

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

Зав. кафедри

_____ Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«15» 06 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньою програмою «Інформаційна та комунікаційна радіоінжене-
рія», за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему: «Антенна решітка діапазону частот 6-7 ГГц з коловою поляри-
зацією»**

Виконав:

студент IV курсу, групи РІ-21

Пасіченко Сергій Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові

Керівник: асистент, Ванділовський Борис Валерійович

Посада, науковий ступінь, вчене звання

Прізвище, ім'я, по батькові

Рецензент: ст. викладач каф. РС Турєєва О.В

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«20» ____ 04 ____ 2026р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студента

Пасіченко Сергія Володимировича

1.Тема проєкту «Антенна решітка діапазону частот 6-7 ГГц з коловою поляризацією»

2.Керівник проєкту Ванділовський Борис Валерійович, затверджені наказом по університету від « 29 » ____ 05 ____ 2026 р. № 1989-с

Строк подання студентом проєкту 08 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проєкту: робочий діапазон частот 6–7 ГГц; центральна частота 6,5 ГГц; призначення антени — приймання відеосигналу з БПЛА; тип антени — мікросмужкова антенна решітка; конфігурація решітки 2×2; колова поляризація; вхідний опір 50 Ом; коефіцієнт підсилення близько 12 дБі; коефіцієнт відбиття S11 не більше –10 дБ; КСХН не більше 2; матеріал діелектричної підкладки ZYF-255DA; моделювання в CST Studio Suite.

4. Зміст пояснювальної записки: 1) аналіз антенних систем для приймання відеосигналу з БПЛА та огляд аналогів; 2) теоретичні основи проєктування мікросмужкових антенних решіток колової поляризації; 3) розрахунок мікросмужкового випромінювача, структури решітки 2×2 та мережі живлення; 4) побудова моделі антенної решітки в CST Studio Suite, моделювання, оптимізація та аналіз отриманих характеристик.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): модель мікросмужкової антенної решітки 2×2 у CST Studio Suite; топологія мікросмужкової мережі живлення; вигляд коаксіального входу; графіки S_{11} , КСХН та вхідного опору; діаграми спрямованості оптимізованої моделі; таблиці з результатами моделювання та порівнянням вимог із отриманими характеристиками; презентація.

6. Дата видачі завдання 20 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих антенних систем для приймання відеосигналу з БПЛА та аналіз аналогів	20.04.26–06.05.26	Виконано
2	Розробка та аналіз технічного завдання на проєкт	07.05.26–10.05.26	Виконано
3	Аналіз теоретичних основ побудови мікросмужкових антенних решіток колової поляризації	11.05.26–18.05.26	Виконано
4	Розрахунок параметрів мікросмужкового випромінювача та вибір матеріалу діелектричної підкладки	19.05.26–23.05.26	Виконано
5	Розрахунок структури антенної решітки та мікросмужкової мережі живлення	24.05.26–29.05.26	Виконано
6	Побудова моделі антенної решітки в CST Studio Suite, моделювання та оптимізація характеристик	30.05.26–05.06.26	Виконано
7	Оформлення текстової та графічної документації дипломного проєкту	06.06.26–15.06.26	Виконано

Студент

 Сергій ПАСІЧЕНКО

Керівник

 Борис ВАНДІЛОВСЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці та моделюванню мікросмушкової антенної решітки діапазону частот 6–7 ГГц з коловою поляризацією для приймання відеосигналу з безпілотного літального апарата.

Об'єктом дослідження є мікросмушкова антенна решітка сантиметрового діапазону хвиль. Предметом дослідження є її електродинамічні характеристики, зокрема коефіцієнт відбиття, КСХН, вхідний опір, коефіцієнт підсилення, діаграма спрямованості та осьове відношення.

Метою роботи є розробка моделі антенної решітки 2×2 з коловою поляризацією, придатної для роботи в діапазоні 6–7 ГГц у складі наземної приймальної станції БПЛА.

У роботі проаналізовано особливості FPV-зв'язку, вимоги до приймальної антенної системи та існуючі комерційні антени колової поляризації. Розглянуто теоретичні основи мікросмушкових антен, способи їх живлення, принцип формування колової поляризації та особливості побудови антенних решіток.

Виконано розрахунок початкових параметрів мікросмушкового випромінювача, структури решітки 2×2 , відстані між елементами та мікросмушкової мережі живлення. Як матеріал підкладки використано ZYF-255DA з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 2,55$.

Моделювання та оптимізацію виконано в CST Studio Suite. За результатами оптимізації отримано модель, що працює в діапазоні 6–7 ГГц, має коефіцієнт підсилення приблизно 11,5–12 дБі та спрямовану діаграму приймання. КСХН в основній частині робочого діапазону переважно не перевищує 2, а вхідний опір змінюється приблизно в межах 40–70 Ом з найкращим наближенням до 50 Ом у центральній частині смуги. Поляризація наближається до

колової в частині робочого діапазону, однак потребує подальшого покращення за осьовим відношенням.

Ключові слова: мікросмужкова антена, антенна решітка, колова поляризація, RHCP, FPV, БПЛА, CST Studio Suite, ZYF-255DA, KCXH, S11, Z11, осьове відношення.

ANNOTATION

The qualification work is devoted to the development and simulation of a circularly polarized microstrip antenna array operating in the 6–7 GHz frequency range for receiving video signals from an unmanned aerial vehicle.

The object of research is a microstrip antenna array in the centimeter wavelength range. The subject of research is its electrodynamic characteristics, including reflection coefficient, VSWR, input impedance, gain, radiation pattern, and axial ratio.

The purpose of the work is to develop a 2×2 circularly polarized antenna array model suitable for operation in the 6–7 GHz range as part of a UAV ground receiving station.

The work analyzes the features of FPV communication, the requirements for a receiving antenna system, and existing commercial circularly polarized antennas. The theoretical principles of microstrip antennas, feeding methods, circular polarization formation, and antenna array design are considered.

Initial parameters of the microstrip radiator, 2×2 array structure, element spacing, and microstrip feeding network were calculated. ZYF-255DA with a relative dielectric permittivity of $\epsilon_r = 2.55$ was used as the substrate material.

Simulation and optimization were performed in CST Studio Suite. The optimized model operates in the 6–7 GHz range, provides a gain of approximately

11.5–12 dBi, and forms a directional radiation pattern. The VSWR mostly does not exceed 2 in the main part of the operating band, while the input impedance varies approximately from 40 to 70 Ohms with the best approximation to 50 Ohms in the central part of the range. The polarization approaches circular polarization in part of the operating band, but further improvement of the axial ratio is required.

Keywords: microstrip antenna, antenna array, circular polarization, RHCP, FPV, UAV, CST Studio Suite, ZYF-255DA, VSWR, S11, Z11, axial ratio.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Антенна решітка діапазону частот 6-7 ГГц з
коловою поляризацією»

Київ — 2026 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	2
Вступ.....	3
1. АНАЛІЗ АНТЕННИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРИЙМАННЯ ВІДЕОСИГНАЛУ З БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	5
1.1 Особливості FPV-зв'язку з безпілотними літальними апаратами ...	5
1.2 Вимоги до антенної системи для приймання відеосигналу	6
1.3 Аналіз частотних діапазонів для передавання відеосигналу	7
1.4 Огляд існуючих антен колової поляризації для FPV-систем	9
1.5 Постановка задачі дипломної роботи	15
Висновки до розділу 1	16
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ КОЛОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ	17
2.1 Класифікація антен та основні параметри антенних систем.....	17
2.2 Мікросмужкові антени та їхні особливості.....	19
2.3 Способи живлення мікросмужкових випромінювачів.....	21
2.4 Принцип формування колової поляризації	22
2.5 Особливості побудови антенних решіток	24
Висновки до розділу 2	25

					PI-21. 468576.002 ПЗ		
ЗМ.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Пасіченко С.В.		<i>П</i>		Антенна решітка діа- пазону частот 6-7 ГГц з коловою поляризацією	Літ.	Лист
Перевірів	Ванділовський Б.В.		<i>В</i>				1
							1
Н. Контр.	П.І.Б.					PI-21, РТФ	
Затвер-	Ванділовський Б.В.		<i>В</i>				

3 РОЗРАХУНОК МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ ДІАПАЗОНУ 6–7 ГГц.....	26
3.1 Вибір початкових вимог до антенної решітки	26
3.2 Вибір робочої частоти та матеріалу підкладки.....	28
3.3 Розрахунок мікросмушкового випромінювача	29
3.4 Розрахунок структури антенної решітки та відстані між елементами	35
3.5 Розрахунок мікросмушкової мережі живлення	39
Висновки до розділу 3	46
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ В CST STUDIO SUITE	48
4.1 Побудова початкової моделі антенної решітки	48
4.2 Налаштування параметрів моделювання.....	54
4.3 Аналіз результатів першої ітерації моделювання	57
4.4 Оптимізація конструкції антенної решітки	60
4.5 Аналіз характеристик оптимізованої моделі.....	63
Висновки до розділу 4	78
ВИСНОВКИ.....	82
Перелік джерел посилання	85
ДОДАТОК А.....	87
ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ	94
ДОДАТОК Б	95

					PI-21. 468576.002 ПЗ		
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Антенна решітка діа- пазону частот 6-7 ГГц з коловою поляризацією		
Розробив	Пасіченко С.В.	✓					
Перевірів	Ванділовський Б.В.	✓			Лім.		
					Лист		
					Листів		
Н. Контр.	П.І.Б.				1		
Затвер-	Ванділовський Б.В.	✓			PI-21, РТФ		
					1		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА — безпілотний літальний апарат

ДС — діаграма спрямованості

КСХН — коефіцієнт стоячої хвилі за напругою

НВЧ — надвисокі частоти

ПЗ — пояснювальна записка

AR — Axial Ratio (осьове відношення)

CST — Computer Simulation Technology

FPV — First Person View (вид від першої особи)

GHz — Gigahertz (гігагерц)

HPBW — Half Power Beam Width (ширина головного пелюстка за рівнем половинної потужності)

LHCP — Left-Hand Circular Polarization (ліва колова поляризація)

PEC — Perfect Electric Conductor (ідеальний електричний провідник)

PTFE — Polytetrafluoroethylene (політетрафторетилен)

RHCP — Right-Hand Circular Polarization (права колова поляризація)

SLL — Side Lobe Level (рівень бічних пелюсток)

SMA — SubMiniature version A (тип високочастотного коаксіального роз'єму)

S11 — коефіцієнт відбиття на вході антени

VSWR — Voltage Standing Wave Ratio (коефіцієнт стоячої хвилі за напругою)

Z11 — вхідний опір антени

ZYF-255DA — високочастотний діелектричний матеріал підкладки

ϵ_r — відносна діелектрична проникність

μ_r — відносна магнітна проникність

$\tan \delta$ — тангенс кута діелектричних втрат

λ — довжина хвилі

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						2
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасних телекомунікаційних системах дедалі більшого значення набувають безпілотні літальні апарати (БПЛА). Безпілотні літальні апарати широко використовуються в телекомунікаційних, моніторингових, пошуково-рятувальних, картографічних та спеціалізованих системах. Одним із важливих напрямів їх застосування є передавання відеосигналу в режимі реального часу, зокрема у FPV-системах.

Якість відеоканалу між БПЛА та наземною станцією значною мірою залежить від характеристик антенної системи. Для стабільного приймання сигналу важливими є робочий частотний діапазон, коефіцієнт підсилення, узгодження з приймальним трактом, діаграма спрямованості та тип поляризації.

У поширених FPV-системах часто використовуються діапазони 2,4 ГГц і 5,8 ГГц, однак вони можуть бути перевантажені іншими бездротовими пристроями. Тому для спеціалізованих систем доцільним є використання діапазону 6–7 ГГц, який дозволяє реалізувати компактні мікросмужкові антени. Водночас робота на таких частотах потребує спрямованої антени з достатнім коефіцієнтом підсилення.

Додатковою проблемою є зміна просторового положення БПЛА під час польоту. У разі використання лінійної поляризації це може призводити до поляризаційних втрат. Для зменшення цього впливу доцільно застосовувати антени колової поляризації, які менш чутливі до взаємної орієнтації передавальної та приймальної антен.

Для реалізації такої антенної системи доцільно використати мікросмужкову антенну решітку. Мікросмужкова технологія забезпечує компактність, малу масу та можливість інтеграції випромінювачів із мережею живлення на одній підкладці. Використання решітки дозволяє підвищити коефіцієнт підсилення порівняно з одиночним мікросмужковим випромінювачем.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						3
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Актуальність теми дипломної роботи полягає в необхідності розробки мікросмужкової антенної решітки колової поляризації діапазону 6–7 ГГц із коефіцієнтом підсилення близько 12 дБі для приймання відеосигналу з безпілотного літального апарата.

Метою дипломної роботи є розробка та моделювання мікросмужкової антенної решітки колової поляризації діапазону частот 6–7 ГГц для приймання відеосигналу з БПЛА.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих антенних систем для приймання відеосигналу;
- визначити вимоги до антенної решітки діапазону 6–7 ГГц;
- розглянути теоретичні основи мікросмужкових антен і колової поляризації;
- виконати розрахунок мікросмужкового випромінювача та решітки 2×2 ;
- розробити мікросмужкову мережу живлення;
- побудувати модель антенної решітки в CST Studio Suite;
- виконати моделювання, оптимізацію та аналіз отриманих характеристик.

Об’єктом дослідження є мікросмужкова антенна решітка сантиметрового діапазону хвиль.

Предметом дослідження є характеристики антенної решітки колової поляризації для приймання відеосигналу в діапазоні частот 6–7 ГГц.

Методи дослідження базуються на аналітичному розрахунку, електродинамічному моделюванні та оптимізації антенної системи в середовищі CST Studio Suite.

Практична цінність роботи полягає в можливості використання розробленої антенної решітки у складі наземних станцій приймання відеосигналу з БПЛА та інших радіотехнічних систем діапазону 6–7 ГГц.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						4
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ АНТЕННИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРИЙМАННЯ ВІДЕОСИГНАЛУ З БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1 Особливості FPV-зв'язку з безпілотними літальними апаратами

FPV-зв'язок забезпечує передавання відеозображення з камери БПЛА на наземну станцію в режимі реального часу. Це дає оператору змогу контролювати політ, оцінювати обстановку та своєчасно приймати рішення під час виконання завдання.

На якість FPV-зв'язку впливають потужність передавача, чутливість приймача, робоча частота, умови поширення радіохвиль, наявність перешкод, взаємне розташування антен, тип поляризації та характеристики антенної системи [1]. Для відеоканалу важливими є стабільність сигналу, достатня якість зображення, низький рівень завад і мінімальна затримка.

Основними проблемами під час польоту є багатопроменеве поширення сигналу та зміна просторової орієнтації БПЛА. Радіохвилі можуть відбиватися від земної поверхні, будівель, дерев та інших об'єктів, унаслідок чого на приймальну антену надходять кілька копій сигналу з різними фазами й амплітудами. Це може погіршувати якість приймання та спричиняти нестабільність відеозображення.

Зміна орієнтації БПЛА також впливає на рівень прийнятого сигналу. У разі використання антен лінійної поляризації можливі додаткові поляризаційні втрати. Для зменшення цього впливу доцільно застосовувати антени колової поляризації, які менш чутливі до взаємного положення передавальної та приймальної антен [2].

Отже, для приймання відеосигналу з БПЛА доцільно використовувати антену з достатнім коефіцієнтом підсилення, стабільним узгодженням у робочому діапазоні, спрямованою діаграмою приймання та коловою поляризацією.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						5
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Вимоги до антенної системи для приймання відеосигналу

Антенна система для приймання відеосигналу з БПЛА повинна забезпечувати роботу в заданому частотному діапазоні, достатній рівень прийнятого сигналу, узгодження з приймальним трактом і потрібний тип поляризації. Для наземної FPV-станції також важливими є спрямована діаграма приймання та практично зручна ширина головного пелюстка [2].

Основною вимогою є робота в діапазоні 6–7 ГГц. Антена має забезпечувати приймання сигналу в усій заданій смузі та зберігати прийнятне узгодження з трактом 50 Ом. Для оцінки узгодження використовують коефіцієнт відбиття S_{11} та КСХН. У практичних антенних системах прийнятними є значення $S_{11} \leq -10$ дБ і КСХН не більше 2.

Для збільшення дальності та стабільності приймання антена повинна мати коефіцієнт підсилення близько 12 дБі. Таке значення є компромісом між підсиленням і шириною діаграми спрямованості, оскільки надто вузький головний пелюсток ускладнює наведення антени на рухомий БПЛА.

Ще однією вимогою є формування колової поляризації. Вона зменшує вплив зміни просторового положення БПЛА та взаємної орієнтації передавальної і приймальної антен. Якість колової поляризації оцінюється за осьовим відношенням, цільове значення якого становить не більше 3 дБ у напрямку головного пелюстка.

Основні початкові вимоги до антенної системи наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Початкові вимоги до антенної системи

Параметр	Вимога
Призначення антени	приймання відеосигналу з БПЛА

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						6
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Робочий діапазон частот	6–7 ГГц
Тип антени	мікросмужкова антенна решітка
Тип поляризації	колова
Коефіцієнт підсилення	близько 12 дБі
Коефіцієнт відбиття S11	не більше –10 дБ у робочому діапазоні
КСХН	не більше 2
Осьове відношення	не більше 3 дБ у напрямку головного пелюстка
Вхідний опір	50 Ом
Тип живлення	мікросмужкова мережа живлення
Середовище моделювання	CST Studio Suite

Таким чином, для поставленої задачі доцільно використати мікросмужкову антенну решітку колової поляризації, яка забезпечує роботу в діапазоні 6–7 ГГц, спрямоване приймання, узгодження з трактом 50 Ом і коефіцієнт підсилення близько 12 дБі.

1.3 Аналіз частотних діапазонів для передавання відеосигналу

Для передавання відеосигналу з БПЛА можуть використовуватися різні частотні діапазони. Їх вибір впливає на дальність зв'язку, рівень втрат під час поширення радіохвиль, розміри антени, стійкість до завад і можливість забезпечення потрібної смуги пропускання.

Діапазон 2,4 ГГц має кращу здатність до поширення на відносно великі відстані, однак є сильно завантаженим через роботу Wi-Fi, Bluetooth та інших бездротових систем. Діапазон 5,8 ГГц широко використовується у FPV-системах і дозволяє застосовувати компактніші антени, але також може бути перевантаженим через велику кількість FPV-обладнання.

Для спеціалізованих систем приймання відеосигналу доцільним є діапазон 6–7 ГГц. Він дозволяє зменшити вплив обладнання, що працює в

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						7
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

поширених діапазонах 2,4 ГГц і 5,8 ГГц, а також реалізувати компактні мікро-смушкові випромінювачі. Для цього діапазону довжина хвилі у вільному просторі становить приблизно 50 мм на частоті 6 ГГц і 42,9 мм на частоті 7 ГГц. На центральній частоті 6,5 ГГц довжина хвилі становить приблизно 46,2 мм.

Водночас зі збільшенням частоти зростають втрати під час поширення електромагнітної хвилі [3]. Тому для роботи в діапазоні 6–7 ГГц доцільно використовувати спрямовану антену з достатнім коефіцієнтом підсилення.

Порівняння основних частотних діапазонів, які можуть використовуватися для передавання відеосигналу з БПЛА, наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння частотних діапазонів для передавання відеосигналу

Діапазон частот	Переваги	Недоліки	Доцільність використання
2,4 ГГц	краща дальність порівняно з вищими частотами; поширене обладнання	висока завантаженість діапазону; можливі завади від Wi-Fi, Bluetooth та інших систем	доцільний для окремих каналів зв'язку, але менш придатний за високого рівня завад
5,8 ГГц	компактніші антени; поширені FPV-рішення; достатня смуга для відеосигналу	більші втрати порівняно з 2,4 ГГц; можлива завантаженість через велику кількість FPV-обладнання	широко використовується у типових FPV-системах
6–7 ГГц	компактність антен; можливість використання менш завантаженої області спектра;	більші втрати поширення; вища вимогливість до прямої видимості та спрямованості антени	доцільний для спеціалізованих FPV-систем і наземних приймальних станцій

	придатність для мікросмушкових решіток		
--	--	--	--

З аналізу видно, що діапазон 6–7 ГГц є придатним для розробки наземної антенної системи приймання відеосигналу за умови використання спрямованої антени з достатнім коефіцієнтом підсилення. Тому в межах дипломної роботи обрано мікросмушкову антенну решітку колової поляризації для роботи в цьому діапазоні.

1.4 Огляд існуючих антен колової поляризації для FPV-систем

Для обґрунтування вибору конструкції було розглянуто існуючі антени колової поляризації, які застосовуються у FPV-системах і системах передавання відеосигналу. Основну увагу приділено спрямованим патч-антенам, оскільки вони використовуються на наземних приймальних станціях для збільшення дальності та стабільності приймання.

Першим аналогом є патч-антена Skif 14 dBi LHCP 4.9–6.0 GHz. Вона має ліву колову поляризацію, коефіцієнт підсилення 14 дБі та працює в діапазоні нижче основної смуги 6–7 ГГц [4].

Загальний вигляд антени наведено на рисунку 1.1.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						9
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

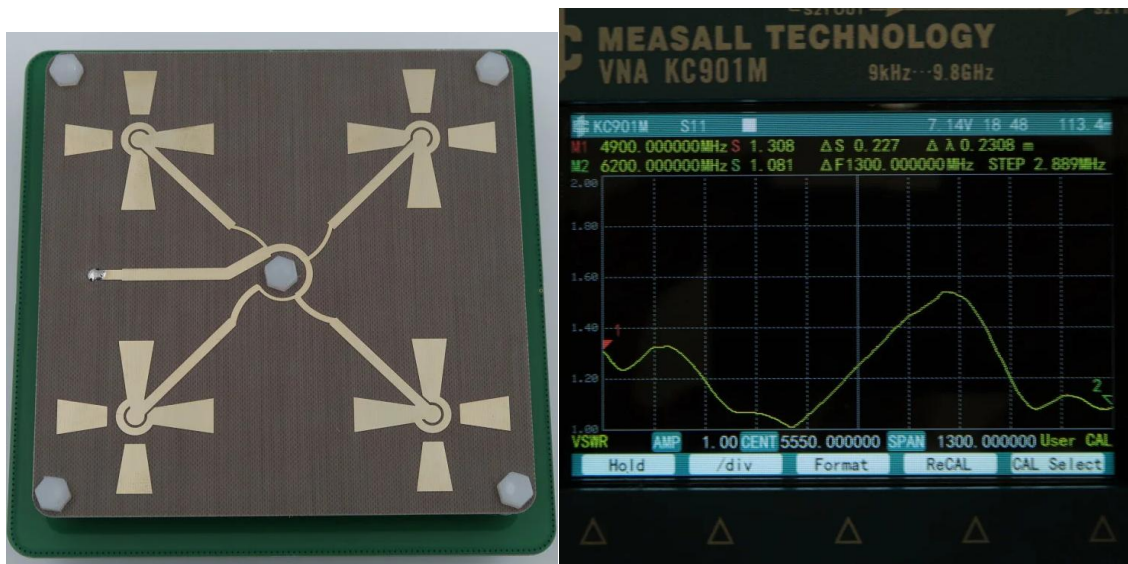


Рисунок 1.1 – Патч-антена Skif 14 dBi LHCP 4.9–6.0 GHz

Другим аналогом є патч-антена 6.2–7.5 GHz 14 dBi RHCP. Вона працює в діапазоні 6.2–7.5 ГГц, має праву колову поляризацію RHCP, коефіцієнт підсилення 14 дБі, вхідний опір 50 Ом, роз'єм SMA Female та КСХН не більше 1,5 [5]. Ця антена є близькою до теми дипломної роботи, оскільки перекриває значну частину діапазону 6–7 ГГц. Загальний вигляд антени наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Патч-антена 6.2–7.5 GHz 14 dBi RHCP

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис
10

Третім аналогом є патч-антена Skif 13,5 dBi RHCP 6.0–8.0 GHz. Вона має праву колову поляризацію RHCP, робочий діапазон 6.0–8.0 ГГц, коефіцієнт підсилення 13,5 дБі, роз'єм SMA-F та кут променя $30^\circ \times 30^\circ$ [6]. Цей зразок повністю перекриває смугу 6–7 ГГц, тому є одним із найближчих аналогів до розроблюваної антени. Загальний вигляд антени наведено на рисунку 1.3.

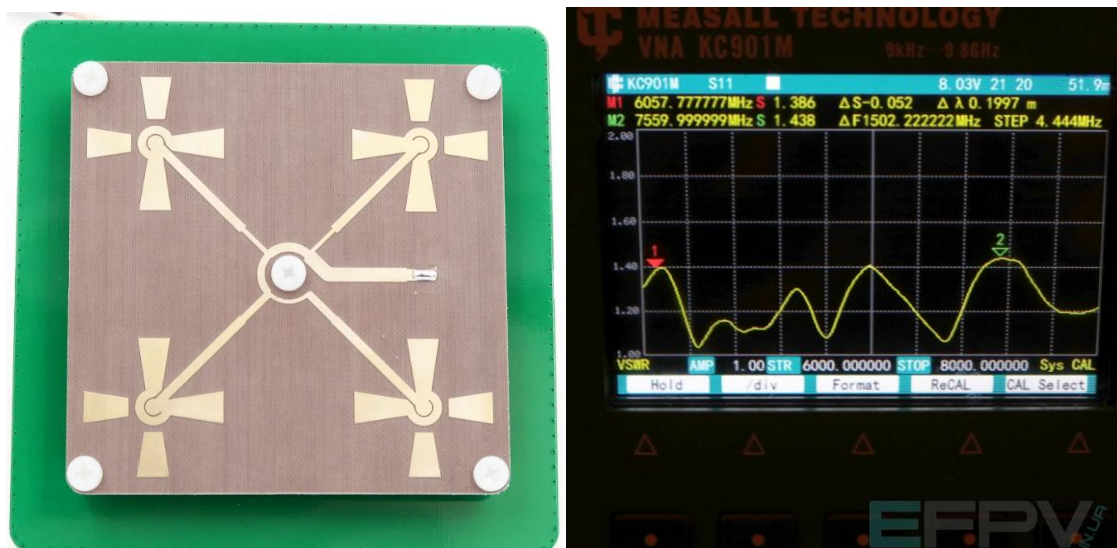


Рисунок 1.3 – Патч-антена Skif 13,5 dBi RHCP 6.0–8.0 GHz

Четвертим аналогом є патч-антена Skif 18,5 dBi RHCP 6.0–8.0 ГГц «Барвінок 67-R-19». Вона також працює в діапазоні 6.0–8.0 ГГц і має праву колову поляризацію RHCP. Її основною перевагою є високий коефіцієнт підсилення 18,5 дБі [7]. Водночас таке підсилення супроводжується звуженням діаграми спрямованості, що може ускладнювати супроводження рухомого БПЛА без поворотного механізму.

Загальний вигляд антени наведено на рисунку 1.4.

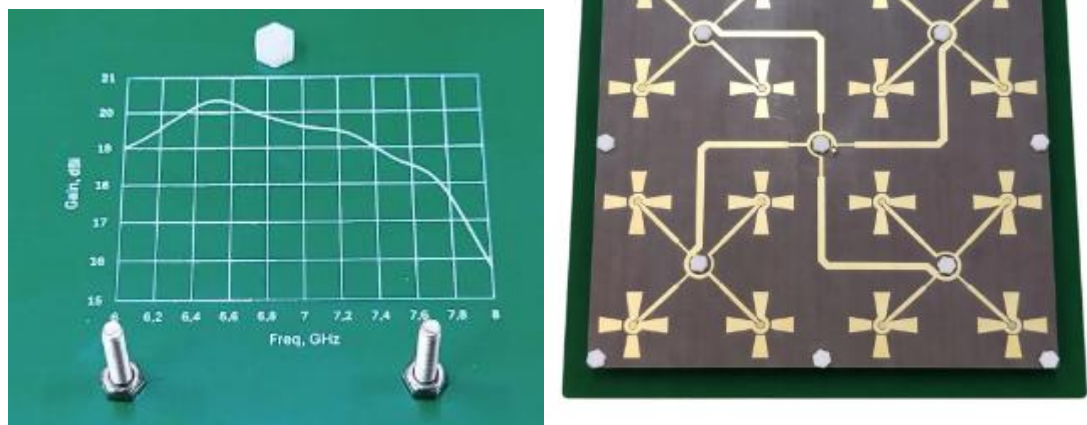


Рисунок 1.4 – Патч-антена Skif 18,5 dBi RHCP 6.0–8.0 ГГц «Барвінок 67-R-19»

П'ятим аналогом є широкосмугова антена Maple Wireless 4.85–6.3G 17 dBi RHCP. Вона має праву колову поляризацію RHCP, коефіцієнт підсилення 17 дБі, КСХН не більше 1,5 та спрямовану діаграму з кутом променя 15° у вертикальній площині та 35° у горизонтальній площині [8]. Ця антена перекриває частину діапазону поблизу 6 ГГц, однак не охоплює повністю смугу 6–7 ГГц. Загальний вигляд антени наведено на рисунку 1.5.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						12
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.5 – Широкопугова антена Maple Wireless 4.85–6.3G 17 dBi RHCP

Оснoвні характеристики розглянутих антен наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння характеристик існуючих антен колової поляризації для FPV-систем

Параметр	Skif 14 dBi LHCP	Патч 6.2–7.5 GHz 14 dBi RHCP	Skif 13,5 dBi RHCP	Skif 18,5 dBi RHCP	Maple Wireless 17 dBi RHCP
Робочий діапазон частот	4.9–6.0 ГГц	6.2–7.5 ГГц	6.0–8.0 ГГц	6.0–8.0 ГГц	4.85–6.3 ГГц
Коефіцієнт підсилення	14 дБі	14 дБі	13,5 дБі	18,5 дБі	17 дБі

Тип поляризації	LHCP	RHCP	RHCP	RHCP	RHCP
Ширина діаграми спрямованості	близько 29°	40° × 40°	30° × 30°	вузька спрямована ДС	15° / 35°
КСХН	≤ 1,5	≤ 1,5	не вказано	не вказано	≤ 1,5
Тип ВЧ-роз'єму	SMA-F	SMA-Female	SMA-F	SMA	SMA-K
Вага	не вказано	85 г	51 г	не вказано	123 г
Особливість	діапазон нижче 6 ГГц	близька до діапазону 6–7 ГГц	повністю перекриває 6–7 ГГц	високе підсилення	не перекриває повністю 6–7 ГГц
Джерело	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]

Примітка. Частина характеристик у відкритих джерелах може відрізнятися залежно від продавця або партії виробу, тому порівняння виконано за основними параметрами: частотним діапазоном, підсиленням, поляризацією та спрямованістю.

Порівняння показало, що найближчими до теми дипломної роботи є антени, які працюють у діапазонах 6.0–8.0 ГГц або 6.2–7.5 ГГц. Вони мають колову поляризацію та достатній коефіцієнт підсилення, однак готові рішення не завжди відповідають поставленим вимогам за шириною робочої смуги, діаграмою спрямованості або можливістю зміни геометрії.

Тому в межах дипломної роботи доцільно розробити власну мікросмужкову антенну решітку колової поляризації з робочим діапазоном 6–7 ГГц, вхідним опором 50 Ом, коефіцієнтом підсилення близько 12 дБі та можливістю оптимізації параметрів у CST Studio Suite.

1.5 Постановка задачі дипломної роботи

За результатами аналізу встановлено, що для приймання відеосигналу з БПЛА доцільно використовувати спрямовану антенну систему з коловою поляризацією, узгодженням із трактом 50 Ом і роботою в діапазоні 6–7 ГГц. Такий діапазон дозволяє реалізувати компактну мікросмужкову конструкцію, однак потребує достатнього коефіцієнта підсилення через зростання втрат поширення.

Готові комерційні антени колової поляризації не завжди повністю відповідають умовам поставленої задачі за робочою смугою, діаграмою спрямованості або можливістю оптимізації геометрії. Тому в межах дипломної роботи поставлено задачу розробити мікросмужкову антенну решітку колової поляризації для діапазону 6–7 ГГц.

Основними вимогами до антенної решітки є: вхідний опір 50 Ом, коефіцієнт підсилення близько 12 дБі, спрямована діаграма приймання, структура 2×2 та формування колової або наближеної до колової поляризації. Для перевірки характеристик передбачено побудову та оптимізацію моделі в CST Studio Suite.

У межах дипломної роботи необхідно виконати такі етапи:

- визначити вимоги до антенної решітки;
- обрати робочу частоту та матеріал підкладки;
- розрахувати параметри мікросмужкового випромінювача;

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						15
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробити структуру решітки 2×2 і мережу живлення;
- побудувати модель у CST Studio Suite;
- виконати моделювання, оптимізацію та аналіз характеристик.

Вихідні вимоги до розроблюваної антенної решітки, її призначення, технічні характеристики, умови експлуатації та етапи виконання роботи наведено в технічному завданні в додатку А.

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто особливості приймання відеосигналу з БПЛА та визначено основні вимоги до антенної системи. Встановлено, що для FPV-зв'язку важливими є стабільність відеоканалу, достатній рівень прийнятого сигналу, стійкість до завад і зменшення впливу зміни просторового положення БПЛА.

Показано, що для зменшення поляризаційних втрат і впливу частини відбитих сигналів доцільно використовувати антени колової поляризації. Для роботи в діапазоні 6–7 ГГц необхідна спрямована антена з достатнім коефіцієнтом підсилення, оскільки зі збільшенням частоти зростають втрати поширення.

Огляд існуючих патч-антен показав, що готові рішення не завжди повністю відповідають поставленим вимогам за частотним діапазоном, шириною діаграми спрямованості або можливістю зміни конструкції. Тому для подальшої розробки обрано мікросмужкову антенну решітку колової поляризації діапазону 6–7 ГГц з коефіцієнтом підсилення близько 12 дБі та можливістю оптимізації в CST Studio Suite.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						16
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ КОЛОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

2.1 Класифікація антен та основні параметри антенних систем

Антенна є основним елементом радіотехнічної системи, який забезпечує перетворення електричних коливань в електромагнітні хвилі під час передавання сигналу та зворотне перетворення під час приймання. Від характеристик антени залежать дальність зв'язку, рівень прийнятого сигналу, завадостійкість і просторові властивості системи [2].

Антени класифікують за призначенням, конструкцією, типом поляризації, робочою смугою, діапазоном хвиль, спрямованими властивостями та місцем встановлення. Основні класифікаційні ознаки наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація антен

Класифікаційна ознака	Основні типи антен
За функціональним призначенням	передавальні, приймальні, приймально-передавальні
За конструкцією	лінійні, апертурні, мікросмужкові, антенні решітки
За типом поляризації	з лінійною, коловою та еліптичною поляризацією
За шириною робочої смуги	вузькосмугові, широкосмугові, широкодіапазонні
За діапазоном хвиль	метрові, дециметрові, сантиметрові, міліметрові
За спрямованими властивостями	всеспрямовані, слабкоспрямовані, спрямовані
За місцем встановлення	наземні, бортові

За призначенням системи	зв'язкові, навігаційні, радіолокаційні, телеметричні
-------------------------	--

У цій роботі основну увагу приділено мікросмужковим антенам та антенним решіткам. Мікросмужкові антени мають плоску конструкцію, малу масу та можуть виготовлятися за друкованою технологією. Антенні решітки дозволяють підвищити коефіцієнт підсилення та сформувати потрібну діаграму спрямованості.

Для оцінки роботи антени використовують робочий діапазон частот, вхідний опір, коефіцієнт відбиття S_{11} , КСХН, коефіцієнт підсилення, діаграму спрямованості та поляризаційні характеристики. Для розроблюваної антенної решітки робочим є діапазон 6–7 ГГц, а вхідний опір має бути наближений до стандартного значення 50 Ом.

Якість узгодження антени з фідерним трактом оцінюють за S_{11} та КСХН. У практичних антенних системах прийнятними вважають значення $S_{11} \leq -10$ дБ і КСХН не більше 2. Коефіцієнт підсилення та діаграма спрямованості визначають здатність антени приймати сигнал у потрібному напрямку, що особливо важливо для наземної станції приймання відеосигналу з БПЛА.

Для антен колової поляризації додатково оцінюють осьове відношення AR. Воно показує, наскільки поляризація наближена до ідеальної колової. Зазвичай для якісної колової поляризації орієнтуються на значення AR не більше 3 дБ у напрямку головного пелюстка.

Отже, під час проєктування антенної решітки необхідно враховувати узгодження, підсилення, діаграму спрямованості та поляризаційні характеристики. Саме ці параметри надалі використовуються для оцінки розробленої мікросмужкової антенної решітки.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						18
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Мікросмушкові антени та їхні особливості

Мікросмушкові антени належать до друкованих антенних структур і широко використовуються в сучасних радіотехнічних системах. В англomовній літературі такі антени часто називають patch antennas, тобто патч-антенами. У цій роботі використовується термін «мікросмушкова антена» [10].

Конструктивно мікросмушкова антена складається з металевого випромінювача, діелектричної підкладки та металізованої площини заземлення. Випромінювач розміщується на верхній поверхні підкладки, а нижній металевий шар виконує роль екрана. Випромінювання формується переважно за рахунок крайових електромагнітних полів на межах патча.

Загальна структура мікросмушкової антени та система координат наведені на рисунку 2.1.

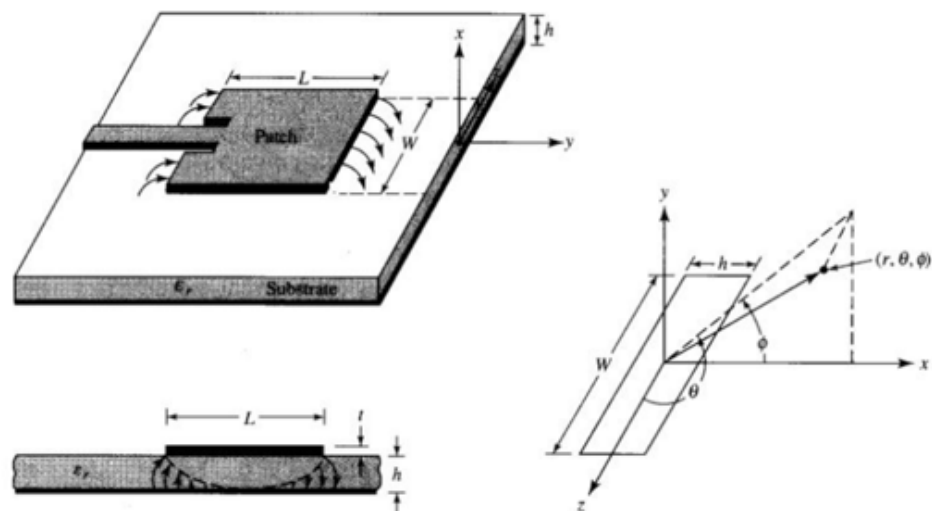


Рисунок 2.1 – Мікросмушкова антена та система координат

Основними елементами мікросмушкової антени є:

– випромінюючий елемент, або патч;

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		19

- діелектрична підкладка;
- металізована площа заземлення;
- фідерна лінія або інший елемент живлення;
- вхідний високочастотний роз'єм або порт живлення.

Форма випромінюючого елемента може бути різною. Найчастіше використовують прямокутні, квадратні, круглі, еліптичні, трикутні або складніші фігурні патчі. Прямокутні та круглі патчі є зручними для аналітичного розрахунку та моделювання, тому вони широко застосовуються в антенній техніці. Водночас зміна форми випромінювача, наприклад за допомогою зрізів, щілин або додаткових елементів, дозволяє впливати на резонансну частоту, узгодження та поляризаційні характеристики антени [11].

Основні форми мікросмужкових випромінювачів наведено на рисунку 2.2.

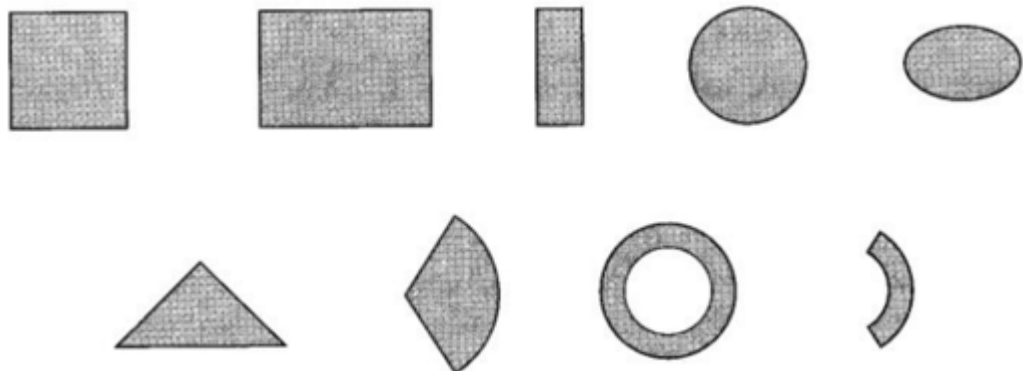


Рисунок 2.2 – Репрезентативні форми елементів мікросмужкових патчів

Перевагами мікросмужкових антен є компактність, мала товщина, невелика маса та технологічність виготовлення. Такі антени можуть бути реалізовані за технологією друкованих плат і легко поєднуються з мікросмужковими лініями живлення. Це робить їх зручними для створення антенних решіток.

Основними недоліками мікросмужкових антен є відносно вузька робоча смуга та обмежений коефіцієнт підсилення одиночного випромінювача. Тому для підвищення підсилення доцільно використовувати не один патч, а решітку з кількох випромінюючих елементів.

На характеристики мікросмужкової антени впливають форма і розміри випромінювача, товщина підкладки, відносна діелектрична проникність, втрати в матеріалі, розміри заземлюючої площини, спосіб живлення та параметри фідерної лінії. Вибір підкладки є важливим, оскільки матеріал визначає розміри антени, ефективність випромінювання та ширину робочої смуги.

Для формування колової поляризації в мікросмужкових антенах використовують спеціальну геометрію випромінювача, зрізані кути, щілини, подвійне живлення або фазозсувні мережі. У цій роботі застосовується патч зі зрізаними кутами, що дозволяє збудити дві ортогональні моди та наблизити поляризацію до колової.

Отже, мікросмужкова технологія є доцільною для розробки антенної решітки діапазону 6–7 ГГц. Вона забезпечує компактну плоску конструкцію, можливість інтеграції випромінювачів із мережею живлення та подальшу оптимізацію геометрії в CST Studio Suite.

2.3 Способи живлення мікросмужкових випромінювачів

Вибір способу живлення мікросмужкового випромінювача впливає на вхідний опір, узгодження, робочу смугу, поляризаційні характеристики та складність виготовлення антени.

Для мікросмужкових антен найчастіше використовують живлення мікросмужковою лінією, коаксіальне зондове живлення, апертурний зв'язок та електромагнітний зв'язок [11]. Основні переваги й недоліки цих способів наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння способів живлення мікросмужкових антен

Спосіб живлення	Переваги	Недоліки	Доцільність використання
-----------------	----------	----------	--------------------------

Мікросмушкова лінія	проста планарна конструкція; зручність виготовлення; легка інтеграція з мережею живлення	можливе паразитне випромінювання фідерної лінії; смуга	доцільна для друкованих антенних решіток
Коаксіальний зонд	можливість вибору точки живлення; відносно просте узгодження	непланарність; індуктивність зонда; складніше виготовлення на високих частотах	зручний для одиначних патчів
Апертурний зв'язок	ізоляція фідерної мережі від випромінювача; можливість розширення смуги	складна багатошарова конструкція; підвищені вимоги до виготовлення	доцільний для складніших широкосмугових антен
Електромагнітний зв'язок	відсутність прямого контакту; можливість ширшої смуги	складна багатошарова структура; складність налаштування	доцільний для спеціалізованих конструкцій

Для розроблюваної антенної решітки обрано мікросмушкову мережу живлення з одним коаксіальним входом. Такий варіант забезпечує підключення до стандартного 50-омного тракту, планарність конструкції та розподіл сигналу між чотирма випромінювачами решітки 2×2 .

Отже, мікросмушкова фідерна мережа є найбільш доцільною для цієї роботи, оскільки вона легко інтегрується з патчами, дозволяє реалізувати потрібні хвильові опори ліній і є зручною для оптимізації в CST Studio Suite.

2.4 Принцип формування колової поляризації

Поляризація характеризує напрям зміни вектора електричного поля електромагнітної хвилі. Розрізняють лінійну, колову та еліптичну поляризацію. У

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						22
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

разі колової поляризації вектор електричного поля обертається в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. Залежно від напрямку обертання розрізняють праву колову поляризацію RHCP та ліву колову поляризацію LHCP [2].

Колова поляризація є доцільною для систем зв'язку з БПЛА, оскільки під час польоту літальний апарат змінює просторове положення. У таких умовах антени лінійної поляризації можуть мати додаткові поляризаційні втрати, тоді як колова поляризація зменшує залежність рівня сигналу від взаємної орієнтації передавальної та приймальної антен.

Якість колової поляризації оцінюють за осьовим відношенням AR. Для ідеальної колової поляризації AR дорівнює 0 дБ. На практиці якісною вважають колову поляризацію, для якої AR не перевищує 3 дБ у напрямку головного пелюстка діаграми спрямованості [2].

У мікросмушкових антенах колову поляризацію формують шляхом збудження двох ортогональних мод з близькими амплітудами та фазовим зсувом 90° . Для цього можуть використовуватися зрізані кути, щілини, подвійне живлення або фазозсувні мережі [11].

У цій роботі використовується мікросмушковий патч зі зрізаними кутами. Зрізання кутів порушує симетрію квадратного випромінювача та створює умови для збудження двох близьких за частотою ортогональних мод. За правильного вибору геометрії це дозволяє отримати колову або наближену до колової поляризацію.

Отже, застосування патчів зі зрізаними кутами дозволяє реалізувати колову поляризацію без ускладнення фідерної мережі подвійним живленням. Якість поляризації надалі оцінюється за осьовим відношенням у діапазоні 6–7 ГГц.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						23
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Особливості побудови антенних решіток

Антенна решітка — це система з кількох випромінюючих елементів, розміщених за певним законом і збуджених із заданими амплітудами та фазами. Порівняно з одиночним випромінювачем решітка дозволяє підвищити коефіцієнт підсилення та сформувати потрібну діаграму спрямованості [2].

Принцип роботи решітки ґрунтується на додаванні електромагнітних полів окремих елементів. У напрямках синфазного додавання формується головний пелюсток, а в інших напрямках рівень випромінювання зменшується. Тому характеристики решітки залежать від кількості елементів, їхнього розміщення, відстані між ними та фазового збудження.

У цій роботі обрано плоску мікросмужкову решітку 2×2 . Така структура є компромісом між підвищенням коефіцієнта підсилення, компактністю конструкції та складністю фідерної мережі. Вона дозволяє розмістити чотири випромінювачі й мережу живлення на одній діелектричній підкладці.

Важливим параметром є відстань між елементами. Занадто мала відстань збільшує взаємний електромагнітний зв'язок, а занадто велика може призвести до появи додаткових пелюсток у діаграмі спрямованості. У практичних решітках відстань між сусідніми елементами часто обирають близькою до половини довжини хвилі [11].

Для діапазону 6–7 ГГц довжина хвилі у вільному просторі становить приблизно 42,9–50 мм. Остаточна відстань між елементами визначається розрахунком і уточнюється під час моделювання в CST Studio Suite.

Для роботи решітки важливо забезпечити потрібний амплітудно-фазовий розподіл. У цій роботі сигнал подається від одного вхідного порту та розподіляється між чотирма патчами мікросмужковою фідерною мережею. Вона повинна забезпечувати узгодження з трактом 50 Ом і зберігати потрібні фазові співвідношення.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						24
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, решітка 2×2 є доцільним варіантом для розроблюваної антени, оскільки дозволяє підвищити підсилення порівняно з одиночним патчем, зберегти компактність конструкції та реалізувати живлення в одній друкованій структурі.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розглянуто основні теоретичні положення, необхідні для проектування мікросмужкової антенної решітки колової поляризації. Визначено основні параметри антенної системи: S_{11} , КСХН, вхідний опір, коефіцієнт підсилення, діаграму спрямованості та осьове відношення.

Показано, що мікросмужкова технологія є доцільною для реалізації антени діапазону 6–7 ГГц, оскільки забезпечує компактну плоску конструкцію та можливість інтеграції випромінювачів із мережею живлення. Для формування колової поляризації обрано патчі зі зрізаними кутами.

Для подальшої розробки обрано мікросмужкову антенну решітку 2×2 з корпоративною мережею живлення та одним коаксіальним входом. Таке рішення дозволяє підвищити коефіцієнт підсилення, забезпечити спрямоване приймання та виконати подальшу оптимізацію моделі в CST Studio Suite.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						25
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРАХУНОК МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ ДІАПАЗОНУ 6–7 ГГц

3.1 Вибір початкових вимог до антенної решітки

Розроблювана антенна решітка призначена для роботи в діапазоні частот 6–7 ГГц. Для початкового розрахунку необхідно визначити центральну частоту, довжину хвилі, тип конструкції, вимоги до узгодження, підсилення та поляризації.

Центральну частоту визначимо як середнє значення між нижньою та верхньою межами робочого діапазону:

$$f^0 = \frac{f_{\min} + f_{\max}}{2},$$

де $f_{\min}$ — нижня межа робочого діапазону;

$f_{\max}$ — верхня межа робочого діапазону.

Підставимо числові значення:

$$f^0 = \frac{6 + 7}{2} = 6,5 \text{ ГГц.}$$

Отже, центральною частотою для початкового розрахунку приймається $f_0 = 6,5 \text{ ГГц}$.

Довжина хвилі у вільному просторі розраховується за формулою:

$$\lambda^0 = \frac{c}{f^0},$$

де c — швидкість поширення електромагнітної хвилі у вільному просторі, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$;

f_0 — центральна частота, Гц.

Для частоти $f_0 = 6,5 \text{ ГГц}$:

$$\lambda^0 = 3 \cdot \frac{10^8}{6,5} \cdot 10^9 = 0,04615 \text{ м} = 46,15 \text{ мм.}$$

Отже, довжина хвилі у вільному просторі на центральній частоті 6,5 ГГц становить приблизно 46,15 мм.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						26
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Для нижньої межі робочого діапазону, тобто для частоти 6 ГГц, довжина хвилі становить:

$$\lambda_{6\text{ГГц}} = 3 \cdot \frac{10^8}{6} \cdot 10^9 = 0,05 \text{ м} = 50 \text{ мм.}$$

Для верхньої межі робочого діапазону, тобто для частоти 7 ГГц:

$$\lambda_{7\text{ГГц}} = 3 \cdot \frac{10^8}{7} \cdot 10^9 = 0,04286 \text{ м} = 42,86 \text{ мм.}$$

Таким чином, у діапазоні 6–7 ГГц довжина хвилі у вільному просторі змінюється приблизно від 50 мм до 42,86 мм. Такі значення дозволяють реалізувати компактні мікросмужкові випромінювачі та розмістити декілька елементів антенної решітки на одній діелектричній підкладці.

Отже, у діапазоні 6–7 ГГц довжина хвилі змінюється приблизно від 50 мм до 42,86 мм. Це дозволяє реалізувати компактні мікросмужкові випромінювачі та розмістити решітку 2×2 на одній діелектричній підкладці.

Початкові вимоги до антенної решітки наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Початкові вимоги до антенної решітки

Параметр	Значення
Призначення антени	приймання відеосигналу з БПЛА
Робочий діапазон частот	6–7 ГГц
Центральна частота	6,5 ГГц
Тип антени	мікросмужкова антенна решітка
Конфігурація решітки	2×2
Тип поляризації	колова
Вхідний опір	50 Ом
Коефіцієнт підсилення	близько 12 дБі
Коефіцієнт відбиття S11	не більше –10 дБ
КСХН	не більше 2
Осьове відношення AR	цільове значення не більше 3 дБ
Тип живлення	мікросмужкова мережа живлення
Середовище моделювання	CST Studio Suite

Таким чином, для подальшого розрахунку прийнято центральну частоту 6,5 ГГц, довжину хвилі 46,15 мм та структуру мікросмужкової антенної решітки 2×2 з коловою поляризацією.

3.2 Вибір робочої частоти та матеріалу підкладки

Робочою частотою для початкового розрахунку прийнято $f_0 = 6,5$ ГГц, що відповідає середині заданого діапазону 6–7 ГГц. На цій частоті виконуються основні розрахунки геометрії мікросмужкового випромінювача, відстані між елементами решітки та параметрів фідерної мережі.

Важливим етапом проектування є вибір діелектричної підкладки. Її параметри впливають на розміри патча, резонансну частоту, ефективність випромінювання, втрати та смугу узгодження. Для діапазону 6–7 ГГц доцільно використовувати високочастотні матеріали з малими діелектричними втратами. Звичайний FR-4 для такого діапазону є небажаним через нестабільність параметрів і підвищені втрати.

На початковому етапі як можливий матеріал підкладки розглядався Rogers RO4350B, однак для подальшого моделювання було обрано ZYF-255DA. Це високочастотний PTFE-ламінат із відносною діелектричною проникністю $D_k = 2,55 \pm 0,04$ [13]. У моделі CST Studio Suite прийнято $\epsilon_r = 2,55$.

Матеріал із такою діелектричною проникністю є придатним для мікросмужкової антенної решітки діапазону 6–7 ГГц, оскільки забезпечує прийнятні розміри випромінювача та достатню ефективність випромінювання. Товщина початкової підкладки прийнята $h = 0,762$ мм, товщина металізації — $t = 0,035$ мм. Металеві частини конструкції в моделі задані як ідеальний електричний провідник PEC.

Початкові параметри для розрахунку та моделювання наведено в таблиці 3.2.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						28
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 – Початкові параметри для розрахунку антенної решітки

Параметр	Позначення	Значення
Нижня межа робочого діапазону	$f_{\min}$	6 ГГц
Верхня межа робочого діапазону	$f_{\max}$	7 ГГц
Центральна частота	f_0	6,5 ГГц
Довжина хвилі на частоті 6 ГГц	$\lambda_{6\text{ГГц}}$	50 мм
Довжина хвилі на частоті 6,5 ГГц	λ_0	46,15 мм
Довжина хвилі на частоті 7 ГГц	$\lambda_{7\text{ГГц}}$	42,86 мм
Матеріал підкладки	—	ZYF-255DA
Відносна діелектрична проникність	ϵ_r	2,55
Магнітна проникність	μ_r	1
Тангенс кута діелектричних втрат у моделі CST	$\text{tg}\delta$	0,00018
Частота задання $\text{tg}\delta$	—	6,5 ГГц
Частотний інтервал моделювання матеріалу	—	5,5–7,5 ГГц
Товщина підкладки	h	0,762 мм
Товщина металізації	t	0,035 мм
Матеріал металізації в моделі	—	PEC
Вхідний опір тракту	Z_0	50 Ом

Параметри обраної підкладки ZYF-255DA ($\epsilon_r = 2,55$, $\text{tg}\delta = 0,00018$ на частоті 10 ГГц) підтверджено технічною документацією виробника [13, 17].

3.3 Розрахунок мікросмужкового випромінювача

Після вибору робочої частоти та матеріалу діелектричної підкладки необхідно визначити початкові геометричні параметри мікросмужкового випромінювача. У розроблюваній антенній решітці випромінюючий елемент реалізовано у вигляді мікросмужкового патча зі зрізаними кутами. Така геометрія використовується для створення умов формування колової поляризації.

Початковий розрахунок виконується для центральної частоти робочого діапазону:

$$f_0 = 6,5 \text{ ГГц.}$$

Параметри діелектричної підкладки:

$$\epsilon_r = 2,55;$$

$$h = 0,762 \text{ мм};$$

$$\text{tg}\delta = 0,00018.$$

Для початкової оцінки розмірів мікросмужкового випромінювача використано наближену методику розрахунку прямокутного мікросмужкового патча.

Ширина патча визначається за формулою [11]:

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}},$$

де W — ширина випромінювача, м;

c — швидкість поширення електромагнітної хвилі у вільному просторі, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с;

f_0 — центральна частота, Гц;

ϵ_r — відносна діелектрична проникність підкладки.

Підставимо числові значення:

$$W = 3 \cdot \frac{10^8}{2 \cdot 6,5 \cdot 10^9} \cdot \sqrt{\frac{2}{2,55 + 1}}.$$

Спочатку визначимо частотну частину виразу:

$$3 \cdot \frac{10^8}{2 \cdot 6,5 \cdot 10^9} = 0,02308 \text{ м} = 23,08 \text{ мм.}$$

Далі визначимо діелектричний множник:

$$\sqrt{\frac{2}{2,55 + 1}} = \sqrt{\frac{2}{3,55}} = \sqrt{0,5634} = 0,7506.$$

Тоді початкова ширина патча становить:

$$W = 23,08 \cdot 0,7506 = 17,32 \text{ мм.}$$

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						30
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, початкове розрахункове значення ширини мікросмужкового випромінювача становить приблизно 17,32 мм.

Для подальшого розрахунку необхідно визначити ефективну діелектричну проникність. Вона враховує те, що електромагнітне поле мікросмужкової структури поширюється не лише в діелектричній підкладці, а й частково в повітрі. Ефективна діелектрична проникність визначається за формулою [11]:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}}$$

Підставимо числові значення:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2,55 + 1}{2} + \frac{2,55 - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{0,762}{17,32}}}$$

Обчислимо першу частину:

$$\frac{2,55 + 1}{2} = \frac{3,55}{2} = 1,775.$$

Обчислимо другу частину:

$$\frac{2,55 - 1}{2} = \frac{1,55}{2} = 0,775.$$

Визначимо відношення:

$$\frac{12h}{W} = 12 \cdot \frac{0,762}{17,32} = \frac{9,144}{17,32} = 0,528.$$

Тоді:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + 0,528}} = \frac{1}{\sqrt{1,528}} = \frac{1}{1,236} = 0,809.$$

Друга частина формули дорівнює:

$$0,775 \cdot 0,809 = 0,627.$$

Отже:

$$\varepsilon_{eff} = 1,775 + 0,627 = 2,402.$$

Ефективна діелектрична проникність становить:

$$\varepsilon_{eff} \approx 2,40.$$

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		31

Ефективна довжина мікросмужкового випромінювача визначається за формулою:

$$L_{eff} = \frac{c}{2 \cdot f^0 \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

Підставимо числові значення:

$$L_{eff} = 3 \cdot \frac{10^8}{2 \cdot 6,5 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{2,402}}$$

Оскільки:

$$\sqrt{2,402} = 1,550,$$

то:

$$L_{eff} = 3 \cdot \frac{10^8}{13 \cdot 10^9 \cdot 1,550} = 3 \cdot \frac{10^8}{20,15} \cdot 10^9 = 0,01489 \text{ м.}$$

Отже:

$$L_{eff} = 14,89 \text{ мм.}$$

Під час роботи мікросмужкового патча електромагнітне поле виходить за межі фізичних країв випромінювача. Через це електрична довжина патча є більшою за його фізичну довжину. Для врахування крайових ефектів використовується поправка ΔL :

$$\Delta L = 0,412h \cdot \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)}$$

Спочатку визначимо відношення:

$$\frac{W}{h} = \frac{17,32}{0,762} = 22,73.$$

Підставимо значення у формулу:

$$\Delta L = 0,412 \cdot 0,762 \cdot \frac{(2,402 + 0,3)(22,73 + 0,264)}{(2,402 - 0,258)(22,73 + 0,8)}$$

Обчислимо складові:

$$2,402 + 0,3 = 2,702;$$

$$22,73 + 0,264 = 22,994;$$

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						32
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

$$2,402 - 0,258 = 2,144;$$

$$22,73 + 0,8 = 23,53.$$

Тоді:

$$\Delta L = 0,314 \cdot \frac{2,702 \cdot 22,994}{2,144 \cdot 23,53}.$$

Обчислимо чисельник і знаменник:

$$2,702 \cdot 22,994 = 62,13;$$

$$2,144 \cdot 23,53 = 50,45.$$

Тоді:

$$\Delta L = 0,314 \cdot \frac{62,13}{50,45} = 0,314 \cdot 1,231 = 0,387 \text{ мм.}$$

Фізична довжина патча визначається як:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L.$$

Підставимо числові значення:

$$L = 14,89 - 2 \cdot 0,387 = 14,89 - 0,774 = 14,116 \text{ мм.}$$

Отже, фізична довжина патча за початковим розрахунком становить:

$$L \approx 14,12 \text{ мм.}$$

За результатами початкового аналітичного розрахунку отримано такі орієнтовні розміри прямокутного мікросмужкового випромінювача:

$$W \approx 17,32 \text{ мм;}$$

$$L \approx 14,12 \text{ мм.}$$

Оскільки в роботі використовується не класичний прямокутний патч, а випромінювач зі зрізаними кутами для формування колової поляризації, отримані значення було використано як початкову оцінку. Остаточні розміри випромінювача були уточнені під час побудови моделі в CST Studio Suite з урахуванням необхідності роботи в діапазоні 6–7 ГГц, формування колової поляризації та узгодження з мікросмужковою мережею живлення.

У моделі CST Studio Suite прийнято квадратний випромінюючий елемент із характерним розміром:

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						33
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\text{patch}} = 14,761 \text{ мм.}$$

Це значення близьке до розрахованої довжини патча та відповідає вимозі компактності випромінюючого елемента для діапазону 6–7 ГГц. Використання квадратної форми патча є зручним для формування двох ортогональних мод, необхідних для отримання колової поляризації.

Для створення умов формування колової поляризації у випромінювачі виконано зрізи кутів. Розмір зрізу в моделі становить:

$$\text{cut} = 3,481 \text{ мм.}$$

Зрізання кутів порушує геометричну симетрію квадратного патча та дозволяє збудити дві ортогональні моди з близькими резонансними частотами. За правильного підбору розміру зрізу між цими модами утворюється фазовий зсув, близький до 90° , що є необхідною умовою формування колової поляризації [11].

Відносний розмір зрізу можна оцінити як відношення cut до розміру патча:

$$\frac{\text{cut}}{W_{\text{patch}}} = \frac{3,481}{14,761} = 0,236.$$

Отже, розмір зрізу становить приблизно 23,6 % від характерного розміру патча. Це значення було прийняте як параметр моделі та надалі може уточнюватися під час параметричної оптимізації для покращення осьового відношення й узгодження антени.

Остаточні геометричні параметри випромінюючого елемента, використані в моделі CST Studio Suite, наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Геометричні параметри мікросмушкового випромінювача

Параметр	Позначення	Значення
Центральна частота	f_0	6,5 ГГц
Матеріал підкладки	—	ZYF-255DA
Відносна діелектрична проникність	ϵ_r	2,55
Товщина підкладки	h	0,762 мм

Розрахункова ширина прямокутного патча	W	17,32 мм
Ефективна діелектрична проникність	ϵ_{eff}	2,40
Ефективна довжина патча	L_{eff}	14,89 мм
Поправка на крайові поля	ΔL	0,387 мм
Розрахункова фізична довжина патча	L	14,12 мм
Прийнятий розмір патча в CST	W_patch	14,761 мм
Розмір зрізу кута	cut	3,481 мм
Відносний розмір зрізу	cut / W_patch	0,236

Таким чином, початковий аналітичний розрахунок дозволив визначити орієнтовні розміри мікросмужкового випромінювача для центральної частоти 6,5 ГГц. Отримані значення були використані як основа для побудови моделі в CST Studio Suite. Остаточна геометрія випромінювача була прийнята з урахуванням необхідності формування колової поляризації та подальшого узгодження всієї антенної решітки з мікросмужковою мережею живлення.

3.4 Розрахунок структури антенної решітки та відстані між елементами

Після визначення параметрів одиночного мікросмужкового випромінювача необхідно обрати структуру антенної решітки та відстань між її елементами. Оскільки заданий коефіцієнт підсилення антенної системи має становити близько 12 дБі, використання лише одного мікросмужкового патча є недостатнім. Для підвищення підсилення та формування спрямованої діаграми приймання в роботі використано мікросмужкову антенну решітку.

У межах дипломної роботи обрано плоску решітку конфігурації 2×2. Вона містить чотири однакові випромінюючі елементи, розміщені у вузлах квадратної сітки. Така структура є компромісом між підвищенням підсилення, компактністю конструкції та складністю мікросмужкової мережі живлення.

Теоретичний приріст підсилення решітки за рахунок збільшення кількості елементів можна оцінити за формулою:

$$G_{\text{array}} \approx G_{\text{element}} + 10 \lg N,$$

де G_{array} — коефіцієнт підсилення антенної решітки;

G_{element} — коефіцієнт підсилення одного випромінюючого елемента;

N — кількість елементів решітки.

Для решітки 2×2 кількість елементів становить:

$$N = 4.$$

Тоді приріст підсилення відносно одиночного елемента дорівнює:

$$10 \lg 4 = 6,02 \text{ дБ.}$$

Отже, у теоретичному випадку чотириелементна решітка може забезпечити приблизно на 6 дБ більше підсилення, ніж одиночний випромінювач. У реальній конструкції це значення може бути меншим через втрати в підкладці, фідерній мережі, взаємний вплив елементів та неідеальне узгодження.

Важливим параметром решітки є відстань між сусідніми випромінювачами. Вона впливає на коефіцієнт підсилення, форму діаграми спрямованості, рівень бічних пелюсток і взаємний електромагнітний зв'язок. Для початкової оцінки міжелементної відстані часто використовують значення, близьке до половини довжини хвилі у вільному просторі [2, 11].

На центральній частоті $f_0 = 6,5$ ГГц довжина хвилі становить:

$$\lambda_0 = 46,15 \text{ мм.}$$

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						36
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді половина довжини хвилі дорівнює:

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{46,15}{2} = 23,08 \text{ мм.}$$

У моделі CST Studio Suite відстань між елементами решітки задано параметром:

$$d_{array} = 25,889 \text{ мм.}$$

Відносно довжини хвилі на центральній частоті це становить:

$$\frac{d_{array}}{\lambda_0} = \frac{25,889}{46,15} = 0,561.$$

Отже, міжелементна відстань у моделі становить приблизно:

$$d_{array} \approx 0,56\lambda_0.$$

Отже, міжелементна відстань становить приблизно $0,56\lambda_0$, що є близьким до половини довжини хвилі та прийнятним для плоскої мікросмужкової решітки.

На межах робочого діапазону відносна відстань становить:

$$\frac{d_{array}}{\lambda_6} = \frac{25,889}{50} = 0,518.$$

$$\frac{d_{array}}{\lambda_7} = \frac{25,889}{42,86} = 0,604.$$

Отже, у межах робочого діапазону 6–7 ГГц відстань між елементами змінюється відносно довжини хвилі приблизно від $0,52\lambda$ до $0,60\lambda$. Це підтверджує, що обране значення d_{array} є допустимим для побудови антенної решітки в заданому частотному діапазоні.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						37
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

У моделі антенної решітки чотири випромінюючі елементи розміщено симетрично відносно центра координат. Центри патчів можна задати координатами:

$$x = \pm \frac{d_{array}}{2};$$

$$y = \pm \frac{d_{array}}{2}.$$

Оскільки:

$$\frac{d_{array}}{2} = \frac{25,889}{2} = 12,945 \text{ мм},$$

координати центрів чотирьох елементів становлять:

перший елемент: $x = -12,945 \text{ мм}$, $y = 12,945 \text{ мм}$;

другий елемент: $x = 12,945 \text{ мм}$, $y = 12,945 \text{ мм}$;

третій елемент: $x = -12,945 \text{ мм}$, $y = -12,945 \text{ мм}$;

четвертий елемент: $x = 12,945 \text{ мм}$, $y = -12,945 \text{ мм}$.

Таке симетричне розташування дозволяє сформувати головний пелюсток діаграми спрямованості поблизу нормалі до площини антени та спрощує побудову фідерної мережі.

Основні параметри структури антенної решітки наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри структури антенної решітки

Параметр	Позначення	Значення
Тип антенної решітки	—	плоска мікросмужкова

Конфігурація решітки	—	2×2
Кількість випромінюючих елементів	N	4
Центральна частота	f_0	6,5 ГГц
Довжина хвилі на частоті 6,5 ГГц	λ_0	46,15 мм
Половина довжини хвилі	$\lambda_0 / 2$	23,08 мм
Прийнята відстань між елементами	d_{array}	25,889 мм
Відносна відстань на 6 ГГц	d_{array} / λ_6	0,518
Відносна відстань на 6,5 ГГц	d_{array} / λ_0	0,561
Відносна відстань на 7 ГГц	d_{array} / λ_7	0,604
Координати центрів елементів	—	$\pm 12,945$ мм по осях X та Y

Таким чином, для розроблюваної антени обрано плоску мікросмушкову решітку 2×2 з чотирма випромінюючими елементами. Відстань між центрами сусідніх патчів становить 25,889 мм, що відповідає приблизно $0,56\lambda_0$ на центральній частоті 6,5 ГГц. Таке значення забезпечує компроміс між підвищенням підсилення, зменшенням взаємного впливу елементів і збереженням прийнятної форми діаграми спрямованості [14, 18].

3.5 Розрахунок мікросмушкової мережі живлення

Після вибору структури антенної решітки необхідно розробити мікросмушкову мережу живлення. Для решітки 2×2 вона повинна забезпечити узгодження з вхідним трактом 50 Ом, рівномірний розподіл потужності між чотирма випромінювачами та потрібні фазові співвідношення.

У роботі використано корпоративну мікросмушкову мережу живлення. У такій структурі сигнал від одного вхідного порту спочатку поділяється на

дві гілки, а потім кожна з них поділяється ще на дві. У результаті до кожного випромінюючого елемента надходить приблизно однакова частина потужності.

Вхідний опір антенної системи прийнято рівним:

$$Z_0 = 50 \text{ Ом.}$$

У разі рівномірного поділу потужності на дві однакові гілки їхній еквівалентний опір визначається як:

$$Z_{eq} = \frac{Z_{branch}}{2}.$$

Для того щоб у точці поділу отримати $Z_{eq} = 50 \text{ Ом}$, опір кожної гілки має становити:

$$Z_{branch} = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Ом.}$$

Отже, після першого поділу потужності доцільно використовувати дві гілки з хвильовим опором близько 100 Ом. При паралельному з'єднанні двох таких гілок у точці розгалуження отримується еквівалентний опір:

$$Z_{eq} = \frac{100}{2} = 50 \text{ Ом.}$$

Для узгодження між ділянками з різним хвильовим опором використовується трансформуюча ділянка. Її хвильовий опір визначається за формулою [12]:

$$Z_t = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$$

де Z_t — хвильовий опір трансформуючої ділянки;

Z_1 — опір першої лінії;

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						40
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Z_2 — опір другої лінії.

Для переходу між лінією 50 Ом і двома гілками по 100 Ом проміжний опір становить:

$$Z_t = \sqrt{50 \cdot 100} = \sqrt{5000} = 70,7 \text{ Ом.}$$

Тому в моделі використовується мікросмужкова ділянка з хвильовим опором приблизно 70 Ом. Її параметри:

$$W_{70} = 1,089 \text{ мм.}$$

$$L_{70} = 5,534 \text{ мм.}$$

Ширини мікросмужкових ліній залежать від товщини підкладки, діелектричної проникності матеріалу та потрібного хвильового опору. Для підкладки ZYF-255DA з $\epsilon_r = 2,55$ і $h = 0,762$ мм у початковій моделі CST Studio Suite прийнято такі значення:

$$W_{50} = 2,15 \text{ мм;}$$

$$W_{70} = 1,089 \text{ мм;}$$

$$W_{100} = 0,60 \text{ мм;}$$

$$W_{35} = 3,80 \text{ мм.}$$

Лінія W50 використовується для вхідної ділянки, узгодженої з трактом 50 Ом. Лінія W70 застосовується як трансформуюча ділянка. Лінія W100 використовується в гілках після поділу потужності. Лінія W35 застосовується в ділянках підведення до випромінювачів і для коригування узгодження.

Для початкової оцінки хвильового опору мікросмужкових ліній використовуються співвідношення для ефективної діелектричної проникності та

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						41
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристичного опору. Ефективна діелектрична проникність визначається за формулою:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-0,5},$$

де ε_{eff} — ефективна діелектрична проникність;

ε_r — відносна діелектрична проникність підкладки;

h — товщина діелектричної підкладки;

W — ширина мікросмужкової лінії.

Для вузьких мікросмужкових ліній, коли $\frac{W}{h} \leq 1$, хвильовий опір можна орієнтовно визначити за формулою:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \cdot \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h}\right).$$

Для ширших ліній, коли $W/h \geq 1$, застосовується наближений вираз:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\left[\sqrt{\varepsilon_{eff}} \cdot \left(\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W}{h} + 1,444\right)\right)\right]}$$

Ці формули використовувалися як початковий орієнтир для вибору ширин мікросмужкових доріжок. Остаточні значення ширин ліній уточнювалися в CST Studio Suite, оскільки в реальній моделі на хвильовий опір впливають розгалуження, згини, взаємний зв'язок між провідниками, коаксіальний перехід і близьке розташування випромінюючих елементів.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		42

Для оцінки електричної довжини мікросмужкових ділянок необхідно враховувати, що хвиля поширюється не у вільному просторі, а в мікросмужковій лінії на діелектричній підкладці. Тому використовується напрямна довжина хвилі:

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}},$$

де λ_g — напрямна довжина хвилі в мікросмужковій лінії;

λ_0 — довжина хвилі у вільному просторі;

ϵ_{eff} — ефективна діелектрична проникність мікросмужкової лінії.

На центральній частоті $f_0 = 6,5$ ГГц довжина хвилі у вільному просторі становить:

$$\lambda_0 = 46,15 \text{ мм.}$$

Для мікросмужкових ліній на підкладці ZYF-255DA ефективна діелектрична проникність є меншою за $\epsilon_r = 2,55$, оскільки частина електромагнітного поля поширюється в повітрі. Орієнтовно вона перебуває в межах 2,0–2,2 залежно від ширини конкретної лінії. Тоді напрямна довжина хвилі становить приблизно:

$$\lambda_g \approx 46,15 / \sqrt{2,1} = 31,85 \text{ мм.}$$

Відповідно чверть напрямної довжини хвилі дорівнює:

$$\lambda_g / 4 \approx 31,85 / 4 = 7,96 \text{ мм.}$$

Це значення використовується як початковий орієнтир для вибору довжин трансформуючих і фазозсувних ділянок. Остаточні довжини ліній у моделі уточнюються в CST Studio Suite, оскільки на їхню роботу впливають згини, розгалуження, зв'язок із сусідніми провідниками, геометрія патчів і крайові ефекти.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						43
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

У моделі також використовується фазозсувна ділянка, задана параметром:

$$L_delay = 8,932 \text{ мм.}$$

Її призначення полягає в коригуванні електричної довжини окремих гілок мережі живлення. Це необхідно для забезпечення потрібних фазових співвідношень між сигналами, що надходять до різних випромінюючих елементів. Для антени колової поляризації правильний фазовий розподіл є особливо важливим, оскільки від нього залежить якість поляризації та значення осьового відношення.

Також у конструкції використовується петльова ділянка живлення з довжиною:

$$L_loop = 7,911 \text{ мм.}$$

Ці параметри використовуються для коригування електричних довжин гілок мережі живлення та можуть уточнюватися під час оптимізації.

Для подачі сигналу до антенної решітки використовується коаксіальний вхід.

У моделі задано такі параметри коаксіального переходу:

$$r_pin = 0,50 \text{ мм;}$$

$$r_coax = 1,67 \text{ мм;}$$

$$L_coax = 4,00 \text{ мм.}$$

Центральний провідник коаксіального переходу з'єднується з мікросмушковою лінією живлення, а зовнішній провідник — із нижнім заземлюючим шаром. Такий спосіб збудження дозволяє змодельовати підключення антени до стандартного 50-омного високочастотного тракту.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						44
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні параметри мікросмужкової мережі живлення наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Параметри мікросмужкової мережі живлення

Параметр	Позначення	Значення
Вхідний опір антенної системи	Z_0	50 Ом
Тип мережі живлення	—	корпоративна мікросмужкова
Кількість вихідних гілок	—	4
Ширина лінії 50 Ом	W_{50}	2,15 мм
Ширина лінії 70 Ом	W_{70}	1,089 мм
Ширина лінії 100 Ом	W_{100}	0,60 мм
Ширина лінії 35 Ом	W_{35}	3,80 мм
Довжина трансформуючої ділянки	L_{70}	5,534 мм
Довжина фазозсувної ділянки	L_{delay}	8,932 мм
Довжина петльової ділянки	L_{loop}	7,911 мм
Радіус центрального провідника коаксіалу	r_{pin}	0,50 мм
Радіус зовнішнього провідника коаксіалу	r_{coax}	1,67 мм
Довжина коаксіального переходу	L_{coax}	4,00 мм
Матеріал підкладки	—	ZYF-255DA
Товщина підкладки	h	0,762 мм

Наведені параметри відповідають початковій розрахунковій моделі антенної решітки. Під час подальшої оптимізації частина геометричних параметрів була уточнена, оскільки зміна товщини підкладки та конфігурації фідерної мережі впливає на хвильовий опір мікросмужкових ліній.

Таким чином, для живлення антенної решітки 2×2 розроблено корпоративну мікросмужкову мережу з входним опором 50 Ом. Розподіл потужності між чотирма випромінювачами забезпечується системою розгалужень і мікросмужкових ліній із різними хвильовими опорами. Остаточні параметри мережі живлення уточнюються під час моделювання та оптимізації в CST Studio Suite.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано розрахунок основних параметрів мікросмужкової антенної решітки діапазону 6–7 ГГц з коловою поляризацією. Визначено початкові вимоги до антенної системи: робочий діапазон 6–7 ГГц, входний опір 50 Ом, коефіцієнт підсилення близько 12 дБі, коефіцієнт відбиття S_{11} не більше -10 дБ та формування колової поляризації.

Для розрахунків центральну частоту прийнято рівною 6,5 ГГц. На цій частоті довжина хвилі у вільному просторі становить 46,15 мм. Як матеріал діелектричної підкладки обрано ZYF-255DA з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 2,55$, товщиною $h = 0,762$ мм та тангенсом кута діелектричних втрат $\tan \delta = 0,00018$.

Початковий аналітичний розрахунок мікросмужкового випромінювача дав такі орієнтовні значення: ширина прямокутного патча $W = 17,32$ мм, ефективна діелектрична проникність $\epsilon_{eff} = 2,40$, ефективна довжина $L_{eff} = 14,89$ мм, фізична довжина $L = 14,12$ мм. У моделі CST Studio Suite прийнято квадратний випромінювач зі стороною $W_{patch} = 14,761$ мм та зрізом кута $cut = 3,481$ мм. Зрізання кутів використовується для створення умов формування колової поляризації.

Для підвищення коефіцієнта підсилення обрано плоску мікросмужкову решітку конфігурації 2×2 . Вона містить чотири випромінюючі елементи, розміщені симетрично відносно центра конструкції. Відстань між центрами сусідніх

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						46
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

патчів становить $darray = 25,889$ мм, що відповідає приблизно $0,56\lambda_0$ на центральній частоті 6,5 ГГц.

Також розраховано початкові параметри корпоративної мікросмужкової мережі живлення. Для узгодження з вхідним трактом 50 Ом використано фідерні ділянки з різними хвильовими опорами: 50 Ом, 70 Ом, 100 Ом і 35 Ом. Початкові ширини та довжини ліній прийнято як параметри моделі CST Studio Suite.

Отримані розрахункові параметри стали основою для побудови початкової моделі антенної решітки. Остаточне уточнення геометрії випромінювачів, фідерної мережі та параметрів підкладки виконувалося на етапі електродинамічного моделювання й оптимізації з урахуванням узгодження, діаграми спрямованості та поляризаційних характеристик.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						47
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ В CST STUDIO SUITE

4.1 Побудова початкової моделі антенної решітки

Після виконання розрахунку основних параметрів було побудовано тривимірну модель мікросмужкової антенної решітки в CST Studio Suite. Модель призначена для подальшого електродинамічного аналізу узгодження, діаграми спрямованості, коефіцієнта підсилення та поляризаційних характеристик у діапазоні 6–7 ГГц.

Початкова конструкція складається з діелектричної підкладки, нижнього заземлюючого шару, чотирьох мікросмужкових випромінювачів, фідерної мережі живлення та коаксіального переходу для збудження антени.

Як матеріал підкладки використано ZYF-255DA з параметрами $\epsilon_r = 2,55$, $\mu_r = 1$ та $\text{tg}\delta = 0,00018$. Початкова товщина підкладки становить $h_{\text{sub}} = 0,762$ мм. Металеві частини конструкції задано як ідеальний електричний провідник PEC, товщина металізації $t_m = 0,035$ мм.

Випромінююча частина антени реалізована у вигляді чотирьох квадратних патчів зі зрізаними кутами, розміщених за схемою 2×2 . Зрізи кутів використовуються для створення умов формування колової поляризації.

Основні геометричні параметри випромінювачів:

$W_{\text{patch}} = 14,761$ мм.

$\text{cut} = 3,481$ мм.

$d_{\text{array}} = 25,889$ мм.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		48

Симетричне розташування елементів відносно центра конструкції дозволяє сформувати головний пелюсток діаграми спрямованості в напрямку, близькому до нормалі до площини антени.

Живлення решітки виконано за допомогою корпоративної мікросмужкової фідерної мережі. Вона забезпечує подачу сигналу від одного вхідного порту до чотирьох випромінювачів і розрахована на підключення до тракту з опором 50 Ом.

У початковій моделі використано такі ширини мікросмужкових ліній:

$$W_{50} = 2,15 \text{ мм};$$

$$W_{70} = 1,089 \text{ мм};$$

$$W_{100} = 0,60 \text{ мм};$$

$$W_{35} = 3,80 \text{ мм}.$$

Лінія W_{50} використовується у вхідній частині фідерної мережі. Ділянка W_{70} виконує роль проміжної трансформуючої лінії. Лінії W_{100} застосовуються в гілках поділу потужності, а ширші ділянки W_{35} використовуються для узгодження та підведення сигналу до випромінювачів.

Для коригування електричної довжини окремих частин фідерної мережі в моделі задано додаткові параметри:

$$L_{70} = 5,534 \text{ мм};$$

$$L_{\text{delay}} = 8,932 \text{ мм};$$

$$L_{\text{loop}} = 7,911 \text{ мм}.$$

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						49
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметр L_{70} визначає довжину трансформуючої ділянки, L_{delay} використовується для фазового коригування окремих гілок мережі живлення, а L_{loop} задає довжину петльової ділянки підведення сигналу до випромінювачів. Наявність цих параметрів дає змогу виконувати подальшу оптимізацію моделі без повної зміни її геометрії.

Загальний вигляд початкової моделі антенної решітки в CST Studio Suite наведено на рисунку 4.1.

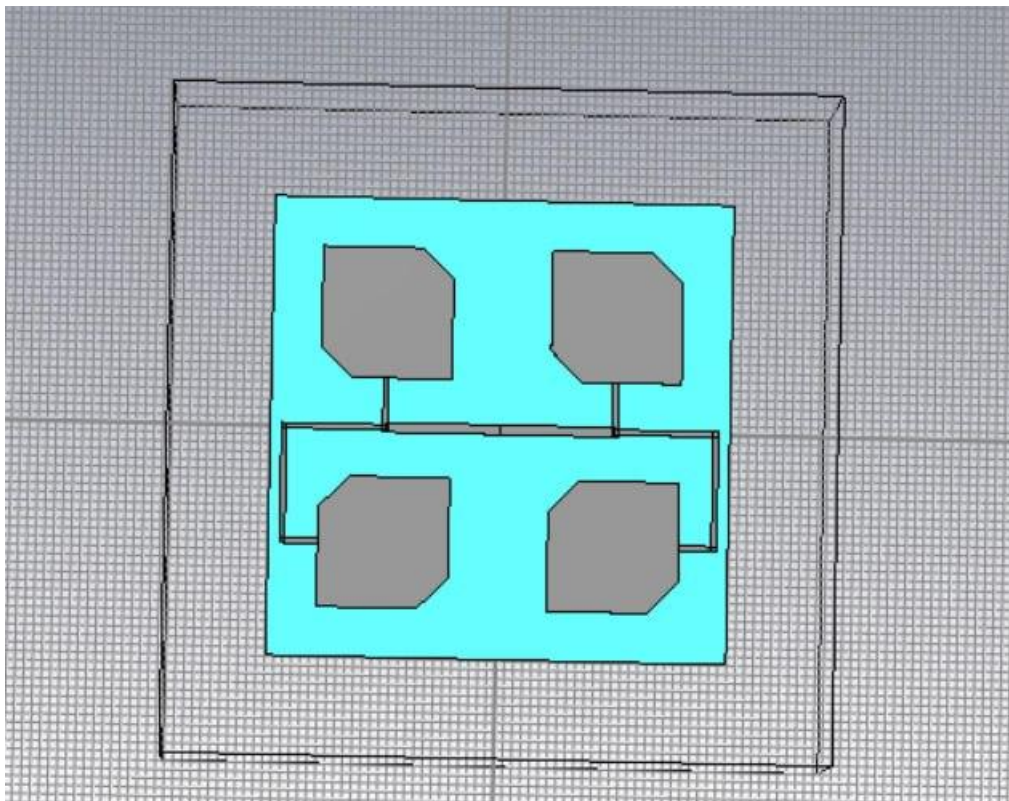


Рисунок 4.1 – Початкова модель мікросмужкової антенної решітки в CST Studio Suite

Для зручності редагування та оптимізації всі основні розміри конструкції було задано в CST Studio Suite у вигляді параметрів. Це дозволяє швидко змінювати розміри патчів, зрізів, фідерних ліній, відстань між елементами та параметри коаксіального переходу. Список основних параметрів початкової моделі наведено на рисунку 4.2.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						50
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Parameter List				
	Name	Expression	Value	Description
-	W_patch	= 14.761163856924	14.761163856924	
-	cut	= 3.4806205225565	3.4806205225565	
-	h_sub	= 0.762	0.762	
-	t_m	= 0.035	0.035	
-	d_array	= 25.888644297595999	25.888644297595999	
-	W_50	= 2.15	2.15	
-	W_100	= 0.6	0.6	
-	W_70	= 1.089	1.089	
-	L_70	= 5.5335161774827002	5.5335161774827002	
-	r_pin	= 0.5	0.5	
-	r_coax	= 1.67	1.67	
-	L_coax	= 4	4	
-	L_delay	= 8.9322299162703	8.9322299162703	
-	L_loop	= 7.9114466290296	7.9114466290296	
-	offset_x	= 7.5575891872467	7.5575891872467	
-	X_out	= d_array/2 + W_patch/2 + 4	24.32490407726	
-	Y_bot	= -d_array/2 - W_patch/2 - 4	-24.32490407726	
-	W_35	= 3.8	3.8	

Рисунок 4.2 – Список параметрів початкової моделі в CST Studio Suite

Збудження антенної решітки здійснюється за допомогою коаксіального переходу, розташованого з нижнього боку конструкції. Центральний провідник коаксіального переходу з'єднаний із мікросмушковою лінією живлення, а зовнішній провідник — із нижнім заземлюючим шаром. Такий спосіб збудження відповідає практичному підключенню антени до коаксіального тракту з хвильовим опором 50 Ом.

Параметри коаксіального переходу в моделі такі:

$$r_{pin} = 0,50 \text{ мм};$$

$$r_{coax} = 1,67 \text{ мм};$$

$$L_{coax} = 4,00 \text{ мм}.$$

Вигляд нижнього заземлюючого шару з коаксіальним входом наведено на рисунку 4.3.

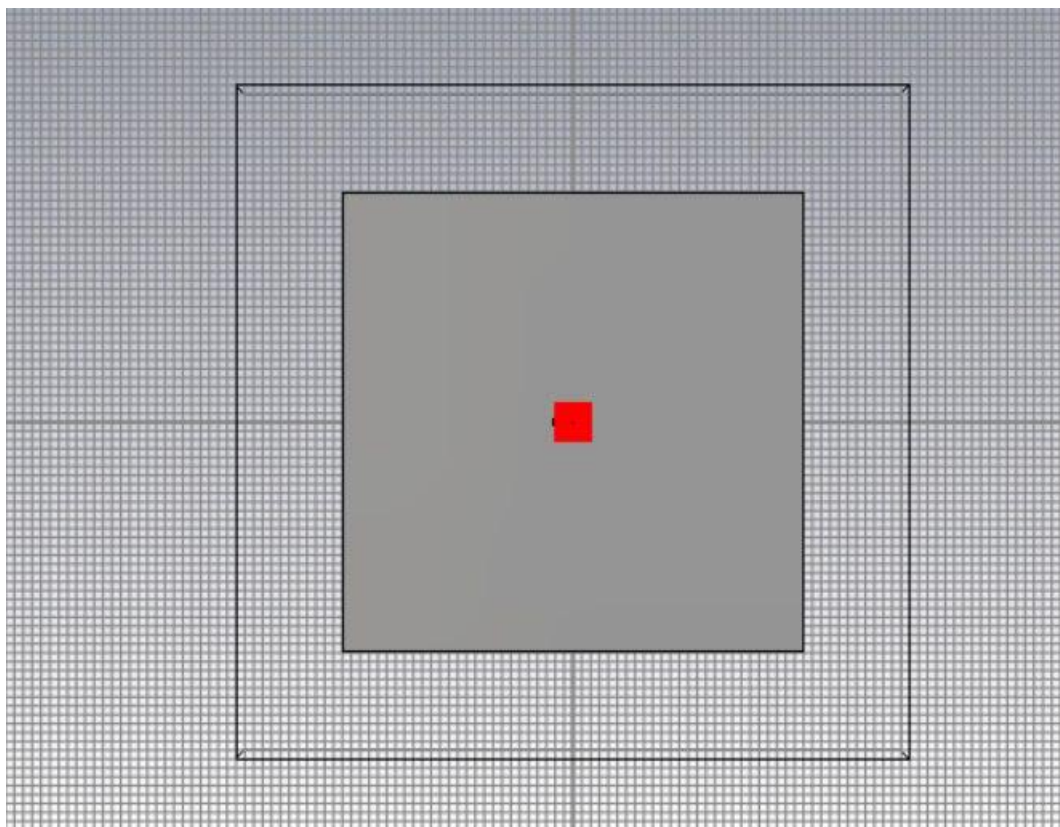


Рисунок 4.3 – Нижній заземлюючий шар антенної решітки з коаксіальним
ВХОДОМ

Тривимірний вигляд коаксіального переходу наведено на рисунку 4.4.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						52
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

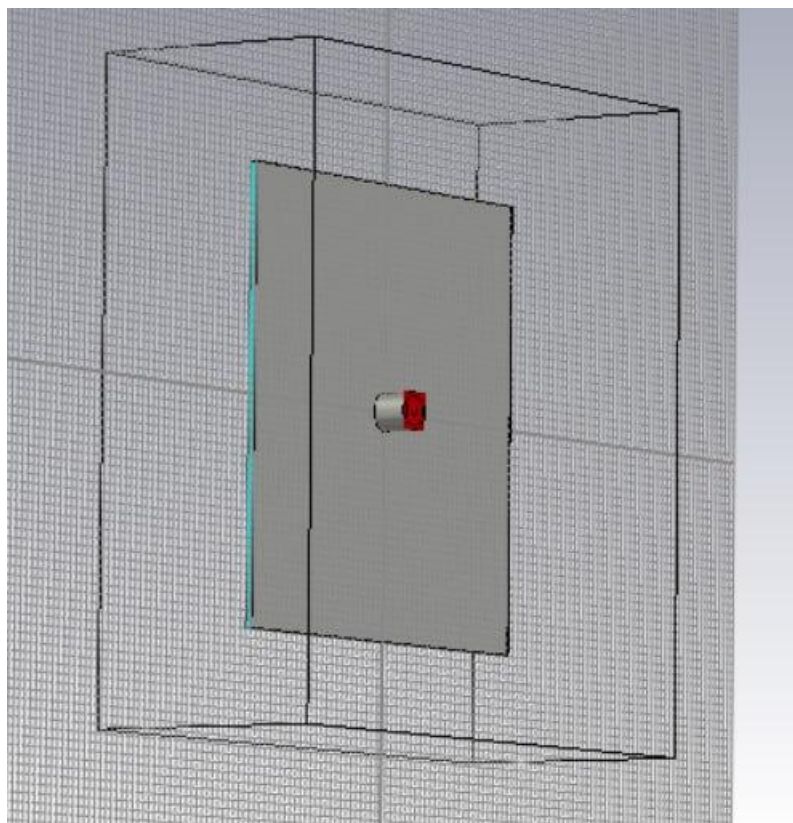


Рисунок 4.4 – Коаксіальний перехід для збудження антенної решітки

Основні параметри початкової моделі антенної решітки наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні параметри початкової моделі антенної решітки

Параметр	Позначення	Значення
Робочий діапазон частот	f	6–7 ГГц
Центральна частота	f_0	6,5 ГГц
Матеріал підкладки	—	ZYF-255DA
Відносна діелектрична проникність	ϵ_r	2,55
Тангенс кута діелектричних втрат	$\text{tg}\delta$	0,00018
Товщина підкладки	h_{sub}	0,762 мм
Товщина металізації	t_m	0,035 мм
Матеріал металізації	—	PEC

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Розмір випромінювача	W_patch	14,761 мм
Розмір зрізу кута	cut	3,481 мм
Відстань між елементами решітки	d_array	25,889 мм
Ширина лінії 50 Ом	W_50	2,15 мм
Ширина лінії 70 Ом	W_70	1,089 мм
Ширина лінії 100 Ом	W_100	0,60 мм
Ширина лінії 35 Ом	W_35	3,80 мм
Довжина ділянки 70 Ом	L_70	5,534 мм
Довжина фазозсувної ділянки	L_delay	8,932 мм
Довжина петльової ділянки	L_loop	7,911 мм
Радіус центрального провідника коаксіалу	r_pin	0,50 мм
Радіус зовнішнього провідника коаксіалу	r_coax	1,67 мм
Довжина коаксіального переходу	L_coax	4,00 мм

Конструктивне оформлення антенної решітки також було представлено у вигляді кресленика. На кресленику наведено основні геометричні розміри мікросмужкової структури, розташування випромінюючих елементів, фідерної мережі, підкладки та коаксіального переходу. Кресленик антенної решітки наведено в додатку Б.

Таким чином, у CST Studio Suite було побудовано параметричну модель мікросмужкової антенної решітки 2×2. Вона містить чотири випромінювачі зі зрізаними кутами, фідерну мережу живлення, нижній заземлюючий шар та коаксіальний вхід. Побудована модель використовується для подальшого моделювання й оптимізації характеристик антени.

4.2 Налаштування параметрів моделювання

Після побудови геометричної моделі антенної решітки було виконано налаштування параметрів електродинамічного моделювання в CST Studio Suite. На цьому етапі задаються матеріали, частотний діапазон, граничні умови, порт

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		54

збудження, параметри сітки та величини, які необхідно отримати після розрахунку.

Основним робочим діапазоном розроблюваної антенної решітки є смуга частот 6–7 ГГц. Для коректного аналізу поведінки антени не лише в межах робочої смуги, а й за її межами, частотний діапазон моделювання було задано ширшим. У моделі використано діапазон приблизно від 5,5 до 7,5 ГГц. Це дозволяє оцінити положення резонансної частоти, ширину смуги узгодження та зміну коефіцієнта відбиття поблизу робочого діапазону.

Як матеріал діелектричної підкладки було задано ZYF-255DA. Для цього матеріалу в моделі прийнято такі параметри:

$$\epsilon_r = 2,55;$$

$$\mu_r = 1;$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,00018.$$

Металеві елементи антени, зокрема патчі, фідерна мережа та заземлюючий шар, на початковому етапі задано як PEC. Такий підхід спрощує модель і дозволяє зосередитися на впливі геометрії конструкції на основні характеристики антени.

Оскільки антена працює у відкритому просторі, навколо моделі задано повітряний об'єм і відповідні граничні умови. Це необхідно для імітації поширення електромагнітної хвилі у вільному просторі та коректного розрахунку діаграми спрямованості.

Збудження моделі здійснюється через один коаксіальний порт із вхідним опором 50 Ом. Центральний провідник коаксіального переходу з'єднаний із

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						55
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

мікросмужковою лінією живлення, а зовнішній провідник — із заземлюючим шаром.

Основним частотним параметром є коефіцієнт відбиття S_{11} . Він показує рівень відбитої потужності на вході антени. Для розроблюваної решітки критерієм прийнятного узгодження є $S_{11} \leq -10$ дБ у діапазоні 6–7 ГГц.

Крім S_{11} , у моделюванні аналізуються просторові характеристики антени: діаграма спрямованості, напрям головного пелюстка, коефіцієнт підсилення та рівень бічних пелюсток. Для оцінки якості колової поляризації також розраховується осьове відношення AR.

Аналіз характеристик доцільно виконувати на нижній межі діапазону 6 ГГц, центральній частоті 6,5 ГГц та верхній межі 7 ГГц. Це дозволяє оцінити зміну узгодження, підсилення, діаграми спрямованості та поляризації в усій робочій смузі.

Під час побудови розрахункової сітки особливу увагу приділено ділянкам зі складною геометрією: зрізаним кутам патчів, розгалуженням фідерної мережі, вузьким мікросмужковим лініям і зоні коаксіального переходу. Недостатня деталізація цих областей може вплинути на точність результатів.

Основні налаштування моделювання наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні параметри налаштування моделювання в CST Studio Suite

Параметр	Значення
Середовище моделювання	CST Studio Suite
Тип конструкції	мікросмужкова антенна решітка
Конфігурація решітки	2×2

Робочий діапазон частот	6–7 ГГц
Діапазон моделювання	5,5–7,5 ГГц
Центральна частота	6,5 ГГц
Матеріал підкладки	ZYF-255DA
Відносна діелектрична проникність	$\epsilon_r = 2,55$
Магнітна проникність	$\mu_r = 1$
Тангенс кута діелектричних втрат	$\operatorname{tg}\delta = 0,00018$
Матеріал металевих елементів	PEC
Тип збудження	коаксіальний порт
Вхідний опір	50 Ом
Основний частотний параметр	S11
Критерій узгодження	$S11 \leq -10$ дБ
Просторові характеристики	діаграма спрямованості, підсилення
Поляризаційна характеристика	осьове відношення

Таким чином, у CST Studio Suite було налаштовано параметри моделювання, необхідні для дослідження мікросмужкової антенної решітки в діапазоні 6–7 ГГц. Було задано матеріали конструкції, частотний діапазон, коаксіальне збудження, умови розрахунку коефіцієнта відбиття та параметри аналізу далекого поля. Після цього модель була готова до виконання першої ітерації електродинамічного розрахунку.

4.3 Аналіз результатів першої ітерації моделювання

Після побудови початкової моделі антенної решітки та налаштування параметрів моделювання було виконано першу ітерацію електродинамічного розрахунку в CST Studio Suite. Метою цього етапу було перевірити працездатність конструкції, визначити положення резонансної частоти, оцінити узгодження антени з трактом 50 Ом та проаналізувати початкову форму діаграми спрямованості.

Основним параметром для оцінки узгодження є коефіцієнт відбиття S_{11} . Для розроблюваної антенної решітки бажано забезпечити значення S_{11} не більше -10 дБ у робочому діапазоні 6–7 ГГц.

Результат розрахунку коефіцієнта відбиття S_{11} для першої ітерації моделі наведено на рисунку 4.5.

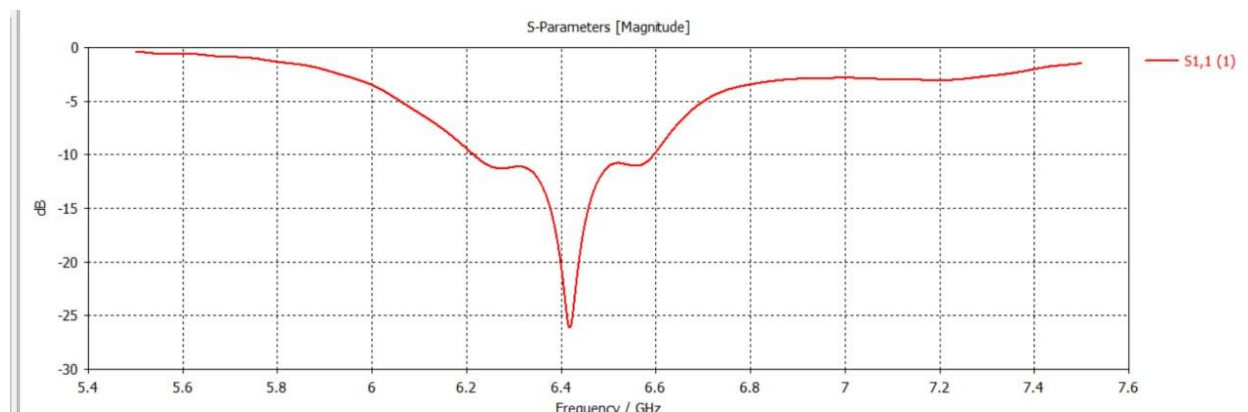


Рисунок 4.5 – Коефіцієнт відбиття S_{11} для першої ітерації моделі

З графіка видно, що початкова модель має виражений резонанс поблизу частоти 6,4 ГГц. Мінімальне значення коефіцієнта відбиття становить приблизно -26 дБ, що свідчить про добре узгодження антени з фідерним трактом у цій області.

Водночас початкова модель не забезпечує повного перекриття діапазону 6–7 ГГц за критерієм $S_{11} \leq -10$ дБ. Якісне узгодження спостерігається лише приблизно в області 6,2–6,6 ГГц. На нижній та верхній межах робочого діапазону узгодження погіршується.

Для оцінки просторових характеристик було виконано розрахунок діаграми спрямованості. Результат моделювання для першої ітерації наведено на рисунку 4.6.

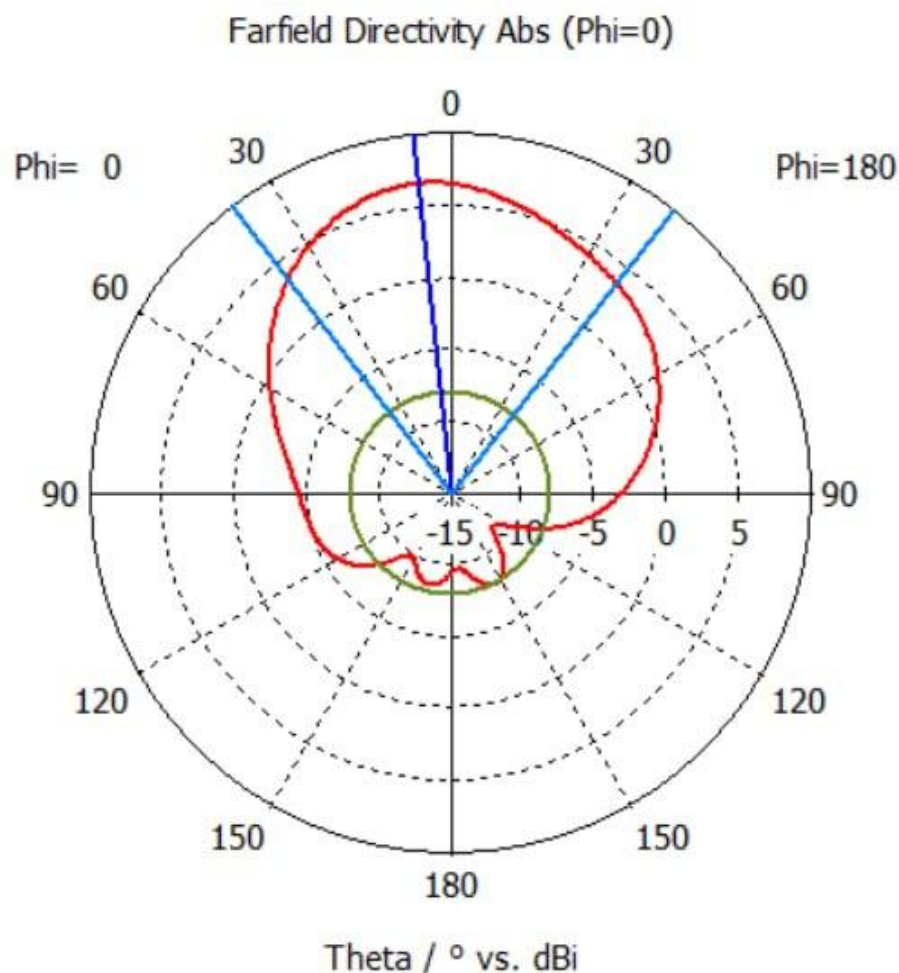


Рисунок 4.6 – Діаграма спрямованості антенної решітки для першої ітерації

Отримана діаграма показує, що антенна решітка формує спрямоване випромінювання з головним пелюстком у передньому півпросторі. Це підтверджує правильність вибору структури 2×2 . Водночас форма діаграми, рівень підсилення, бічні пелюстки та поляризаційні характеристики потребують подальшого уточнення.

Основні результати першої ітерації моделювання наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні результати першої ітерації моделювання

Параметр	Результат першої ітерації
Робочий діапазон за технічним завданням	6–7 ГГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис
59

Частота мінімального S11	близько 6,4 ГГц
Мінімальне значення S11	приблизно -26 дБ
Область якісного узгодження	приблизно 6,2–6,6 ГГц
Узгодження на 6 ГГц	недостатнє
Узгодження на 7 ГГц	недостатнє
Характер діаграми спрямованості	спрямована
Основний недолік	недостатня смуга узгодження

Таким чином, результати першої ітерації показали, що побудована модель є працездатною та має резонанс у межах заданого частотного діапазону. Мінімальне значення S11 близько -26 дБ свідчить про добре узгодження в околі частоти 6,4 ГГц. Проте початкова модель не забезпечує виконання вимоги $S_{11} \leq -10$ дБ у всьому діапазоні 6–7 ГГц. Тому на наступному етапі необхідно виконати оптимізацію конструкції антенної решітки, зокрема уточнити параметри випромінювачів, розміри зрізів, відстань між елементами та геометрію мікросмужкової мережі живлення.

4.4 Оптимізація конструкції антенної решітки

За результатами першої ітерації моделювання встановлено, що початкова модель має резонанс у заданому діапазоні, однак не забезпечує достатню ширину смуги узгодження. Тому було виконано оптимізацію конструкції антенної решітки.

Основною метою оптимізації було покращення узгодження з трактом 50 Ом у діапазоні 6–7 ГГц, уточнення діаграми спрямованості, збереження коефіцієнта підсилення близько 12 дБі та покращення умов формування колової поляризації.

Першим напрямом оптимізації було уточнення параметрів діелектричної підкладки. У початковій моделі використовувалася підкладка ZYF-255DA з

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						60
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

товщиною $h_{\text{sub}} = 0,762$ мм. Під час оптимізації товщину підкладки було збільшено до $h_s = 2,5$ мм. Це дозволило покращити узгодження та розширити робочу смугу антенної решітки.

Зміна товщини підкладки впливає не лише на випромінювачі, а й на хвильові опори мікросмужкових ліній. Тому після зміни h_s було додатково уточнено ширини та довжини фідерних ділянок.

Другим напрямом оптимізації було коригування геометрії патчів. Основними параметрами є розмір випромінювача та розмір зрізу кута. Зміна розмірів патча впливає на положення резонансної частоти, а зрізи кутів визначають умови збудження двох ортогональних мод, необхідних для наближення до колової поляризації.

Третім напрямом було уточнення мікросмужкової мережі живлення. Саме фідерна мережа значною мірою визначає якість узгодження всієї решітки з вхідним трактом 50 Ом. Особливу увагу було приділено переходам між ділянками з різними хвильовими опорами, розгалуженням, фазозсувним ділянкам та підведенню сигналу до випромінювачів.

Окремо аналізувалися параметри L_{70} , L_{delay} і L_{loop} . Параметр L_{70} визначає довжину трансформуючої ділянки, L_{delay} використовується для фазового коригування гілок мережі живлення, а L_{loop} задає довжину петльової ділянки підведення сигналу до випромінювачів.

Для антенної решітки колової поляризації важливо враховувати не тільки S_{11} , а й фазові співвідношення та осьове відношення AR. Тому під час оптимізації оцінювалися узгодження, форма діаграми спрямованості, коефіцієнт підсилення та поляризаційні характеристики.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						61
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні параметри, які враховувалися під час оптимізації, наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Основні параметри оптимізації антенної решітки

Параметр	Призначення параметра	Вплив на характеристики антени
W_patch	розмір мікросмушкового патча	зміщення резонансної частоти
cut	розмір зрізу кута патча	формування колової поляризації, вплив на осьове відношення
d_array	відстань між елементами решітки	вплив на підсилення, взаємний зв'язок і бічні пелюстки
W_50	ширина вхідної лінії 50 Ом	узгодження з вхідним трактом
W_70	ширина трансформуючої лінії	узгодження між 50-омною та розгалуженою частинами мережі
W_100	ширина гілок після поділу потужності	поділ потужності між випромінювачами
W_35	ширина низькоомної ділянки	додаткове узгодження та підведення сигналу до патчів
L_70	довжина трансформуючої ділянки	вплив на ширину смуги узгодження
L_delay	довжина фазозсувної ділянки	коригування фазових співвідношень
L_loop	довжина петльової ділянки живлення	вплив на електричну довжину фідерної мережі

hs	товщина діелектричної підкладки	вплив на смугу узгодження, ефективність випромінювання та хвильові опори мікросмужкових ліній
----	---------------------------------	---

Оптимізація виконувалася шляхом послідовної зміни параметрів моделі та аналізу отриманих результатів у CST Studio Suite. Найбільший вплив на положення резонансу мають розміри патча, тоді як параметри фідерної мережі суттєво впливають на глибину мінімуму S_{11} , ширину смуги узгодження та фазові співвідношення між елементами.

Таким чином, оптимізація була спрямована на покращення узгодження в діапазоні 6–7 ГГц, зменшення відбиття на вході антени, коригування діаграми спрямованості та покращення умов формування колової поляризації. Результати моделювання оптимізованої конструкції наведено в наступному підрозділі.

4.5 Аналіз характеристик оптимізованої моделі

Після виконання оптимізації конструкції антенної решітки було проведено повторне електродинамічне моделювання в CST Studio Suite. Метою цього етапу було оцінити характеристики остаточної моделі в робочому діапазоні частот 6–7 ГГц та визначити, наскільки отримані результати відповідають початковим вимогам дипломного проєкту.

Остаточна модель антенної решітки зберігає структуру 2×2 і складається з чотирьох мікросмужкових випромінювачів зі зрізаними кутами, діелектричної підкладки, нижнього заземлюючого шару, коаксіального входу та мікросмужкової мережі живлення. Загальний вигляд оптимізованої моделі наведено на рисунку 4.7.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		63

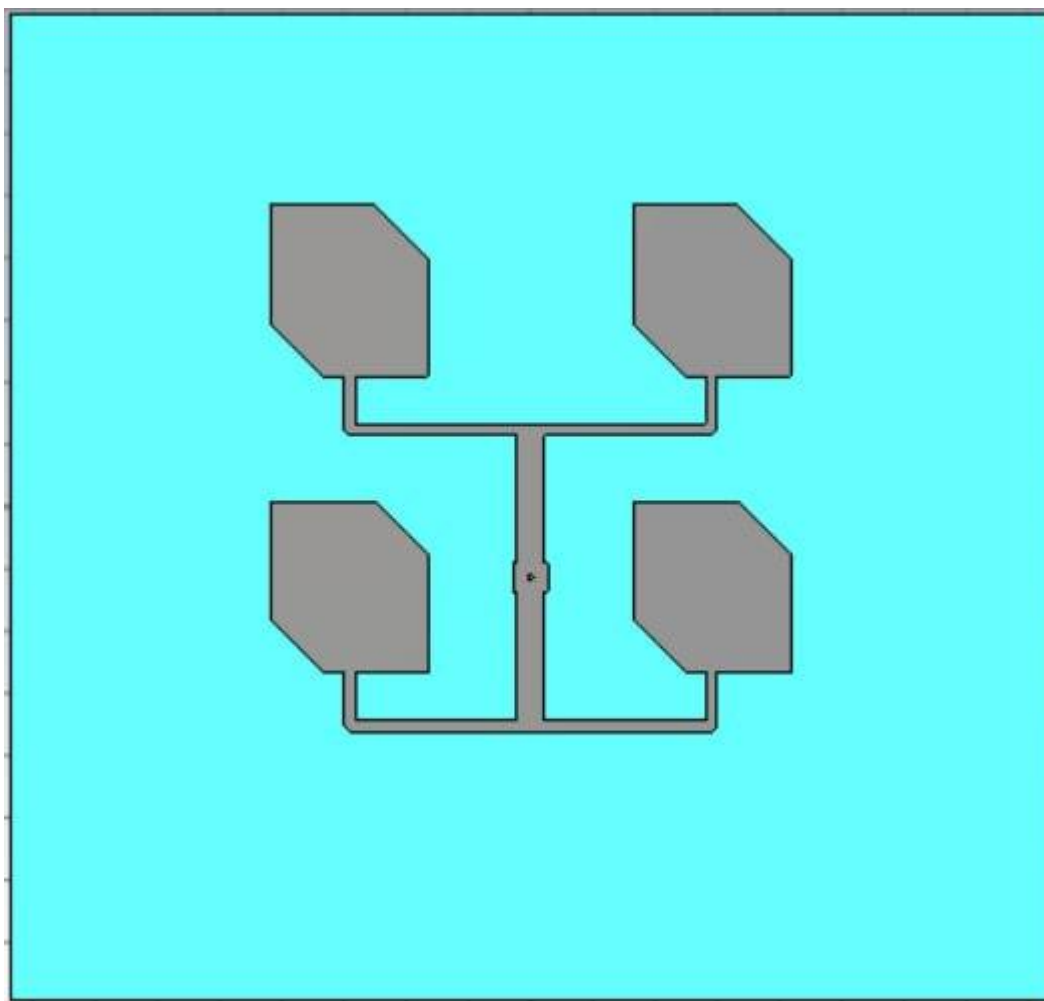


Рисунок 4.7 – Загальний вигляд оптимізованої моделі антенної решітки

З нижнього боку конструкції розміщено суцільний заземлюючий шар і коаксіальний вхід. Центральний провідник коаксіального переходу з'єднаний із мікросмушковою мережею живлення, а зовнішній провідник — із заземлюючою площиною. Нижній вигляд антенної решітки наведено на рисунку 4.8.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис

64

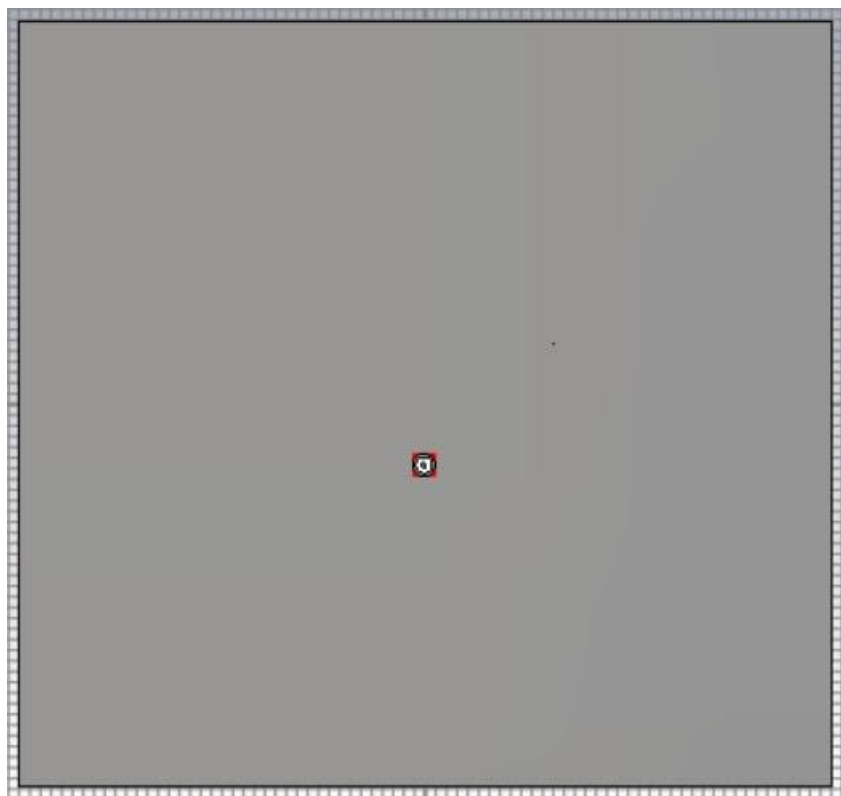


Рисунок 4.8 – Нижній шар оптимізованої моделі з коаксіальним входом

Після оптимізації було уточнено розміри підкладки, випромінювачів і мікросмушкової мережі живлення. Основні параметри остаточної моделі наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Основні параметри оптимізованої моделі

Параметр	Позначення	Значення
Ширина підкладки	ws	76,192 мм
Довжина підкладки	ls	71,669 мм
Товщина підкладки	hs	2,5 мм
Товщина металізації	hm	0,035 мм
Ширина лінії 50 Ом	w50	2,142 мм
Довжина центральної лінії	lcl	22,656 мм
Довжина внутрішньої ділянки	lint	24,103 мм

Ширина лінії 70 Ом	w70	0,957 мм
Довжина ділянки живлення	lpl	5,081 мм
Ширина патча	wp	13,172 мм
Довжина патча	lp	13,247 мм
Розмір зрізу кута	zriz	3,541 мм
Діаметр центрального провідника	dfc	0,45 мм
Довжина фідерної ділянки	lfeed	5 мм
Параметр металізації / переходу	dfm	1,52 мм
Зовнішній діаметр переходу	dfo	2,1 мм
Ширина контактної площадки	wcp	2,611 мм
Довжина контактної площадки	lcp	2,3 мм

Одним із важливих результатів оптимізації є наближення вхідного опору антени до стандартного значення 50 Ом. За результатами моделювання дійсна частина опору вхідного тракту становить приблизно 50,6 Ом у заданому діапазоні частот. Це свідчить про коректну адаптацію антенної решітки до стандартного високочастотного тракту. Результат розрахунку вхідного опору наведено на рисунку 4.9.

Одним із важливих результатів оптимізації є наближення вхідного опору антенної решітки до стандартного тракту 50 Ом. Для додаткової оцінки узгодження було проаналізовано параметр Z11 за результатами Z-matrix. Цей параметр показує зміну вхідного опору антени в робочому діапазоні частот. Графік Z11 оптимізованої моделі наведено на рисунку 4.9.

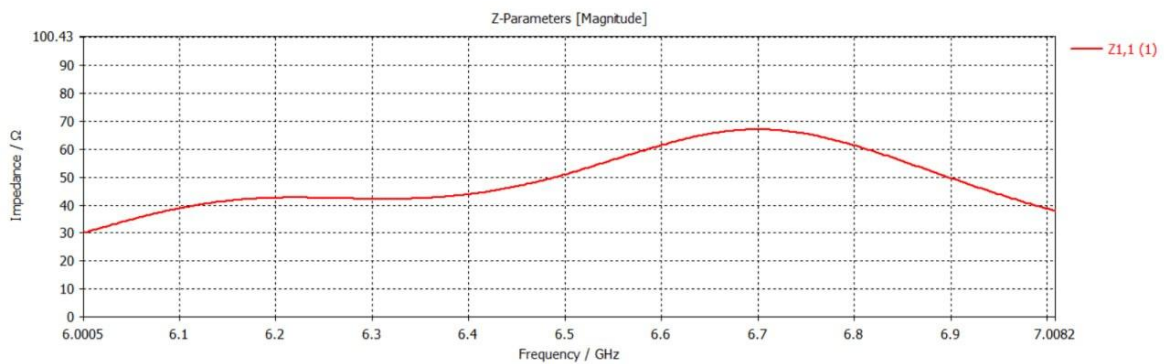


Рисунок 4.9 – Зміна вхідного опору антенної решітки в діапазоні 6–7 ГГц

З графіка видно, що вхідний опір антенної решітки в діапазоні 6–7 ГГц не є сталим і змінюється приблизно в межах 40–70 Ом. Найкраще наближення до стандартного значення 50 Ом спостерігається в центральній частині робочого діапазону. На краях смуги відхилення опору збільшується, що пояснюється широкосмуговим характером поставленої задачі, взаємним впливом випромінювачів і складною геометрією мікросмужкової мережі живлення.

Такий результат не є ідеальним, однак може вважатися допустимим для зробленої моделі, оскільки в робочому діапазоні зберігаються прийнятні значення КСХН та коефіцієнта відбиття. Подальше покращення стабільності вхідного опору може бути виконане за рахунок додаткової оптимізації фідерної мережі та переходу від коаксіального входу до мікросмужкових ліній.

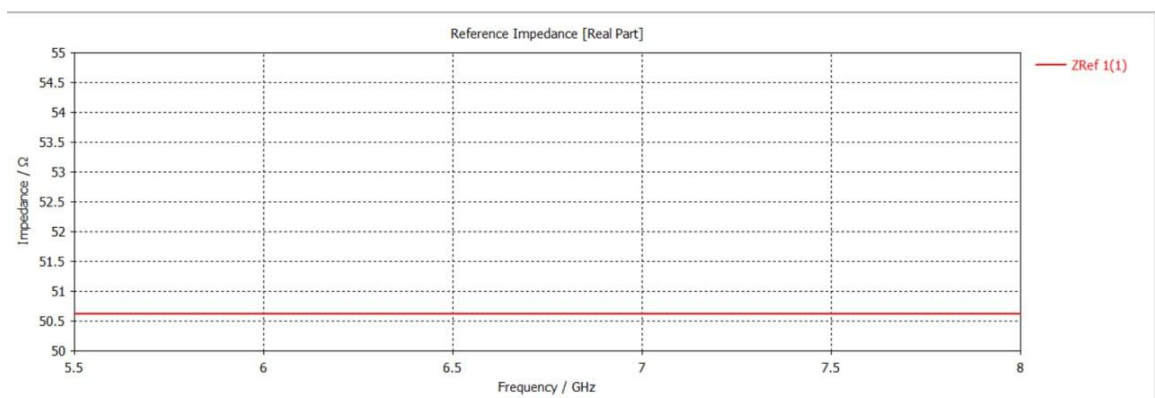


Рисунок 4.10 – Дійсна частина вхідного опору оптимізованої моделі

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис
67

Для оцінки узгодження антени також було проаналізовано коефіцієнт стоячої хвилі за напругою. Графік КСХН наведено на рисунку 4.10.

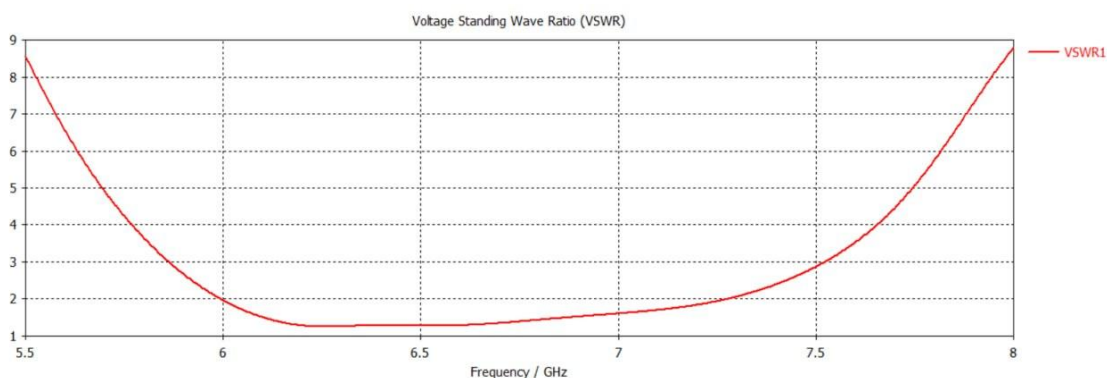


Рисунок 4.10 – Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою оптимізованої моделі

З графіка видно, що в основній частині робочого діапазону 6–7 ГГц значення КСХН залишається прийнятним. Найкраще узгодження спостерігається приблизно в області 6,2–6,6 ГГц, де КСХН має мінімальні значення. На частоті 6 ГГц КСХН наближається до граничного значення 2, а в області 7 ГГц залишається меншим за 2. Отже, за критерієм $КСХН \leq 2$ оптимізована модель загалом придатна для роботи в діапазоні 6–7 ГГц, хоча найкращі характеристики узгодження спостерігаються в середній частині діапазону.

Для детального аналізу просторових характеристик було побудовано діаграми спрямованості оптимізованої моделі в діапазоні частот від 6,0 до 7,0 ГГц із кроком 0,1 ГГц. У цьому підрозділі наведено повний набір діаграм спрямованості на рисунках 4.11 – 4.21.

На основі отриманих результатів встановлено, що в усьому робочому діапазоні антенна решітка зберігає спрямований характер випромінювання. Коефіцієнт підсилення змінюється приблизно від 11,5 до 12 дБі, а напрям головного пелюстка залишається близьким до нормалі до площини антени. Ширина головного пелюстка за рівнем 3 дБ становить приблизно 48,5–51°, що

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис
68

забезпечує ширшу діаграму спрямованості порівняно з частиною комерційних аналогів.

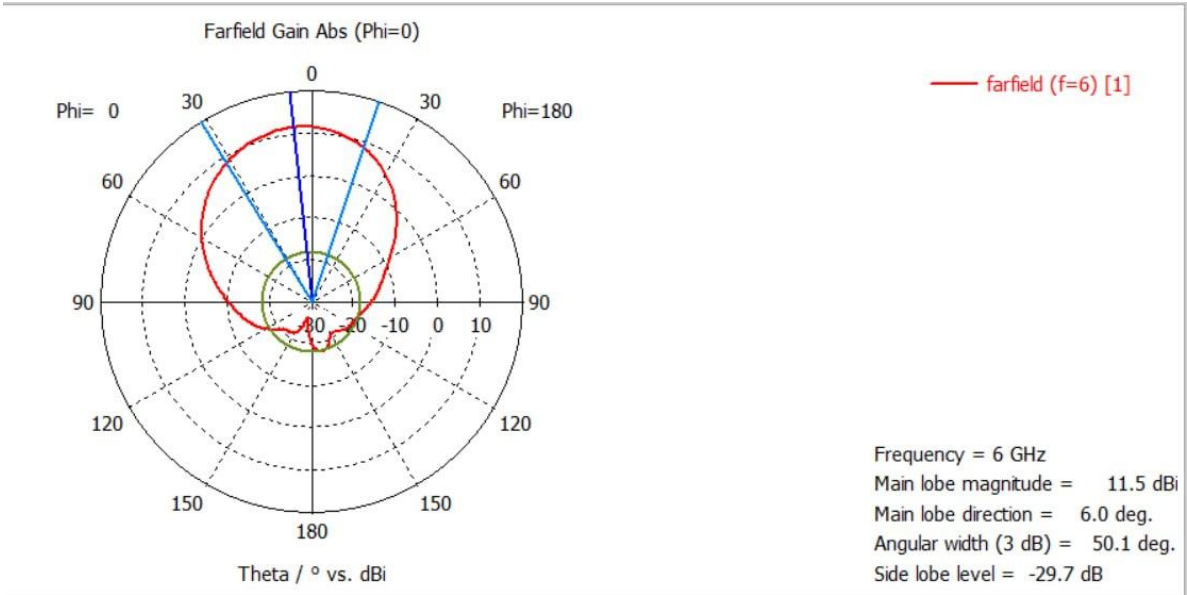


Рисунок 4.11 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,0 ГГц

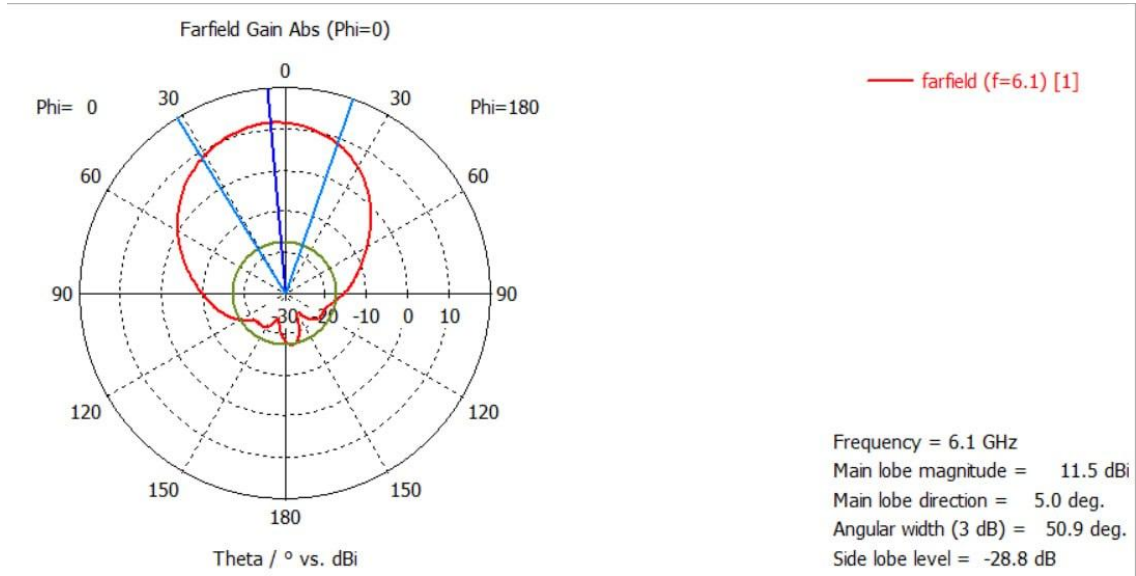


Рисунок 4.12 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,1 ГГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

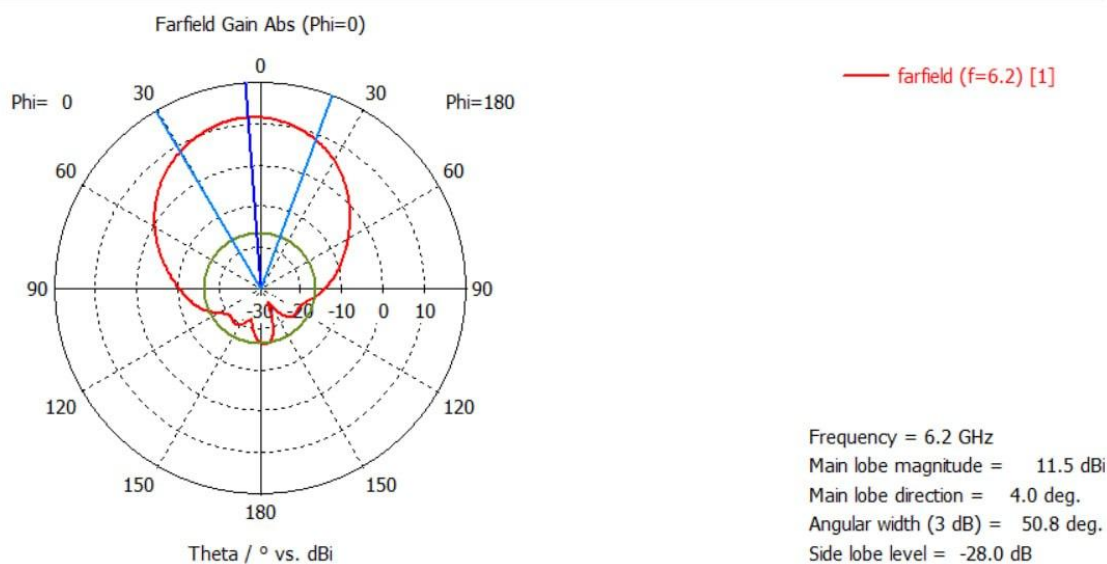


Рисунок 4.13 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,2
ГГц

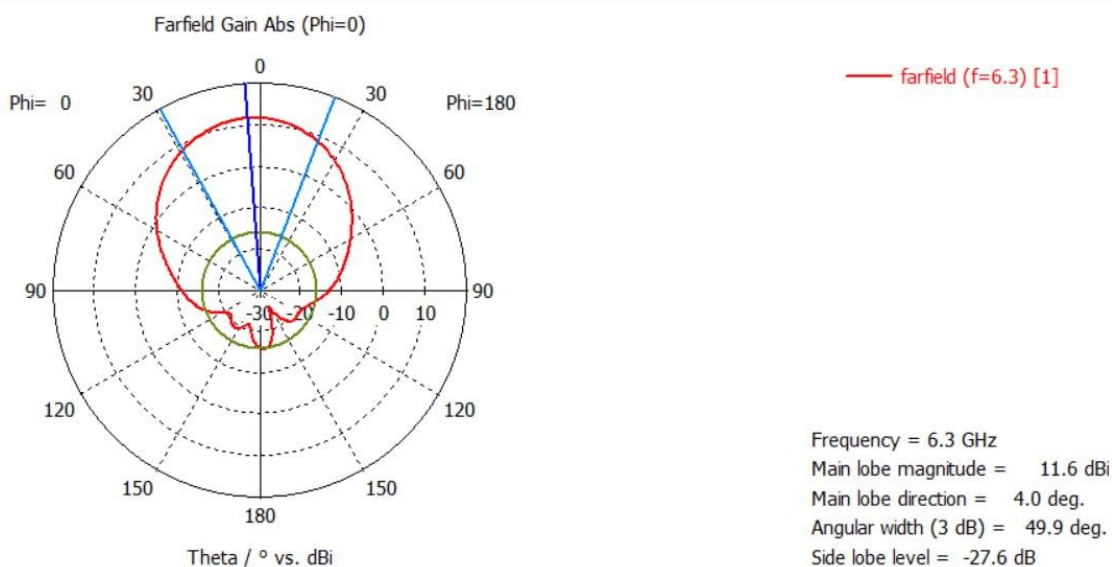


Рисунок 4.14 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,3
ГГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис
70

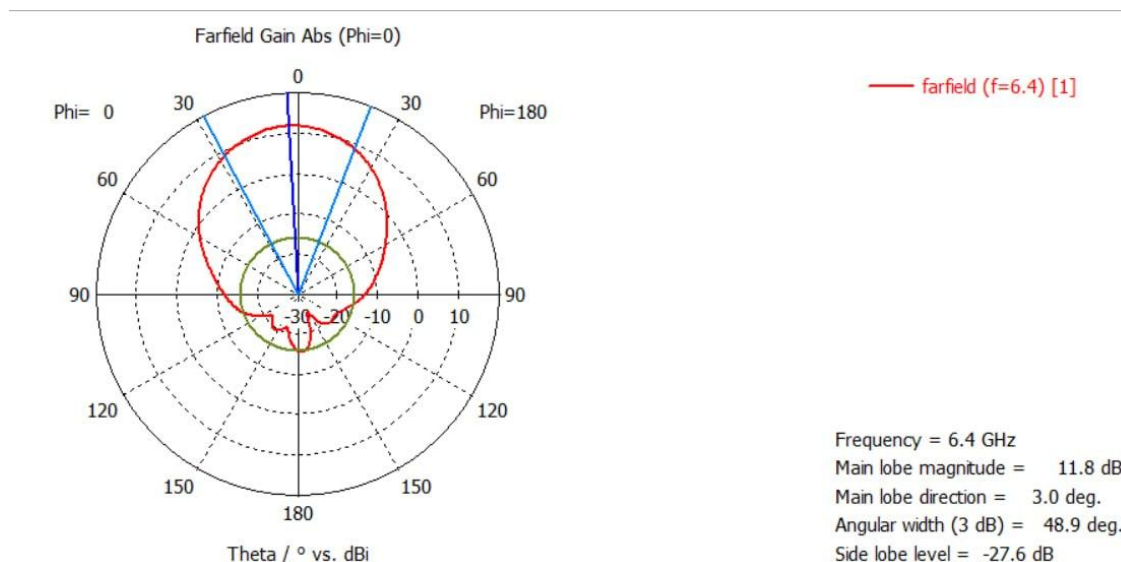


Рисунок 4.15 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,4 ГГц

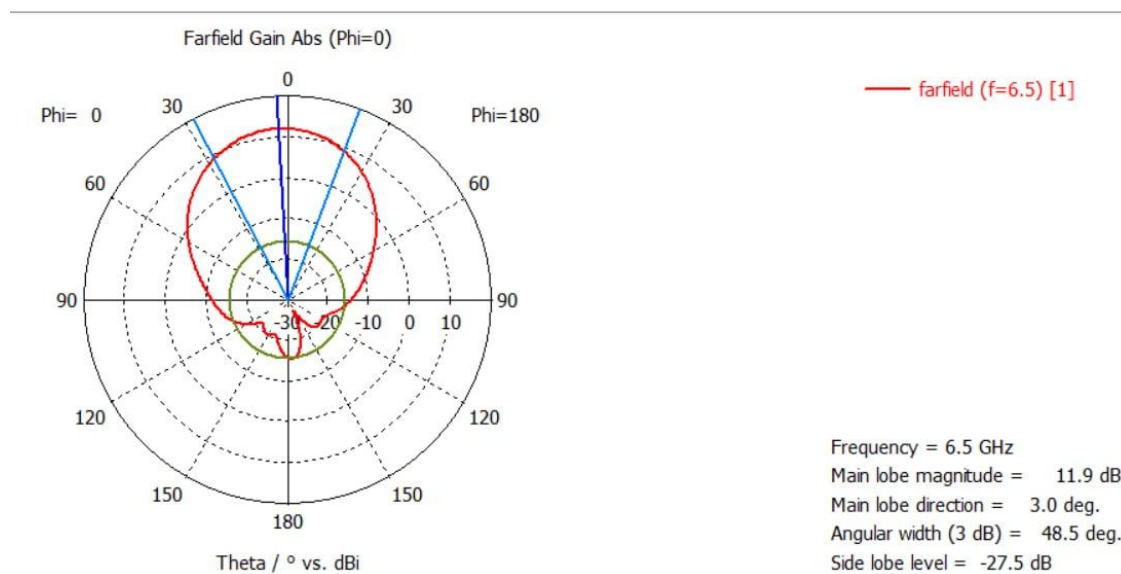


Рисунок 4.16 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,5 ГГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис
71

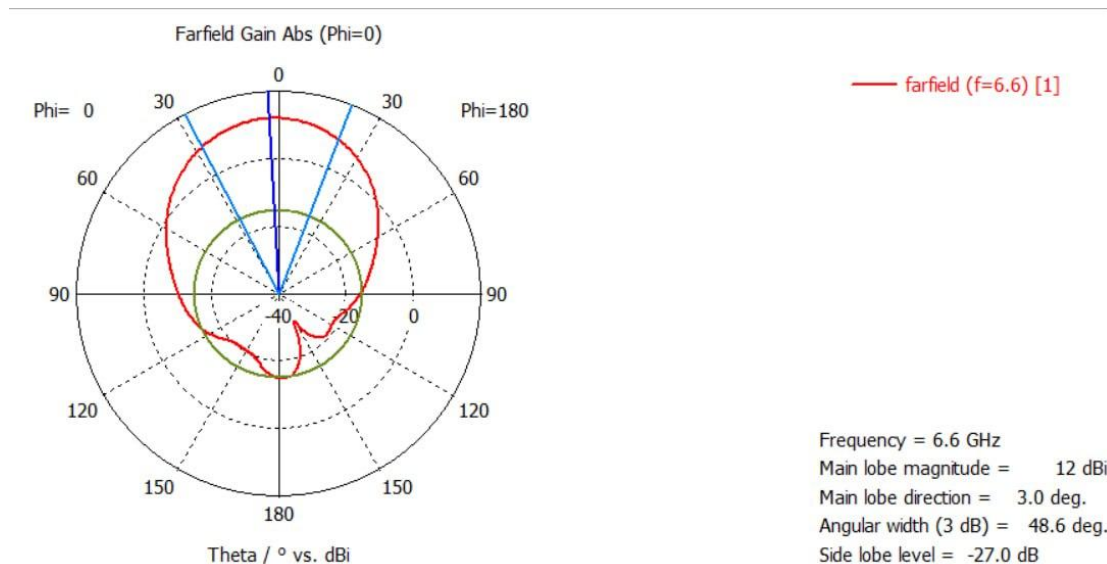


Рисунок 4.17 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,6 ГГц

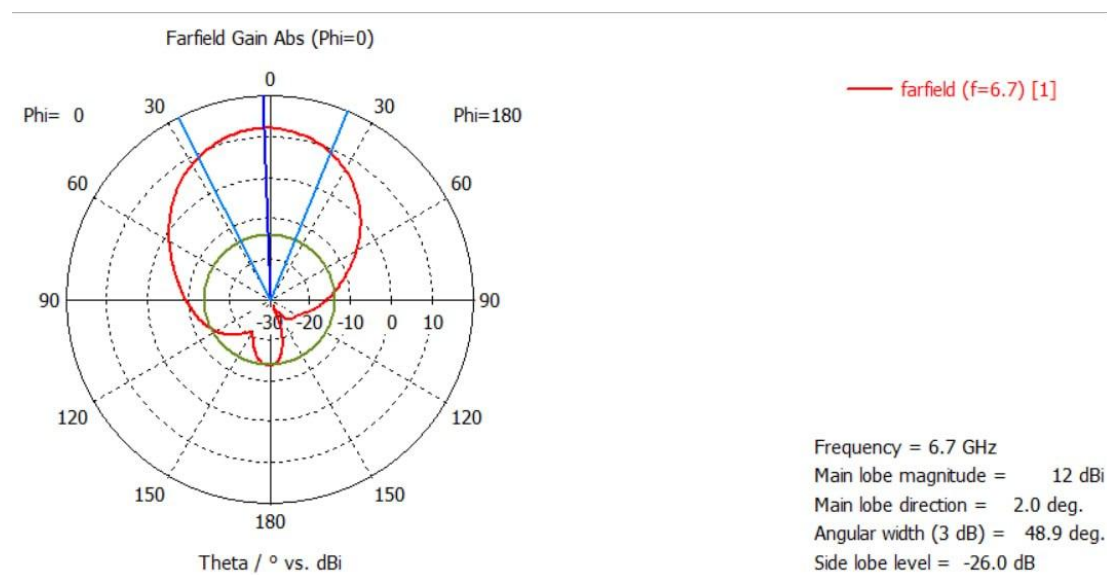


Рисунок 4.18 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,7 ГГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис
72

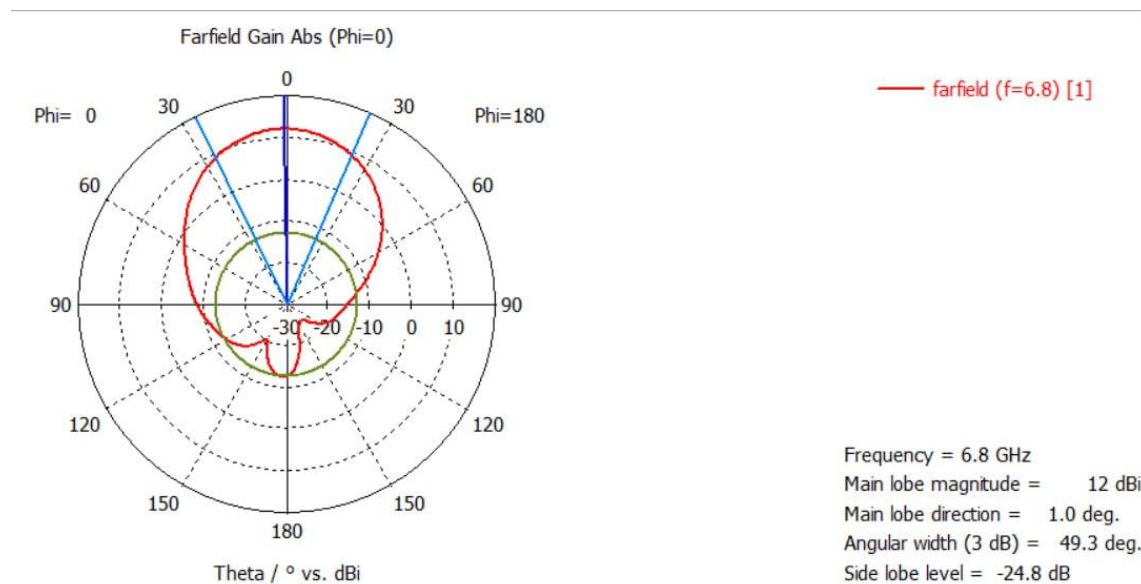


Рисунок 4.19 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,8
ГГц

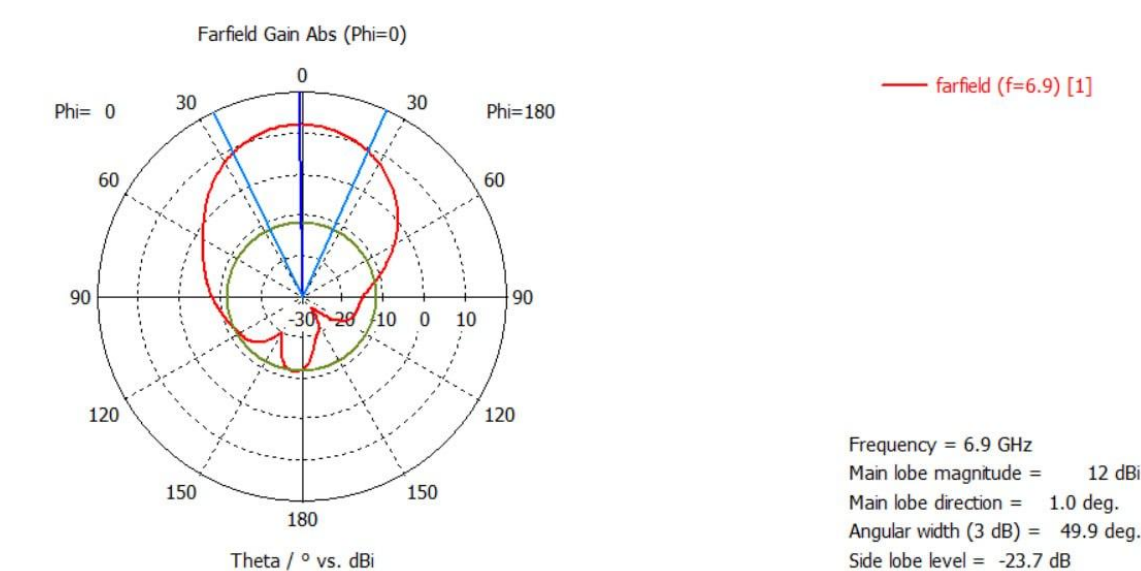


Рисунок 4.20 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 6,9
ГГц

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лис
73

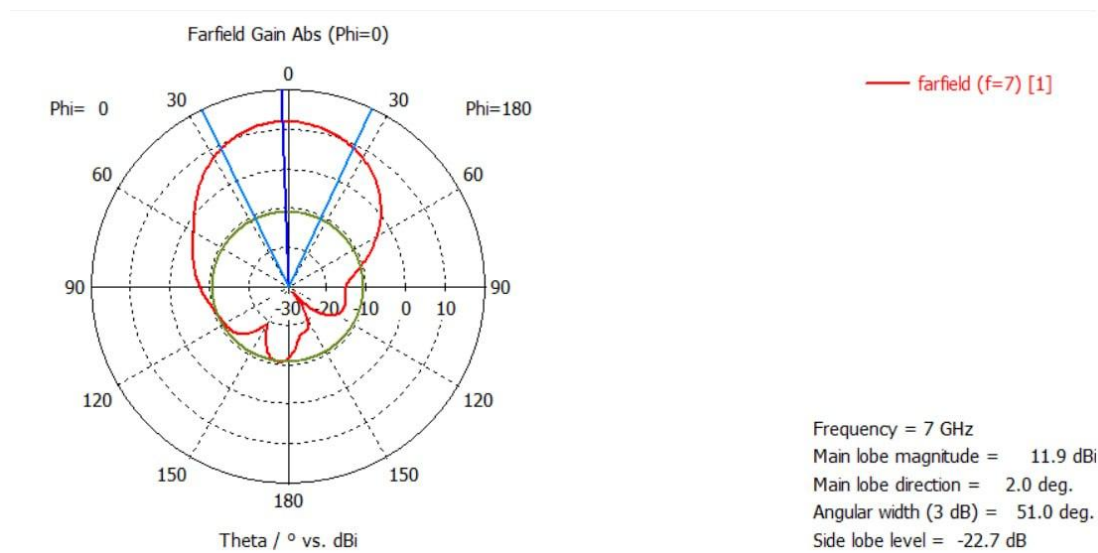


Рисунок 4.21 – Діаграма спрямованості антенної решітки на частоті 7,0 ГГц

Результати моделювання показують, що антенна решітка формує стабільну спрямовану діаграму випромінювання в усьому робочому діапазоні. Головний пелюсток орієнтований поблизу нормалі до площини антени. Його напрям змінюється від 6° на частоті 6 ГГц до 1–2° у верхній частині діапазону. Така зміна є незначною і не погіршує практичне використання антени як наземної приймальної системи.

Коефіцієнт підсилення оптимізованої моделі змінюється в межах приблизно від 11,5 до 12 дБі. На нижній межі діапазону, тобто на частотах 6,0–6,2 ГГц, підсилення становить близько 11,5 дБі. У середній та верхній частині діапазону значення підсилення збільшується і досягає приблизно 12 дБі. Це близько до заданої вимоги не менше 12 дБі.

Основні результати розрахунку діаграми спрямованості наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Параметри діаграми спрямованості оптимізованої моделі

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		74

Частота, ГГц	Підси- лення, дБі	Напря́м головно́го пелюстка, град.	Ширина за рів- нем 3 дБ, град.	Рівень бічних пе- люсток, дБ
6,0	11,5	6	50,1	-29,7
6,1	11,5	5	50,9	-28,8
6,2	11,5	4	50,8	-28,0
6,3	11,6	4	49,9	-27,6
6,4	11,8	3	48,9	-27,6
6,5	11,9	3	48,5	-27,5
6,6	12,0	3	48,6	-27,0
6,7	12,0	2	48,9	-26,0
6,8	12,0	1	49,3	-24,8
6,9	12,0	1	49,9	-23,7
7,0	11,9	2	51,0	-22,7

З таблиці видно, що ширина головного пелюстка за рівнем 3 дБ перебуває приблизно в межах 48,5–51°. Така діаграма спрямованості є ширшою, ніж у частини розглянутих комерційних аналогів, які мають вужчий промінь. Це є важливою практичною перевагою для наземної FPV-станції, оскільки ширша діаграма спрямованості спрощує наведення антени на рухомий БПЛА та зменшує вимоги до точності орієнтації антени.

Разом із тим ширша діаграма спрямованості супроводжується меншим коефіцієнтом підсилення порівняно з окремими аналогами. Розглянуті в першому розділі комерційні антени мають підсилення 13,5–18,5 дБі, тоді як у розробленої моделі підсилення становить приблизно 11,5–12 дБі. Отже, розроблена антена поступається частині аналогів за коефіцієнтом підсилення, але має компактну плоску конструкцію та ширшу діаграму спрямованості, що може бути зручним для практичного приймання відеосигналу з БПЛА.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						75
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Окремо було проаналізовано поляризаційні характеристики антенної решітки. Оскільки метою роботи є створення антени колової поляризації, важливим параметром є осьове відношення AR. Для ідеальної колової поляризації AR дорівнює 0 дБ, а для практичних антен прийнятним критерієм вважається $AR \leq 3$ дБ у напрямку головного пелюстка [15, 16].

Для додаткової перевірки типу поляризації було проаналізовано тривимірну діаграму підсилення правої колової компоненти поля. У CST Studio Suite для цього використано компоненту Ludwig 3 Right, яка відповідає правій коловій поляризації. Результат розрахунку на частоті 6,4 ГГц наведено на рисунку 4.22.

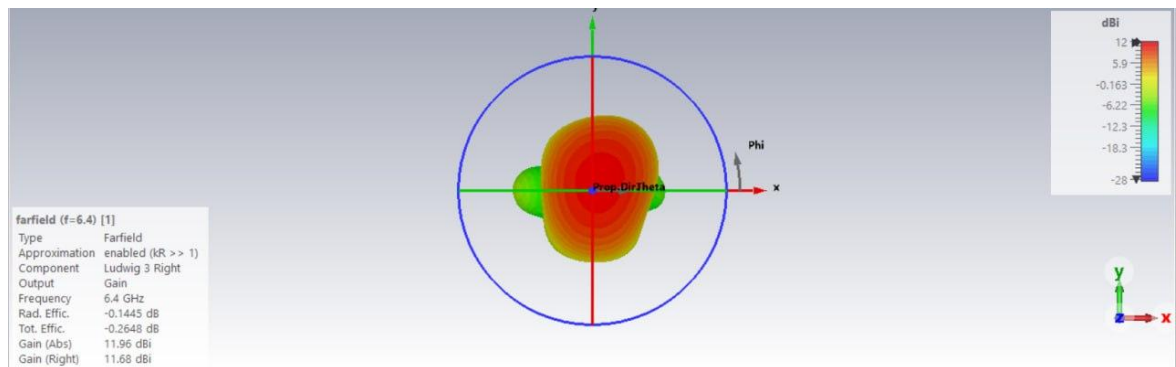


Рисунок 4.22 – Тривимірна діаграма підсилення правої колової компоненти поля на частоті 6,4 ГГц

З рисунка видно, що в напрямку головного пелюстка формується виражена права колова складова поля. На частоті 6,4 ГГц абсолютне підсилення антени становить 11,96 дБі, а підсилення правої колової компоненти Gain Right становить 11,68 дБі. Оскільки значення Gain Right є близьким до повного значення підсилення Gain Abs, можна зробити висновок, що в напрямку основного випромінювання переважає права колова поляризація.

Отриманий результат підтверджує, що розроблена антенна решітка формує праву колову складову поля, тобто відповідає типу поляризації RHCP.

Водночас для повної оцінки якості колової поляризації необхідно також аналізувати осьове відношення AR. Саме цей параметр показує, наскільки поляризація наближена до ідеальної колової.

За результатами моделювання встановлено, що в частині робочого діапазону поляризація антени наближається до колової. У діапазоні приблизно 6,1–6,6 ГГц значення осьового відношення є меншим за 5 дБ, а в області приблизно 6,2–6,6 ГГц спостерігається найкраще наближення до колової поляризації. Проте отримане значення AR не в усьому діапазоні відповідає критерію ідеальної або якісної колової поляризації $AR \leq 3$ дБ.

Отже, у процесі оптимізації вдалося покращити поляризаційні характеристики антени та отримати область частот, у якій поляризація наближається до колової. Водночас довести конструкцію до ідеального рішення за осьовим відношенням у всьому діапазоні 6–7 ГГц не вдалося. Це пов'язано зі складністю одночасного забезпечення широкої смуги узгодження, достатнього підсилення, компактних розмірів і якісної колової поляризації в мікросмужковій решітці.

Порівняння основних вимог і отриманих результатів наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Порівняння вимог і результатів оптимізованої моделі

Параметр	Вимога	Отриманий результат
Робочий діапазон частот	6–7 ГГц	6–7 ГГц
Вхідний опір	50 Ом	приблизно 40–70 Ом у діапазоні 6–7 ГГц, з наближенням до 50 Ом у центральній частині діапазону

КСХН	не більше 2	переважно не більше 2 у діапазоні 6–7 ГГц
Коефіцієнт підсилення	близько 12 дБі	11,5–12 дБі
Напрямок головного пелюстка	поблизу нормалі	1–6°
Ширина головного пелюстка	не нормується	48,5–51°
Рівень бічних пелюсток	якомога менший	від –29,7 до –22,7 дБ
Осьове відношення	бажано ≤ 3 дБ	менше 5 дБ у частині діапазону, найкраще в області 6,2–6,6 ГГц

Таким чином, оптимізована модель антенної решітки забезпечує роботу в діапазоні 6–7 ГГц, має вхідний опір, близький до 50 Ом, прийнятне узгодження за КСХН та спрямовану діаграму випромінювання. Коефіцієнт підсилення становить приблизно 11,5–12 дБі, що є близьким до заданої вимоги.

Основною перевагою конструкції є компактність, плоске виконання та ширша діаграма спрямованості порівняно з частиною комерційних аналогів. Основним недоліком залишається те, що осьове відношення не вдалося знизити до рівня менше 3 дБ у всьому робочому діапазоні. Тому розроблена конструкція може розглядатися як працездатна модель антенної решітки з наближенням до колової поляризації в частині діапазону, однак її поляризаційні характеристики потребують подальшого вдосконалення.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було виконано моделювання та оптимізацію мікросмужкової антенної решітки діапазону частот 6–7 ГГц у середовищі CST Studio Suite. На основі розрахункових параметрів було побудовано початкову модель

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		78

антенної решітки 2×2 , яка містить чотири мікросмушкові випромінювачі зі зрізаними кутами, діелектричну підкладку, нижній заземлюючий шар, мікросмушкову мережу живлення та коаксіальний вхід.

За результатами першої ітерації моделювання було встановлено, що початкова модель має виражений резонанс у межах заданого частотного діапазону. Мінімальне значення коефіцієнта відбиття S_{11} становило приблизно -26 дБ поблизу частоти $6,4$ ГГц. Це свідчило про добре узгодження антени в області резонансу. Водночас смуга узгодження за критерієм $S_{11} \leq -10$ дБ не перекривала весь робочий діапазон $6-7$ ГГц, тому конструкція потребувала подальшої оптимізації.

Під час оптимізації було скориговано основні геометричні параметри антенної решітки, зокрема розміри випромінювачів, величину зрізів кутів, параметри мікросмушкової мережі живлення та коаксіального переходу. Особливу увагу було приділено адаптації вхідного тракту до хвильового опору 50 Ом, покращенню узгодження та збереженню стабільної спрямованої діаграми випромінювання.

Після оптимізації дійсна частина вхідного опору становить приблизно $50,6$ Ом, що є близьким до стандартного значення 50 Ом. Аналіз коефіцієнта стоячої хвилі за напругою показав, що в основній частині робочого діапазону $6-7$ ГГц антена має прийнятне узгодження, а найкращі характеристики спостерігаються приблизно в області $6,2-6,6$ ГГц.

Оптимізована модель формує спрямовану діаграму випромінювання з головним пелюстком, орієнтованим поблизу нормалі до площини антени. У діапазоні $6-7$ ГГц напрям головного пелюстка змінюється в межах приблизно $1-6^\circ$, що є прийнятним для наземної приймальної антенної системи. Коефіцієнт підсилення становить приблизно $11,5-12$ дБі. Ширина головного пелюстка за

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						79
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

рівнем 3 дБ перебуває в межах приблизно $48,5\text{--}51^\circ$, а рівень бічних пелюсток змінюється приблизно від $-29,7$ до $-22,7$ дБ.

Порівняно з розглянутими комерційними аналогами розроблена антенна решітка має дещо менший коефіцієнт підсилення, оскільки частина аналогів забезпечує підсилення на рівні $13,5\text{--}18,5$ дБі. Водночас запропонована конструкція є компактною, має плоске мікросмужкове виконання та ширшу діаграму спрямованості. Це є практичною перевагою для наземної FPV-станції, оскільки ширший головний пелюсток спрощує наведення антени на рухомий БПЛА та зменшує вимоги до точності її орієнтації.

За результатами аналізу тривимірної діаграми правої колової компоненти поля встановлено, що в напрямку головного пелюстка переважає компонента Ludwig 3 Right. На частоті 6,4 ГГц абсолютне підсилення становить 11,96 дБі, а підсилення правої колової компоненти Gain Right — 11,68 дБі. Це підтверджує формування правої колової поляризації RHCP у напрямку основного випромінювання.

Водночас аналіз осьового відношення показав, що якість колової поляризації не є ідеальною в усьому робочому діапазоні. У діапазоні приблизно 6,1–6,6 ГГц значення осьового відношення є меншим за 5 дБ, а найкраще наближення до колової поляризації спостерігається в області приблизно 6,2–6,6 ГГц. Проте досягти критерію $AR \leq 3$ дБ у всьому діапазоні 6–7 ГГц не вдалося.

Таким чином, у результаті моделювання та оптимізації було отримано працездатну компактну мікросмужкову антенну решітку 2×2 для діапазону 6–7 ГГц. Антена має вхідний опір, близький до 50 Ом, прийнятне узгодження, коефіцієнт підсилення близько 12 дБі, спрямовану діаграму випромінювання та підтверджену праву колову складову поля RHCP. Основним недоліком конструкції є те, що осьове відношення не вдалося знизити до рівня менше 3 дБ у

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						80
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

всьому робочому діапазоні. Тому поляризаційні характеристики антени можуть бути покращені на наступних етапах дослідження.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						81
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті було розроблено та досліджено мікросмужкову антенну решітку діапазону частот 6–7 ГГц з коловою поляризацією для приймання відеосигналу з безпілотного літального апарата. Актуальність роботи зумовлена необхідністю забезпечення стабільного приймання відеосигналу в FPV-системах, підвищення завадостійкості радіоканалу та використання антенної системи з достатнім коефіцієнтом підсилення.

У першому розділі було проведено аналіз антенних систем для приймання відеосигналу з БПЛА. Розглянуто особливості FPV-зв'язку, вимоги до приймальної антенної системи, частотні діапазони передавання відеосигналу та існуючі комерційні антени колової поляризації. У результаті аналізу встановлено, що для наземної приймальної станції доцільно використовувати спрямовану антену з коловою поляризацією, робочим діапазоном 6–7 ГГц, узгодженням із трактом 50 Ом та коефіцієнтом підсилення, близьким до 12 дБі.

У другому розділі було розглянуто теоретичні основи проектування мікросмужкових антен і антенних решіток. Проаналізовано основні параметри антенних систем, особливості мікросмужкових випромінювачів, способи їх живлення та принцип формування колової поляризації. Показано, що мікросмужкова технологія є придатною для реалізації компактної антенної решітки сантиметрового діапазону хвиль, а використання патчів зі зрізаними кутами дозволяє створити умови для формування колової поляризації.

У третьому розділі було виконано розрахунок основних параметрів антенної решітки. Центральну частоту прийнято рівною 6,5 ГГц. Як матеріал підкладки використано ZYF-255DA з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 2,55$. Було розраховано початкові розміри мікросмужкового випромінювача, визначено структуру решітки 2×2 , відстань між випромінюючими елементами

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						82
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

та параметри мікросмужкової мережі живлення. Отримані розрахункові значення використано як основу для побудови моделі в CST Studio Suite.

У четвертому розділі було виконано моделювання та оптимізацію антенної решітки в CST Studio Suite. За результатами першої ітерації встановлено, що початкова модель має резонанс у межах заданого частотного діапазону, однак не забезпечує необхідних характеристик у всій смузі 6–7 ГГц. Тому було проведено оптимізацію конструкції, під час якої скориговано розміри випромінювачів, зрізи кутів, параметри мікросмужкової мережі живлення та коаксіального переходу.

Після оптимізації дійсна частина вхідного опору антени становить приблизно 50,6 Ом, що є близьким до стандартного значення 50 Ом. Аналіз коефіцієнта стоячої хвилі за напругою показав, що в основній частині робочого діапазону 6–7 ГГц антена має прийнятне узгодження, а найкращі характеристики спостерігаються приблизно в області 6,2–6,6 ГГц.

За результатами моделювання діаграм спрямованості встановлено, що оптимізована антенна решітка формує спрямоване випромінювання з головним пелюстком, орієнтованим поблизу нормалі до площини антени. Коефіцієнт підсилення в діапазоні 6–7 ГГц становить приблизно 11,5–12 дБі. Ширина головного пелюстка за рівнем 3 дБ перебуває в межах приблизно 48,5–51°, що забезпечує достатньо широку зону приймання сигналу.

Порівняно з розглянутими комерційними аналогами розроблена антена має дещо менший коефіцієнт підсилення, оскільки частина аналогів забезпечує підсилення на рівні 13,5–18,5 дБі. Водночас запропонована конструкція є компактною, має плоске мікросмужкове виконання та ширшу діаграму спрямованості. Це є перевагою для наземної FPV-станції, оскільки ширший головний пелюсток спрощує наведення антени на рухомий БПЛА та зменшує вимоги до точності її орієнтації.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						83
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим результатом роботи є підтвердження формування правої колової поляризації. За результатами аналізу тривимірної діаграми правої колової компоненти поля встановлено, що в напрямку головного пелюстка переважає компонента Ludwig 3 Right. На частоті 6,4 ГГц абсолютне підсилення становить 11,96 дБі, а підсилення правої колової компоненти Gain Right — 11,68 дБі. Це підтверджує, що розроблена антенна решітка формує праву колову поляризацію RHCP у напрямку основного випромінювання.

Разом із тим аналіз осьового відношення показав, що довести поляризаційні характеристики до ідеального рівня в усьому робочому діапазоні не вдалося. У діапазоні приблизно 6,1–6,6 ГГц значення осьового відношення є меншим за 5 дБ, а найкраще наближення до колової поляризації спостерігається в області 6,2–6,6 ГГц. Проте критерій $AR \leq 3$ дБ не виконується в усьому діапазоні 6–7 ГГц. Отже, антена забезпечує праву колову складову поля та наближення до колової поляризації в частині діапазону, однак її поляризаційні характеристики потребують подальшого вдосконалення.

Таким чином, у результаті виконання дипломного проєкту було отримано працездатну компактну мікросмужкову антенну решітку 2×2 для діапазону частот 6–7 ГГц. Розроблена антена має вхідний опір, близький до 50 Ом, прийнятне узгодження, коефіцієнт підсилення близько 12 дБі, спрямовану діаграму випромінювання та підтверджену праву колову поляризацію RHCP. Практична цінність роботи полягає в можливості використання такої антенної решітки у складі наземної станції приймання відеосигналу з БПЛА.

Подальше вдосконалення конструкції доцільно спрямувати на зменшення осьового відношення до рівня менше 3 дБ у ширшій частині робочого діапазону, покращення поляризаційних характеристик та можливе підвищення коефіцієнта підсилення без суттєвого звуження діаграми спрямованості.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						84
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Gupta L. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks / L. Gupta, R. Jain, G. Vaszkun // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – Vol. 18, No. 2. – P. 1123–1152.
2. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design / C. A. Balanis. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. – 1096 p.
3. ITU-R P.525-5. Calculation of free-space attenuation [Електронний ресурс] / International Telecommunication Union. – 2024. – Режим доступу: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525>
4. Патч Skif 14 dBi LHCP 4.9–6.0 GHz з кабелем для FPV Drone [Електронний ресурс] / 450 Tactical. – Режим доступу: https://450tactical.com/patch_skif_14dbi_lhcp_4_9_6_0_ghz_fpv_drone/
5. Антена патч 6.2–7.5 GHz 14 dBi RHCP кругова поляризація SMA 50W [Електронний ресурс] / Emart. – Режим доступу: <https://emart.co.ua/antena-patch-6-2-7-5-hhsts-14db-rhcp-sma-50w/>
6. Патч Skif 13,5 dBi RHCP 6.0–8.0 GHz Made in UA [Електронний ресурс] / EFPV. – Режим доступу: <https://efpv.in.ua/patch-skif-13-5dbi-rhcp-6-0-8-0-ghz-made-in-ua>.
7. Патч Skif 18,5 dBi RHCP 6.0–8.0 ГГц «Барвінок 67-R-19» [Електронний ресурс] / Skif Robotics. – Режим доступу: <https://skifrobotics.com/ua/g133946455-anteni-retranslyatoriv>.
8. Широкопasmовa антена Maple Wireless 4.85–6.3G 17 dBi RHCP [Електронний ресурс] / Flash Army. – Режим доступу: <https://flasharmy.com.ua/shirokosmugova-antena-maple-wireless-4-85-6-3g-17dbi-rhcp>.
9. Богданов Ю. М. Антени та пристрої надвисоких частот : підручник / Ю. М. Богданов, О. П. Кізмін, О. Ю. Смирнова. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 352 с.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						85
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Власенко В. О. Проектування мікросмугових антенних пристроїв : навчальний посібник / В. О. Власенко, С. О. Попов, В. Г. Скиданов. – Суми : СумДУ, 2013. – 180 с.
11. Garg R. Microstrip Antenna Design Handbook / R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, A. Ittipiboon. – Boston ; London : Artech House, 2001. – 845 p.
12. Pozar D. M. Microwave Engineering / D. M. Pozar. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2012. – 756 p.
13. ZYF-D series PTFE laminate [Електронний ресурс] / P2M. – Режим доступу: <https://www.p2m.com/wp-content/uploads/2023/ZYF-D%20series%20PTFE%20laminate.pdf>.
14. Sudhakar K., Harshita B., Indumathi R., Infant Bena B., Janani C., Meha T. Design and Simulation of a 2x2 Microstrip Patch Antenna Array for a Wireless Communication System // 2025 6th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). – 2025. – P. 253–257.
15. Shirpay A., Rohaninezhad M. R., Tavakoli M., Zarezadeh E. Reduction of mutual coupling in a microstrip array antenna with circular polarization in the C-frequency band using a combination of DGS and EBG methods // Engineering Research Express. – 2023. – Vol. 5, No. 1. – P. 015033.
16. Magalhães M. P. Design and analysis of an antenna array system for communication using high-altitude platforms : Master's thesis. – 2017. – 161 p.
17. High Frequency PCB Material: ZYF255DA (Dk=2.55, Df=0.0018) [Електронний ресурс] / JLCPCB. – Режим доступу: <https://jlcpcb.com/pcb-fabrication/high-frequency-pcb>
18. Panchenko P. O., Shmakov A. A., Skvarnik I. S., Statsenko L. G., Seleznev V. A. Development of a microstrip antenna array for wireless broadband access means based on domestic element base // Journal of Radio Electronics. – 2025. – № 6

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						86
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

ЗМІСТ

1. НАЙМЕНУВАННЯ ТА ГАЛУЗЬ РОЗРОБКИ.....	2
2. ПІДСТАВА ДЛЯ РОЗРОБКИ	2
3. МЕТА ТА ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ	2
4. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ.....	3
5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.....	3
5.1 Вимоги до функціонування антенної системи.....	3
5.2 Вимоги до електродинамічних характеристик.....	4
5.3 Вимоги до конструкції та матеріалів	5
5.4 Вимоги до моделювання	5
5.5 Умови експлуатації.....	6
6. ЕТАПИ РОЗРОБКИ	6
7. НАЙМЕНУВАННЯ ТА ГАЛУЗЬ РОЗРОБКИ.....	7

1. НАЙМЕНУВАННЯ ТА ГАЛУЗЬ РОЗРОБКИ

Назва розробки: «Антенна решітка діапазону частот 6–7 ГГц з коловою поляризацією».

Галузь застосування: радіотехнічні та телекомунікаційні системи, зокрема наземні станції приймання відеосигналу з безпілотних літальних апаратів, FPV-системи та інші високочастотні системи зв'язку сантиметрового діапазону хвиль.

2. ПІДСТАВА ДЛЯ РОЗРОБКИ

Підставою для розробки є завдання на дипломне проєктування на здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, затверджене кафедрою радіоінженерії. Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського».

3. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Метою дипломного проєкту є розробка та моделювання мікросмушкової антенної решітки колової поляризації, призначеної для роботи в діапазоні частот 6–7 ГГц.

Призначенням розроблюваної антенної решітки є приймання відеосигналу з безпілотного літального апарата у складі наземної приймальної станції. Антенна система повинна забезпечувати спрямоване приймання сигналу, узгодження з 50-омним трактом, коефіцієнт підсилення близько 12 дБі та формування колової поляризації або наближення до неї в робочому діапазоні частот.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						88
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

Джерелами розробки є:

- науково-технічна література з теорії антен, мікросмушкових випромінювачів та антенних решіток;
- навчальні посібники та підручники з проектування антен і пристроїв НВЧ;
- технічна документація на діелектричні матеріали, придатні для використання в НВЧ-діапазоні;
- відкриті технічні характеристики комерційних патч-антен колової поляризації для FPV-систем;
- матеріали та інструменти програмного середовища CST Studio Suite;
- результати аналітичного розрахунку, електродинамічного моделювання та оптимізації антенної решітки.

5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.1 Вимоги до функціонування антенної системи:

- приймання відеосигналу з безпілотного літального апарата в діапазоні частот 6–7 ГГц;
- роботу у складі наземної приймальної станції;
- спрямоване приймання сигналу в напрямку головного пелюстка діаграми спрямованості;
- підвищення коефіцієнта підсилення порівняно з одиночним мікросмушковим випромінювачем;
- зменшення впливу зміни просторового положення БПЛА за рахунок використання колової поляризації;
- підключення до стандартного високочастотного тракту з хвильовим опором 50 Ом;
- можливість подальшої оптимізації геометричних параметрів у середовищі CST Studio Suite.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						89
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.2 Вимоги до електродинамічних характеристик:

- робочий діапазон частот — 6–7 ГГц;
- центральна частота розрахунку — 6,5 ГГц;
- тип антени — мікросмужкова антенна решітка;
- конфігурація решітки — 2×2 ;
- тип поляризації — колова, бажано права колова поляризація RHCP;
- коефіцієнт підсилення — близько 12 дБі;
- вхідний опір — 50 Ом;
- коефіцієнт відбиття S_{11} — не більше -10 дБ у робочому діапазоні частот;
- коефіцієнт стоячої хвилі за напругою — не більше 2 в основній частині робочого діапазону;
- осьове відношення — цільове значення не більше 3 дБ у напрямку головного пелюстка; допускається подальша оптимізація для покращення цього параметра;
- діаграма спрямованості — спрямована, з головним пелюстком поблизу нормалі до площини антени;
- рівень бічних пелюсток — мінімально можливий для обраної конфігурації решітки.

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						90
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.3 Вимоги до конструкції та матеріалів:

- використання мікросмужкової технології;
- розміщення чотирьох випромінюючих елементів на спільній діелектричній підкладці;
- застосування мікросмужкових патчів зі зрізаними кутами для формування колової поляризації;
- використання корпоративної мікросмужкової мережі живлення;
- підведення сигналу через один вхідний коаксіальний порт;
- використання діелектричної підкладки ZYF-255DA або матеріалу з близькими електричними характеристиками;
- відносна діелектрична проникність підкладки — близько $\epsilon_r = 2,55$;
- відносна магнітна проникність матеріалу — $\mu_r = 1$;
- тангенс кута діелектричних втрат — малий, придатний для роботи в НВЧ-діапазоні;
- провідні елементи антени моделюються як ідеальний електричний провідник PEC;
- конструкція повинна мати плоску форму та бути придатною для подальшого виготовлення за технологією друкованих плат.

5.4 Вимоги до моделювання:

- побудувати тривимірну модель антенної решітки;
- задати матеріали діелектричної підкладки та провідних елементів;
- реалізувати мікросмужкову мережу живлення та коаксіальний вхід;
- виконати розрахунок коефіцієнта відбиття S11;

					PI-21.000000.002 ПЗ	Лис
						91
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

- оцінити КСХН у робочому діапазоні частот;
- проаналізувати вхідний опір антенної решітки за параметром Z_{11} ;
- отримати діаграми спрямованості в діапазоні 6–7 ГГц;
- визначити коефіцієнт підсилення антенної решітки;
- оцінити поляризаційні характеристики за осьовим відношенням AR;
- провести оптимізацію геометричних параметрів випромінювачів, підкладки та фідерної мережі.

5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.5 Умови експлуатації:

- робота в діапазоні частот 6–7 ГГц;
- використання в умовах прямої або частково обмеженої видимості між БПЛА та наземною станцією;
- експлуатація у складі стаціонарної або переносної наземної антенної системи;
- підключення до високочастотного тракту з хвильовим опором 50 Ом;
- робота за нормальних кліматичних умов або в захисному корпусі;
- температура навколишнього середовища — від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- відносна вологість повітря — до 80 % без конденсації вологи;
- захист від прямого потрапляння атмосферних опадів має забезпечуватися конструкцією корпусу або умовами встановлення.

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						92
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ЕТАПИ РОЗРОБКИ

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів
1	Огляд існуючих антенних систем для приймання відеосигналу з БПЛА та аналіз аналогів	20.04.26–06.05.26
2	Розробка та аналіз технічного завдання на проєкт	07.05.26–10.05.26
3	Аналіз теоретичних основ побудови мікросмужкових антенних решіток колової поляризації	11.05.26–18.05.26
4	Розрахунок параметрів мікросмужкового випромінювача та вибір матеріалу діелектричної підкладки	19.05.26–23.05.26
5	Розрахунок структури антенної решітки та мікросмужкової мережі живлення	24.05.26–29.05.26
6	Побудова моделі антенної решітки в CST Studio Suite, моделювання та оптимізація характеристик	30.05.26–05.06.26
7	Оформлення текстової та графічної документації	06.06.26–15.06.26

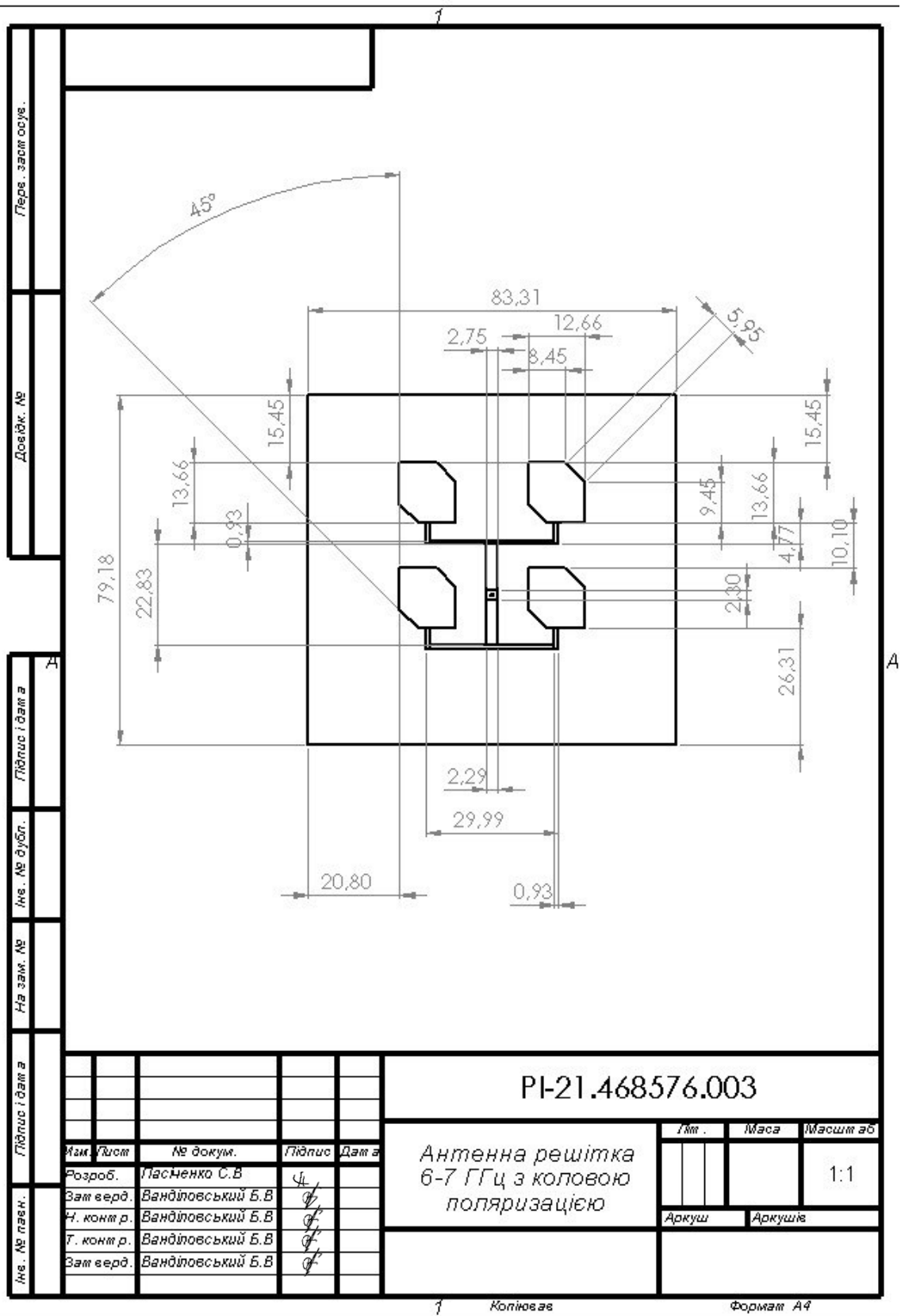
ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

[illegible]

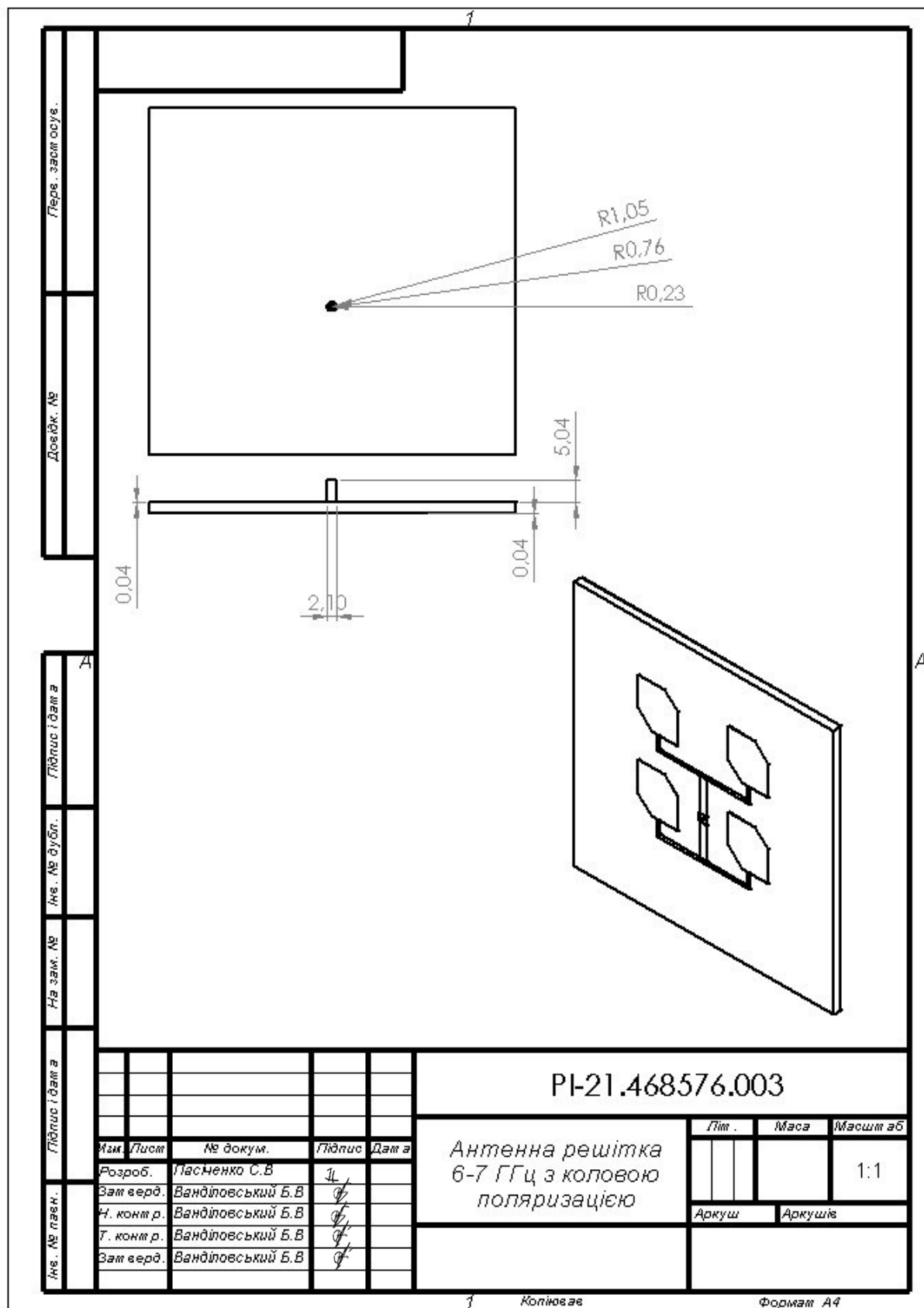
				PI-21. 468576.000		
	ПІБ	Підп.	Дата	Антенна решітка діапазону частот 6-7 ГГц з коловою поляризацією	Лист	Листів
Розробн.	Пасіченко				1	1
Керівн.	Ванділовський				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф.РІ ,Гр. РІ-21	
Н/контр.						
Зав.каф.	Літвінцев					

					<i>PI-21.000000.002 ПЗ</i>	Лис
						94
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б



Аркуш 1 — Геометричні розміри мікросмужкової антенної решітки.



Аркуш 2 — Конструктивний вигляд антенної решітки, розріз і коаксіальний перехід.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

PI-21.000000.002 ПЗ

Лист
96