

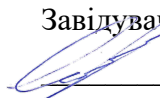
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«16» 06 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра за освітньою програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

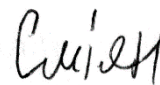
спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

**на тему: «Дослідження впливу носійної платформи на характеристики
випромінювання антен в С-діапазоні частот»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) III курсу, групи РІ-п31

Сміян Іван Анатолійович



Керівник:

Доцент, PhD

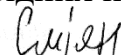
Сушко Олександр Юрійович

Рецензент:

Д.Т.Н., Професор

Степанов Михайло Миколайович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
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 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

« 20 » 04 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний роботу студенту

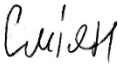
Сміяну Івану Анатолійовичу

1. Тема роботи «Дослідження впливу носійної платформи на характеристики випромінювання антен в С-діапазоні частот »,
керівник роботи доц., PhD Сушко Олександр Юрійович,
затверджені наказом по університету від « 28 » 5 2026 р. № 1990-с
2. Термін подання студентом роботи 16.06.2026
3. Вихідні дані до роботи: Дрон із карбоновим корпусом, антена кругової поляризації типу «конюшина», програмне середовище CST Studio Suite, орієнтація БПЛА, висота підвісу антени 20/60/120 мм.
4. Зміст пояснювальної записки обґрунтування вибору антени типу «конюшина»; побудова тривимірної моделі антени та інтеграція її з моделлю носійної платформи; моделювання та аналіз характеристик у вільному просторі та на корпусі БПЛА; порівняння результатів і формування рекомендацій щодо оптимального розміщення антени для забезпечення стабільного радіозв'язку.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація на слайдів
6. Дата видачі завдання 20.04.2026р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Розробка теми, збір і аналіз літературних джерел	20.04.2026	
2	Обґрунтування вибору антени та платформи	26.04.2026	
3	Побудова моделі антени у CST Studio Suite	01.05.2026	
4	Моделювання впливу платформи на характеристики випромінювання	11.05.2026	
5	Аналіз результатів	21.05.2026	
6	Оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів	31.05.2026	
7	Підготовка до захисту	11.06.2026	

Студент

 Іван СМІЯН

Керівник

Олександр СУШКО

ЗМІСТ

АННОТАЦІЯ	5
ANNOTATION	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АНТЕННИХ СИСТЕМ БПЛА С-ДІАПАЗОНУ	10
1.1 Особливості побудови радіоліній зв'язку БПЛА в С-діапазоні.....	10
1.2 Порівняльний аналіз антен С-діапазону частот для бортових систем БПЛА.....	11
1.2.1 Всеспрямовані антени	12
1.2.2 Спрямовані антени.....	12
1.2.3 У чому різниця між лінійними та кільцевими антенами	14
1.2.4 Порівняльний аналіз антен С-діапазону частот для бортових систем БПЛА.....	16
1.3 Принцип роботи та характеристики антен колової поляризації типу «конюшина» ..	25
1.4 Вплив матеріалів та конструкції носійної платформи (БПЛА) на поширення радіохвиль.....	27
1.5 Висновки до розділу 1	30
2 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГОТОВОЇ КОНЮШИНОВОЇ АНТЕНИ У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРІ	32
2.1 Геометричний аналіз імпортованої моделі антени на частоту 5,8 ГГц	32
2.2 Алгоритм імпорту тривимірної CAD-моделі в CST Studio Suite	33
2.3 Конфігурування обчислювальної сітки та граничних умов	35
2.4 Результати моделювання ізольованої антени у вільному просторі	36
2.5 Висновки до розділу 2	40
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ АНТЕНИ З КОНСТРУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ БПЛА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЇЇ ПОЛОЖЕННЯ	42
3.1 Методологія просторово-топологічної оптимізації антенної системи.....	42
3.2 Побудова та обґрунтування тривимірної моделі системи «антена – БПЛА»	43
3.3 Аналіз характеристик імпедансного узгодження для різних режимів польоту	45
3.4 Вплив конструкції БПЛА на діаграму спрямованості антени.....	49
3.5 Аналіз частотно-кутової залежності коефіцієнта еліптичності антени.....	56
3.6 Висновки до розділу 3	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

АННОТАЦІЯ

Пояснювальна записка дипломної роботи має обсяг 64 сторінок, містить 33 рисунки та ілюстрації, 10 найменувань у переліку посилань.

У дипломній роботі розглянуто процес дослідження електродинамічної взаємодії бортової антени кругової поляризації типу «конюшина» з носійною вуглепластиковою платформою БПЛА в С-діапазоні частот на центральній частоті 5.8 ГГц. Моделювальна частина базується на використанні методу скінченних інтегралів у спеціалізованому програмному середовищі тривимірного електродинамічного аналізу CST Studio Suite. Проведено обґрунтування вибору геометричних параметрів розміщення випромінювача, розроблено інтегральну тривимірну модель системи «антена – БПЛА» та досліджено три варіанти висоти підвісу антени для режимів горизонтального і нахиленого польоту. У роботі здійснено комп'ютерні дослідження характеристик імпедансного узгодження, просторових діаграм спрямованості та частотно-кутової залежності коефіцієнта еліптичності, а також порівняно отримані результати з параметрами ізольованого випромінювача. Запропоновано напрямки вдосконалення бортової системи зв'язку, зокрема конструктивне винесення фазового центра антени за допомогою жорсткого високочастотного фідерного кронштейна. Робота має практичне значення для підвищення завадостійкості та стабільності каналів телеметрії і високошвидкісної відеопередачі FPV-систем в умовах активного польотного маневрування.

Ключові слова: антена кругової поляризації, антена типу «конюшина», коефіцієнт стоячої хвилі, діаграма спрямованості, коефіцієнт еліптичності, карбоновий планер, CST Studio Suite.

ANNOTATION

The explanatory note of the bachelor's thesis consists of 64 pages, contains 32 figures and illustrations and 10 references.

The thesis examines the investigation of the electrodynamic interaction between an onboard circular polarization cloverleaf antenna and a carbon-fiber UAV carrier platform in the C-band at the central frequency of 5.8 GHz. The simulation part is based on the finite integration technique used in the specialized 3D electrodynamic analysis software CST Studio Suite. The selection of geometric parameters for the radiator placement is substantiated, an integrated 3D model of the "antenna – UAV" system is developed, and three antenna mounting height configurations (20 mm, 60 mm, and 120 mm) are investigated for both horizontal and tilted flight modes. Computer simulations of impedance matching characteristics (VSWR), spatial radiation patterns, and the frequency-angular dependence of the axial ratio (AR) are carried out, and the obtained results are compared with the parameters of an isolated radiator. Directions for improving the onboard communication system are proposed, specifically the structural displacement of the antenna's phase center using a rigid high-frequency feeder bracket. The work has practical significance for enhancing the noise immunity and stability of telemetry and high-speed video transmission channels in FPV systems under conditions of active flight maneuvering.

Keywords: circular polarization antenna, cloverleaf antenna, voltage standing wave ratio, VSWR, radiation pattern, axial ratio, AR, carbon-fiber airframe, CST Studio Suite.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ВЧ – високочастотний

ДС – діаграма спрямованості

КЕ – коефіцієнт еліптичності

КСХ (КСХН) – коефіцієнт стоячої хвилі

НВЧ – надвисокі частоти

РЕМ – радіоелектронні медіа / радіоелектронна межа

AR – коефіцієнт еліптичності

CST Studio Suite – спеціалізоване програмне середовище тривимірного електродинамічного моделювання

дБ – децибел

FPV (First Person View) – режим керування та передачі відеопотоку від першої особи

ГГц – гігагерц

h – висота просторового винесення антени над планером БПЛА, мм

Low / Mid / High – низька (20 мм), середня (60 мм) та висока (120 мм) конфігурації геометричного розміщення антени

VSWR – Voltage Standing Wave Ratio

Θ – кут місця у сферичній системі координат, градус

Φ – азимутальний кут у сферичній системі координат, градус

E – вектор напруженості електричного поля

ВСТУП

На сьогоднішній день безпілотні літальні апарати різних модифікацій знайшли масове застосування як у цивільній сфері (моніторинг інфраструктури, аерозйомка, пошуково-рятувальні операції), так і у військовій справі для ведення розвідки та коригування вогню. Надійність, дальність та стабільність виконання польотних місій безпосередньо залежать від якості функціонування бортових радіоліній зв'язку, керування, передачі телеметрії та відеоданих у реальному часі.

Для забезпечення високої пропускну здатності та завадостійкості сучасних радіоліній БПЛА широко використовується С-діапазон частот, зокрема цивільний ISM-діапазон частот біля 5.8 ГГц. Під час польоту безпілотник постійно змінює свою просторову орієнтацію (здійснює крени, тангаж, розвороти), що в системах із лінійною поляризацією призводить до глибоких поляризаційних завмирань сигналу аж до повної його втрати. Для вирішення цієї проблеми бортові комплекси оснащують антенами колової поляризації. Серед них особливе місце посідають конюшині антени, які поєднують у собі всеспрямовану діаграму покриття та високу якість колової поляризації в широкому кутовому секторі.

Проте в реальних умовах експлуатації антена не функціонує в ізольованому вільному просторі. Вона монтується на носійну платформу — корпус БПЛА. Сучасні рами дронів переважно виготовляються з вуглепластику, який має високу питому провідність і поводить на частотах С-діапазону як діелектричний матеріал із високою діелектричною проникністю і втратами. Крім того, на близькій відстані від антени розташовані інші масивні конструктивні елементи: літій-полімерні акумуляторні батареї, безколекторні двигуни, силові кабелі та металізовані плати електроніки.

Присутність такого складного провідного оточення призводить до значного викривлення діаграми спрямованості, появи «мертвих зон» через ефекти затінення, руйнування колової поляризації, а також до зміни вхідного імпедансу антени та погіршення її узгодження.

Мета роботи дослідження характеру та ступеня впливу конструктивних елементів і матеріалів носійної платформи на спрямовані, поляризаційні та імпедансні характеристики антени типу конюшина С-діапазону частот, а також розробка обґрунтованих практичних рекомендацій щодо оптимізації її просторового розміщення на борту носія для забезпечення надійного радіозв'язку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати сучасний стан розвитку бортових антенних систем БПЛА та теоретичні основи взаємодії випромінювання антен колової поляризації з провідними об'єктами складної геометричної форми.
- Розрахувати геометричні параметри та створити базову тривимірну електродинамічну модель конюшинової антени на робочу частоту 5.8 ГГц у середовищі CST Studio Suite.
- Дослідити характеристики узгодження та випромінювання розробленої антени у вільному просторі.
- Розробити геометрично та фізично адекватну 3D-модель носійної платформи з урахуванням реальних електрофізичних властивостей матеріалів.
- Провести серію чисельних експериментів з моделювання системи «БПЛА + антена» для різних варіантів просторового розташування антени на корпусі носія.
- Виконати порівняльний аналіз деградації характеристик антени під впливом платформи та сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальної точки монтажу.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АНТЕННИХ СИСТЕМ БПЛА С-ДІАПАЗОНУ

1.1 Особливості побудови радіоліній зв'язку БПЛА в С-діапазоні

Сучасні комплекси БПЛА критично залежать від стійкості та пропускної здатності бортових радіоліній, які забезпечують три основні функціональні потоки даних: передачу команд управління, трансляцію телеметричної інформації та передачу широкосмугового цифрового або аналогового відеопотоку у реальному часі [1].

Для реалізації високошвидкісних каналів зв'язку авіаційних систем широкого впровадження набув С-діапазон частот, а саме виділена цивільна ділянка ISM у межах частот 5,7–5,8 ГГц. Перехід у даний частотний діапазон зумовлений потребою передачі великих обсягів інформації (зокрема відео високої чіткості HD з низьким рівнем затримки), що вимагає широкої смуги пропускання каналу [1, 4]. Окрім цього, оскільки довжина хвилі λ на частотах близько 5,8 ГГц становить приблизно 5,17 см, габаритні розміри та маса бортових антенних пристроїв значно зменшуються, що є критично важливим для збереження корисного навантаження та аеродинамічних властивостей літального апарата [3].

Поширення радіохвиль С-діапазону відбувається переважно в умовах прямої видимості. Хоча для хвиль цього діапазону характерне явище дифракції, через невелику довжину хвилі її вплив є обмеженим. Внаслідок цього огинання природних та штучних перешкод відбувається менш ефективно порівняно з нижчими частотними діапазонами, що призводить до значного ослаблення сигналу за наявності рельєфу місцевості, рослинності або забудови [3].

Особливою проблемою при експлуатації радіоліній зв'язку є динамічний характер польоту БПЛА, що супроводжується постійними змінами його просторової орієнтації — кутів крену, тангажу та азимутального розвороту. Якщо бортовий та наземний комплекси оснащені класичними антенами з лінійною поляризацією (наприклад, чвертьхвильовими монополями), то при

маневруванні виникає просторова неузгодженість векторів напруженості електричного поля E приймальної та передавальної антен[5].

Поляризаційні втрати потужності сигналу $L_{\text{пол}}$ за такої взаємодії визначаються за формулою [2]:

$$L_{\text{пол}} = -20 \lg(\cos \theta)$$

де $L_{\text{пол}}$ — поляризаційні втрати потужності сигналу, дБ; θ — кут просторової неузгодженості між осями лінійної поляризації антен.

При кутах нахилу апарата, близьких до $\theta = 90^\circ$, теоретичні втрати прямують до нескінченності, що практично виражається у появі глибоких завмирань сигналу аж до повної втрати керування та телеметрії [8].

1.2 Порівняльний аналіз антен С-діапазону частот для бортових систем БПЛА

Під час вибору антени потрібно враховувати наступні параметри:

- Частотний діапазон — переважно 5.8 ГГц, але для довгих дистанцій застосовують також 1.2 ГГц, 2.4 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення (Gain) — визначає, наскільки вузько сфокусований сигнал. Для польотів на великі відстані потрібні антени з більшим підсиленням (10–20 dBi).
- Поляризація — лінійна або колова (RHCP/LHCP).
- Спрямованість — всеспрямована або секторна.
- Тип роз'єму — SMA, RP-SMA, MMCX або U.FL, що визначає сумісність із передавачем чи окулярами.

На FPV-дронах використовуються два основних типи антен — всеспрямовані та спрямовані.

1.2.1 Всеспрямовані антени

Такі антени приймають і передають сигнал у всіх напрямках. Їх часто встановлюють на дроні, адже під час маневрів і поворотів важливо, щоб зв'язок не втрачався незалежно від положення апарата.

Переваги:

1) Стабільний сигнал під час активних рухів. Антени з коловою поляризацією зберігають якість зв'язку навіть тоді, коли дрон виконує різкі маневри, нахиляється, робить перевороти чи змінює орієнтацію в просторі.

2) Лінійно-поляризовані антени сильно залежать від взаємної орієнтації передавача та приймача — якщо дрон нахилиться, сигнал може різко впасти. Колова поляризація нівелює ці зміни завдяки обертанню хвилі, тому приймач отримує стабільну потужність сигналу майже з будь-якого кута.

3) Простота встановлення. Такі антени не потребують точного вирівнювання у просторі. Їх легко розташувати на дроні або FPV-окулярах без необхідності підбирати строго вертикальне чи горизонтальне положення. У більшості випадків достатньо просто закрутити антену в роз'єм SMA/MMCX та забезпечити, щоб вона не торкалася пропелерів.

4) Хороша робота на коротких і середніх дистанціях. На типових для FPV відстанях колові антени демонструють відмінний баланс між стабільністю, завадостійкістю й кутовим покриттям. Вони краще пригнічують мультипасинг (коли сигнал багато разів відбивається від землі, дерев, металевих конструкцій), що забезпечує чистішу картинку.

На дистанції до 2–3 км якісна антена дає чіткий відеосигнал навіть у складних умовах — у лісі, в міських зонах, поруч з іншими дронами.

1.2.2 Спрямовані антени

Спрямовані концентрують сигнал у вузькому секторі, завдяки чому мають більшу дальність. Їх ставлять на приймальну сторону — антену для FPV окулярів або антену для FPV шолома.

Переваги:

1) Значно більша дальність. Антени з лінійною поляризацією та вузьким діаграмним рисунком забезпечують максимальну концентрацію радіосигналу в обраному напрямку. Це дозволяє передавати відео на істотно більшу відстань, оскільки енергія випромінювання не розсіюється на всі боки, як у колових антен. Саме тому правильно орієнтований патч або хелікс дає впевнений прийом на 10 км і далі, навіть при відносно невисокій потужності VTX. Для далеких польотів така антена дає максимальний приріст дальності без необхідності збільшувати потужність передавача, що важливо для дотримання законодавства і збереження акумулятора дрона.

2) Підвищена стійкість до перешкод. Завдяки вузькому променю антена приймає сигнал із конкретного напрямку й природно відсікає шуми з боків та ззаду. Це особливо корисно на великій дистанції, де фонові радіоперешкоди можуть «з'їдати» слабкий сигнал дрона.

Переваги вузьконаправлених антен у боротьбі з перешкодами:

- значне послаблення паразитних сигналів;
- зменшення впливу мультипасингу (особливо над водою та в гірській місцевості);
- краща фокусованість прийому, що підвищує стабільність каналу FPV.

У підсумку відео стає менш «зернистим», зникають стрибки RSSI та зменшується кількість чорних екранів при розворотах на великій дистанції.

3) Оптимальний вибір для дальніх польотів або фіксованих позицій. Сценарії, де такі антени працюють найкраще:

- політ за маршрутом – дрони летять у конкретному напрямку, і оператор завжди знає, де вони будуть;
- довгі прямолінійні вильоти — типові для крил та long-range квадрокоптерів;

- стаціонарні наземні станції — коли антена встановлена на штативі та завжди направлена у бік дрона;
- ретранслятори або стаціонарні приймальні точки — наприклад, для відеомоніторингу.

Оскільки така антена потребує наведення в бік дрона, її найчастіше встановлюють:

- на FPV-окулярах/шоломах разом зі stubby- або cloverleaf-антеною;
- на наземній станції з трекером, який сам повертає антену за дроном.

Для далеких польотів саме направлені антени — найкраще рішення, бо вони забезпечують максимальну ефективність, стабільність та якість зображення.

1.2.3 У чому різниця між лінійними та кільцевими антенами

Антени відрізняються типом поляризації — лінійною або коловою. Це визначає, як саме поширюється електромагнітна хвиля в просторі.

Лінійна поляризація:

Вектор електричного поля коливається в одній площині (вертикальній або горизонтальній).

Переваги:

- стабільний коефіцієнт підсилення при прямій видимості;
- простіша конструкція.

Недоліки:

- дуже чутлива до орієнтації антен;
- при поворотах дрона сигнал може втрачатися.

Лінійні антени частіше застосовуються у фіксованих системах або в FPV-передачі на 1.2 ГГц, де дрон не виконує активних обертів.

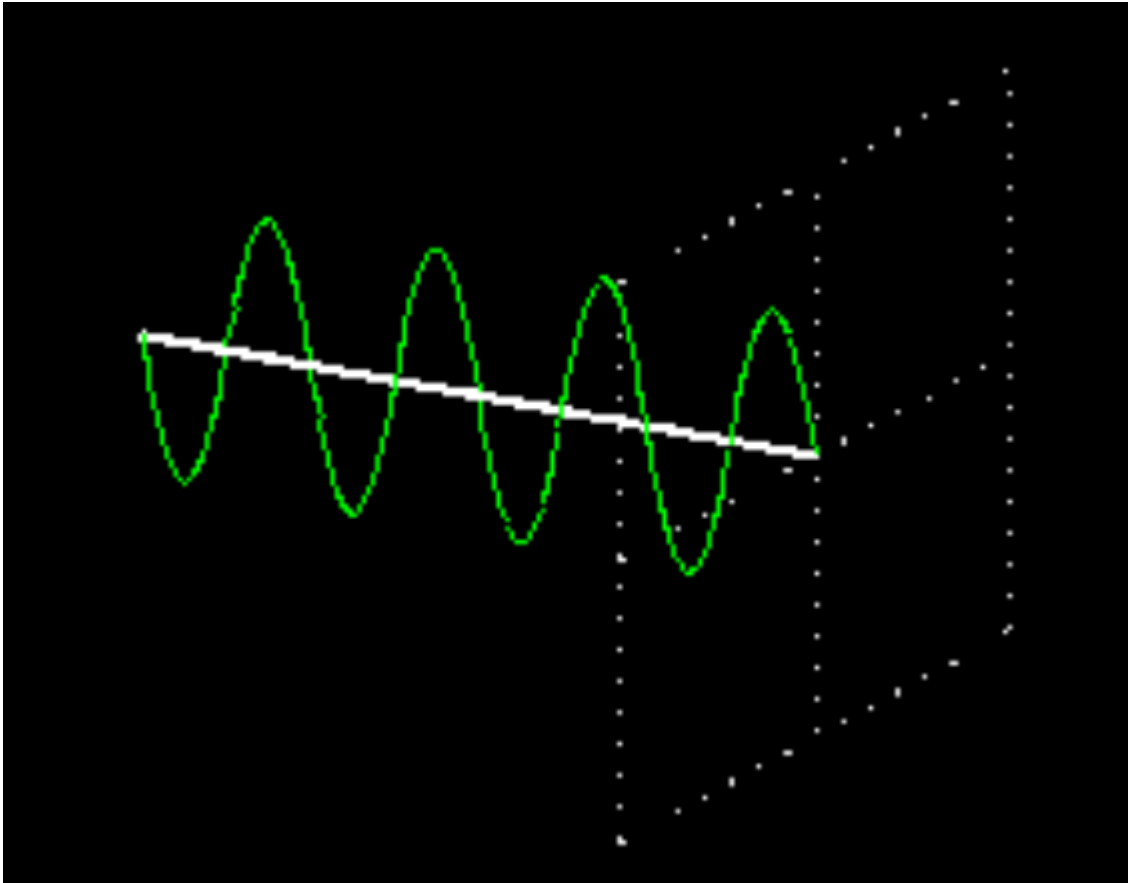


Рисунок 1.1 – Приклад вектора напруженості електричного поля для лінійної поляризації

Колова поляризація

У цьому випадку хвиля обертається навколо своєї осі. Вона може бути правою (RHCP) або лівою (LHCP).

Переваги:

- стабільний прийом незалежно від положення дрона;
- менше відбиттів і перешкод від металевих об'єктів;
- відмінна сумісність із FPV-окулярами та шоломами.

Недоліки:

- трохи нижча ефективність при прямій видимості;
- необхідно підбирати правильну поляризацію (RHCP до RHCP, LHCP до LHCP).

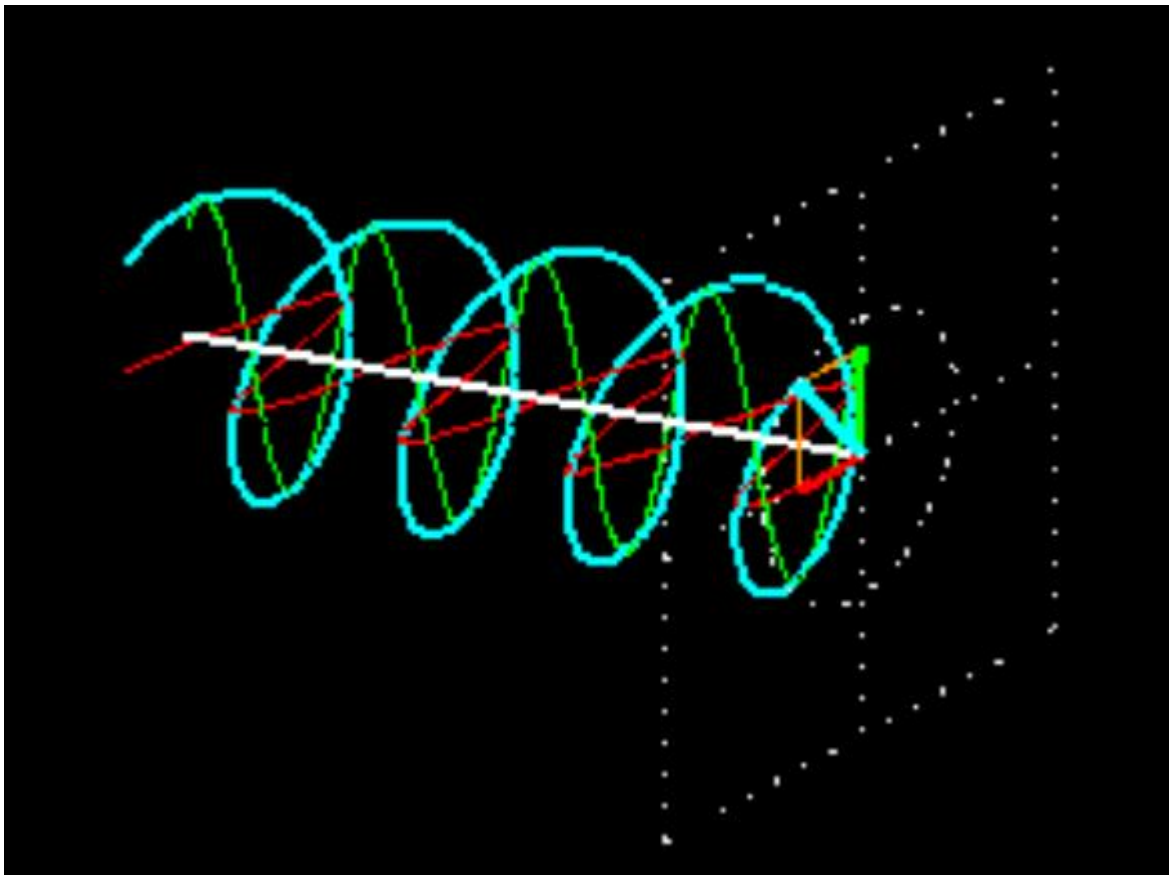


Рисунок 1.2 – Приклад вектора напруженості електричного поля для колової поляризації

Таким чином, для більшості FPV-дронів оптимальним варіантом буде антена з коловою поляризацією RHCP.

1.2.4 Порівняльний аналіз антен С-діапазону частот для бортових систем БПЛА

Для забезпечення стабільного енергетичного потенціалу радіолінії зв'язку та передачі відеоданих незалежно від орієнтації БПЛА у просторі необхідно виконати обґрунтований вибір конструктивної форми та електродинамічного типу бортової антени [3]. Відповідно до результатів досліджень експлуатаційних особливостей безпілотних авіаційних систем, антени С-діапазону, зокрема для робочої частоти 5,8 ГГц, класифікуються за двома основними критеріями: формою діаграми спрямованості (ДН) та видом поляризації випромінюваного електромагнітного поля [3].

За формою ДН антени поділяються на всеспрямовані, які забезпечують практично рівномірне випромінювання енергії в азимутальній площині на 360° , та спрямовані (Directional), що концентрують електромагнітну енергію в обмеженому просторовому секторі для збільшення дальності зв'язку [10]. За поляризаційними характеристиками виділяють антени з лінійною поляризацією, а також антени з коловою поляризацією правого або лівого обертання [5]. Далі розглянемо основні типи антен, які знайшли застосування в безпілотних системах зв'язку С-діапазону.

1) Штирова антена (четвертьхвильовий монополь)

Штирова антена (рисунок 1.3) належить до найпростіших типів випромінювачів за своєю конструкцією. Вона являє собою прямолінійний провідник довжиною приблизно $\lambda/4$, який встановлюється над провідною поверхнею, що виконує роль противаги [2].



Рисунок 1.3 – Штирова антена

До основних переваг штирових антен належать малі масогабаритні характеристики, невисока вартість виготовлення, простота узгодження з коаксіальним трактом хвильовим опором 50 Ом без використання додаткових узгоджувальних елементів, а також наявність всеспрямованої діаграми спрямованості тороїдальної форми в азимутальній площині. Для типового четвертьхвильового монополя коефіцієнт підсилення зазвичай перебуває в межах 1,5–2,1 dBi.

Разом із тим підвищення коефіцієнта підсилення штирових антен, зокрема шляхом застосування колінеарних конструкцій, досягається переважно за рахунок звуження діаграми спрямованості у вертикальній площині. Унаслідок цього характерна тороїдальна форма випромінювання стає більш «сплющеною» [10]. Для безпілотних літальних апаратів така особливість може бути критичною, оскільки під час проходження апарата безпосередньо над наземною станцією він потрапляє в область мінімуму діаграми спрямованості, так звану «мертву зону зеніту», що здатне спричинити істотне погіршення або навіть втрату зв'язку.

Додатковим обмеженням є використання виключно лінійної вертикальної поляризації. Як було показано в підрозділі 1.1, при виконанні БПЛА маневрів із креном або тангажем орієнтація антени змінюється відносно наземної станції, що призводить до поляризаційної неузгодженості. Наслідком цього є додаткові втрати сигналу, які в окремих випадках можуть досягати –20 дБ і більше [8]. Таким чином, незважаючи на конструктивну простоту та широке поширення, штирові антени мають низку обмежень, що знижують ефективність їх використання в каналах зв'язку БПЛА під час інтенсивного маневрування.

2) Мікросмужкова патч-антена

Мікросмужкова патч-антена (рисунок 1.4) являє собою плоский металевий випромінювальний елемент певної геометричної форми (прямокутної, квадратної, круглої тощо), розміщений на діелектричній підкладці, на протилежному боці якої розташована суцільна заземлена металізація, що виконує функцію екрана [9]. Залежно від способу та точки підведення живлення, яке може здійснюватися за допомогою мікросмужкової лінії або коаксіального зонда, така антена здатна формувати як лінійну, так і колову поляризацію електромагнітної хвилі.

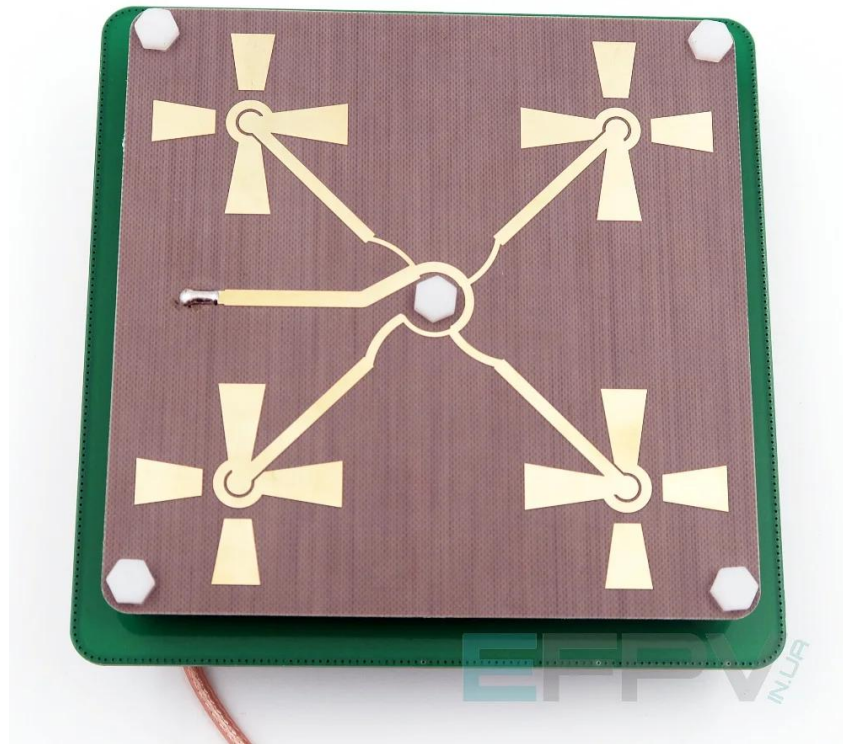


Рисунок 1.4 – Мікросмужкова патч-антена

До основних переваг мікросмужкових патч-антен належать невелика товщина конструкції, мала маса та можливість інтеграції безпосередньо в елементи планера БПЛА, зокрема в композитні частини корпусу або крила. Завдяки цьому практично усувається додатковий аеродинамічний опір, що є важливою перевагою для літальних платформ [4]. Крім того, патч-антени

характеризуються порівняно високим коефіцієнтом підсилення, який зазвичай знаходиться в межах від 10 до 20 дБі.

Водночас даний тип антен має низку суттєвих обмежень. Насамперед це спрямований характер діаграми спрямованості, внаслідок чого основна частина випромінюваної енергії концентрується в одній півсфері простору з типовою шириною головної пелюстки близько 20° – 50° . Іншим важливим недоліком є відносно вузька робоча смуга частот, яка для більшості конструкцій становить лише 10–30 % за умови забезпечення КСХ менше 2 [9].

Через обмежений сектор просторового покриття використання патч-антени як єдиної бортової антени на маневрених безпілотних літальних апаратах є малоефективним. Під час зміни просторової орієнтації апарата або його розвороту екранованою стороною до наземного пункту керування можливе різке погіршення якості каналу зв'язку або повна його втрата. Разом із тим завдяки підвищеному коефіцієнту підсилення та можливості формування вузької діаграми спрямованості мікросмужкові патч-антени широко застосовуються у складі наземних секторних антенних систем і станцій стеження за БПЛА [8].

3) Спіральна осьова антена (Axial-Mode Helical Antenna)

Спіральна антена осьового режиму випромінювання (рисунк 1.5) являє собою провідниковий випромінювач, виконаний у вигляді циліндричної спіралі, розташованої над металевим рефлектором плоскої або конічної форми. Для забезпечення роботи в осьовому режимі необхідно, щоб довжина одного витка спіралі була близькою до робочої довжини хвилі. За таких умов основне випромінювання формується вздовж осі спіралі, що забезпечує спрямовану діаграму спрямованості та високі енергетичні характеристики антени.



Рисунок 1.5 – Спіральна антена

Однією з головних переваг спіральних антен є здатність формувати високоякісну колову поляризацію правого або лівого обертання. Крім того, вони характеризуються широкою робочою смугою частот, яка може досягати 30–50 %, а також значним коефіцієнтом підсилення. Значення підсилення безпосередньо залежить від кількості витків спіралі та зазвичай перебуває в межах від 8,0 до 15,0 дБі.

Разом із високими енергетичними показниками спіральні антени мають виражену спрямованість. Типова ширина головної пелюстки діаграми спрямованості становить близько 20° – 40° , що забезпечує ефективну концентрацію енергії в заданому напрямку. Однак така особливість супроводжується збільшенням геометричних розмірів конструкції, а також підвищеним аеродинамічним опором через значну просторову форму випромінювача [3].

Унаслідок великих габаритів, відносно високої маси та вузької діаграми спрямованості використання спіральних антен безпосередньо на борту малих і середніх безпілотних літальних апаратів є малопридатним. Для підтримання стабільного каналу зв'язку така антена потребувала б застосування складної системи автоматичного наведення, що включає поворотну платформу,

гіростабілізацію та засоби супроводження цілі. З цієї причини спіральні антени переважно використовуються на наземних пунктах керування як високопідсилювальні приймальні антени для забезпечення зв'язку на великих відстанях [10]

4) Конюшинова антена

Конюшинова антена (рисунок 1.6) належить до класу багатопелюсткових антенних систем із коловою поляризацією. Її конструкція складається з трьох провідникових петель у виконанні Cloverleaf або чотирьох петель у виконанні Skew-Planar Wheel. Пелюстки формуються за визначеною геометрією та підключаються до центрального коаксіального вузла під кутом близько 45° відносно площини основи, що забезпечує необхідний розподіл струмів для формування колової поляризації [7].



Рисунок 1.6 – Конюшинова антена

Ключовою особливістю даного типу антени є поєднання двох важливих характеристик: практично всеспрямованої діаграми спрямованості в азимутальній площині та колової поляризації випромінювання. За характером просторового розподілу енергії така антена подібна до четвертьхвильового монополя, забезпечуючи покриття на 360° навколо осі випромінювача, проте водночас формує електромагнітну хвилю з правою або лівою коловою поляризацією [1]. Типові значення коефіцієнта підсилення перебувають у межах 1,2–2,0 дБі, що є достатнім для організації каналів зв'язку та передачі відеоданих на малих і середніх дистанціях.

Застосування конюшинових антен у складі FPV-комплексів дозволяє практично усунути проблему поляризаційних втрат, які виникають під час виконання БПЛА маневрів із креном, тангажем або різкою зміною курсу [8]. Оскільки колова поляризація не залежить від взаємної орієнтації передавальної та приймальної антен у просторі, рівень сигналу залишається значно стабільнішим порівняно з системами, що використовують лінійну поляризацію.

Ще однією важливою перевагою конюшинових антен є висока стійкість до багатопроменевого поширення сигналу. Під час відбиття хвилі з коловою поляризацією від земної поверхні, будівель або інших об'єктів напрямок обертання електричного поля змінюється на протилежний. Наприклад, відбита RHCP-хвиля перетворюється на LHCP-хвилю. У результаті антена, налаштована на прийом RHCP-сигналу, значною мірою пригнічує відбиті сигнали протилежної поляризації, забезпечуючи додаткове ослаблення на рівні 20–30 дБ. Це суттєво зменшує вплив інтерференційних завмирань і покращує якість прийому в складних умовах поширення радіохвиль [1, 5].

Для коректної роботи радіолінії необхідно забезпечити однаковий напрямок колової поляризації на передавальній та приймальній сторонах. Використання антен із протилежним напрямком обертання призводить до значної поляризаційної ізоляції та втрати більшої частини переданої енергії, що може спричинити повний зрив зв'язку.

До недоліків конюшинових антен належать відносно складна просторова конструкція, високі вимоги до точності виготовлення та налаштування, а також механічна вразливість провідникових пелюсток. При експлуатації БПЛА існує ризик пошкодження антени під час транспортування або жорстких посадок, тому на практиці такі антени часто оснащуються радіопрозорими захисними ковпаками, які підвищують їхню механічну міцність без істотного впливу на електричні характеристики.

Таким чином, проведений аналіз основних типів антен, що застосовуються в системах зв'язку безпілотних літальних апаратів С-діапазону, показав, що кожен із розглянутих варіантів має власні переваги та обмеження. Штирові антени забезпечують всеспрямоване покриття, однак є чутливими до поляризаційної неузгодженості та мають зони мінімального випромінювання. Мікросмужкові патч-антени характеризуються підвищеним коефіцієнтом підсилення та компактністю, проте їхня спрямована діаграма спрямованості обмежує можливість використання як єдиної бортової антени. Спіральні антени забезпечують високе підсилення та якісну колову поляризацію, але через значні габарити й вузьку діаграму спрямованості переважно застосовуються на наземних пунктах керування.

Найбільш збалансованим рішенням для бортових радіоліній маневрених БПЛА є конюшинова антена, яка поєднує всеспрямовану діаграму спрямованості в азимутальній площині з коловою поляризацією випромінювання. Таке поєднання дозволяє забезпечити стабільний рівень сигналу незалежно від просторової орієнтації літального апарата, зменшити вплив поляризаційних втрат та підвищити завадостійкість каналу зв'язку в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль.

З огляду на наведені переваги та відповідність вимогам до бортових систем зв'язку безпілотних літальних апаратів, конюшинова антена була обрана як об'єкт подальшого комп'ютерного моделювання, оптимізації параметрів та дослідження її електродинамічних характеристик у межах даної роботи.

1.3 Принцип роботи та характеристики антен колової поляризації типу «конюшина»

Антени типу «конюшина» належать до класу багатопелюсткових рамкових випромінювачів колової поляризації та широко застосовуються в системах зв'язку і передачі відеосигналу безпілотних літальних апаратів завдяки поєднанню всеспрямованої діаграми спрямованості та високої стійкості до поляризаційних втрат [1]. Принцип їх роботи базується на формуванні двох взаємно ортогональних складових електромагнітного поля однакової амплітуди зі зсувом фаз на 90° , що забезпечує утворення хвилі з коловою поляризацією.

Конструктивно антена складається з трьох або чотирьох однакових провідникових петель, рівномірно розташованих навколо центральної осі коаксіального фідера. У класичній конструкції Cloverleaf використовується три пелюстки зі взаємним кутовим рознесенням 120° , тоді як у конструкції Skew-Planar Wheel застосовуються чотири пелюстки, зміщені на 90° одна відносно одної [7]. Симетричне розташування випромінюючих елементів забезпечує рівномірний розподіл електромагнітного поля навколо антени та сприяє формуванню всеспрямованої діаграми спрямованості в азимутальній площині.

Для реалізації колової поляризації кожна пелюстка має спеціальну просторову форму та нахиляється приблизно під кутом 45° до площини основи антени [5, 7]. Геометричні розміри петель вибираються таким чином, щоб їхній електричний периметр був близьким до довжини хвилі робочого діапазону. Робоча довжина хвилі визначається співвідношенням:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

де c — швидкість поширення електромагнітної хвилі у вільному просторі ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с), а f — робоча частота антени.

Для частоти 5,8 ГГц довжина хвилі становить приблизно 51,7 мм, тому геометричні параметри пелюсток визначаються саме виходячи з цієї величини. При проходженні високочастотного струму через вигнуті провідники в кожній пелюстці виникають вертикальна та горизонтальна складові електричного поля. Завдяки особливій геометрії випромінювача між цими складовими формується фазовий зсув, близький до 90° [5].

У дальній зоні випромінювання відбувається суперпозиція двох ортогональних компонент поля однакової амплітуди зі зсувом фаз на чверть періоду. За цих умов кінець вектора напруженості електричного поля описує коло, що відповідає коловій поляризації електромагнітної хвилі. Залежно від напрямку просторового вигину пелюсток антена може формувати правобічну колову поляризацію або лівобічну колову поляризацію [7].

Важливою перевагою колової поляризації є її значно менша чутливість до зміни орієнтації антени в просторі. На відміну від систем із лінійною поляризацією, де навіть невеликий крен або тангаж БПЛА може призвести до суттєвих втрат сигналу, колова поляризація забезпечує стабільний рівень прийнятої потужності незалежно від положення літального апарата. Саме тому антени типу «конюшина» стали фактичним стандартом для FPV-комплексів та телеметричних систем безпілотних платформ [1].

Однією з найважливіших характеристик антен колової поляризації є коефіцієнт еліптичності, який визначає ступінь наближення реальної поляризації до ідеально колової [3]. Для ідеального випадку значення Axial Ratio дорівнює одиниці або 0 дБ.

На практиці через похибки виготовлення, неточність геометрії пелюсток, вплив коаксіального кабелю, карбонової рами БПЛА та інших навколишніх об'єктів колова поляризація частково спотворюється. Якщо значення Axial Ratio перевищує 3 дБ, поляризація вважається еліптичною, що призводить до зростання поляризаційних втрат та зменшення ефективності придушення відбитих сигналів [5].

До основних електродинамічних характеристик конюшинових антен належать коефіцієнт підсилення в межах 1,2–2,0 дБі, широка діаграма спрямованості в азимутальній площині, висока чистота колової поляризації та значна стійкість до багатопроменевого поширення радіохвиль. Саме здатність пригнічувати відбиті сигнали протилежної поляризації робить даний тип антен особливо ефективним для експлуатації в міських умовах та поблизу земної поверхні, де інтенсивно проявляються явища відбиття та інтерференції [1, 8].

Таким чином, принцип роботи антени типу «конюшина» базується на створенні двох ортогональних компонент електромагнітного поля з квадратурним фазовим зсувом, що забезпечує формування колової поляризації та підвищену стійкість каналу зв'язку до зміни просторової орієнтації БПЛА і впливу багатопроменевого поширення сигналів. Це робить даний тип антен одним із найбільш ефективних рішень для бортових систем зв'язку та передачі відео в С-діапазоні частот.

1.4 Вплив матеріалів та конструкції носійної платформи (БПЛА) на поширення радіохвиль

У реальних умовах експлуатації антена безпілотного літального апарата функціонує не в умовах вільного простору, а в безпосередній близькості до численних конструктивних елементів планера. Навколо антени формується складна електродинамічна система, до складу якої входять провідні та діелектричні об'єкти різної геометрії й електрофізичних властивостей [8]. На частотах С-діапазону ($f = 5,8$ ГГц) довжина хвилі становить приблизно $\lambda = 51,7$ мм, що є співмірним із характерними розмірами елементів конструкції більшості мультикоптерів та літакових платформ. У таких умовах взаємодія електромагнітного поля антени з планером носія стає одним із визначальних факторів, що впливають на якість радіозв'язку.

1) Вплив матеріалів конструкції

Сучасні рами БПЛА переважно виготовляються з вуглепластикових композитів, які поєднують високу механічну міцність із малою масою. Незважаючи на композитну структуру, карбонові матеріали на надвисоких

частотах характеризуються значною питомою провідністю ($\sigma \approx 10^4 \dots 10^5$ См/м), унаслідок чого поведуться подібно до металевих поверхонь [1]. Вони ефективно відбивають електромагнітні хвилі, створюючи екранувальні та резонансні ефекти.

На відміну від карбону, полімерні матеріали (PLA, ABS, PETG, нейлон), які часто використовуються для виготовлення кріплень та захисних елементів, є радіопрозорими діелектриками з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r \approx 2,5 \dots 4$. Такі матеріали практично не впливають на амплітуду сигналу, хоча можуть спричиняти незначні фазові спотворення при проходженні хвилі через значні товщини матеріалу [5].

Особливу небезпеку становлять металеві елементи конструкції: гвинти, стійки, кріплення двигунів, радіатори систем охолодження та металеві корпуси електронних модулів. Навіть невеликі металеві об'єкти, розташовані поблизу антени, можуть виступати паразитними резонаторами та суттєво змінювати її характеристики.

2) Ефекти затінення, відбиття та дифракції

Одним із найбільш поширених джерел спотворення діаграми спрямованості є затінення антени конструктивними елементами платформи. Центральна палуба рами, акумуляторна батарея, польотний контролер, відеопередавач та інші компоненти можуть перекривати пряму видимість у певних напрямках [8].

Особливо сильний вплив мають літій-полімерні акумулятори, які містять великі металізовані електроди. На частоті 5,8 ГГц вони поведуться як ефективні відбивачі електромагнітної енергії та можуть створювати локальні зони екранування.

На краях карбонових променів виникають явища дифракції електромагнітних хвиль. Дифраговані хвилі взаємодіють із прямим випромінюванням антени, утворюючи складну інтерференційну картину. У результаті діаграма спрямованості втрачає симетрію, а в окремих напрямках можуть формуватися глибокі провали рівня сигналу, які досягають -20 дБ і

більше. Такі області називають «мертвими зонами» і вони можуть спричиняти короткочасні втрати зв'язку під час маневрування БПЛА.

3) Деградація колової поляризації

Для конюшинових антен критично важливим параметром є чистота колової поляризації. Під час роботи антени електромагнітне поле взаємодіє з провідними елементами планера, двигунами та силовими кабелями. У цих елементах індуються високочастотні струми, які створюють вторинне електромагнітне випромінювання [3].

На відміну від основного випромінювання антени, вторинні поля часто мають переважно лінійну поляризацію. Суперпозиція основного та вторинного полів призводить до порушення колової поляризації та збільшення коефіцієнта еліптичності. У результаті коефіцієнт осьового відношення може значно перевищувати допустиме значення 3 дБ, що свідчить про деградацію поляризаційних характеристик антени та зниження її завадостійкості.

4) Розлагодження вхідного імпедансу

Характеристики антени значною мірою залежать від електромагнітного оточення в реактивній ближній зоні. Якщо елементи рами, кабелі живлення або металеві компоненти розташовані на відстані меншій за 8мм відбувається суттєва зміна розподілу поверхневих струмів на випромінювачі [2].

Наслідком цього є зміщення резонансної частоти антени, зміна її вхідного імпедансу та погіршення узгодження з фідерним трактом. Зростання КСХ призводить до відбиття частини потужності назад у передавач, що зменшує ефективність випромінювання та може спричиняти додаткове нагрівання вихідних каскадів передавача.

5) Вплив електродвигунів та силових електроніки

Додатковим джерелом електромагнітних завад є безколекторні електродвигуни та регулятори швидкості. Робота силових ключів супроводжується формуванням широкосмугових імпульсних завад, які можуть проникати до приймального тракту через випромінювання або паразитні струми в кабельних лініях.

Силові проводи між акумулятором та регуляторами швидкості можуть функціонувати як ненавмисні антени, що перевипромінюють високочастотні гармоніки. Хоча основний спектр цих завад розташований значно нижче 5,8 ГГц, нелінійні процеси в електронних компонентах здатні генерувати широкосмуговий шумовий фон, який знижує відношення сигнал/шум приймальної системи.

6) Особливості вибору місця встановлення антени

Для мінімізації негативного впливу носійної платформи антену доцільно розміщувати на максимальній відстані від карбонових елементів, акумулятора, двигунів та силових кабелів. У більшості сучасних FPV-дронів конюшинову антену встановлюють у хвостовій частині або над верхньою палубою за допомогою діелектричних кронштейнів. Такий підхід дозволяє зменшити екранування та забезпечити більш симетричну діаграму спрямованості.

1.5 Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто особливості організації радіоліній зв'язку та передачі відеоданих безпілотних літальних апаратів у С-діапазоні частот, а також проаналізовано основні типи антен, що використовуються в сучасних безпілотних системах. Встановлено, що канали зв'язку на частоті 5,8 ГГц функціонують переважно в умовах прямої видимості та є чутливими до впливу поляризаційних втрат, які виникають внаслідок постійної зміни просторової орієнтації БПЛА під час виконання маневрів.

Проведений порівняльний аналіз штирових, мікросмужкових, спіральних та конюшинових антен показав, що найбільш доцільним рішенням для бортових систем зв'язку є антена типу «конюшина». На відміну від інших розглянутих конструкцій, вона забезпечує поєднання всеспрямованої діаграми спрямованості в азимутальній площині та колової поляризації випромінювання, що дозволяє істотно зменшити вплив поляризаційних завмирань і підвищити стабільність радіолінії. Формування колової поляризації досягається завдяки спеціальній просторовій геометрії пелюсток та їх нахилу під кутом близько 45° відносно площини основи антени.

Дослідження принципу роботи антени типу «конюшина» показало, що колова поляризація утворюється внаслідок суперпозиції двох взаємно ортогональних складових електромагнітного поля зі зсувом фаз на 90° . Такий принцип забезпечує високу стійкість до зміни орієнтації літального апарата в просторі та ефективне пригнічення відбитих сигналів протилежної поляризації, що особливо важливо в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль.

Окрему увагу було приділено впливу носійної платформи на характеристики антени. Встановлено, що карбонові елементи рами, акумуляторні батареї, електродвигуни, силові кабелі та інші конструктивні компоненти БПЛА суттєво змінюють електромагнітне оточення антени. Це призводить до появи зон затінення, спотворення діаграми спрямованості, деградації колової поляризації, зміщення резонансної частоти та погіршення імпедансного узгодження. У результаті можливе зниження ефективності випромінювання, виникнення додаткових втрат сигналу та формування «мертвих зон» зв'язку.

Аналіз показав, що електродинамічні процеси, які виникають у системі «антена – БПЛА», мають складний просторовий характер і залежать від великої кількості взаємопов'язаних параметрів: геометрії конструкції, властивостей матеріалів, взаємного розташування елементів та робочої частоти. Через складність таких процесів отримання достовірних результатів аналітичними методами є практично неможливим. Тому для дослідження впливу носійної

платформи на характеристики антени необхідно використовувати сучасні методи чисельного електродинамічного аналізу.

Отже, подальші дослідження доцільно виконувати із застосуванням тривимірного комп'ютерного моделювання в програмному комплексі CST Studio Suite, який реалізує метод скінченних інтегралів та дозволяє з високою точністю досліджувати розподіл електромагнітних полів, характеристики випромінювання антени та особливості її взаємодії з конструкцією безпілотного літального апарата. Отримані результати стануть основою для оптимізації розташування антени та підвищення ефективності функціонування радіоліній БПЛА.

2 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГОТОВОЇ КОНЮШИНОВОЇ АНТЕНИ У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРІ

2.1 Геометричний аналіз імпортованої моделі антени на частоту 5,8 ГГц

Для проведення достовірного електродинамічного аналізу в даній роботі використано не спрощену аналітичну модель випромінювача, а реальну тривимірну модель серійної антени типу Skew-Planar Wheel, попередньо розроблену в системі автоматизованого проєктування SolidWorks. Такий підхід дозволяє максимально наблизити умови чисельного експерименту до реальної конструкції виробу та врахувати всі особливості його геометрії, які можуть впливати на характеристики випромінювання.

Об'єктом дослідження є чотиріпелюсткова конюшинова антена колової поляризації, розрахована для роботи в цивільному ISM-діапазоні на центральній частоті $f_0 = 5,8$ ГГц.

Довжина електромагнітної хвилі у вільному просторі на зазначеній частоті визначається співвідношенням $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ та становить $\lambda_0 \approx 51,72$ мм

Отримане значення довжини хвилі є основним параметром для оцінювання електричних розмірів антени. Оскільки характерні розміри випромінювальних елементів є співрозмірними з довжиною хвилі, електромагнітні процеси в антені мають виражений резонансний характер.

Навіть незначні зміни геометричних параметрів можуть призводити до зміщення резонансної частоти, зміни вхідного імпедансу та погіршення поляризаційних характеристик.

Використання готової CAD-моделі дозволяє врахувати такі конструктивні особливості антени:

- 1) діаметр мідного дроту пелюсток $d=1,5$ мм;
- 2) реальну просторову геометрію пелюсток;
- 3) форму та розміри вузлів пайки;
- 4) конструкцію коаксіального переходу;
- 5) наявність внутрішнього діелектричного заповнення коаксіальної лінії;
- 6) кінцеву товщину провідників.

На відміну від спрощених дротяних моделей, така геометрія дозволяє враховувати паразитні ефекти, пов'язані з локальною концентрацією струмів та електромагнітного поля в місцях з'єднання елементів конструкції.

Пелюстки антени рівномірно розташовані навколо центральної осі коаксіального кабелю зі взаємним кутовим зміщенням 90° . Кожна пелюстка нахилена приблизно під кутом 45° до площини основи, що забезпечує формування правобічної колової поляризації. Симетрія конструкції сприяє формуванню рівномірної діаграми спрямованості в азимутальній площині та зменшує рівень паразитних поляризаційних складових.

2.2 Алгоритм імпорту тривимірної CAD-моделі в CST Studio Suite

Електродинамічний аналіз антени виконано в середовищі CST Studio Suite, яке є одним із найбільш поширених програмних комплексів для моделювання антенних систем і пристроїв надвисоких частот.

Підготовка моделі до чисельного розрахунку здійснювалася за таким алгоритмом.

1) Експорт геометричної моделі

Після завершення побудови антени в SolidWorks тривимірну модель було експортовано у формат STEP. Застосування даного формату забезпечує збереження точних геометричних параметрів, радіусів вигинів, топології поверхонь та взаємного розташування всіх конструктивних елементів.

2) Створення нового проєкту

У середовищі CST Studio Suite створено новий проєкт із використанням шаблону Antenna . Як базові одиниці вимірювання встановлено: довжина — мм, частота — ГГц, час — нс.

Для аналізу антени задано частотний діапазон від 5,0 до 6,0 ГГц, що дозволяє дослідити форму резонансної характеристики та визначити параметри узгодження в околі робочої частоти.

3) Імпорт геометрії

За допомогою команди Modeling → Import → 3D CAD здійснено імпорт STEP-моделі до середовища CST. Після імпорту проведено перевірку цілісності геометрії та відсутності помилок топології.

4) Призначення матеріалів

Для коректного відображення фізичних процесів усім елементам конструкції призначено відповідні електрофізичні властивості.

Для випромінювальних пелюсток та зовнішнього екрана коаксіального роз'єму використано матеріал Annealed Copper, який характеризується високою електропровідністю.

Для внутрішнього ізолятора коаксіальної лінії задано матеріал PTFE із параметрами: $\epsilon_r = 2,1$, $\tan \delta = 0,0002$.

Зазначені значення відповідають характеристикам реального фторопластового заповнювача коаксіальних кабелів надвисокочастотного діапазону.

5) Налаштування джерела збудження

Збудження антени реалізовано за допомогою дискретного порту, встановленого між центральною жилою та зовнішнім екраном коаксіальної лінії.

Опорний імпеданс порту становить $R_{\text{порт}} = 50 \text{ Ом}$, що відповідає стандартним трактам FPV-систем, телеметричних каналів та більшості сучасних високочастотних передавачів.

2.3 Конфігурування обчислювальної сітки та граничних умов

Якість чисельного моделювання значною мірою залежить від правильного вибору математичного апарату, граничних умов та параметрів дискретизації простору.

1) Граничні умови

На початковому етапі дослідження антена аналізується в умовах ідеального вільного простору без впливу навколишніх об'єктів.

Для всіх меж розрахункової області встановлено умову Open (add space). Даний тип граничних умов автоматично формує навколо розрахункової області поглинаючі шари типу PML, які імітують нескінченний простір та запобігають появі паразитних відбиттів електромагнітних хвиль від меж розрахункового об'єму.

Застосування PML дозволяє значно підвищити точність визначення параметрів випромінювання без необхідності збільшення розмірів розрахункової області.

2) Метод розрахунку

Моделювання виконано за допомогою методу скінченних інтегралів.

Перевагами методу є:

- 2.1) висока точність для складних тривимірних структур;
- 2.2) коректне врахування втрат у провідниках і діелектриках;
- 2.3) можливість широкосмугового аналізу за одну симуляцію;
- 2.4) ефективна робота зі складними антенними системами.

Для розрахунку використано часовий розв'язувач, який дозволяє отримати частотні характеристики антени після виконання одного імпульсного розрахунку.

3) Генерація обчислювальної сітки

Для дискретизації простору сформовано гексагональну сітку. У зонах найбільшої концентрації електромагнітних полів виконано локальне згущення сітки:

- 3.1) поблизу порту живлення;
- 3.2) у місцях пайки пелюсток;
- 3.3) у зоні переходу коаксіальної лінії до випромінювачів.

Таке рішення дозволяє зменшити похибку апроксимації криволінійної геометрії та підвищити точність розрахунку поверхневих струмів.

4) Параметри розрахунку

Для завершення симуляції встановлено критерій точності: Ассигасу = -40 дБ.

Також створено монітори дальнього поля на частоті 5,8 ГГц для подальшого аналізу характеристик випромінювання антени.

2.4 Результати моделювання ізольованої антени у вільному просторі

Після завершення електродинамічного моделювання антени типу Clover було проведено аналіз її основних характеристик у вільному просторі. Дослідження виконувалося в діапазоні частот 5–6 ГГц, що охоплює робочу частоту системи передачі відеосигналу 5,8 ГГц.

Першочергово було проаналізовано частотну залежність коефіцієнта відбиття S_{11} , яка наведена на рисунку 2.1.

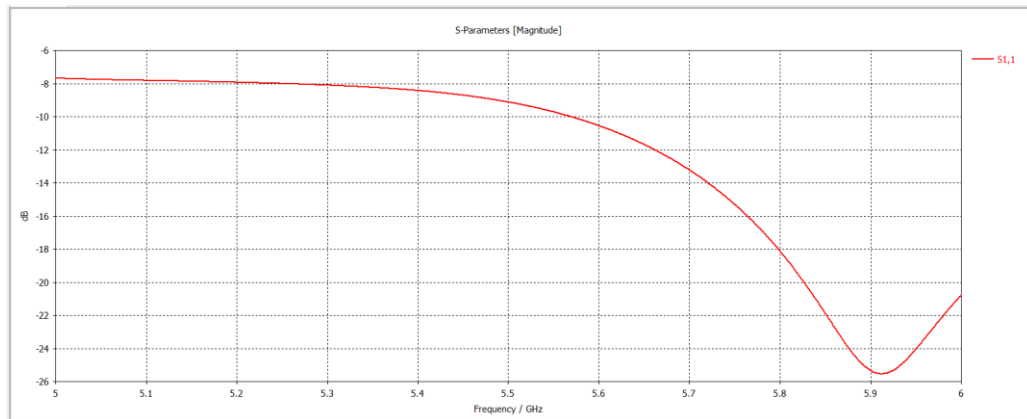


Рисунок 2.1 – Частотна залежність коефіцієнта відбиття S11 антени типу Clover

Із графіка видно, що в околі частоти 5,8 ГГц спостерігається виражений мінімум коефіцієнта відбиття, що свідчить про якісне узгодження антени з фідерним трактом. На робочій частоті значення S11 становить приблизно – 25 дБ, що відповідає низькому рівню відбитої потужності.

Для оцінки ступеня узгодження також було проаналізовано залежність коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) від частоти. Отримані результати наведено на рисунку 2.2.

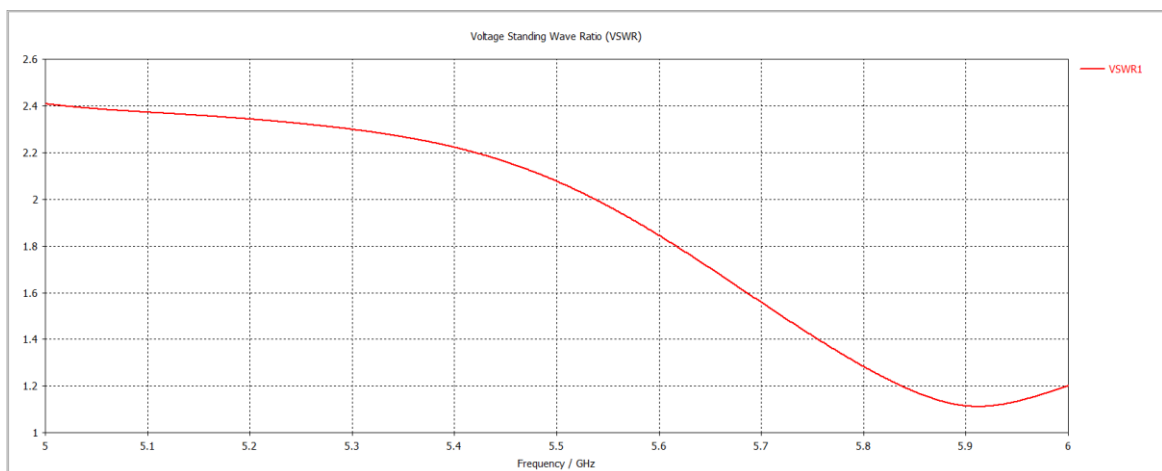


Рисунок 2.2 – Частотна залежність КСХН антени типу Clover

На робочій частоті значення КСХН становить близько 1,12, що відповідає високому рівню узгодження та забезпечує ефективну передачу енергії від передавача до випромінювача.

Однією з важливих характеристик антен кругової поляризації є коефіцієнт еліптичності, який характеризує якість формування кругової поляризації. Частотна залежність даного параметра наведена на рисунку 2.3.

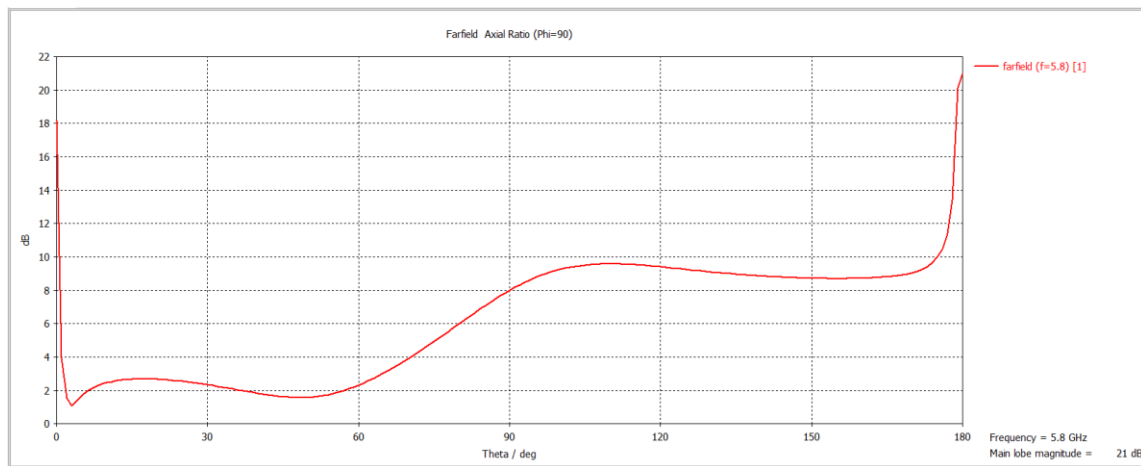


Рисунок 2.3 – Кутовий розподіл коефіцієнта еліптичності

На рисунку 2.3 наведено кутовий розподіл коефіцієнта еліптичності антени на частоті 5,8 ГГц. Аналіз результатів показує, що в напрямках основного випромінювання значення Axial Ratio становить менше 3 дБ, що відповідає умовам формування кругової поляризації. Зі збільшенням кута відносно напрямку максимального випромінювання значення коефіцієнта еліптичності зростає, що свідчить про поступовий перехід до еліптичної та лінійної поляризації.

Подальший аналіз було виконано для просторових характеристик випромінювання антени. На рисунках 2.4–2.6 наведено діаграми спрямованості в полярній системі координат для частот 5,0 ГГц, 5,5 ГГц та 6,0 ГГц відповідно.

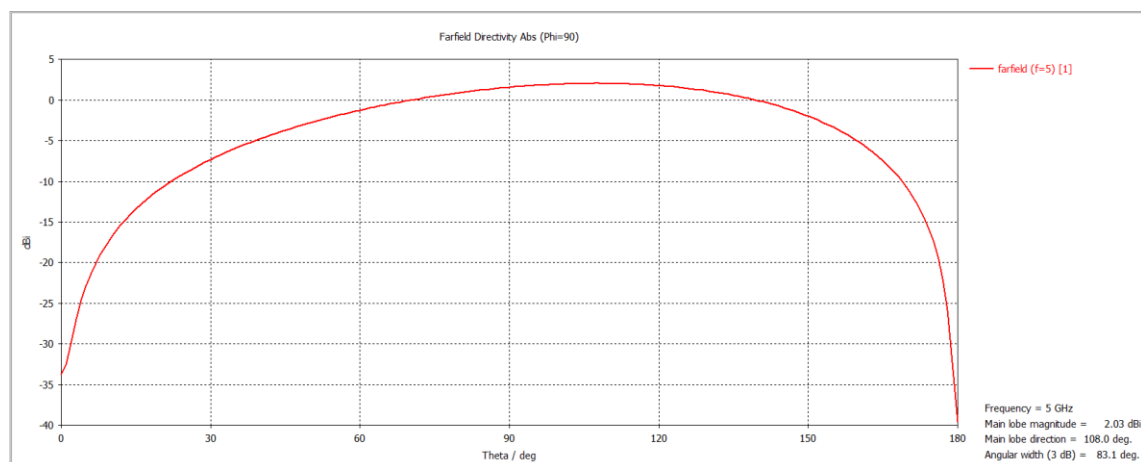


Рисунок 2.4 – Діаграма спрямованості антени на частоті 5,0 ГГц

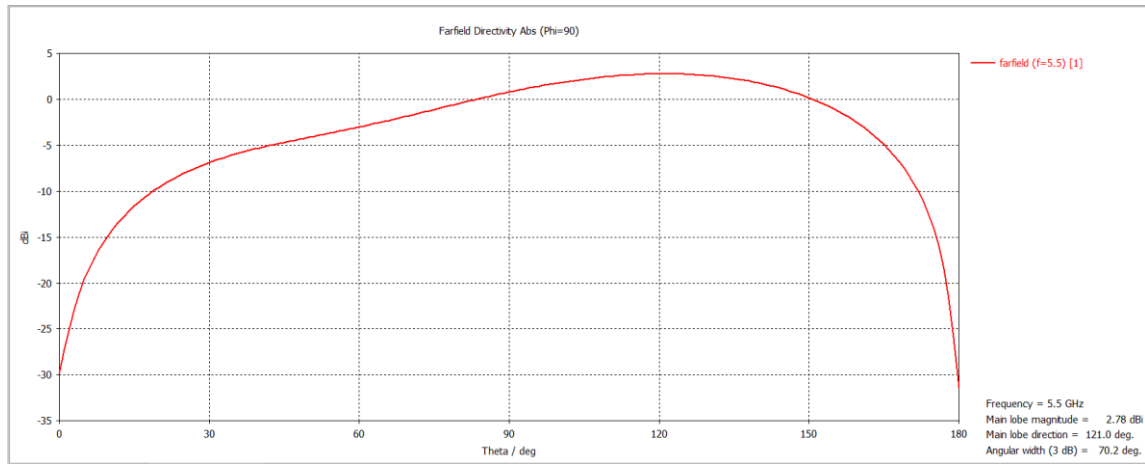


Рисунок 2.5 – Діаграма спрямованості антени на частоті 5,5 ГГц

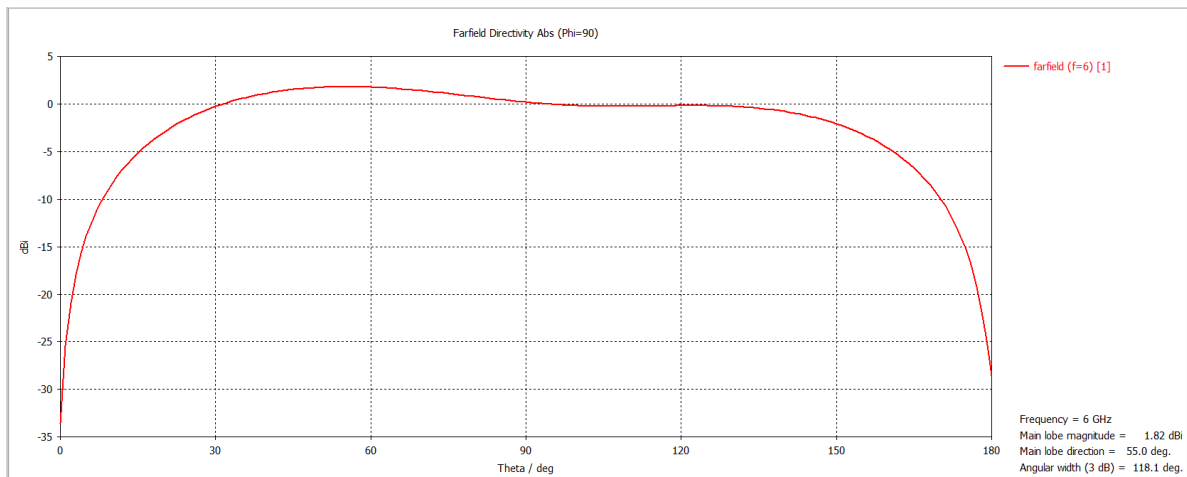


Рисунок 2.6 – Діаграма спрямованості антени на частоті 6,0 ГГц

Отримані результати демонструють характерну для антен типу Clover тороїдальну форму діаграми спрямованості. У всьому досліджуваному частотному діапазоні забезпечується практично рівномірне випромінювання в азимутальній площині. Незначні зміни форми діаграми зі зміною частоти не впливають суттєво на загальний характер випромінювання антени.

Для робочої частоти 5,8 ГГц додатково було побудовано тривимірну діаграму спрямованості, наведену на рисунку 2.7.

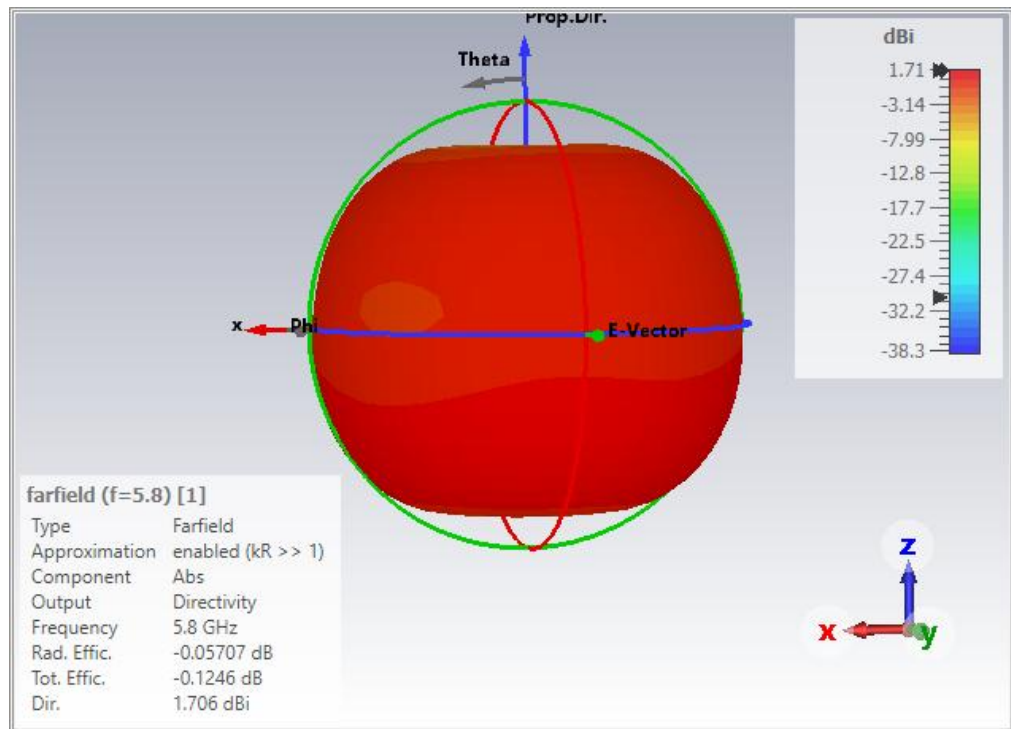


Рисунок 2.7 – Тривимірна діаграма спрямованості антени типу Clover на частоті 5,8 ГГц

За результатами моделювання на частоті 5,8 ГГц отримано максимальну спрямованість $D_{\max} = 1,706$ дБі. Радіаційна ефективність антени становить $-0,057$ дБ, а повна ефективність $-0,124$ дБ, що відповідає високому коефіцієнту корисної дії та низьким втратам у провідниках і діелектричних матеріалах.

Таким чином, результати моделювання підтверджують працездатність антени в робочому діапазоні частот та її відповідність вимогам систем передачі відеосигналу БПЛА. Отримані характеристики можуть бути використані як базові для подальшого дослідження впливу конструкції безпілотної літальної апарату на параметри антенної системи.

2.5 Висновки до розділу 2

У результаті проведеного електродинамічного моделювання сформовано еталонну математичну модель конюшинової антени типу Skew-Planar Wheel для роботи на частоті 5,8 ГГц. Використання повноцінної CAD-моделі дозволило врахувати реальні конструктивні особливості виробу та підвищити достовірність отриманих результатів порівняно зі спрощеними аналітичними моделями.

У середовищі CST Studio Suite реалізовано чисельний розрахунок методом скінченних інтегралів із використанням відкритих граничних умов типу PML та дискретного порту з хвильовим опором 50 Ом. Виконане налаштування забезпечило коректне моделювання умов вільного простору та стабільну збіжність обчислювального процесу.

Отримані результати підтвердили високий рівень узгодження антени на робочій частоті 5,8 ГГц. Значення $S_{11} \approx -25$ дБ та $VSWR=1,12$ свідчать про мінімальні втрати потужності у фідерному тракті та ефективну передачу енергії до випромінювача.

Аналіз дальнього поля показав формування симетричної тороїдальної діаграми спрямованості з максимальною спрямованістю 1,71 дБі та ефективністю понад 98 %. Отримані характеристики повністю відповідають теоретичним очікуванням про роботу антен колової поляризації типу «конюшина».

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ АНТЕНИ З КОНСТРУКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ БПЛА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЇЇ ПОЛОЖЕННЯ

3.1 Методологія просторово-топологічної оптимізації антенної системи

У практиці проєктування безпілотних літальних апаратів інженер зазвичай працює з готовими серійними компонентами, геометричні параметри яких визначаються виробником та не підлягають зміні. До таких компонентів належать антени, елементи конструкції рами, акумуляторні батареї, вузли кріплення та інші складові бортового обладнання. У зв'язку з цим підвищення ефективності роботи радіолінії доцільно здійснювати не шляхом модифікації конструкції антени, а за рахунок оптимізації її просторового розташування відносно елементів носійної платформи.

Основною метою даного етапу дослідження є визначення такого положення антени на корпусі БПЛА, за якого забезпечуються найкращі характеристики імпедансного узгодження та просторового випромінювання в реальних умовах експлуатації.

Як основний параметр оптимізації обрано висоту встановлення антени над корпусом безпілотного літального апарата. Для аналізу розглянуто три конструктивно можливі варіанти монтажу: низьке встановлення з висотою кабелю $h = 20$ мм, середнє встановлення з висотою $h = 60$ мм та високе встановлення з висотою $h = 120$ мм.

Оскільки під час польоту просторове положення БПЛА постійно змінюється, чисельне моделювання виконувалося для двох характерних режимів експлуатації. Перший режим відповідає горизонтальному польоту або зависанню, коли корпус апарата розташований паралельно поверхні землі. Другий режим моделює нахилений політ, що виникає під час швидкісного руху, виконання маневрів або компенсації вітрового навантаження. Такий підхід дозволяє оцінити стабільність роботи антенної системи в умовах зміни просторової орієнтації носія.

3.2 Побудова та обґрунтування тривимірної моделі системи «антена – БПЛА»

Для дослідження впливу конструктивних елементів безпілотного літального апарата на характеристики випромінювання антени в середовищі CST Studio Suite було сформовано єдину електродинамічну модель, яка поєднує імпортовану CAD-модель антени та спрощену тривимірну модель планера БПЛА.

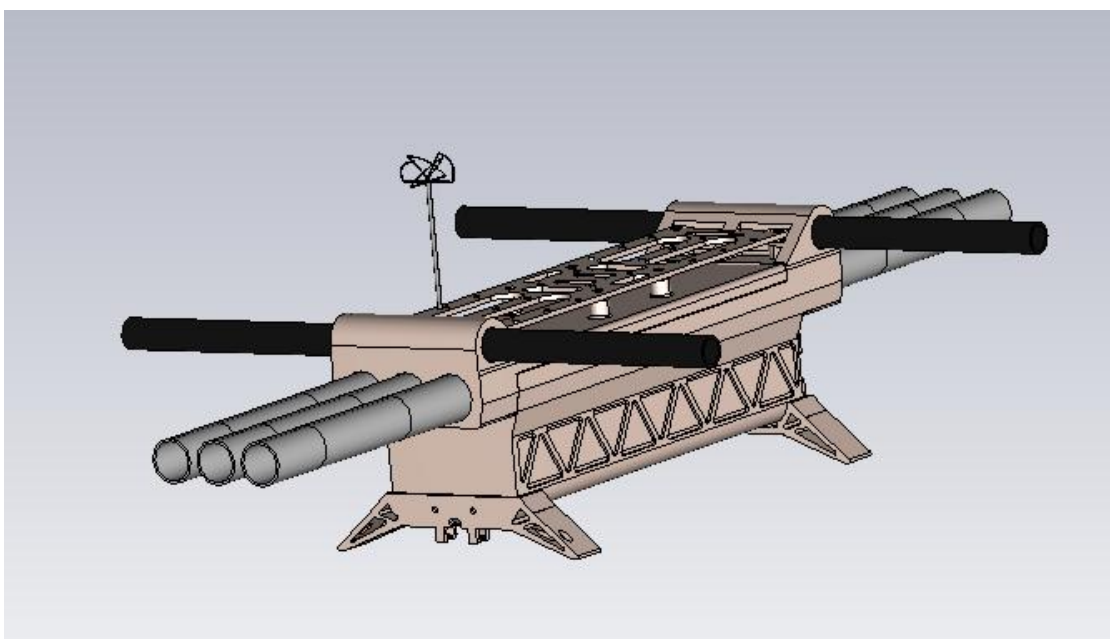


Рисунок 3.1 – Спрощена тривимірна модель системи «антена – БПЛА» у режимі горизонтального польоту

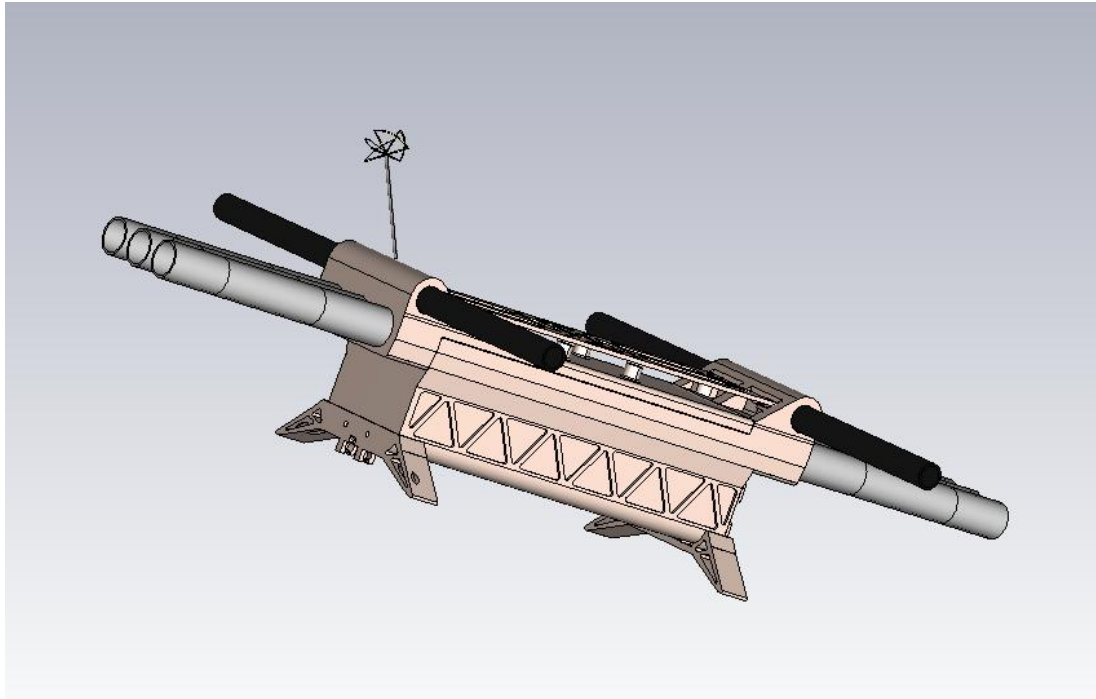


Рисунок 3.2 – Спрощена тривимірна модель системи «антена – БПЛА» у режимі польоту з нахилом корпусу

Під час побудови моделі було застосовано інженерний підхід до спрощення геометрії з метою зменшення обчислювальної складності задачі. Із розрахункової області вилучено електродвигуни та повітряні гвинти, оскільки їхня складна геометрія потребувала б суттєвого згущення обчислювальної сітки та значного збільшення часу розрахунку. При цьому їхній вплив на загальну картину взаємодії електромагнітного поля з конструкцією платформи є значно меншим порівняно з впливом карбонових променів та металевих конструктивних елементів.

Для забезпечення фізичної достовірності моделі усім компонентам системи було призначено відповідні електрофізичні характеристики. Центральна частина рами та елементи шасі моделювалися як діелектричні структури з параметрами, характерними для конструкційних полімерів типу ABS або PLA. Для таких матеріалів прийнято значення відносної діелектричної проникності $\epsilon_r = 3,0$ та тангенса кута діелектричних втрат $\tan \delta = 0,01$.

На робочій частоті 5,8 ГГц зазначені матеріали є практично радіопрозорими та не створюють суттєвих перешкод для поширення електромагнітних хвиль.

Промені рами моделювалися із використанням матеріалу Carbon Fiber, для якого було задано відносну діелектричну проникність $\epsilon_r = 5$ та тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta = 1,5$. Зазначені параметри забезпечують врахування поглинання електромагнітної енергії та впливу карбонових елементів конструкції на характеристики випромінювання антени в робочому діапазоні частот 5,8 ГГц.

Окрему увагу приділено моделюванню ствольних блоків конструкції БПЛА. Для опису їхніх електромагнітних властивостей було використано матеріал з відотною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 8,6$ та тангенсом кута діелектричних втрат $\tan \delta = 0,0003$.

Такі параметри дозволяють врахувати вплив конструктивних елементів на розподіл електромагнітного поля в ближній зоні антени, а також можливі фазові спотворення та додаткові втрати під час поширення радіохвиль. Використання реальних електрофізичних характеристик матеріалу підвищує достовірність результатів чисельного моделювання та дозволяє точніше оцінити взаємодію антени з носійною платформою.

Антену розташовувалася у хвостовій частині апарата на параметризованій щоглі, висота якої змінювалася відповідно до умов експерименту. Такий підхід забезпечив можливість автоматизованого дослідження різних варіантів розташування антени без зміни її внутрішньої геометрії.

3.3 Аналіз характеристик імпедансного узгодження для різних режимів польоту

Розташування провідних елементів конструкції БПЛА в ближній зоні антени призводить до зміни розподілу поверхневих струмів та трансформації її вхідного імпедансу. У результаті цього можуть виникати зміщення резонансної частоти, погіршення узгодження та збільшення втрат потужності в фідерному тракті.

Для оцінювання зазначених ефектів було проаналізовано коефіцієнт відбиття S_{11} та коефіцієнт стоячої хвилі для всіх досліджуваних варіантів розміщення антени.

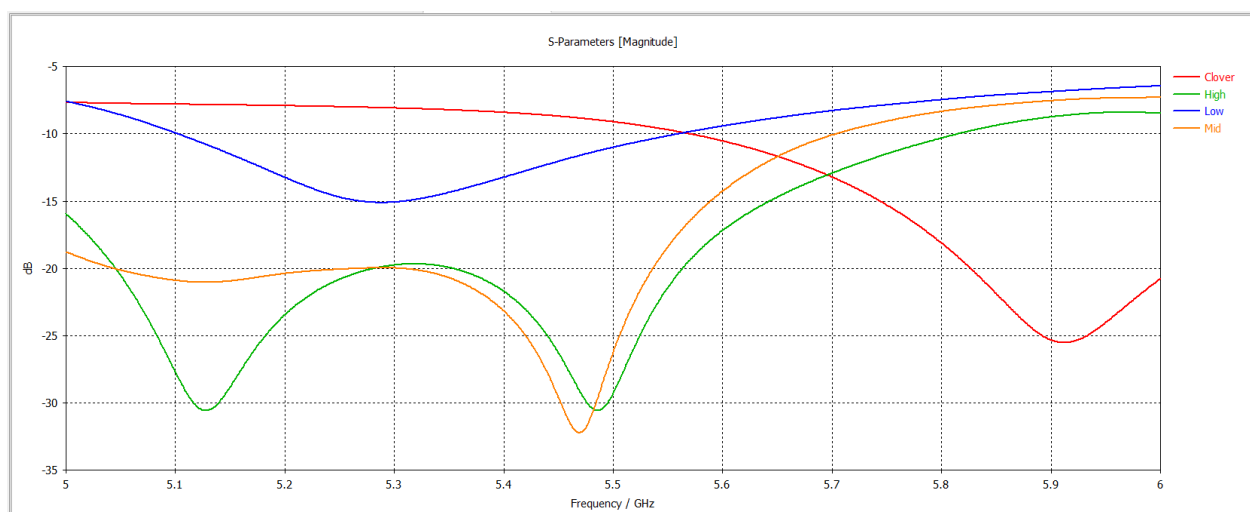


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта відбиття S_{11} від частоти для режиму горизонтального польоту

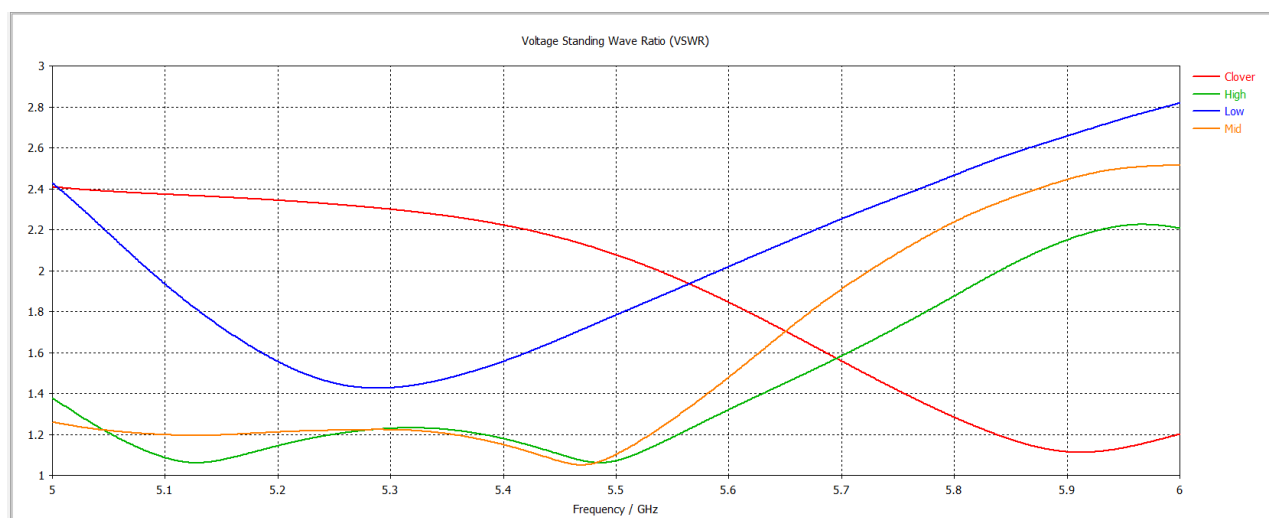


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта стоячої хвилі VSWR від частоти для режиму горизонтального польоту

Низьке встановлення (крива «Low», $h = 20$ мм). Дана конфігурація демонструє найгірші характеристики узгодження серед досліджених варіантів. На робочій частоті 5,8 ГГц коефіцієнт стоячої хвилі досягає значення $VSWR = 2,45$, коефіцієнт відбиття $S_{11} \approx -7,5$ дБ. За таких умов приблизно 17–18%

підведеної до антени потужності відбивається назад у фідерний тракт. Отримані результати свідчать про суттєвий вплив конструктивних елементів платформи, розташованих у безпосередній близькості до антени, на її імпедансне узгодження та електродинамічні характеристики.

Середнє встановлення (крива «Mid», $h = 60$ мм). Для даної конфігурації на частоті 5,8 ГГц отримано значення $VSWR=2,16$. Хоча узгодження на центральній частоті дещо погіршується, спостерігається зміщення резонансної точки до частоти 5,52 ГГц, де коефіцієнт стоячої хвилі зменшується до $VSWR=1,31$. Це вказує на покращення узгодження в нижній частині С-діапазону та розширення області ефективної роботи антени.

Високе встановлення (крива «High», $h = 120$ мм). Для даної конфігурації на робочій частоті отримано значення $VSWR=1,85$. Незважаючи на значне віддалення антени від конструктивних елементів платформи, повне усунення їхнього впливу не досягається. Відбиття та перевипромінювання електромагнітних хвиль від елементів конструкції продовжують впливати на розподіл поля поблизу антени, що призводить до погіршення узгодження порівняно з оптимальним варіантом встановлення $h = 60$ мм. Це свідчить про те, що надмірне збільшення висоти монтажу не забезпечує додаткових переваг з точки зору імпедансних характеристик системи.

При переході БПЛА в режим нахиленого польоту, який імітує виконання швидкісного маневру або компенсацію аеродинамічних навантажень, змінюється взаємне просторове розташування антени та конструктивних елементів платформи. Це призводить до зміни розподілу електромагнітного поля в ближній зоні випромінювача та впливає на його імпедансні характеристики. Аналіз графіків коефіцієнта стоячої хвилі (рис. 3.6) та коефіцієнта відбиття S_{11} (рис. 3.5) на частоті 5,8 ГГц дозволив встановити особливості роботи антенної системи для різних варіантів розташування антени.

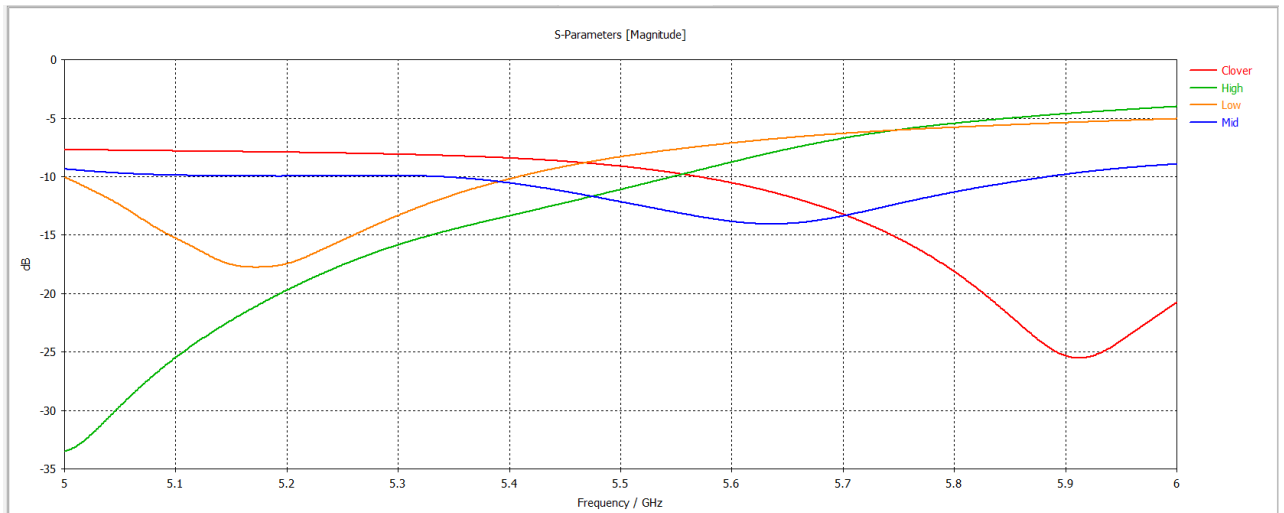


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта відбиття S11 від частоти для режиму нахилоного польоту

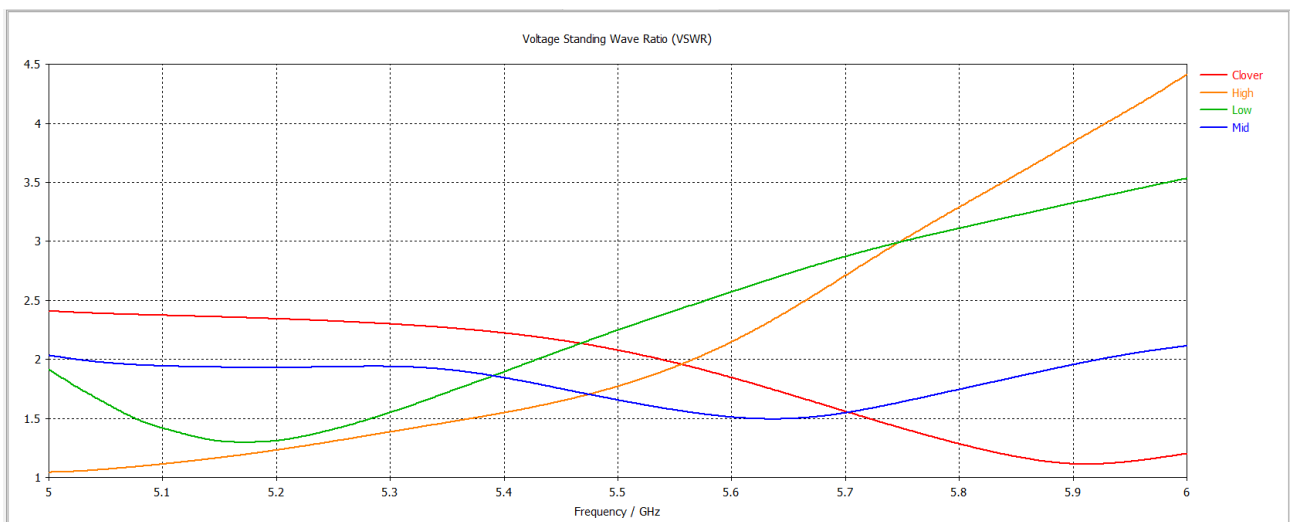


Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнта стоячої хвилі VSWR від частоти для режиму нахилоного польоту

Конфігурація «Mid» ($h = 60$ мм, зелена крива). Дана конфігурація демонструє найвищу стабільність характеристик при зміні просторової орієнтації БПЛА. На робочій частоті 5,8 ГГц значення коефіцієнта стоячої хвилі становить $VSWR = 1,44$, коефіцієнт відбиття $S_{11} \approx -14,9$ дБ. Отримані результати свідчать про збереження належного рівня імпедансного узгодження навіть за умов нахилу платформи, що підтверджує доцільність встановлення антени на висоті 60 мм.

Конфігурація «High» ($h = 120$, помаранчева крива). Для даного варіанта спостерігається зміщення резонансних характеристик унаслідок зміни просторової взаємодії антени з елементами конструкції БПЛА. На частоті 5,8 ГГц коефіцієнт стоячої хвилі становить $VSWR=1,75$. Хоча отримані параметри залишаються в допустимих межах для роботи радіолінії, вони поступаються результатам, отриманим для конфігурації «Mid».

Конфігурація «Low» ($h = 20$ мм, синя крива). Найбільше погіршення характеристик спостерігається при мінімальній висоті встановлення антени. На частоті 5,8 ГГц коефіцієнт стоячої хвилі зростає до $VSWR=3,10$, а коефіцієнт відбиття S_{11} досягає $\approx -5,8$ дБ. За таких умов понад 25 % підведеної до антени потужності відбивається назад у фідерний тракт. Це свідчить про суттєве погіршення імпедансного узгодження та може призводити до зниження ефективності випромінювання й скорочення енергетичного потенціалу радіолінії.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що варіант встановлення антени на висоті $h = 60$ мм забезпечує найкращу стабільність характеристик при зміні просторової орієнтації БПЛА та є найбільш доцільним для практичної реалізації досліджуваної антенної системи.

3.4 Вплив конструкції БПЛА на діаграму спрямованості антени

Окрім впливу на параметри узгодження, конструктивні елементи БПЛА істотно змінюють просторовий розподіл електромагнітного поля антени. Внаслідок відбиття, дифракції та перевипромінювання хвиль карбоновими та металевими елементами конструкції відбувається деформація початкової діаграми спрямованості.

Для оцінювання зазначених ефектів виконано аналіз тривимірних діаграм спрямованості на частоті 5,8 ГГц для всіх варіантів висоти встановлення антени.

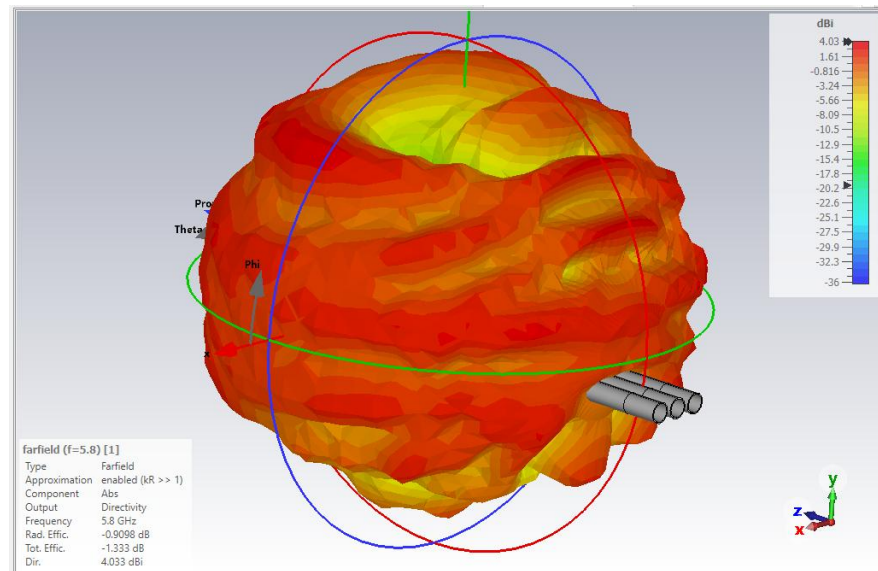


Рисунок 3.7 – Тривимірна діаграма спрямованості при висоті $h = 120$ мм у режимі горизонтального польоту

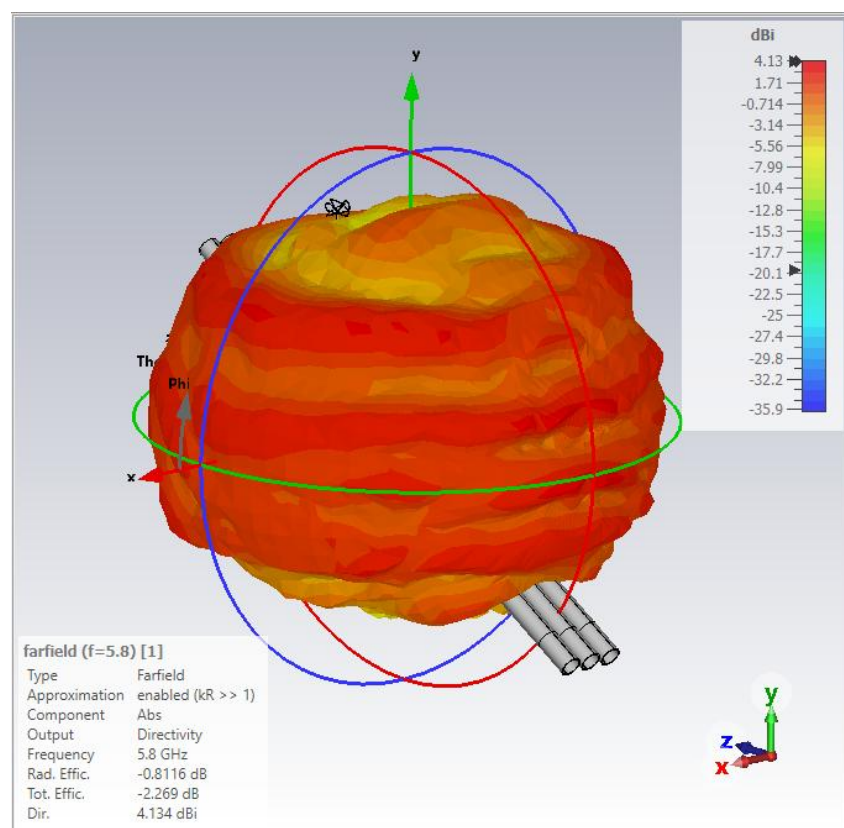


Рисунок 3.8 – Тривимірна діаграма спрямованості при висоті $h=120$ мм у режимі нахиленого польоту

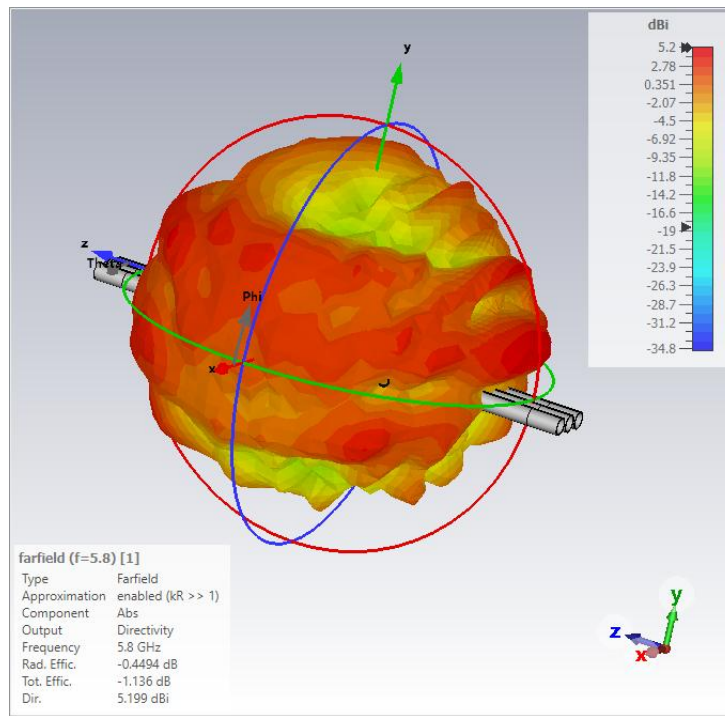


Рисунок 3.9 – Тривимірна діаграма спрямованості при висоті $h=60$ мм у режимі горизонтального польоту

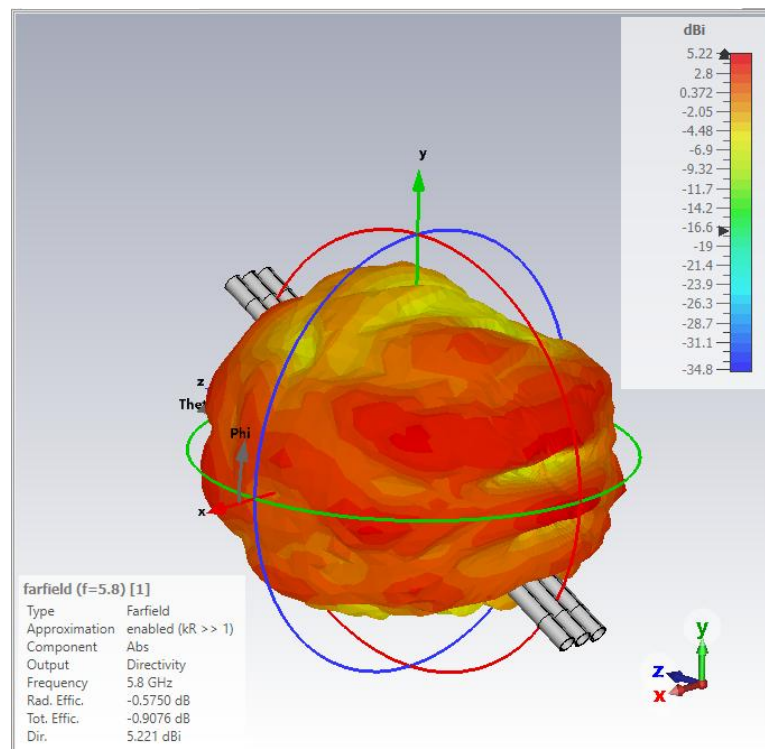


Рисунок 3.10 – Тривимірна діаграма спрямованості при висоті $h=60$ мм у режимі нахилоного польоту

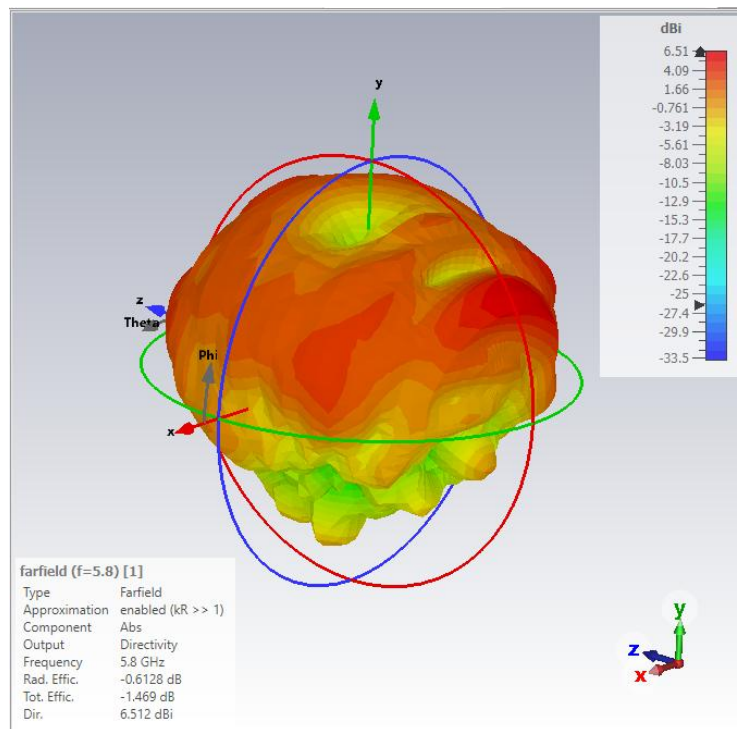


Рисунок 3.11 – Тривимірна діаграма спрямованості при висоті $h=20$ мм у режимі горизонтального польоту

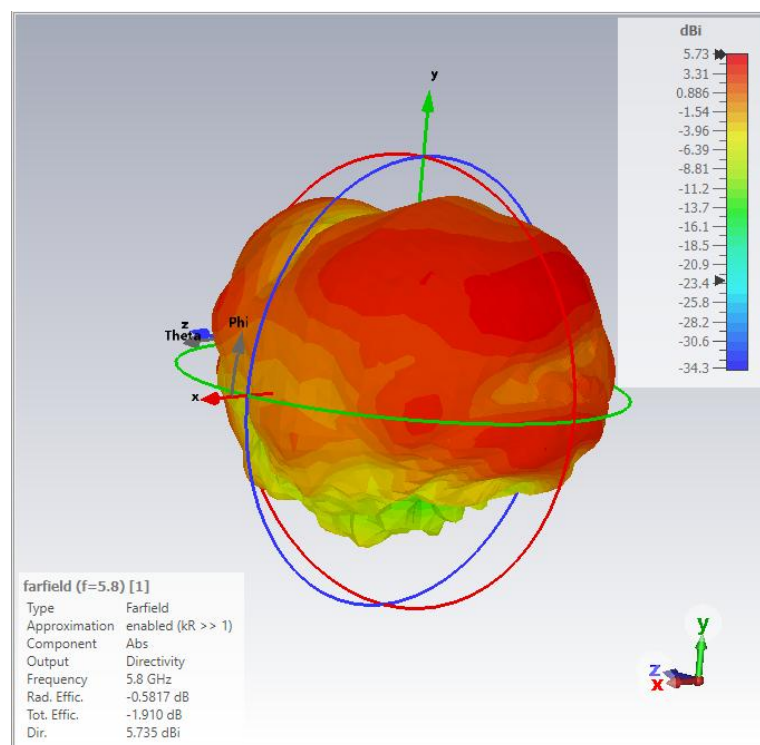
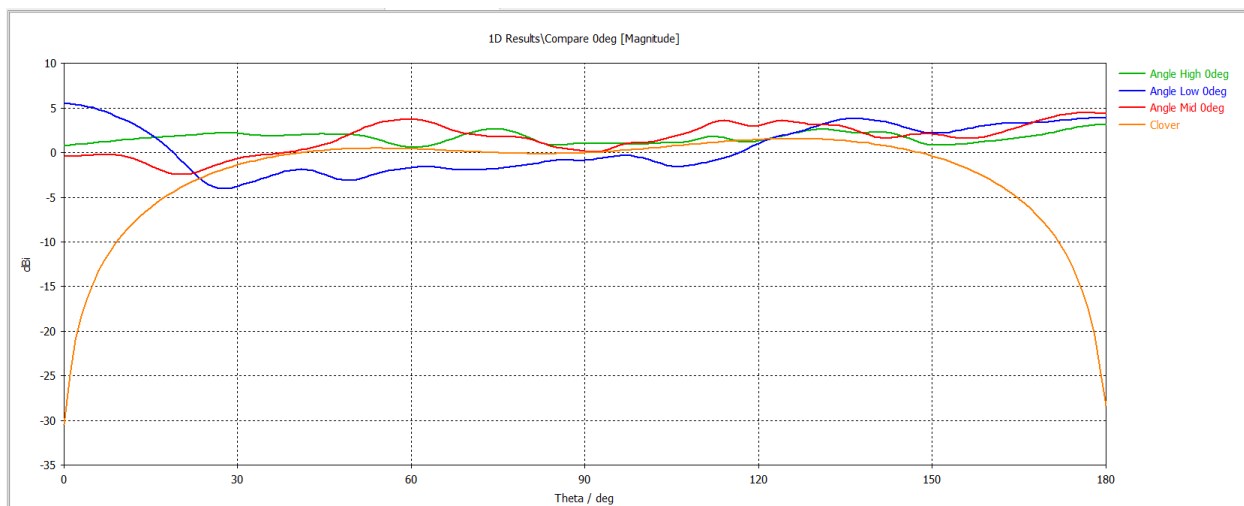
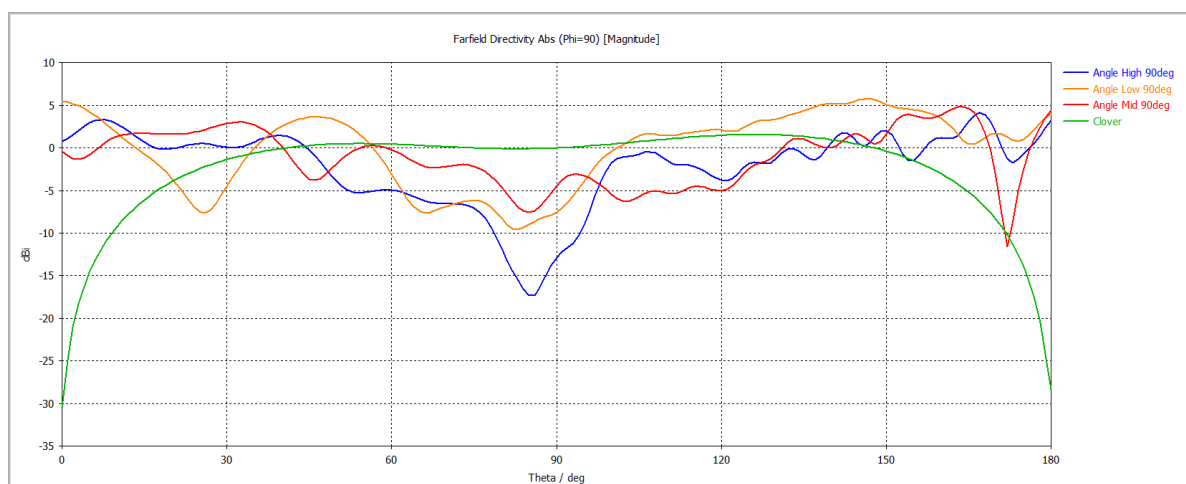


Рисунок 3.12 – Тривимірна діаграма спрямованості при висоті $h=20$ мм у режимі нахилоного польоту

Для оцінки впливу носійної платформи на просторові характеристики випромінювання було виконано аналіз одновимірних діаграм спрямованості у двох взаємно перпендикулярних площинах: $\Phi=0^\circ$ та $\Phi=90^\circ$. Порівнювалися характеристики ізольованої антени та антени, встановленої на БПЛА на висотах 20 мм, 60 мм і 120 мм.

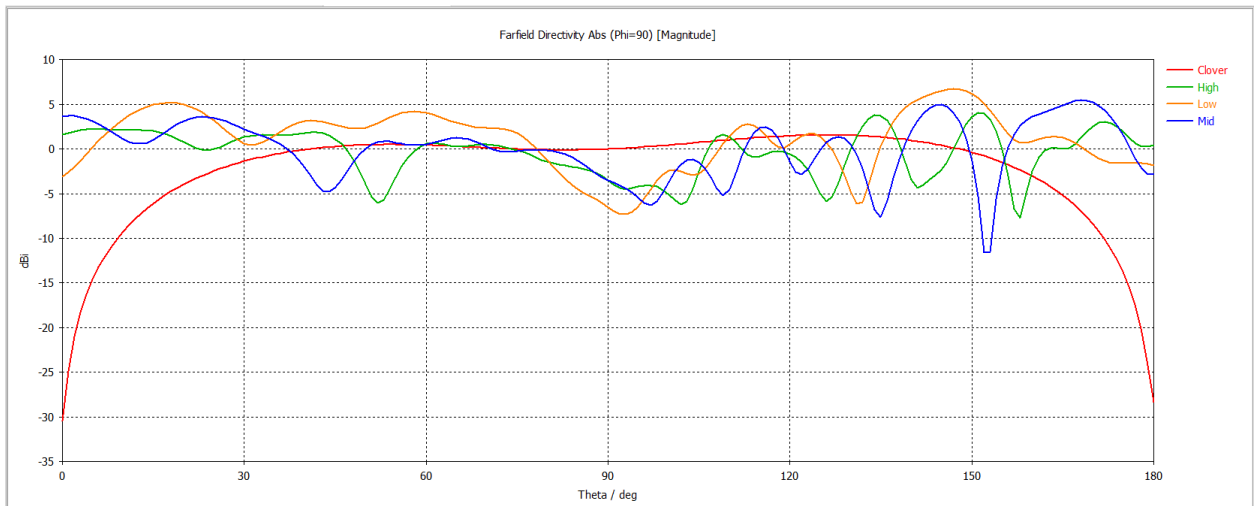


а)

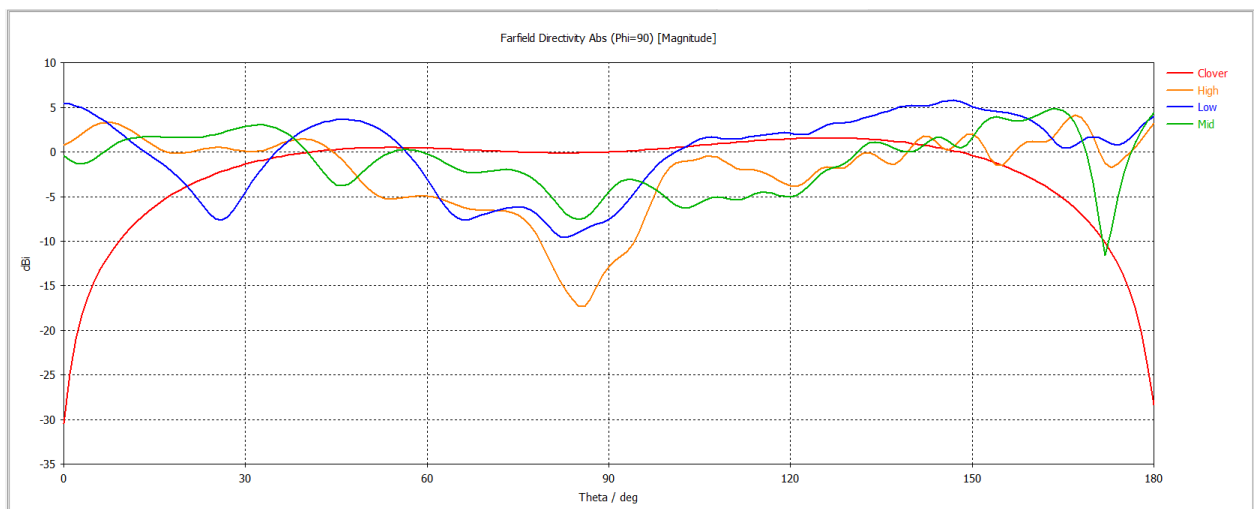


б)

Рисунок 3.13 – Одновимірні діаграми спрямованості для площини $\Phi=0^\circ$ (а – у режимі горизонтального польоту, б - у режимі нахилоного польоту)



a)



б)

Рисунок 3.14 – Одновимірні діаграми спрямованості для площини $\Phi=90^\circ$ а – у режимі горизонтального польоту, б - у режимі нахилоного польоту)

Аналіз діаграм для площини $\Phi=0^\circ$ у режимі горизонтального польоту (рисунок 3.13а) показує, що ізолювана антена формує плавну тороїдальну характеристику без різких локальних максимумів і мінімумів. Після встановлення на платформу відбувається суттєве викривлення форми діаграми.

Найбільш виражені спотворення спостерігаються для конфігурації «Mid» ($h = 60$ мм), де з'являється значна кількість локальних максимумів та мінімумів у секторі від 60° до 150° . Водночас рівень випромінювання залишається достатньо рівномірним у більшості напрямків. Для конфігурації «Low» ($h = 20$ мм) спостерігається помітне пригнічення випромінювання в центральній частині діаграми та формування нерівномірної структури поля внаслідок сильного впливу рами. Конфігурація «High» ($h = 120$ мм) демонструє більш згладжену характеристику, однак також містить окремі області підсилення та ослаблення сигналу, спричинені перевідбиттям хвиль від елементів конструкції.

У режимі нахилоного польоту (рисунок 3.13б) відмінності між конфігураціями стають ще більш помітними. Для висоти 20 мм спостерігається суттєва деформація діаграми спрямованості та значне зміщення максимумів випромінювання. Конфігурація «High» характеризується нерівномірним розподілом енергії та локальними провалами. Найбільш стабільною залишається конфігурація «Mid», для якої загальна форма діаграми зберігається навіть після зміни просторового положення БПЛА. Це узгоджується з результатами аналізу КСХ і свідчить про меншу чутливість антени до зміни орієнтації платформи.

Аналіз характеристик у площині $\Phi=90^\circ$ (рисунок 3.14а) демонструє ще більш виражений вплив конструктивних елементів БПЛА. Для ізолюваної антени характерна гладка симетрична форма діаграми, тоді як усі варіанти встановлення на платформу супроводжуються появою додаткових бічних пелюсток та глибоких провалів. Найбільша нерівномірність спостерігається для варіанта «Low», де рівень сигналу змінюється в широких межах залежно від напрямку випромінювання. Це свідчить про сильну взаємодію електромагнітного поля з елементами рами, які розташовані безпосередньо в ближній зоні антени.

У режимі нахилоного польоту (рисунок 3.14б) вплив платформи додатково посилюється. Для конфігурації «High» з'являється глибокий провал поблизу кута $\theta \approx 85^\circ$, де рівень випромінювання знижується більш ніж на 15 дБ відносно сусідніх напрямків. Для конфігурації «Low» спостерігається значна

кількість локальних максимумів і мінімумів, що свідчить про розвиток складної інтерференційної картини. Конфігурація «Mid» також демонструє певні спотворення, однак вони є менш критичними та не призводять до формування настільки глибоких зон ослаблення сигналу.

Таким чином, результати аналізу діаграм спрямованості підтверджують висновки, отримані на основі характеристик узгодження. Мінімальна висота встановлення антени ($h = 20$ мм) призводить до найбільшого викривлення просторових характеристик випромінювання через сильну електромагнітну взаємодію з конструкцією БПЛА. Надмірне збільшення висоти встановлення до 120 мм зменшує вплив ближньої зони рами, проте не усуває інтерференційні ефекти та супроводжується появою окремих глибоких провалів у діаграмі спрямованості. Найкращий компроміс між якістю узгодження, рівномірністю просторового покриття та стабільністю характеристик при зміні орієнтації БПЛА забезпечує конфігурація «Mid» з висотою встановлення антени $h = 60$ мм. Саме цей варіант доцільно розглядати як оптимальний для практичного застосування у складі бортової радіолінії зв'язку та відеопередачі.

3.5 Аналіз частотно-кутової залежності коефіцієнта еліптичності антени

Для повного аналізу якості сформованої кругової поляризації досліджуваної бортової антени типу «конюшина» в умовах її інтеграції з носійною платформою БПЛА критично важливим параметром є коефіцієнт еліптичності. Даний параметр визначає ступінь відхилення поляризаційного еліпса від ідеального кола. У системах FPV-зв'язку, телеметрії та передачі високошвидкісного відеопотоку критерієм збереження високої завадостійкості й ефективного пригнічення багатопроменевих відбиттів є виконання умови $AR \leq 3$ дБ.

З метою дослідження впливу польотного маневрування на характеристики поляризації буловедено порівняльний аналіз для двох конфігурацій системи «антена–планер»: для режиму горизонтального польоту (симетричне положення носія) та для режиму нахилоного польоту, коли планер БПЛА нахилений відносно антени під кутом маневрування.

На рисунках 3.15–3.18 наведено розраховані кутові залежності коефіцієнта еліптичності для центральної робочої частоти 5.8 ГГц у двох головних ортогональних площинах перерізу.

3.5.1 Характеристики коефіцієнта еліптичності у режимі горизонтального польоту

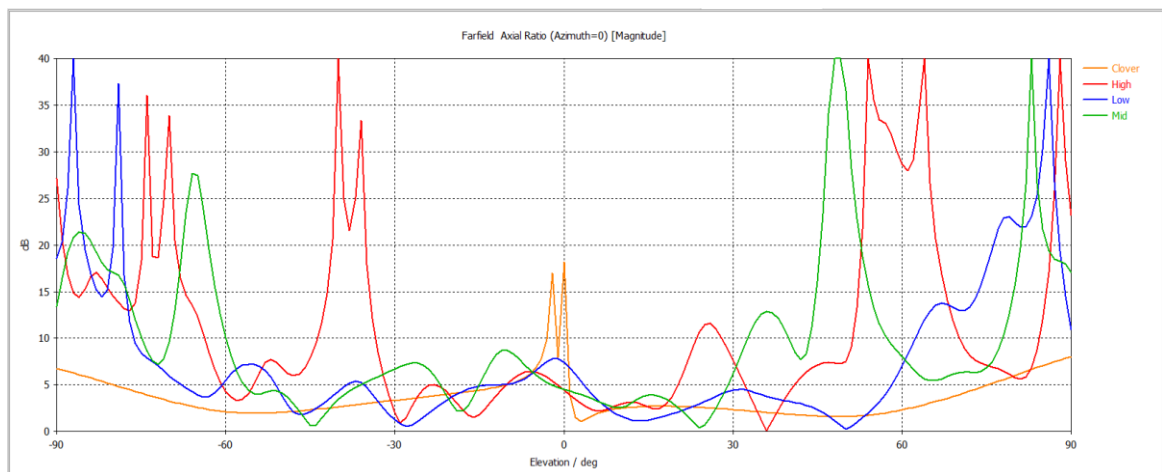


Рисунок 3.15 – Кутова залежність коефіцієнта еліптичності у площині $\Phi = 0^\circ$ у режимі горизонтального польоту

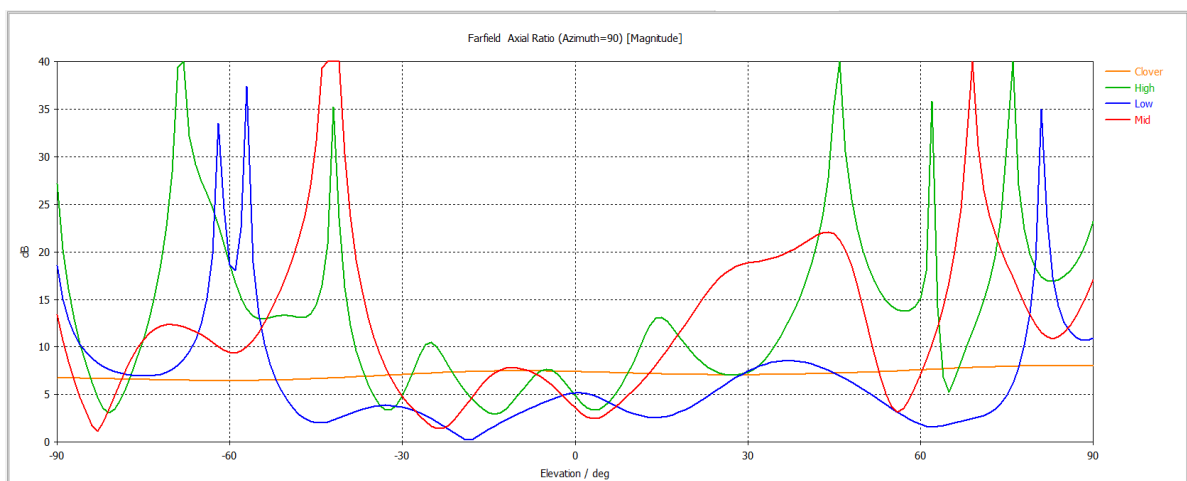


Рисунок 3.16 – Кутова залежність коефіцієнта еліптичності у площині $\Phi = 90^\circ$ у режимі горизонтального польоту

Аналіз графіків для симетричного горизонтального положення планера дозволяє сформулювати такі висновки.

Конфігурація High $h = 120$ мм: Цей варіант показує найкращі характеристики. У напрямку зеніту $\theta = 0^\circ$ значення AR становить приблизно 1.4 дБ. Завдяки значній відстані від провідних елементів планера забезпечується найбільший сектор стабільної кругової поляризації $AR \leq 3$ дБ, який досягає близько $\pm 40^\circ$.

Конфігурація Mid $h = 60$ мм: Спостерігається збереження загальної симетрії діаграми. Показник AR у зеніті дещо погіршується, однак робочий кутовий сектор із умовою $AR \leq 3$ дБ залишається достатньо широким — приблизно $\pm 35^\circ$.

Конфігурація Low $h = 20$ мм: Через розташування випромінювача в ближній реактивній зоні карбонової конструкції виникає помітне погіршення характеристик поля. Значення AR у зеніті зростає, а допустимий сектор кутів звужується. При великих кутах $\theta > |40^\circ|$ спостерігається різке збільшення до 5–7 дБ, що пояснюється інтенсивним перевипромінюванням від елементів корпусу.

3.5.2 Характеристики коефіцієнта еліптичності у режимі нахиленого польоту

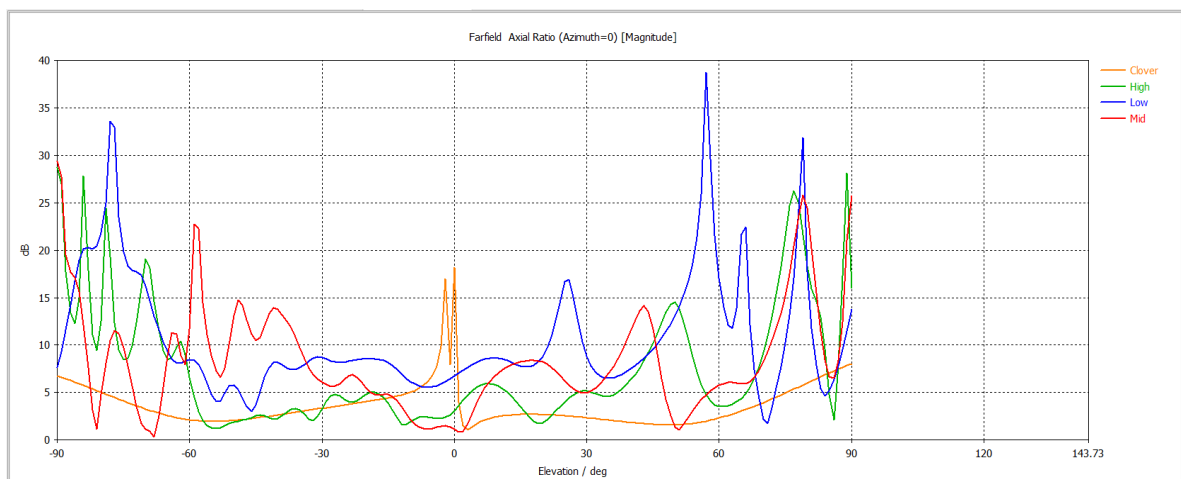


Рисунок 3.17 – Кутова залежність коефіцієнта еліптичності у площині $\Phi = 0^\circ$ у режимі нахиленого польоту

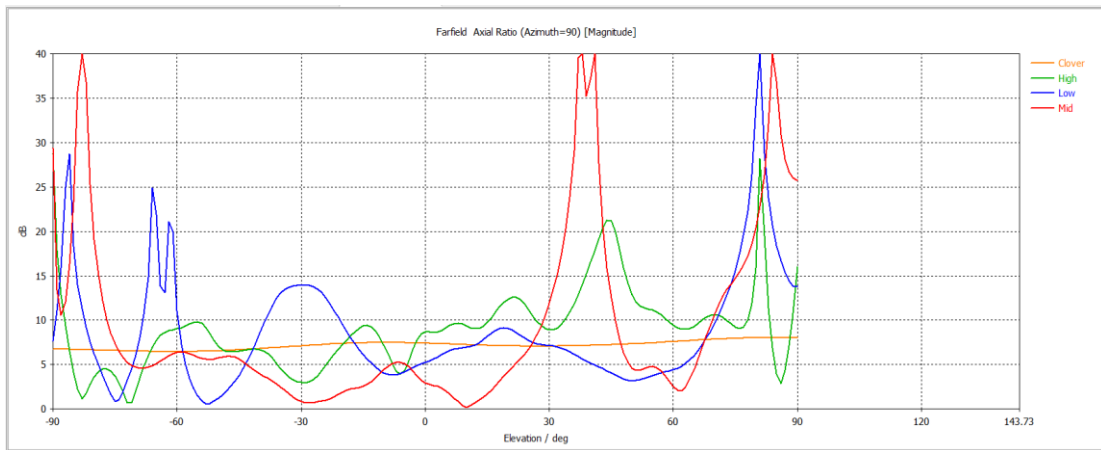


Рисунок 3.18 – Кутова залежність коефіцієнта еліптичності у площині $\Phi = 90^\circ$ у режимі нахиленого польоту

Коли планер БПЛА нахиляється відносно антени під час маневрування, висота її встановлення стає ключовим фактором, що визначає стабільність поляризаційних характеристик.

Площина $\Phi = 0^\circ$: Для всіх розглянутих конфігурацій спостерігається певне погіршення параметра AR у зеніті — до приблизно 2.3 дБ. Водночас конфігурація High (120 мм) демонструє більш плавну та стабільну поведінку кривої, тоді як у варіанті Low (20 мм) відбувається швидка деградація еліптичності, і значення AR досягає 6–8 дБ вже при відносно невеликих кутових відхиленнях.

Площина $\Phi = 90^\circ$: У цьому випадку проявляється виражена просторова асиметрія, зумовлена нахилом планера. У зоні від’ємних кутів усі конфігурації зберігають відносно стабільні значення AR приблизно 2.5–2.9 дБ. Натомість у додатній кутовій області $\theta > +15^\circ$, де відстань між антеною та планером геометрично зменшується, виникає різке погіршення характеристик.

Для конфігурації Low (20 мм) спостерігається стрімкий вихід за межу 3 дБ із подальшим зростанням до 4.5–5.5 дБ, що фактично відповідає переходу від кругової до лінійної поляризації. Конфігурація High (120 мм), завдяки більшому просторовому зазору, значно краще протидіє цим спотворенням і забезпечує збереження кругової поляризації в ширшому кутовому діапазоні.

3.6 Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано комплексне електродинамічне моделювання та дослідження взаємодії бортової антени кругової поляризації типу «конюшина» з носійною вуглепластиковою платформою БПЛА. На основі параметричного аналізу для різних висот встановлення антени $h = 20$ мм — конфігурація Low, $h = 60$ мм — Mid, $h = 120$ мм — High та двох просторових режимів польоту горизонтального та нахиленого сформульовано такі науково-практичні результати.

Електродинамічна верифікація моделі: Розроблена в середовищі CST Studio Suite тривимірна інтегральна модель системи «антена – планер БПЛА» забезпечила врахування реальної геометрії носія, розташування акумуляторного блока та анізотропних провідних властивостей карбонового матеріалу рами. Доведено, що близьке розташування провідних елементів планера до випромінювача є основною причиною деградації узгодження, спрямованості та поляризаційних характеристик внаслідок збудження вторинних високочастотних струмів у ближній та реактивній зонах антени.

Вплив на імпедансне узгодження (КСХ): Встановлено, що найменший вплив на вхідний імпеданс антени має конфігурація High $h = 120$ мм, де коефіцієнт стоячої хвилі залишається стабільним і не перевищує 1.25 в обох режимах польоту. Зменшення висоти до $h = 20$ мм призводить до зміщення резонансної частоти та зростання КСХ, яке додатково посилюється під час нахиленого польоту через асиметричне ємнісне навантаження з боку конструкції планера.

Спотворення просторового розподілу поля : Аналіз тривимірних та одновимірних діаграм спрямованості показав, що планер БПЛА виконує роль часткового екрана та вторинного випромінювача. У режимі горизонтального польоту для малих висот $h = 20$ мм зафіксовано появу глибоких інтерференційних провалів до -15 дБ та порушення цілісності тороїдальної діаграми спрямованості. При переході до нахиленого польоту спостерігається зміщення максимуму випромінювання вниз, що зменшує ефективне покриття у

верхній півсфері. Конфігурації Mid та High забезпечують більш стабільну форму ДС з меншими флуктуаціями коефіцієнта підсилення.

Залежність чистоти кругової поляризації від висоти підвісу : Дослідження коефіцієнта еліптичності підтвердило, що геометрична відстань між антеною та планером є визначальним фактором збереження кругової поляризації сигналу. У режимі горизонтального польоту найкращі показники забезпечує висота $h = 120$ мм, де в зеніті $\theta = 0^\circ$ досягається мінімальне значення $AR \approx 1.4$ дБ, а робоча зона за критерієм $AR \leq 3$ дБ становить близько $\pm 40^\circ$. Зменшення висоти до 20 мм призводить до звуження цієї зони через амплітудно-фазовий розбаланс ортогональних компонентів поля.

Поляризаційна асиметрія та деградація при маневрах: Виявлено, що в режимі нахилоного польоту в площині маневрування $\Phi = 90^\circ$ порушується симетрія поляризаційних характеристик. Через кутове зближення елементів рами та акумулятора з однією з пелюсток діаграми спрямованості крива AR для конфігурації Low різко перетинає межу 3 дБ вже при $\theta > +15^\circ$, досягаючи 4.5 – 5.5 дБ, що відповідає переходу до еліптичної та частково лінійної поляризації. Конфігурація High завдяки збільшеному просторовому зазору ефективно послаблює цей ефект і забезпечує збереження кругової поляризації в ширшому кутовому діапазоні.

Отримані кількісні критерії КСХ, ДС та AR свідчать, що використання низькопрофільного розміщення антени є недоцільним для систем FPV-відеозв'язку та телеметрії через високу ймовірність поляризаційних втрат і збоїв синхронізації в умовах маневрування. Оптимальним є винесення фазового центра антени на рівень конфігурацій Mid $h = 60$ мм або High $h = 120$ мм, що забезпечує підвищену стабільність радіолінії, збереження енергетичного потенціалу та стійкість до багатопроменевого поширення сигналу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті вирішено актуальну науково-практичну задачу дослідження, чисельного моделювання та просторово-топологічної оптимізації бортової антенної системи безпілотного літального апарата С-діапазону, що функціонує в умовах впливу конструктивних елементів носійної платформи та зміни просторової орієнтації під час польоту.

За результатами виконаної роботи отримано такі основні науково-практичні результати.

1) Розроблено тривимірну електродинамічну модель антени колової поляризації типу «Clover» для роботи на частоті 5,8 ГГц у програмному середовищі CST Studio Suite. Чисельне моделювання ізольованої антени у вільному просторі підтвердило високу якість її узгодження з фідерним трактом: на центральній частоті отримано значення коефіцієнта стоячої хвилі $VSWR = 1,12$, а коефіцієнт відбиття становить $S_{11} = -24$, дБ. Максимальна спрямованість антени дорівнює 1,71 дБі, а форма діаграми спрямованості відповідає класичній тороїдальній структурі, характерній для антен типу Skew-Planar Wheel.

2) Створено комплексну електродинамічну модель системи «Антенна — БПЛА», що включає спрощену геометрію квадрокоптера та реальні електрофізичні характеристики конструкційних матеріалів. Для елементів рами використано матеріал Carbon Fiber з параметрами $\epsilon_r = 5$ та $\tan \delta = 1,5$, для корпусних елементів — ABS/PLA пластик із параметрами $\epsilon_r = 3,0$ та $\tan \delta = 0,01$, а для ствольних блоків — матеріал із параметрами $\epsilon_r = 8,6$ та $\tan \delta = 0,0003$.

3) Встановлено суттєвий вплив носійної платформи на характеристики антени. При зменшенні висоти встановлення до $h = 20$ мм спостерігається значне погіршення імпедансного узгодження: у горизонтальному польоті отримано $VSWR = 2,45$, а в режимі нахиленого польоту $VSWR = 3,10$. За таких умов понад 25 % підведеної потужності відбивається назад у фідерний тракт, що знижує ефективність випромінювання та енергетичний потенціал радіолінії.

4) На основі порівняльного аналізу частотних характеристик та параметрів узгодження визначено раціональну висоту встановлення антени ($h = 60$) мм. Для даної конфігурації забезпечується найкраще поєднання стабільності характеристик у режимах горизонтального та нахилоного польоту. У режимі маневрування отримано значення $VSWR = 1,44$ та коефіцієнт відбиття $S_{11} \approx -14,9$ дБ, що підтверджує високий рівень узгодження антенно-фідерного тракту.

5) Досліджено вплив носійної платформи на просторові характеристики випромінювання. Встановлено, що елементи конструкції БПЛА істотно трансформують початкову тороїдальну діаграму спрямованості антени, формуючи додаткові локальні максимуми та мінімуми випромінювання. У деяких напрямках спостерігається збільшення спрямованості системи до значень близько 5 дБі, що пояснюється перевідбиттям і перевипромінюванням електромагнітної енергії конструктивними елементами платформи.

6) Аналіз одновимірних діаграм спрямованості в площинах $\Phi=0^\circ$ та $\Phi=90^\circ$ показав, що мінімальна висота встановлення антени призводить до найбільшого викривлення просторового розподілу поля та появи виражених зон ослаблення сигналу. Конфігурація з висотою 60 мм забезпечує найбільш рівномірний розподіл випромінювання та найменшу чутливість до зміни просторової орієнтації БПЛА, тоді як варіант з висотою 120 мм характеризується появою окремих глибоких провалів у діаграмі спрямованості.

Отримані результати підтверджують необхідність врахування взаємодії антени з носійною платформою ще на етапі проєктування безпілотних авіаційних комплексів. Запропонована методика моделювання може бути використана для оптимізації розміщення антен зв'язку та відеопередачі на БПЛА різного призначення з метою підвищення надійності радіоканалу та покращення умов експлуатації системи в реальних польотних режимах.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Слюсар В. І. Антени для БПЛА: сучасний стан та тенденції розвитку. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 2 (22). С. 43–56.
2. Бова Н. Т., Резніков Ю. Б. *Антени та пристрої надвисоких частот*. Київ : Вища школа, 1993. 365 с.
3. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. 1072 p.
4. Панченко С. О., Загородній М. В. Особливості проектування мікросмужкових антен колової поляризації для мобільних систем зв'язку. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*. 2021. Вип. 84. С. 15–23.
5. Volakis J. L. *Antenna Engineering Handbook*. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 1712 p.
6. CST Studio Suite — High-Frequency Simulation. *Dassault Systèmes*. 2024. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>.
7. Huang J., Das N. K. *Microstrip and Printed Antennas: New Trends, Techniques and Applications*. London : IntechOpen, 2019. 194 p.
8. Рівняк М. М., Токар Л. П. Дослідження ефекту екранування бортових антен елементами конструкції безпілотних літальних апаратів. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 4. С. 78–85.
9. Garg R., Bhartia P., Bahl I. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Boston : Artech House, 2001. 845 p.
10. Kraus J. D., Marhefka R. J. *Antennas for All Applications*. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2002. 893 p.