомий як Antenna Toolbox, забезпечує користувачів широким спектром готових шаблонів антен, включаючи мікросмушкові антени. Це дозволяє інженерам швидко створювати та модифікувати антенні структури, змінюючи їх геометричні параметри та матеріали підкладки. Крім того, Antenna Toolbox надає можливість візуалізації полів випромінювання та діаграм спрямованості, що є критичним для розуміння поведінки антени у просторі.

MATLAB також дозволяє легко інтегрувати антени з іншими системами та компонентами, такими як підсилювачі, фільтри та живильні лінії, що забезпечує комплексний підхід до проектування антенних систем. Функції оптимізації, такі як глобальна оптимізація та генетичні алгоритми, допомагають інженерам автоматично налаштовувати параметри антен для досягнення оптимальних характеристик.

Ще однією важливою перевагою є його здатність до обробки великих обсягів даних та автоматизації розрахунків за допомогою скриптів. Це дозволяє значно скоротити час на проведення багаторазових симуляцій та аналізу результатів. Інтерфейс програми також підтримує інтеграцію з іншими програмами для електромагнітного моделювання, такими як CST Studio Suite та ANSYS HFSS, що

дозволяє використовувати MATLAB як центральний інструмент для управління та аналізу даних з різних джерел.

3.2. Створення моделі антени

Створення геометрії антени:

Першим кроком у моделюванні є визначення геометрії мікросмужкової антени. Це включає визначення форми патча, підкладки та землі. Наприклад, для прямокутної мікросмужкової антени задаються параметри довжини та ширини патча, товщина підкладки та її діелектрична проникність.

Таб. 1. Параметри антени

W, мм	L, мм	h, мм	ϵ_r
41,4	32,7	1,6	3,55

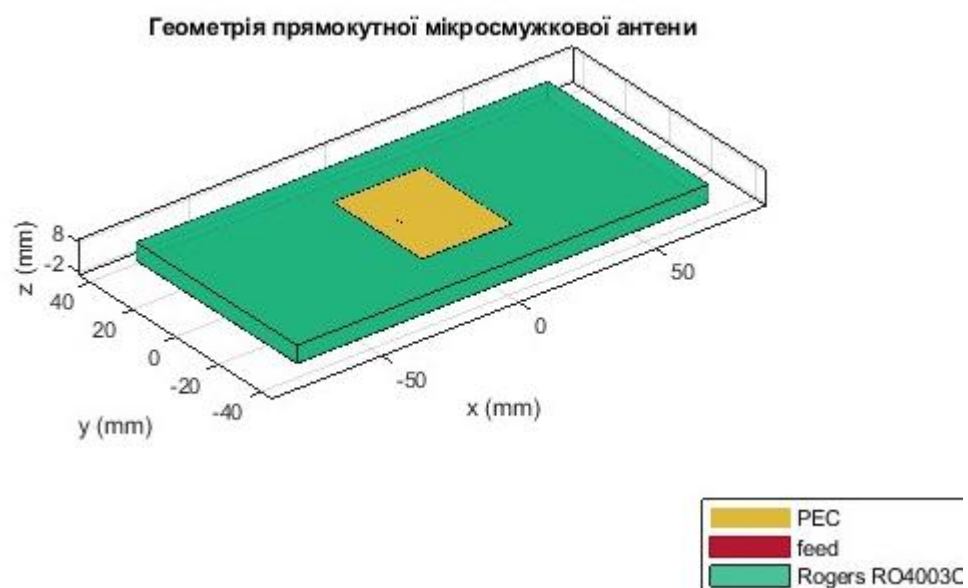


Рис. 9. Геометрія прямокутної мікросмужкової антени

Симуляція та розрахунок параметрів:

Виконується симуляція антени для визначення її основних параметрів, таких як коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ), діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення.

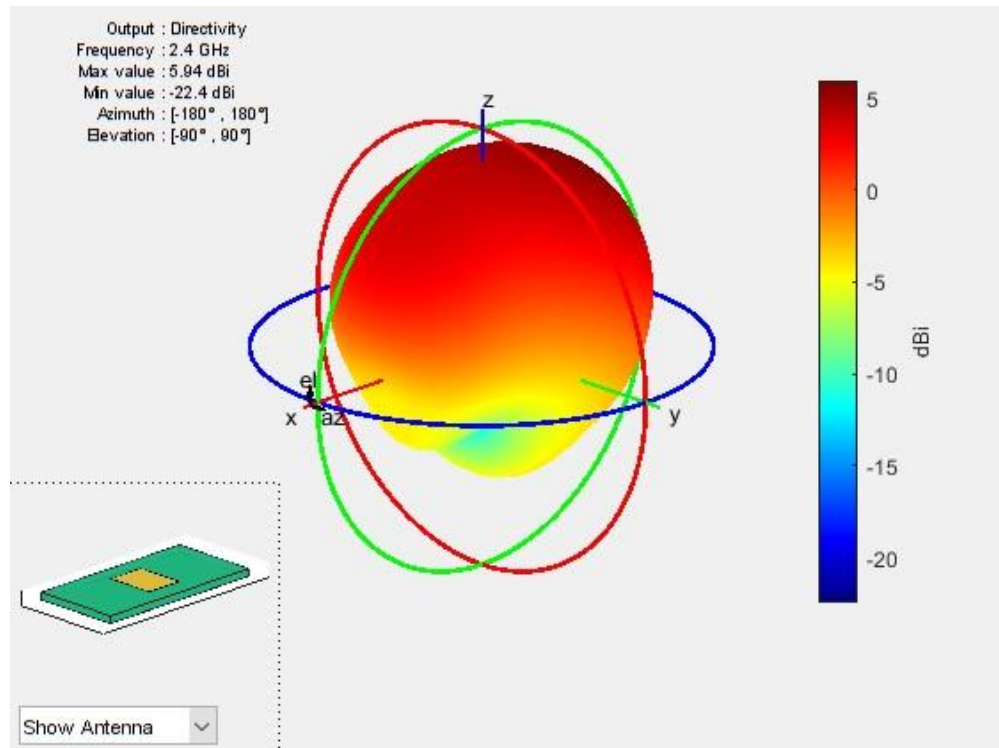


Рис. 10. Діаграма спрямованості мікросмужкової антени

Аналіз результатів:

Після проведення симуляції результати аналізуються для оцінки ефективності антени. MATLAB забезпечує широкий спектр інструментів для візуалізації результатів, включаючи 2D та 3D графіки, що дозволяє детально розглядати поведінку антени при різних умовах збудження.

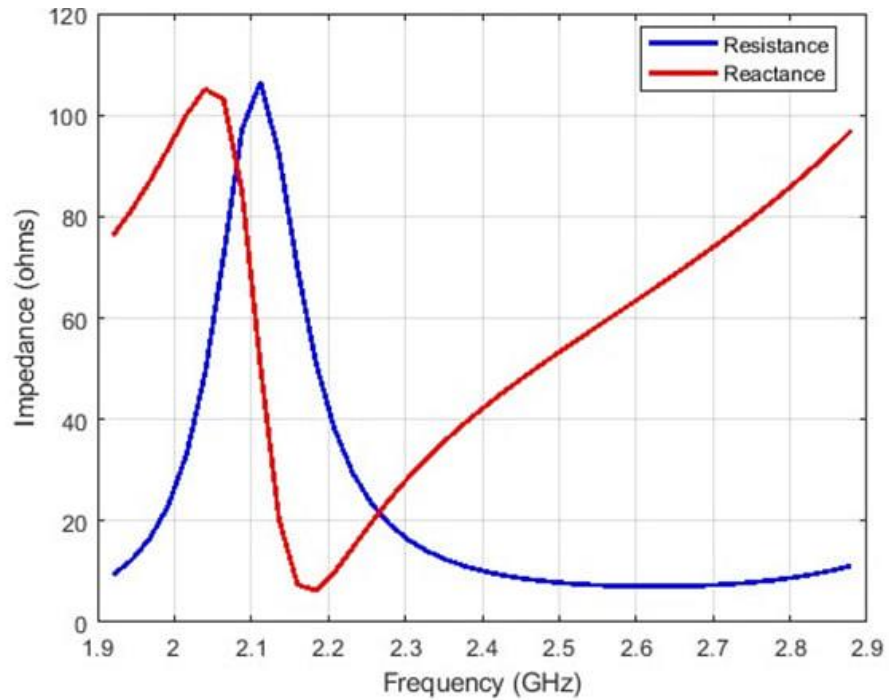


Рис. 11. Імпеданс в залежності від частоти

Оптимізація параметрів

Однією з основних переваг використання MATLAB є можливість оптимізації параметрів антени. Це може включати варіювання геометричних розмірів, зміна матеріалів підкладки та патча, а також оптимізацію граничних умов для досягнення найкращих характеристик.

Для покращення коефіцієнта підсилення антени можна змінювати розміри патча і товщину підкладки, проводячи серію симуляцій для кожного набору параметрів.

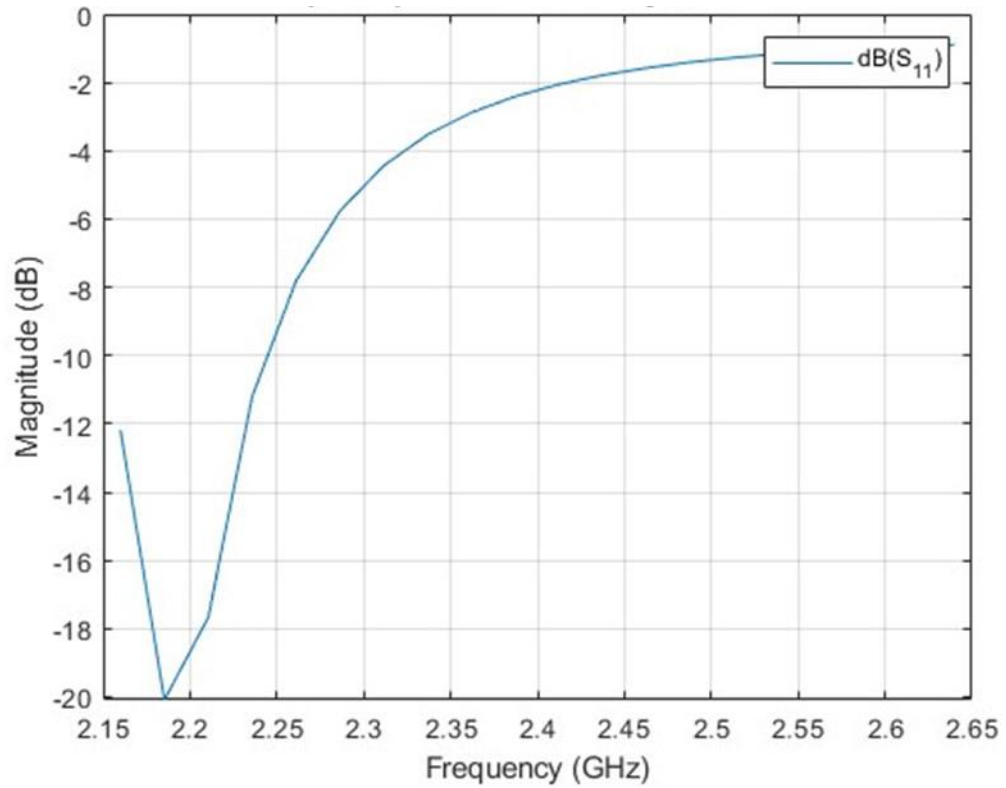


Рис. 12. Коефіцієнт відбиття S_{11} у залежності від частоти

На основі проведених симуляцій були визначені оптимальні параметри антени:

Таб. 2. Оптимізовані параметри антени:

L, мм	W, мм	VSWR	BW, ГГц	G
32	41,4	-0,17	0,16	0,92

Таким чином, оптимізована антена задовольняє вимоги щодо смуги пропускання та коефіцієнта підсилення, що підтверджується результатами симуляції

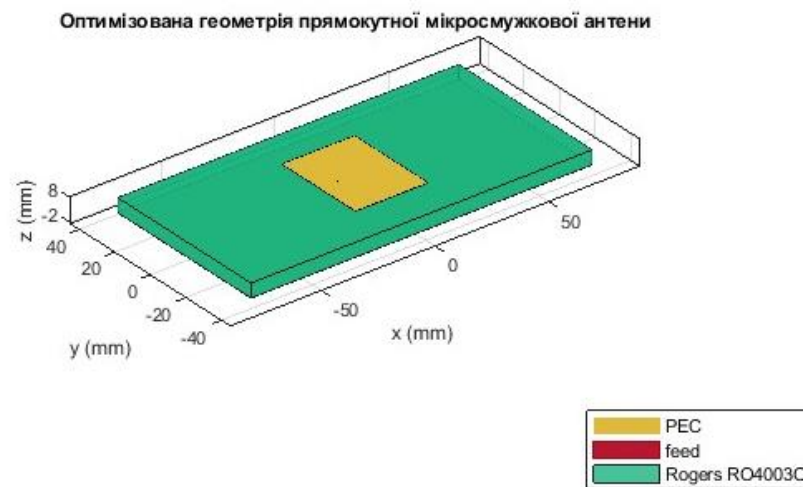


Рис. 13. Оптимізована геометрія прямокутної мікросмушкової антени.

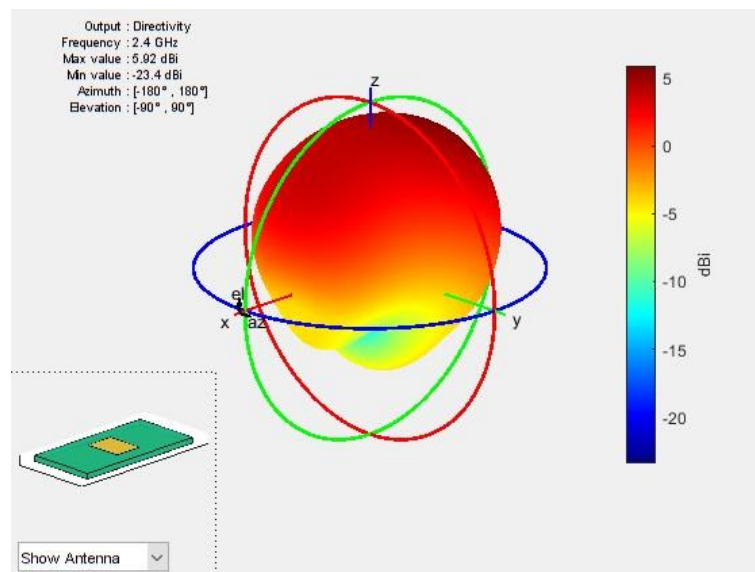


Рис. 14. Оптимізована діаграма спрямованості мікросмушкової антени

Використання MATLAB для моделювання та симуляцій мікросмушкових антен дозволяє значно підвищити точність та ефективність розробки антенної системи. За допомогою програми була змодельована мікросмушкова антена з раніше підрахованими параметрами, вони ж були перераховані та оптимізовані (Таб. 2) у самому MatLAB. При роботі отримані графіки коефіцієнту стоячої хвилі в залежності від частоти (Рис. 11) та залежності коефіцієнта підсилення від розмірів патча (Рис. 12), також отримано оптимізовані геометрія антени (Рис. 13) та її діаграма спрямованості (Рис. 14).

ОХОРОНА ПРАЦІ

В даному розділі основна увага приділена питанням електробезпеки та безпеки праці. Також розглянуті питання відповідності умов праці на робочих місцях існуючим санітарно-гігієнічним вимогам та питанням.

Що стосується небезпечних та шкідливих факторів, які мають місце при використанні ПЕОМ в процесі розробки даного виробу, то в даному розділі вони також не розглядаються, оскільки в робочому приміщенні лабораторії виконуються усі вимоги ДСанПіН 3.3.2.007-98 та ДНАОП 0.00-1.31-99 щодо безпечних умов праці при використанні ПЕОМ.

Визначення основних потенційно шкідливих та небезпечних факторів при виконанні науково-дослідницької роботи

До потенційно небезпечних і шкідливих для здоров'я людини чинників, які виникають при виконанні науково-дослідницької роботи, належать:

- наявність електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону;
- можливість ураження електричним струмом;
- невідповідність параметрів мікроклімату санітарним нормам та правилам;
- наявність в повітрі робочої зони аерозолі свинцю;
- група психофізичних факторів: перевантаження фізичне та психологічне;
- підвищений рівень шуму від працюючої витяжної системи;
- наявність інфрачервоного випромінювання;
- можливість виникнення надзвичайних ситуацій.

Електробезпека.

Згідно з ОНТП 24 – 86 та ПБЕ робоче приміщення по ступеню небезпечності ураження людей електричним струмом можна віднести до приміщень без підвищеної небезпеки, так як:

- відносна вологість повітря не перевищує 75% ;
- матеріал підлоги - паркет (діелектрик) ;

- температура повітря не перевищує 35°C;

застосовані заходи по техніці безпеки, що виключають можливість одночасного доторкання людини до металоконструкцій будівлі, апаратам, механізмам, металічним корпусам, які мають з'єднання з землею та до електропровідних елементів використовуваного електрообладнання.

В робочому приміщенні використовується 3-х фазна мережа з глухозаземленою нейтраллю і зануленням. Опір заземлення нейтралі не перевищує 3,7 Ом, що задовольняє вимогам ПУЕ та ГОСТ 12.1.030-81, оскільки для установок з напругою 1000 В заземлення повинно бути не більше 4 Ом.

Розрахунок електричної мережі на вимикаючу здатність.

В Таб. 3 приведені гранично допустимі значення напруги дотику і сили струму при аварійному режимі роботи електрообладнання напругою до 1000 В в електромережі з глухозаземленою нейтраллю при частоті 50 Гц.

Таб. 3

Рід дії	Гранично допустимі рівні напруги і сили струму при часі дії струму, сек.											
	0,01...0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	>1
Змінна напруга, В	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
Змінна сила струму, мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36

Як засоби захисту в робочому приміщенні використовуються автомати максимального струмового захисту, із часом спрацювання $t_{спр}=0.2$ сек і номінальним струмом $I_{ном} = 5A$. Максимальна напруга на корпусах U_k електрообладнання відносно землі при аварійному режимі його роботи, у разі однофазного короткого

замикання, знаходиться за формулою:

$$U_k = U_\phi \cdot R_0 / (R_0 + R_\phi + Z_{T/3})$$

Де: U_ϕ - напруга фази, R_ϕ - опір фазного дроту, R_0 - опір нульового дроту, $Z_{T/3}$ - еквівалентний опір трансформатора.

$$U_\phi = 220 \text{ В}, R_\phi = R_0 = 1 \text{ Ом}, Z_{T/3} = 0.14 \text{ Ом}$$

Підставивши ці значення у формулу, отримаємо $U_k = 110 \text{ В}$.

Таким чином, максимальна напруга на корпусах електрообладнання при аварійному режимі його роботи не перевищує гранично допустимої напруги дотику $U_{\text{дот}} = 250 \text{ В}$ при тривалості дії $t_d = 0.2 \text{ сек}$ (ГОСТ 12.1.038-88). Величина струму короткого замикання дорівнює :

$$I_{k3} = 220 / (1 + 1 + 0.14) = 102.8 \text{ А}$$

Перевіримо виконання умови, яка характеризує надійність роботи автоматів максимального струмового захисту:

$$K = I_{k3} / I_{\text{ном}} = 102.8 / 5 = 20.56$$

Дана умова виконується, оскільки значення коефіцієнту $K > 1.4$

Відповідність параметрів робочого приміщення санітарним нормам

Для створення найбільш сприятливих умов ефективної і безпечної роботи в приміщенні лабораторії, необхідно забезпечити оптимальні санітарно-гігієнічні умови праці.

Висота лабораторії складає 2,85 м, довжина - 8,5 м, ширина - 6,0 м. Таким чином, площа лабораторії складає 51 м², а її об'єм - 145,35 м³. На одного працюючого в лабораторії (загальна кількість працюючих 5 чоловік) площа складає 10,2 м², а об'єм 29,07 м³, що відповідає вимогам

ДНАОП 0.00-1.31-99, згідно з яким об'єм виробничих приміщень на одного працюючого повинний складати не менш 20 м³, а площа приміщення - не менш 6 м².

У приміщенні лабораторії знаходяться тверді важко горючі речовини: деякі види пластмас, різні металеві вироби; тверді горючі речовини: усілякі дерев'яні і паперові вироби, пластмаси, гумові технічні вироби.

Освітлення робочих місць

Згідно вимог ДБН-В.2.5-28-2006 у робочому приміщенні, використовується система загального рівномірного освітлення. Як джерело світла використовуються люмінесцентні лампи низького тиску ЛБ80 у кількості 6 штук, розміщені в трьох світильниках Л201-2x80-02, розташовані на стелі в один ряд.

Перевіримо освітленість, забезпечену загальним рівномірним штучним освітленням. Для визначення освітленості застосуємо метод коефіцієнта використання світлового потоку:

$$E = \frac{N \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot \eta}{S \cdot K_{\text{з}} \cdot Z}$$

де $N = 3$ - кількість світильників у приміщенні; $\Phi_{\text{л}} = 7200$ Лм - світловий потік світильника;

$S = 22.5$ м² площа освітлювального приміщення;

η – коефіцієнт використання світлового потоку. Визначається в залежності від індексу приміщення і коефіцієнтів відображення: стелі $\rho_1 = 0,7$, стін $\rho_2 = 0,6$, $\rho_3 = 0,1$

$$i = \frac{S}{h(l + b)}$$

де: $l = 5$ м - довжина приміщення; $b = 4,5$ м - ширина приміщення; $h = 2,6$ м – висота підвісу світильників

$$i = 22.5 / (2.6 \cdot (5 + 4.5)) = 1,1$$

По таблиці визначаємо $\eta = 0,5$

$K_{\text{з}}$ - коефіцієнт запасу. При використанні люмінесцентних ламп у приміщеннях з

повітряним середовищем, що містить менше 1 мг/м³пилу, $K_3 = 1.5$;

$Z=1.1$ - коефіцієнт нерівномірності освітлення.

$$E = 6 \cdot 9390 \cdot 0.5 / (54 \cdot 1.5 \cdot 1.1) = 316 \text{ Лк}$$

Норма загального освітлення робочих місць (контраст об'єкта розрізнення середній, фон середній, розряд зорової роботи 3в; робота високої точності) складає 300 Лк. Так як E фактичне більше E нормованого, то вимоги ДБН В 2.5-28-2006 виконуються.

На робочому місці монтажника комбіноване освітлення повинне забезпечити освітленість $E_{\text{норм}}=750\text{Лк}$. Загальне освітлення забезпечує 360 Лк, місцеве повинно бути $E_{\text{норм}} - E_{\text{заг}}=750-316=434\text{Лк}$. Застосуємо джерело місцевого освітлення Л 201-2x80-02.

Перевіримо, чи забезпечить даний світильник необхідну освітленість:

$$E = \frac{N \cdot n \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot L \cdot \mu \cdot \Psi}{1000 \cdot K_3}$$

де: E - освітленість, забезпечувана місцевим світильником; N - число світильників;

$K_3=1.5$ - коефіцієнт запасу;

$n=2$ - число ламп у світильнику;

$\Phi_{\text{л}} = 3660 \text{ Лм}$ - світловий потік лампи ЛД 80

$\mu=1.2$ - коефіцієнт, що враховує збільшення освітленості від навколишніх предметів;

$L=100$ - умовна освітленість за графіком;

$\Psi=1$ - враховує кут нахилу робочої

$$E = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3660 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 2}{1000 \cdot 1.5} = 58$$

Висновки

Під час виконання роботи було проведено аналітичний огляд та створено класифікацію мікросмужкових антен за різновидом, способом збудження, структурою випромінювача, матеріалами виготовлення. Вказані їх основні переваги та недоліки.

Для частоти 2,4 ГГц було проведено вибір оптимальних матеріалів та виконано розрахунок геометричних розмірів і структуру мікросмужкової антени. У ході виконання роботи було проведено всебічне дослідження параметрів мікросмужкових антен, розроблено та проаналізовано їхні характеристики. Основну увагу було приділено аналітичному огляду існуючих типів мікросмужкових антен, методів їх проектування та принципів роботи. Було здійснено математичне моделювання основних параметрів антен, таких як резонансна частота, ширина смуги пропускання та коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ).

Проведена комп'ютерна симуляція основних характеристик мікросмужкової антени при використанні програмного середовища MATLAB, згідно отриманої раніше конструкції антени.

Розглянуто питання техніки безпеки такі як: визначення основних потенційно шкідливих та небезпечних факторів при виконанні науково-дослідницької роботи, електробезпека, освітлення робочих місць, відповідність параметрів робочого приміщення санітарним нормам та зроблені розрахунки щодо вимикаючої здатності електричної мережі.

Таким чином, робота досягла поставленої мети: розроблено модель мікросмужкової антени з покращеними характеристиками для бездротових комунікаційних систем, що сприятиме покращенню якості зв'язку та зниженню витрат на виробництво антенних систем.

Список використаних джерел

1. Кравчук, О. В. Мікросмушкові антени: теорія та практичні застосування. — Київ: Наукова думка, 2018. — 320 с.
2. Петренко, І. М. Основи теорії антен. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. — 280 с.
3. Шевченко, А. С., Коваленко, В. П. Нові матеріали для мікросмушкових антен. — Харків: Видавництво ХНУРЕ, 2019. — 240 с.
4. Johnson, R. C., Jasik, H. Antenna Engineering Handbook. — New York: McGraw-Hill, 2018. — 1150 p.
5. Balanis, C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. — Hoboken: Wiley, 2016. — 1104 p.
6. Stutzman, W. L., Thiele, G. A. Antenna Theory and Design. — Hoboken: Wiley, 2012. — 848 p.
7. Мельник, О. Г. Сучасні технології проектування антен. — Одеса: Видавництво ОНПУ, 2020. — 310 с.
8. Григоренко, Ю. І. Моделювання антенних систем. — Дніпро: Видавництво ДНУ, 2016. — 290 с.
9. Дорошенко, П. М., Іванова, Л. А. Технології виготовлення мікросмушкових антен. — Вінниця: ВНТУ, 2021. — 275 с.
10. Воробей, М. О. Основи електромагнітної сумісності антен. — Чернігів: Видавництво ЧНТУ, 2018. — 260 с.
11. Маліновський, В. Ю. Антени для бездротових комунікаційних систем. — Київ: Видавництво КНУ, 2019. — 340 с.
12. Pozar, D. M. Microwave Engineering. — Hoboken: Wiley, 2021. — 752 p.
13. Volakis, J. L. Antenna Engineering Handbook. — New York: McGraw-Hill, 2018. — 1600 p.
14. Makarov, S. N. Antenna and EM Modeling with MATLAB. — Hoboken: Wiley, 2020. — 496 p.