ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ АНТЕН ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ІОТ ТА ДРОНАХ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

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

_____ Юрій МАРЧЕВСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. ТСДМ-62
Юрій МАРЧЕВСЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Олексій ГЕТМАНЕЦЬ
к.т.н. *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Рецензент: _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Марчевському Юрію Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Методика оптимізації кругової поляризації антен для застосування в IoT та дронах
керівник кваліфікаційної роботи Олексій ГЕТМАНЕЦЬ, к.т.н.
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» 10. 2025 р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1. Кругова поляризація антен.
2. IoT та дрони.
3. Оцінка ефективності.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Теоретичні основи кругової поляризації антен.
2. Аналіз існуючих антенних структур з круговою поляризацією.
3. Методика оптимізації параметрів кругової поляризації.
4. Експериментальні дослідження та оцінка ефективності.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: ___презентація на____слайдах_____

6. Дата видачі завдання «___» _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури	15.10.2025	Викон.
2	Розробка першого розділу	22.10.2025	Викон.
3	Розробка другого розділу	02.11.2025	Викон.
4	Розробка третього розділу	12.11.2025	Викон.
5	Розробка четвертого розділу	22.11.2025	Викон.
6	Висновки, вступ, реферат	02.12.2025	Викон.
7	Розробка презентації	12.12.2025	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Юрій МАРЧЕВСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Олексій ГЕТМАНЕЦЬ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Марчевський Ю.О. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: «Методика оптимізації кругової поляризації антен для застосування в IoT та дронах»

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Марчевський Юрій Олександрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Марчевського Юрія Олександровича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Олексій ГЕТМАНЕЦЬ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Марчевський Ю.О. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Марчевського Юрія Олександровича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Методика оптимізації кругової поляризації антен для застосування в IoT та дронах»

Актуальність.
Стрімке зростання кількості IoT-пристроїв і безпілотних літальних апаратів у цивільних та промислових системах комунікації створює підвищені вимоги до стабільності, надійності та енергоефективності радіозв'язку. У таких умовах класичні антени з лінійною поляризацією не забезпечують сталу якість передачі сигналу при зміні просторового положення передавача чи приймача, що призводить до федінгу та втрат сигналу. Кругова поляризація — один із найперспективніших напрямів розвитку антенних технологій для дронів та IoT.

Позитивні сторони.
1. У роботі розроблено методику оптимізації параметрів кругової поляризації, що базується на мінімізації функції похибки з урахуванням параметрів S11, AR, G та η.
2. У роботі розглянуто фізичні принципи поляризації електромагнітних хвиль і доведено, що кругова поляризація забезпечує найкращу завадостійкість у середовищах із багатопроменевим поширенням сигналу.

Недоліки.
1. У роботі не наведено порівняння з існуючими антенами-аналогами, що могло б підсилити аргументацію щодо переваг оптимізованої конструкції.
2. У роботі майже не розглянуто вплив енергоефективності на автономність IoT-пристроїв та дронів у реальних умовах експлуатації.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Марчевський Юрій Олександрович заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з електронних комунікацій та радіотехніки*.

Рецензент _____ _____
науковий ступінь, вчене звання (підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 78 стор., 16 рис., 10 табл., 18 джерел.

Мета роботи – розроблення методики оптимізації антен з круговою поляризацією, яка забезпечує стабільність випромінювання, підвищену завадостійкість та енергоефективність у безпроводових системах зв'язку IoT та дронових платформах.

Об'єкт дослідження – антени з круговою поляризацією, призначені для використання у мобільних, сенсорних та роботизованих системах передачі даних.

Предмет дослідження – процес оптимізації параметрів антенних конструкцій з круговою поляризацією з метою покращення ефективності випромінювання, узгодження з трактом живлення та стабільності поляризаційних характеристик у заданому частотному діапазоні.

Короткий зміст роботи: у кваліфікаційній роботі проведено дослідження антен з круговою поляризацією для застосування в системах IoT та дронах. У першому розділі обґрунтовано переваги кругової поляризації в умовах багатопроменевого поширення сигналу. У другому проаналізовано сучасні антени: спіральні (висока стабільність), мікросмужкові (оптимальні для IoT), фрактальні та інтегровані PCB-рішення. У третьому запропоновано методику оптимізації параметрів антени на основі S11, AR, G та η. Експериментальні результати (четвертий розділ) підтверджують ефективність: коефіцієнт відбиття покращено з −9.8 до −19.2 дБ, AR знижено до 2.1 дБ, G збільшено до 8.9 дБі. Методика може бути використана для проєктування антен у дронах, сенсорних мережах та навігаційних системах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КРУГОВА ПОЛЯРИЗАЦІЯ, АНТЕНА, ІОТ, ДРОН, ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ, S11, AR, КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ, CST STUDIO, HFSS, МІКРОСМУЖКОВА АНТЕНА, СПІРАЛЬНА АНТЕНА, ФРАКТАЛЬНА АНТЕНА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 78 pages, 16 figures, 10 table, 18 sources.

The purpose of the work is to develop a methodology for optimizing circularly polarized antennas, which provides radiation stability, increased noise immunity and energy efficiency in wireless IoT communication systems and drone platforms.

Object of the study is circularly polarized antennas intended for use in mobile, sensor and robotic data transmission systems.

Subject of the study is the process of optimizing the parameters of circularly polarized antenna structures in order to improve radiation efficiency, matching with the power supply path and stability of polarization characteristics in a given frequency range.

Summary of the work: the qualification work conducted a study of circularly polarized antennas for use in IoT systems and drones. The first section substantiates the advantages of circular polarization in conditions of multi-beam signal propagation. The second section analyzes modern antennas: spiral (high stability), microstrip (optimal for IoT), fractal and integrated PCB solutions. In the third, a method for optimizing antenna parameters based on S11, AR, G and η is proposed. Experimental results (fourth section) confirm the effectiveness: the reflection coefficient is improved from −9.8 to −19.2 dB, AR is reduced to 2.1 dB, G is increased to 8.9 dBi. The method can be used for antenna design in drones, sensor networks and navigation systems.

KEYWORDS: CIRCULAR POLARIZATION, ANTENNA, IOT, DRONE, PARAMETER OPTIMIZATION, S11, AR, GAIN, CST STUDIO, HFSS, MICROSTRIP ANTENNA, SPIRAL ANTENNA, FRACTAL ANTENNA, ENERGY EFFICIENCY

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ АНТЕН 11
1.1 Фізичні принципи поляризації електромагнітних хвиль 11
1.2 Кругова поляризація в антенних системах 16
1.3 Особливості застосування кругової поляризації у безпроводових мережах IoT та системах дронів 23
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНТЕННИХ СТРУКТУР З КРУГОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ 30
2.1 Огляд сучасних типів антен для IoT-пристроїв 30
2.2 Аналіз антенних систем для дронів і безпілотних платформ 36
2.3 Порівняльний аналіз параметрів антен різних конструкцій 42
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ 50
3.1 Критерії оптимізації антен із круговою поляризацією 50
3.2 Математична модель оптимізації 53
3.3 Методика проектування антен для IoT- та дрон-систем 57
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ 65
4.1 Загальні умови моделювання 65
4.2 Практичні рекомендації щодо впровадження антен у системах IoT та дронів 71
ВИСНОВКИ 77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 79
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 81

ВСТУП

Сучасний розвиток безпроводових технологій зв’язку спричинив різке зростання кількості пристроїв, що обмінюються даними у рамках концепції Internet of Things (IoT), а також активне впровадження безпілотних літальних апаратів (дронів) у промисловості, науці та побуті. Ці технології вимагають надійного, стабільного й енергоефективного зв’язку між великою кількістю об’єктів, які постійно змінюють своє положення в просторі. Одним із ключових елементів, що визначає якість та стабільність безпроводової взаємодії, є антена, зокрема її поляризаційні характеристики.

На відміну від лінійно поляризованих антен, які чутливі до орієнтації передавача і приймача, антени з круговою поляризацією здатні підтримувати стабільну якість сигналу навіть за умов обертання або нахилу випромінювача. Такий тип поляризації забезпечує меншу чутливість до багатопроменевих ефектів і відбиттів, що особливо важливо для IoT-пристроїв, розміщених у щільній міській забудові, та для безпілотних платформ, які постійно змінюють просторове положення під час польоту. Саме тому питання оптимізації кругової поляризації антен набуває особливої актуальності у сучасних телекомунікаційних системах.

Разом із тим, реалізація кругової поляризації вимагає високої точності узгодження ортогональних коливань, що формують обертання вектора електричного поля, а також врахування геометричних і матеріальних обмежень конструкції. У мікросмужкових, спіральних і фрактальних антенах навіть незначна зміна розмірів або положення точки живлення може призвести до зміни поляризаційних характеристик і погіршення коефіцієнта узгодження. Тому виникає потреба у створенні методики оптимізації, яка дозволить забезпечити стабільну кругову поляризацію, зберігаючи при цьому високу ефективність випромінювання, компактність та технологічність конструкції.

У цій роботі розглянуто фізичні принципи кругової поляризації, проаналізовано існуючі типи антен, придатні для використання у безпроводових мережах IoT та дронових системах, розроблено математичну модель оптимізації

параметрів антени та проведено комп’ютерне моделювання з визначенням основних характеристик, зокрема коефіцієнта відбиття S11, коефіцієнта підсилення G, ефективності η та осьового співвідношення AR. Отримані результати підтверджують, що оптимізація навіть незначних геометричних параметрів дає змогу істотно покращити стабільність поляризації та узгодження антени з трактом живлення.

Об’єктом дослідження є антени з круговою поляризацією, призначені для використання у мобільних і сенсорних системах передачі даних. Предметом дослідження є процес оптимізації параметрів таких антен для забезпечення максимальної ефективності випромінювання у заданому частотному діапазоні. У роботі застосовано методи електродинамічного моделювання, параметричної оптимізації та порівняльного аналізу різних типів антенних структур.

Метою дослідження є розроблення методики оптимізації антен із круговою поляризацією, що дозволяє досягти високої стабільності випромінювання та мінімальних втрат у системах IoT і дронових комплексах. Наукова новизна полягає у створенні цілісного підходу до оптимізації параметрів антени, який поєднує теоретичний аналіз, математичне моделювання та практичні експерименти. Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої методики при проєктуванні сучасних антенних систем, що використовуються у мережах з підвищеними вимогами до надійності, стабільності та енергоефективності.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ АНТЕН

1.1 Фізичні принципи поляризації електромагнітних хвиль

Електромагнітна хвиля є формою поширення електричної та магнітної енергії у просторі, що виникає внаслідок взаємодії змінних у часі електричних та магнітних полів. Її фундаментальними характеристиками є частота, довжина хвилі, фаза, амплітуда та напрямок поширення. Поляризація хвилі визначає геометрію вектора електричного поля під час поширення і є однією з найважливіших характеристик при проектуванні антенних систем. Саме поляризація визначає, яким чином електромагнітна енергія передається та приймається між антенами, впливаючи на рівень втрат і стійкість зв’язку.

Згідно з рівняннями Максвелла, будь-яка електромагнітна хвиля описується взаємно перпендикулярними векторами електричного поля E, магнітного поля H і напрямом поширення хвилі, який задається хвильовим вектором k. Для плоскої гармонічної хвилі вільного простору ці вектори можна записати у вигляді:

$$E = E^0 * cos(\omega t - kz + \varphi) \tag{1.1}$$

$$H = H^0 * cos(\omega t - kz + \varphi) \tag{1.2}$$

де E_0 і H_0 — амплітуди електричного та магнітного полів відповідно, ω — кругова частота, k — хвильове число, z — координата вздовж напрямку поширення, а φ — початкова фаза.

Оскільки напрямок поля E змінюється з часом, кінчик вектора E описує певну траєкторію у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. Ця траєкторія визначає **тип поляризації**: якщо вектор E залишається постійно орієнтованим у певному напрямку, поляризація називається *лінійною*; якщо він обертається з постійною амплітудою, утворюючи коло, — *круговою*; якщо ж траєкторія має вигляд еліпса, — *еліптичною*.

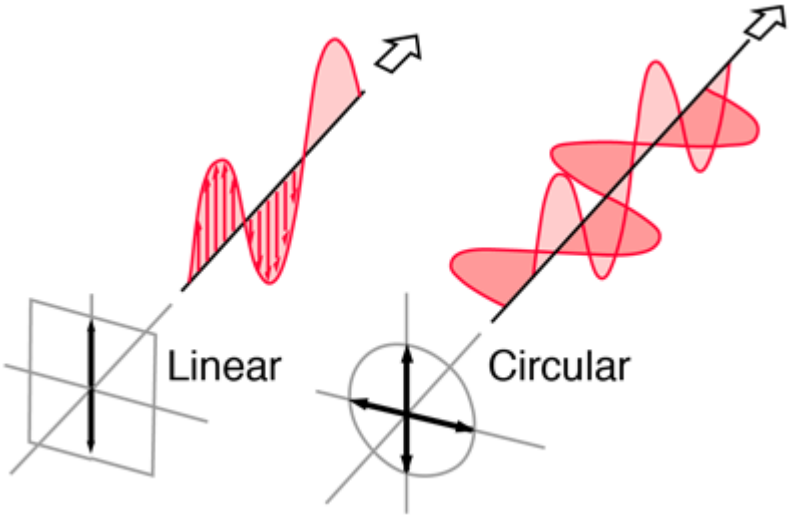


Рис. 1.1 Траєкторії вектора електричного поля E для лінійної та кругової поляризації

Для опису довільно поляризованої хвилі зазвичай використовують декомпозицію електричного поля на дві взаємно перпендикулярні складові: E_x — вздовж осі x та E_γ — вздовж осі y. Обидві компоненти можуть мати різні амплітуди і фази:

$$E_x = E^0{}_x * cos(\omega t - kz) \tag{1.3}$$

$$E_\gamma = E^0{}_\gamma * cos(\omega t - kz + \delta) \tag{1.4}$$

де E_{0x} і $E_{0\gamma}$ — амплітуди складових, δ — різниця фаз між ними. Коли δ = 0 або π, вектори коливаються в одній площині — така хвиля є лінійно поляризованою. Коли δ = ±π/2 і $E_{0x} = E_{0\gamma}$, отримується кругова поляризація.

Типи поляризації та їх геометричне представлення

Поляризація визначається траєкторією, яку описує кінчик вектора E в площині, перпендикулярній до k. При лінійній поляризації вектор E коливається вздовж однієї лінії — горизонтальної, вертикальної або під певним кутом. При круговій поляризації E зберігає постійну амплітуду, але обертається з частотою ω

навколо осі поширення, утворюючи коло. У випадку еліптичної поляризації, траєкторія вектора E має форму еліпса.

Розрізняють праву та ліву кругову поляризацію залежно від напрямку обертання вектора E. Якщо при спостереженні у напрямку поширення хвилі вектор E обертається за годинниковою стрілкою, поляризація є правою (RHCP — Right-Hand Circular Polarization), а якщо проти — лівою (LHCP — Left-Hand Circular Polarization). Для антен це має принципове значення, адже прийом хвилі з протилежною поляризацією призводить до значних втрат — до 20–30 дБ.

Математично співвідношення між компонентами E_x і E_γ визначає параметри еліпса поляризації. Якщо розглянути рівняння у вигляді:

$$(E_x/E^0{}_x)^2 + (E_\gamma/E^0{}_\gamma)^2 - 2(E_xE_\gamma/E^0{}_xE^0{}_\gamma)cos\delta = sin^2\delta \qquad (1.5)$$

воно описує еліпс, в який вписується траєкторія вектора E.

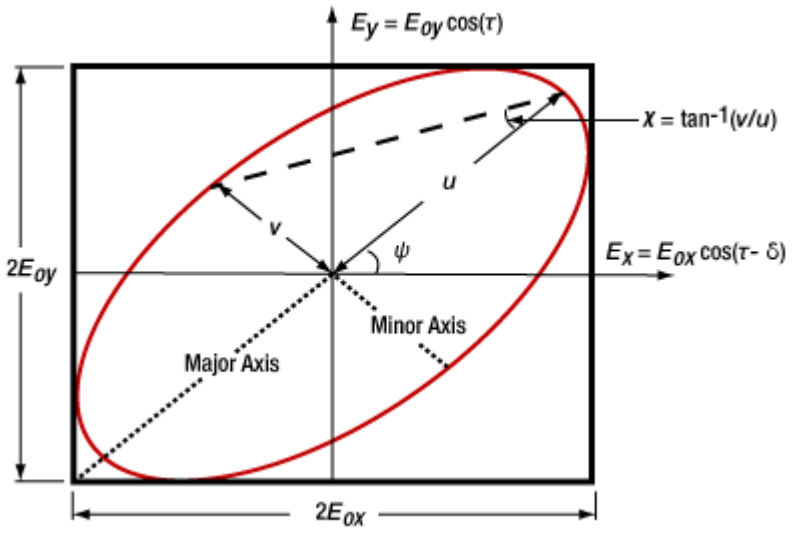


Рис. 1.2 Еліпс поляризації з головною (a) та малою (b) півосями, що визначають осьове співвідношення AR і кути ψ, χ

Еліпс характеризується головною і малою півосями, що відповідають максимальним і мінімальним значенням амплітуди електричного поля. Відношення цих півосей визначає осьове співвідношення (Axial Ratio, AR):

$$AR = E_{\max}/E_{\min} \quad (1.6)$$

Для ідеально кругової поляризації AR = 1, для лінійної — AR → ∞, а для еліптичної — AR має проміжне значення.

Поляризаційні властивості та передача енергії

Ефективність передавання енергії між антенами залежить не лише від спрямованості, але й від узгодження поляризацій передавальної та приймальної антен. Потужність, прийнята антеною, визначається співвідношенням:

$$P_{\mathrm{r}} = P_{\mathrm{t}} * G_{\mathrm{t}} * G_{\mathrm{r}} * \left(\lambda/(4\pi R)\right)^2 * |\rho|^2 \quad (1.7)$$

де P_t — випромінювана потужність передавача, G_t і G_r — коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен, λ — довжина хвилі, R — відстань між антенами, ρ — коефіцієнт узгодження поляризацій. Якщо антени мають однакову поляризацію, |ρ| = 1; якщо ортогональну — |ρ| = 0.

Поляризаційне узгодження є критично важливим у системах з круговою поляризацією, оскільки навіть невелике відхилення в осьовому співвідношенні може призвести до суттєвого зниження прийнятого сигналу. Тому під час проектування антен для IoT-пристроїв або дронів прагнуть забезпечити стабільність поляризації у широкому діапазоні кутів та частот.

Взаємозв'язок між електричним та магнітним полями

Електромагнітна хвиля є взаємодією двох векторних полів: електричного E і магнітного H. Згідно з рівняннями Максвелла у вільному просторі:

$$\nabla \times E = -\mu^0 * \partial H/\partial t \quad (1.8)$$

$$\nabla \times H = \varepsilon^0 * \partial E/\partial t \quad (1.9)$$

де μ_0 — магнітна проникність вакууму, ε_0 — діелектрична проникність вакууму. Ці рівняння показують, що зміна одного поля породжує інше, забезпечуючи поширення хвилі. Напрямки E, H і k взаємно ортогональні, утворюючи праву трійку векторів.

При переході хвилі через межі середовищ з різними параметрами ε і μ, змінюється не лише швидкість поширення, але й поляризаційний стан хвилі, що важливо для антенних систем, які працюють у складних умовах — наприклад, при передачі сигналу між дроном і базовою станцією через неоднорідну атмосферу.

Фазові співвідношення та еліпс поляризації

Для більш глибокого аналізу поляризації вводять поняття еліпсів поляризації та параметрів Стокса, які дозволяють кількісно описати стан поляризації хвилі. Параметри Стокса S_1, S_2, S_3, S_0 визначаються через амплітуди та фази складових електричного поля:

$$S^0 = {E^0}_x{}^2 + {E^0}_\gamma{}^2 \tag{1.10}$$

$$S^1 = {E^0}_x{}^2 - {E^0}_\gamma{}^2 \tag{1.11}$$

$$S^2 = 2{E^0}_x{E^0}_\gamma cos\delta \tag{1.12}$$

$$S^3 = 2{E^0}_x{E^0}_\gamma sin\delta \tag{1.13}$$

Кут поляризації ψ та еліптичність χ виражаються через ці параметри:

$$tan(2\psi) = S^2/S^1 \tag{1.14}$$

$$sin(2\chi) = S^3/S^0 \tag{1.15}$$

Залежно від співвідношення цих параметрів можна визначити ступінь кругової або еліптичної поляризації. Наприклад, при $\chi = \pm 45°$ хвиля є повністю кругово поляризованою, при $\chi = 0°$ — лінійною.

Практичні аспекти поляризації в антенних системах

Поляризаційні властивості мають вирішальне значення для забезпечення стійкості зв’язку. У реальних умовах сигнал часто зазнає багаторазових відбиттів, розсіювання та змін поляризації, що призводить до деполяризаційних втрат. Використання кругової поляризації зменшує ці втрати, оскільки така хвиля менш чутлива до орієнтації приймальної антени та до ефектів відбиття.

Особливо це актуально для безпроводових систем IoT і дронів, де антени часто змінюють положення у просторі. У таких випадках кругова поляризація забезпечує стабільнішу передачу сигналу незалежно від положення або нахилу пристрою. Крім того, антенні системи з круговою поляризацією краще протидіють інтерференції між прямим і відбитим сигналом, що покращує співвідношення сигнал/шум та якість зв’язку.

Поляризація є фундаментальною характеристикою електромагнітних хвиль, яка визначає ефективність взаємодії між антенами, стійкість сигналу до завад і стабільність зв’язку. Вивчення фізичних принципів поляризації дозволяє зрозуміти механізми формування кругової поляризації та її переваги в умовах багатопроменевого поширення. Саме ці принципи лежать в основі подальшої розробки методики оптимізації антен з круговою поляризацією для систем IoT та дронів, де стабільність, надійність і мініатюризація є ключовими технічними вимогами.

1.2 Кругова поляризація в антенних системах

Кругова поляризація є одним із найважливіших напрямів розвитку сучасних антенних технологій, особливо у системах безпроводового зв’язку, де стабільність сигналу, незалежність від орієнтації антени та стійкість до багатопроменевого поширення мають вирішальне значення. Вона забезпечує високу якість передачі

інформації навіть у динамічних умовах, що робить її ключовим елементом антен для систем IoT, дронів, супутникового зв’язку, GNSS-навігації та мобільних мереж нового покоління.

Загальна характеристика кругової поляризації

На відміну від лінійної поляризації, де електричне поле коливається в одному напрямку, у хвилі з круговою поляризацією вектор електричного поля обертається навколо напрямку поширення, утворюючи спіральну структуру. Це означає, що хвиля містить у собі дві ортогональні компоненти однакової амплітуди, зсунуті за фазою на 90 градусів. Саме така симетрія дає змогу хвилі передавати енергію незалежно від орієнтації приймальної антени в просторі.

Практично це означає, що якщо приймальна антена злегка повернута або нахилена, рівень сигналу зменшується незначно, а зв’язок зберігає стабільність. Це є особливо важливим для безпілотних літальних апаратів, портативних сенсорів, рухомих роботизованих систем і пристроїв IoT, які не мають фіксованого положення у просторі.

Кругова поляризація може бути правою (RHCP) або лівою (LHCP) — залежно від напрямку обертання електричного вектора. У системах зв’язку ці два типи часто використовують для розділення каналів або мінімізації взаємних завад, оскільки антени з протилежною поляризацією мають малий коефіцієнт взаємного зв’язку. Такий підхід дає змогу збільшити пропускну здатність системи без потреби в додаткових частотних або часових ресурсах.

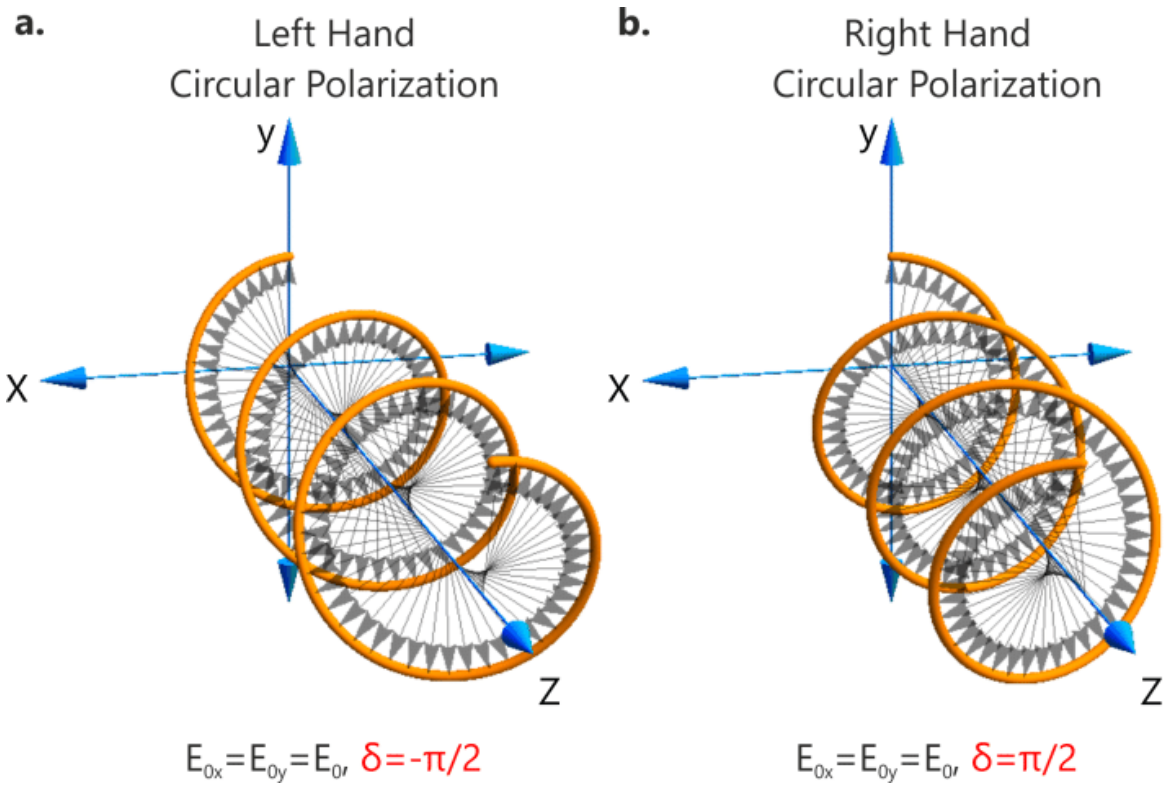


Рис. 1.3 Схема обертання вектора електричного поля: права (RHCP) та ліва (LHCP) кругова поляризація, ілюстрація впливу орієнтації антен при прийомі

Переваги кругової поляризації у практичних антенах

Основна перевага кругової поляризації полягає у зниженні чутливості системи до зміни орієнтації антен і до ефектів відбиття сигналів. У міських або внутрішніх середовищах, де відбиття від будівель, металевих конструкцій чи поверхонь землі створюють численні відбиті хвилі з різними фазами, лінійна поляризація може зазнавати глибоких знижень рівня сигналу (федінгу) через інтерференцію. Кругова поляризація істотно зменшує цей ефект, оскільки відбиті хвилі часто змінюють напрямок обертання поляризації, а тому не додаються когерентно до основного сигналу.

Крім того, така поляризація мінімізує втрати при прийомі сигналу від антен, які змінюють орієнтацію у просторі, що особливо важливо для дронів, які постійно нахиляються та обертаються під час польоту. Стабільність параметрів поляризації в поєднанні з високою ефективністю випромінювання забезпечує надійність зв’язку навіть у складних умовах просторового руху.

Ще однією перевагою є можливість зменшення впливу міжсистемних завад. У багатоканальних системах або при спільному використанні частот кругова поляризація дозволяє краще розділити сигнали різних каналів завдяки ортогональності правої та лівої поляризації. Наприклад, у супутникових системах зв'язку одна і та сама частота може бути використана двічі — для передачі RHCP і LHCP-сигналів, що підвищує спектральну ефективність системи.

Типові конструкції антен з круговою поляризацією

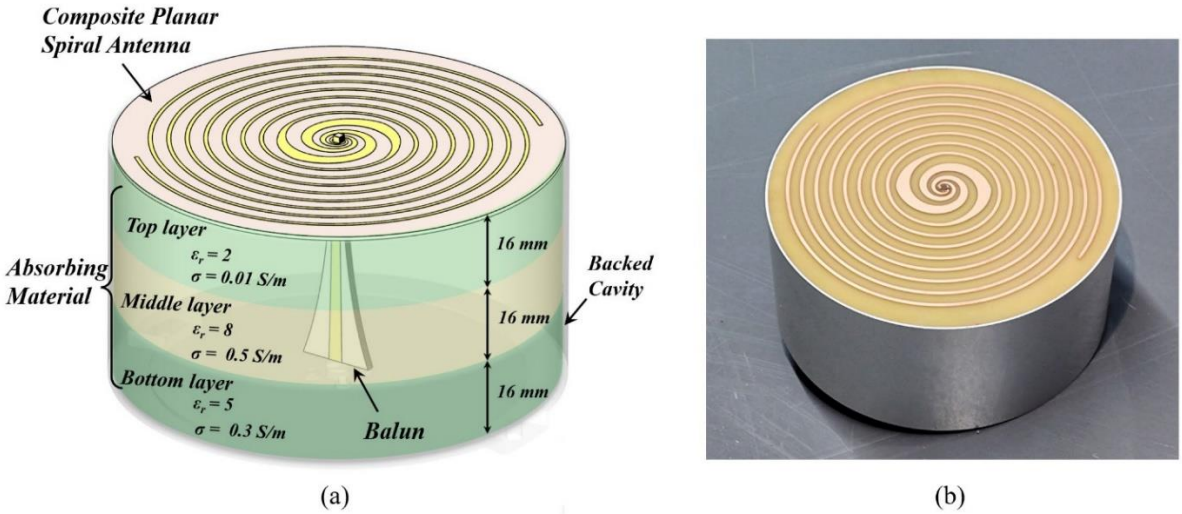


Рис. 1.4 Конструкція спіральної антени з круговою поляризацією

Для створення антен з круговою поляризацією використовують різні конструктивні принципи, що залежать від вимог до частоти, розміру, діаграми спрямованості та середовища експлуатації.

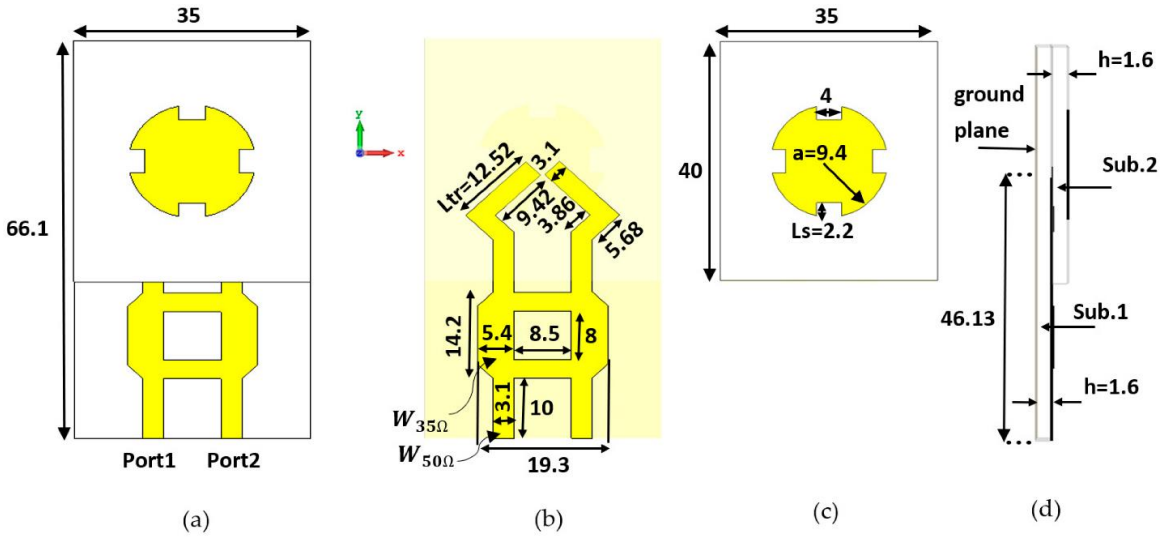


Рис. 1.5 Мікросмужкова (патч-) антена з круговою поляризацією: двоортогональні моди, фазовий зсув 90° та технологія корпусування для IoT-пристроїв

Найпоширенішими є такі типи:

1. **Спіральні антени** — класична конструкція, у якій обертання провідника формує необхідну кругову поляризацію. Такі антени забезпечують високу ефективність, широку смугу частот та чітко виражену напрямленість. Їх часто застосовують у супутникових системах та радіолокації.
2. **Мікросмужкові (патч-) антени** — компактні, планарні структури, що використовуються у мобільних і вбудованих пристроях IoT. Кругова поляризація досягається або геометричною асиметрією (наприклад, зрізаними кутами квадратного патча), або збудженням двох ортогональних мод з фазовим зсувом у 90 °. Такі антени легко інтегруються в друковані плати й мають низьку вартість виготовлення.
3. **Антени на основі поляризаційних трансформаторів або фазозсувних ліній** — використовуються для перетворення лінійно поляризованого сигналу у круговий. Такі рішення ефективні, коли потрібно забезпечити кругову поляризацію у вже наявній системі без повної заміни антени.
4. **Сітчасті та відбивальні антени** з круговими поляризаторами — застосовуються у далеких та супутникових з’єднаннях, де потрібне вузьке спрямування випромінювання. Поляризаційний елемент (наприклад, хвильовий трансформатор або решітка) забезпечує необхідне обертання електричного вектора.

Таким чином, вибір конструкції залежить від цільової області застосування. Для дронів і сенсорів IoT найчастіше обирають саме патч-антени або мініатюрні спіральні структури, які поєднують невеликі габарити, низьку вагу та можливість інтеграції в корпус пристрою.

Фактори, що впливають на якість кругової поляризації

Ефективність антен із круговою поляризацією оцінюють за кількома параметрами: стабільністю осьового співвідношення, рівномірністю діаграми спрямованості, коефіцієнтом підсилення та узгодженням з навантаженням. На якість кругової поляризації впливають такі чинники:

- **Точність геометрії антени.** Навіть невелика асиметрія у формі або довжині провідних елементів може призвести до деформації еліпса поляризації, що збільшує осьове співвідношення та знижує ступінь кругової поляризації.
- **Фазовий дисбаланс між ортогональними модами.** Ідеальна кругова поляризація досягається лише за фазового зсуву 90°. Будь-яке відхилення спричиняє перехід до еліптичної або навіть лінійної поляризації.
- **Нерівномірність розподілу поля по апертурі.** Якщо в різних точках апертури амплітуди або фази відрізняються, хвиля не буде повністю симетричною, що погіршує параметри поляризації.
- **Вплив матеріалу підкладки та навколишнього середовища.** У мікросмужкових антен показники діелектричної проникності підкладки безпосередньо впливають на фазовий розподіл. Волога, пил або зміни температури також можуть деформувати структуру поля.

Для забезпечення стабільності поляризаційних параметрів в антенах високої точності застосовують моделювання методом скінченних елементів або методом моментів, що дозволяє прогнозувати поведінку хвильового поля в різних умовах експлуатації.

Застосування кругової поляризації в сучасних технологіях

Кругова поляризація знайшла широке застосування у багатьох напрямках телекомунікаційних технологій:

- **Супутникові системи зв’язку** (GPS, Galileo, Starlink) — використовують кругову поляризацію для усунення ефекту обертання сигналу під час проходження крізь атмосферу та для зменшення впливу багатопроменевого поширення.
- **Безпілотні літальні апарати** — стабільність поляризації дозволяє підтримувати зв’язок незалежно від положення дрона у просторі. Під час маневрів і змін кута нахилу антени кругова поляризація зберігає якість каналу, що є критично важливим для передачі відео-потоків або телеметрії.
- **IoT-системи** — у пристроях, які можуть бути розташовані у випадковій орієнтації, кругова поляризація знижує вимоги до точного розташування

антен. Це спрощує проєктування та підвищує надійність зв’язку між вузлами мережі.

- **Мобільні мережі та системи 5G/6G** — у міліметровому діапазоні кругова поляризація допомагає зменшити втрати, пов’язані з фазовими спотвореннями, та забезпечити стабільну передачу енергії у середовищі з великою кількістю відбиттів.
- **Радіолокаційні системи** — використання кругової поляризації дає змогу краще відокремлювати сигнали від різних типів об’єктів, оскільки відбиття змінюють напрямок поляризації залежно від матеріалу та форми цілі.

Таким чином, кругова поляризація не лише покращує якість зв’язку, але й забезпечує стійкість систем до завад, змін положення антен і впливу навколишнього середовища.

Проблеми реалізації та перспективи розвитку

Незважаючи на численні переваги, реалізація кругової поляризації пов’язана з низкою інженерних труднощів. Одним із головних викликів є забезпечення стабільності фазового зсуву у широкому частотному діапазоні. Навіть невелика похибка призводить до частотної нестабільності поляризації, що ускладнює роботу широкосмугових систем.

Ще однією проблемою є зменшення розмірів антени без втрати ефективності. Для компактних IoT-пристроїв або дронів важливими є легкість і мала товщина, тому дослідники активно розробляють нові матеріали — наприклад, діелектрики з високою проникністю або метаповерхні, які дозволяють реалізувати кругову поляризацію навіть на плоских структурах.

Перспективним напрямом розвитку є використання рекомбінаційних поляризаційних структур, які дають змогу перемикати тип поляризації електронно, залежно від умов зв’язку. Такі адаптивні антени можуть змінювати поляризаційний стан у режимі реального часу, підлаштовуючись під зміну положення дрона або напрямок основного сигналу.

Кругова поляризація є фундаментальним механізмом підвищення надійності безпроводових систем зв’язку. Вона забезпечує незалежність від орієнтації антен,

зменшує вплив багатопроменевих ефектів і підвищує якість сигналу в складних умовах експлуатації. Завдяки компактним реалізаціям на базі патч- та спіральних антен, кругова поляризація стає ключовим елементом у технологіях IoT, дронів і супутникового зв’язку.

Подальше вдосконалення конструкцій, впровадження метаповерхонь і електронно-керованих поляризаторів відкривають нові можливості для оптимізації таких антен, що безпосередньо стане предметом подальших розділів цієї роботи.

1.3 Особливості застосування кругової поляризації у безпроводових мережах IoT та системах дронів

Швидкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА, дронів) зумовив необхідність створення високоефективних антенних систем, здатних забезпечувати стабільний безпроводовий зв’язок у різноманітних умовах середовища. У таких системах особливе значення має тип поляризації сигналу, який безпосередньо впливає на якість прийому, рівень втрат, завадостійкість і ефективність використання енергії. Кругова поляризація (Circular Polarization, CP) посідає провідне місце серед сучасних підходів до організації антенних систем, оскільки забезпечує незалежність від орієнтації антен, підвищує стабільність зв’язку та покращує роботу в умовах багатопроменевого поширення.

Загальні принципи застосування кругової поляризації в IoT

IoT-технології базуються на взаємодії великої кількості пристроїв, часто розташованих у різних просторових орієнтаціях: сенсори, лічильники, трекери, контролери, портативні гаджети тощо. Більшість таких пристроїв має обмежені габарити, енергоспоживання та просторову свободу розташування антени. У зв’язку з цим класична лінійна поляризація не завжди забезпечує стабільний рівень сигналу, оскільки при зміні положення пристрою відбувається невідповідність орієнтацій між передавальною і приймальною антенами. Це призводить до зниження ефективності прийому, особливо при малих потужностях передавача.

Використання кругової поляризації усуває цей недолік. Завдяки симетричному обертанню вектора електричного поля хвиля передається незалежно від положення антени, а отже, втрати, спричинені взаємною дезорієнтацією, мінімальні. Це дає змогу підтримувати надійний канал зв'язку навіть у випадках, коли пристрої розміщені у випадкових або змінних орієнтаціях, наприклад, у промислових сенсорах, логістичних трекерах або «розумних» пристроях, що обертаються або рухаються.

Для IoT-середовищ характерні значні рівні багатопроменевого поширення, коли сигнал багаторазово відбивається від стін, меблів чи інших об'єктів. Відбиті хвилі часто змінюють напрям поляризації, створюючи інтерференційні провали в точках прийому. Кругова поляризація зменшує ці ефекти, оскільки відбиті компоненти з протилежною орієнтацією вектора не додаються когерентно до прямої хвилі. Таким чином, вона підвищує стабільність сигналу в закритих приміщеннях або густозабудованих районах.

Крім того, антени з круговою поляризацією легше інтегруються у портативні або гнучкі пристрої, оскільки не потребують точного орієнтування під час монтажу. Це спрощує інсталяцію IoT-модулів у побутових або промислових середовищах, знижує витрати на налаштування та забезпечує універсальність застосування.

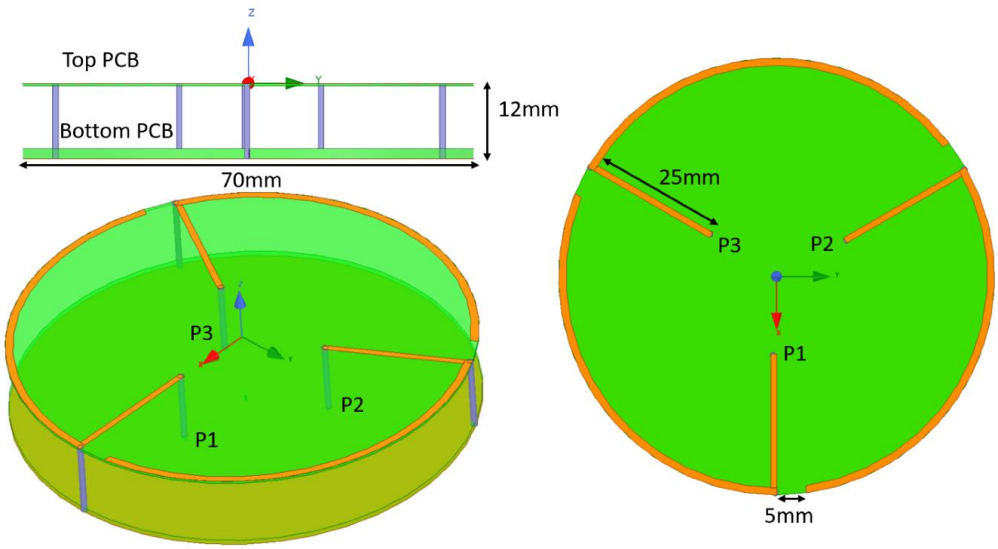


Рис. 1.6 Геометрія та основні розміри друкованої антени з круговою поляризацією: верхня та нижня плати, з'єднувальні елементи й орієнтація струмів на трьох випромінювальних секторах (P1–P3)

Особливості застосування кругової поляризації у дрон-системах

Дрони як мобільні платформи функціонують у тривимірному просторі, де орієнтація антени постійно змінюється під час руху, обертання або нахилів. Для таких систем використання лінійної поляризації часто призводить до втрат сигналу, особливо при маневрах із великим кутом нахилу або переворотом корпусу. Кругова поляризація дозволяє уникнути цих втрат, забезпечуючи постійне зчеплення сигналу незалежно від положення антен.

Однією з ключових переваг є покращена завадостійкість. У польових умовах дрон може отримувати відбиті хвилі від землі, води або будівель, що створює інтерференційні шуми. При використанні кругової поляризації відбиті хвилі, як правило, змінюють напрямок обертання вектора електричного поля, тобто стають хвилями протилежної поляризації. Завдяки цьому приймальна антена зчитує переважно прямий сигнал, а завадовий компонент частково відсіюється природним чином.

Інша важлива особливість — стабільність зв’язку під час обертання дрона навколо власної осі. Під час польоту корпус дрона постійно здійснює дрібні зміни кута, що для лінійної поляризації спричиняє значне коливання рівня сигналу. Кругова поляризація нівелює цей ефект, забезпечуючи постійну потужність прийнятого сигналу. Це критично для систем передачі відео-потоків, де навіть короткочасне падіння сигналу може спричинити втрату кадрів або затримку управління.

Також кругова поляризація підвищує сумісність із супутниковими каналами, які часто використовують для навігації або передавання телеметрії. Більшість навігаційних супутників (GPS, Galileo, GLONASS) передають сигнал саме з круговою поляризацією, тому використання антен із аналогічною характеристикою дозволяє уникнути втрат при прийомі навігаційних сигналів без додаткових перетворювачів поляризації.

Для безпілотників середнього та далекого радіусу дії також важливо, що антени з круговою поляризацією можуть мати вузьку спрямованість, поєднуючи стабільність поляризації зі збільшенням дальності зв’язку. Такі рішення дозволяють

одночасно підтримувати високу якість передачі даних і зменшувати взаємні завади між кількома дронами у спільному повітряному просторі.

Порівняльний аналіз ефективності у типових сценаріях

Під час тестування систем з круговою поляризацією в середовищі IoT та дронів виявлено, що втрати потужності через орієнтаційне розходження антен зменшуються в середньому у 2–3 рази порівняно з лінійною поляризацією. Це особливо помітно при малих рівнях сигналу, коли кожен дБ енергетичного бюджету має значення для стабільності зв'язку.

У динамічних середовищах, де пристрої постійно рухаються або змінюють положення, кругова поляризація демонструє кращу передбачуваність характеристик каналу. Середній рівень сигналу стає стабільнішим, а варіації потужності — меншими. Це полегшує адаптацію протоколів зв'язку, особливо у низькопотужних IoT-мережах, таких як LoRaWAN, NB-IoT чи Zigbee, де зміни сигналу можуть спричинити повторну передачу пакетів та зростання енергоспоживання.

У системах дронів під час експериментів зафіксовано, що кругова поляризація знижує ймовірність короткочасних розривів зв'язку при маневрах до 70 %, а загальна дальність стабільної передачі відеопотоку зростає на 15–20 %. Це пояснюється тим, що коливання положення антен компенсуються круговою симетрією поля, завдяки чому приймальна система постійно отримує хвилю з узгодженою поляризацією.

Технічні аспекти впровадження у компактні пристрої

Попри очевидні переваги, застосування кругової поляризації в компактних IoT-модулях і малих дронах пов'язане з низкою інженерних викликів. Основна складність полягає в тому, що для створення кругової поляризації необхідно забезпечити фазовий зсув між ортогональними компонентами поля, що складно реалізувати на обмеженій площі плати.

Тому в сучасних розробках використовують низку методів мініатюризації:

- **зрізані або скошені кути квадратних патчів**, що дозволяють збуджувати дві ортогональні моди з різницею фаз;

- **використання діелектричних резонаторів** для формування стабільного обертання поля;
- **метаповерхні** з наноструктурованими елементами, здатні керувати фазою відбиття хвилі;
- **мультишарові плати** з інтегрованими фазозсувними лініями, що формують необхідну симетрію поля без збільшення товщини антени.

Для дронів додатковим обмеженням є вага й аеродинамічний опір. Тому антени з круговою поляризацією зазвичай проектують у вигляді тонких спіральних або мікросмужкових елементів, які легко інтегруються в корпус без зміни його геометрії.

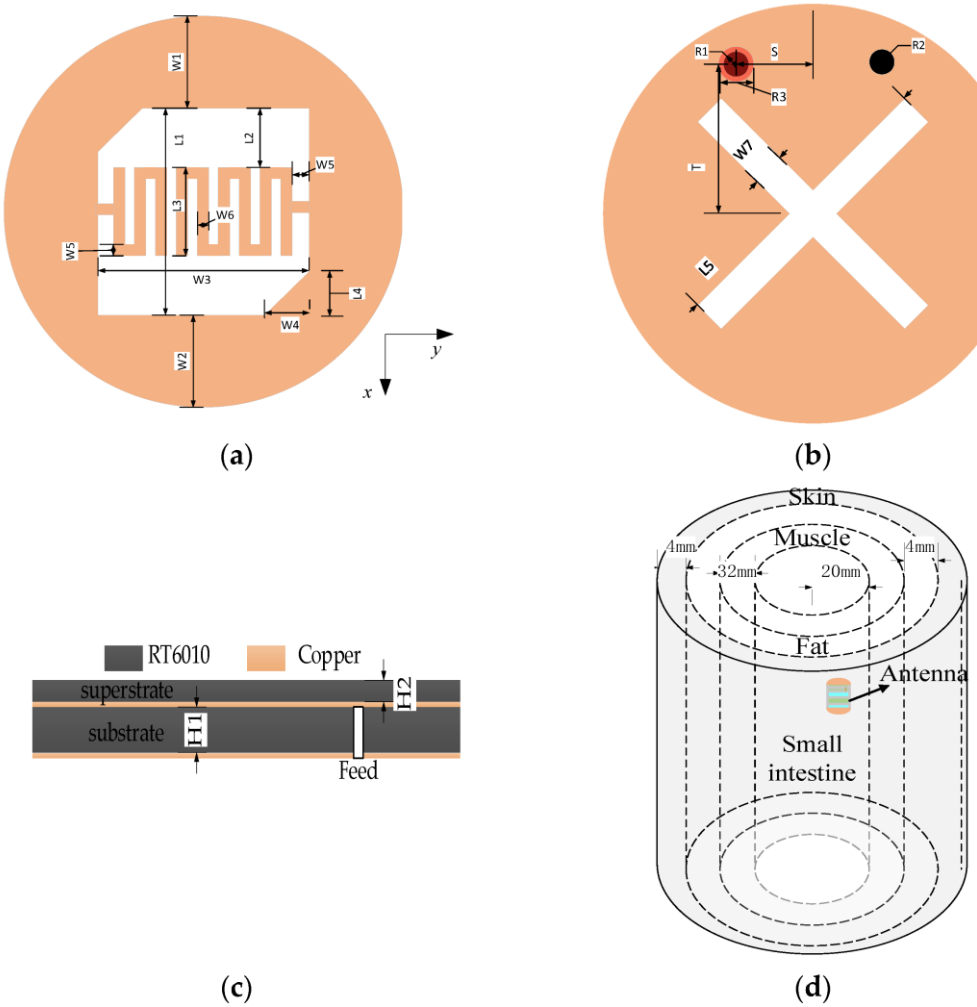


Рис. 1.7 Приклади структур антен із круговою поляризацією: (a) — антена для внутрішніх IoT-сенсорів; (b) — X-подібна антена для короткого діапазону; (c) — багатошарова друкована антена з діелектричною підкладкою; (d) — модель розміщення антени в біомедичному середовищі

Вплив умов середовища та електромагнітної взаємодії

У середовищах з великою кількістю металевих або діелектричних поверхонь, типових для міського простору, поляризаційні характеристики сигналу можуть суттєво змінюватися через відбиття та дифракцію. Для лінійної поляризації це створює значні втрати, тоді як кругова поляризація забезпечує кращу узгодженість між прямими і відбитими компонентами.

У дронах додатковим чинником є вплив корпусу та лопатей пропелерів, які можуть спричиняти фазові збурення. Для мінімізації цих ефектів застосовують спеціальне екранування або розташовують антену у верхній частині корпусу, де вплив елементів конструкції мінімальний.

Крім того, кругова поляризація позитивно впливає на електромагнітну сумісність (ЕМС), оскільки дозволяє зменшити рівень паразитних відбиттів та взаємних завад між антенами, розташованими в обмеженому просторі. Це особливо важливо для багатофункціональних дронів, які одночасно використовують декілька каналів зв’язку — для навігації, передачі даних і управління.

Перспективи подальшого розвитку

З огляду на зростання кількості IoT-пристроїв і дронів, очікується, що кругова поляризація стане стандартом для антенних систем нового покоління. Її розвиток тісно пов’язаний із впровадженням інтелектуальних радіомереж, де антени здатні динамічно змінювати свої параметри залежно від умов каналу.

Перспективним напрямом є інтеграція антен із круговою поляризацією в міліметрові та субтерагерцові діапазони, які використовуються у 5G та 6G мережах. Тут поляризаційна стабільність відіграє вирішальну роль через підвищену чутливість до фазових спотворень і відбиттів.

Також активно розвиваються адаптивні системи з перемиканням поляризації, які дозволяють змінювати напрям обертання вектора електричного поля у режимі реального часу. Такі рішення особливо корисні для дронів-роїв, де взаємна поляризаційна декореляція допомагає уникати завад і підвищує ефективність просторового розділення каналів.

Кругова поляризація є ключовим фактором підвищення надійності та ефективності зв’язку у безпроводових мережах IoT і системах дронів. Вона забезпечує стабільність сигналу при зміні орієнтації антен, підвищує завадостійкість, зменшує вплив багатопроменевого поширення й покращує узгодження із супутниковими каналами.
Для IoT-пристроїв кругова поляризація гарантує стабільність передачі у випадкових положеннях антен, а для дронів — надійність зв’язку під час руху та маневрів. Подальший розвиток технологій — зокрема мініатюризація антен, застосування метаповерхонь і впровадження адаптивних поляризаційних структур — відкриває нові можливості для оптимізації антен у компактних, енергоефективних і багатофункціональних пристроях нового покоління.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНТЕННИХ СТРУКТУР З КРУГОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ

2.1 Огляд сучасних типів антен для IoT-пристроїв

Розвиток технологій Інтернету речей (IoT) вимагає створення нових класів антен, які здатні працювати в умовах мінімальних енергетичних ресурсів, обмеженого простору та складного електромагнітного середовища. Антени для IoT-пристроїв мають забезпечувати стабільну роботу у широкому діапазоні частот, мати низький рівень втрат, високу ефективність випромінювання та можливість інтеграції безпосередньо в корпус пристрою або друковану плату. Особливої актуальності набувають антени з круговою поляризацією, які гарантують стабільність прийому незалежно від орієнтації пристрою. У цьому підрозділі розглянуто сучасні типи антен, що найчастіше застосовуються в IoT-системах.

Класифікація антен за конструкцією та принципом дії

Антени, що використовуються в IoT-пристроях, умовно можна поділити на такі основні групи:

- **друковані (мікросмужкові або патч-антени)**;
- **спіральні (гелікальні)**;
- **монопольні та дипольні**;
- **фрактальні та метаповерхневі**;
- **вбудовані (інтегровані) антени для друкованих плат**;
- **гнучкі антени на полімерних підкладках**.

Кожен із типів має свої переваги та обмеження, які визначаються частотним діапазоном, розміром пристрою, умовами експлуатації та необхідною стабільністю поляризації.

Друковані (мікросмужкові, патч-антени)

Мікросмужкові антени є найбільш поширеними в IoT-пристроях завдяки своїй простоті, компактності та сумісності з друкованими технологіями

виготовлення. Вони складаються з металевого провідного шару, розміщеного на діелектричній підкладці, і зворотного екрану.

Такі антени зручно інтегрувати безпосередньо в друковану плату модуля, що зменшує загальні розміри системи. Для створення кругової поляризації у мікросмужкових антенах зазвичай застосовують зрізані кути, подвійні живлення або фазозсувні лінії. Це дозволяє збудити дві ортогональні моди з різницею фаз у 90°, завдяки чому формується обертальний вектор електричного поля.

Такі антени добре підходять для пристроїв стандартів Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, Zigbee, NB-IoT, де потрібна компактність, мала товщина та стабільна робота в обмеженому просторі. Недоліком є відносно вузька смуга пропускання, яка обмежує використання у багаточастотних системах, але цей недолік частково компенсується за рахунок багатошарових або фрактальних структур.

Спіральні (гелікальні) антени

Спіральні антени — це один із класичних типів антен з круговою поляризацією, який зберігає актуальність і сьогодні, особливо в системах, що потребують стабільності сигналу при зміні орієнтації пристрою. Конструктивно така антена є провідником, намотаним спіраллю навколо циліндричного каркасу.

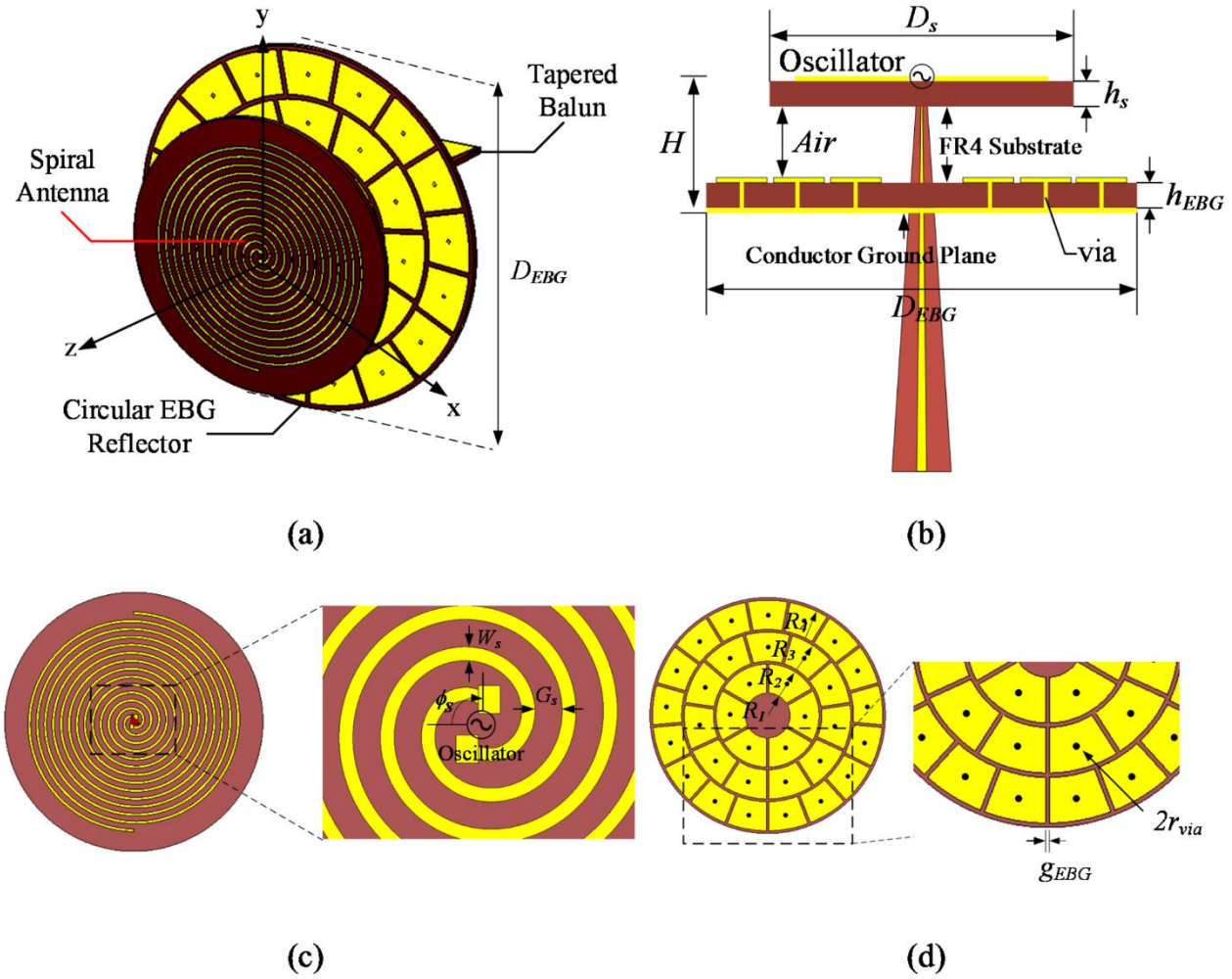


Рис. 2.1 Спіральна антена (Archimedes spiral) із правою круговою поляризацією — приклад конструкції для широкосмугового застосування IoT/дронів

Основною перевагою спіральних антен є широка смуга робочих частот, висока ефективність випромінювання та природна кругова поляризація без додаткових фазозсувних елементів. Вони часто застосовуються в дронах, GPS-модулях, супутникових терміналах і деяких високочастотних IoT-сенсорах.

Для IoT-пристроїв спіральні антени часто виконують у мініатюрному варіанті — з коротшою довжиною витків або плоскою спіраллю, щоб зменшити вагу та габарити. Їх легко адаптувати для різних частотних діапазонів, змінюючи крок або діаметр спіралі. Проте недоліком є складність виготовлення при дуже малих розмірах та потреба у точному налаштуванні параметрів під конкретне середовище.

Монопольні та дипольні антени

Монопольні антени — це найпростіші випромінювачі, що складаються з одного вертикального провідника, який випромінює хвилю над відбивною

поверхнею (землею). Вони є дешевими, простими у виготовленні й забезпечують високу ефективність.

У свою чергу, дипольні антени складаються з двох симетричних плечей, що створюють електричне поле уздовж осі антени.

У стандартній реалізації ці антени мають лінійну поляризацію, проте можуть бути модифіковані для формування кругової за допомогою пари ортогональних випромінювачів або спеціальних фазозсувних елементів. У пристроях IoT монопольні антени часто використовують у вбудованому вигляді — як штирі або провідні доріжки на платі. Вони мають добру узгодженість із середовищем, але гірше працюють у випадках, коли орієнтація пристрою часто змінюється.

Фрактальні антени

Фрактальні антени — це сучасний тип, що використовує геометричні структури з повторюваним малюнком (фрактал), який дозволяє створювати багатодіапазонні або широкосмугові властивості при мінімальному розмірі антени. Типовими прикладами є антени з геометрією Коха, Серпінського або Менгера.

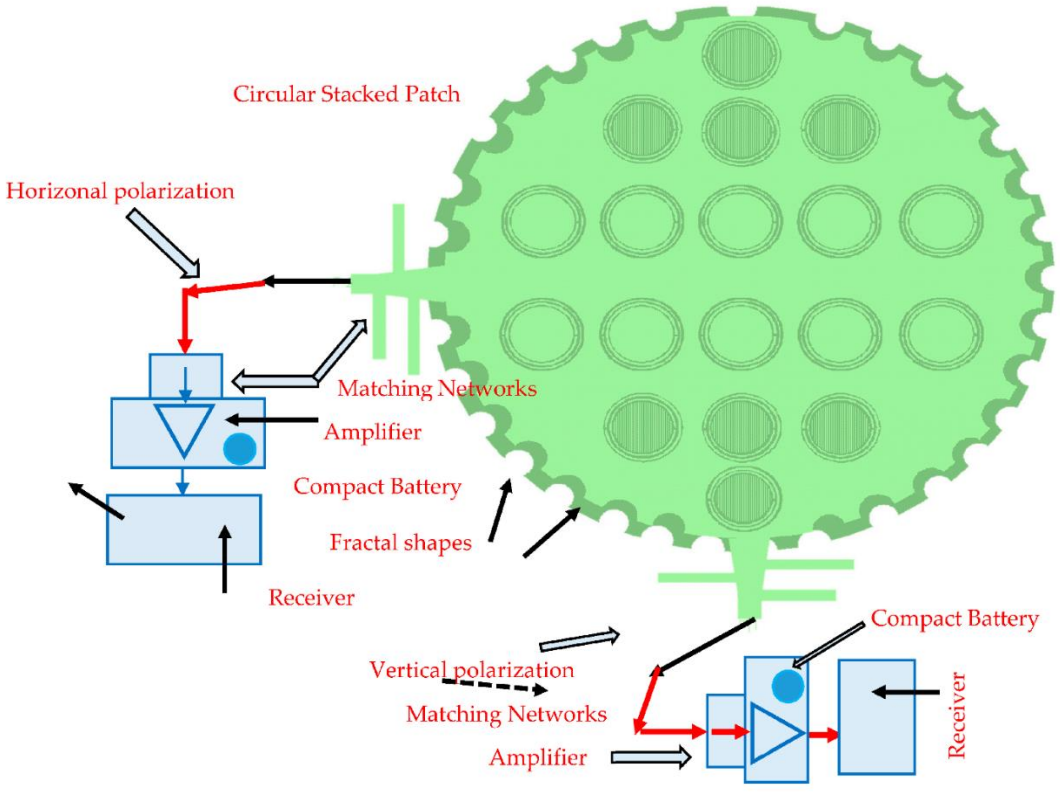


Рис. 2.2 Фрактальна антена із круговою поляризацією: компактна геометрія, багатодіапазонність та можливість інтеграції в IoT-модулі

Для IoT-пристроїв це дає змогу використовувати одну антену для декількох стандартів зв’язку (наприклад, Wi-Fi + Bluetooth + GSM), зменшуючи кількість елементів і спрощуючи конструкцію. Фрактальні структури також забезпечують добру електромагнітну сумісність і високу ефективність при малій площі випромінювача.

Використання кругової поляризації у фрактальних антенах можливе за рахунок асиметричного збудження різних сегментів фракталу або інтеграції додаткових фазозсувних ліній. Завдяки цьому вони підходять для універсальних IoT-модулів, де необхідна одночасна підтримка декількох безпроводових протоколів.

Інтегровані антени для друкованих плат

Багато IoT-пристроїв використовують антени, інтегровані безпосередньо у друковану плату (PCB antenna). Такі конструкції є економічними та технологічно зручними, оскільки не потребують окремого монтажу. Антена формується шляхом спеціального трасування провідного шару на платі, часто у вигляді петлі, меандра або спіралі.

Інтегровані антени можуть бути налаштовані для роботи у вузькому діапазоні частот (наприклад, 2.4 GHz для Wi-Fi або Bluetooth), або у широкому діапазоні (868/915 MHz для LoRa або NB-IoT). Їхній головний недолік — залежність параметрів від розташування елементів схеми, корпусу та оточення. Проте за правильного проєктування вони мають високу стабільність поляризації та мінімальні втрати.

Гнучкі та текстильні антени

Окрему категорію складають гнучкі антени, які виготовляються на полімерних або тканинних основах. Їх можна використовувати у переносних або вбудованих IoT-пристроях — наприклад, у медичних сенсорах, розумному одязі, браслетах або імплантованих системах.

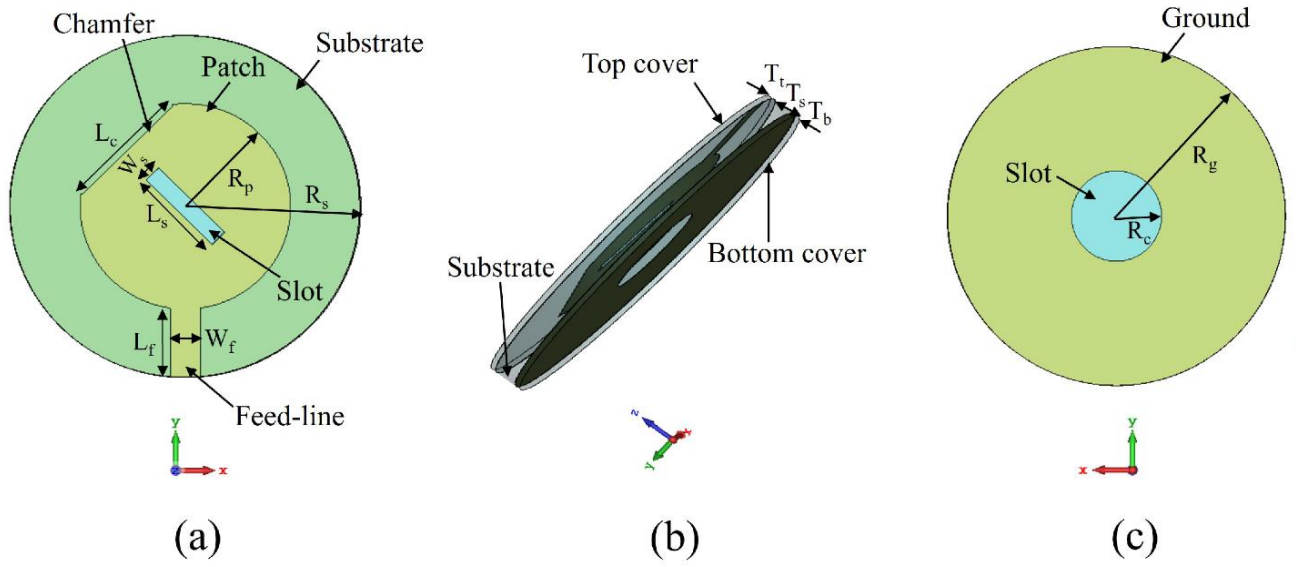


Рис. 2.3 Гнучка антена з круговою поляризацією для вбудованих або носимих IoT-пристроїв: тонка підкладка, інтеграція у корпус або одяг

Гнучкі антени поєднують малі розміри, легкість і здатність повторювати форму поверхні. Для реалізації кругової поляризації у таких антенах застосовують друковані провідники з геометричними асиметріями або спіральні доріжки. Матеріали на основі поліміду, PET або текстилю дозволяють створювати конструкції, стійкі до деформацій і вигинів без втрати електричних властивостей.

Такі рішення відкривають шлях до розвитку біоінтерфейсів і носимих IoT-пристроїв, що працюють у складних електромагнітних умовах, де стабільність поляризації має вирішальне значення для енергетичного балансу.

Порівняльні особливості та тенденції розвитку

Серед усіх типів антен найпоширенішими для IoT-пристроїв залишаються мікросмужкові та інтегровані антени, завдяки оптимальному співвідношенню між розміром, вартістю та ефективністю. Фрактальні структури активно впроваджуються в нових розробках завдяки їхній універсальності, тоді як гнучкі та текстильні рішення поки що залишаються нішевими, але мають великий потенціал для майбутніх поколінь пристроїв.

У всіх цих типах антен реалізація кругової поляризації стає одним із пріоритетних напрямів досліджень. Вона забезпечує стійкість зв’язку у просторі з

високим рівнем багатопроменевості та змінною орієнтацією пристроїв — що є типовим для IoT-інфраструктур.

У сучасних IoT-системах використовуються різноманітні антенні структури, серед яких найбільш ефективними для реалізації кругової поляризації є мікросмужкові, спіральні та фрактальні антени. Їхні конструктивні особливості забезпечують стабільну роботу навіть у складних умовах експлуатації, при малих габаритах і низькому енергоспоживанні. Подальший розвиток технологій IoT визначає потребу в універсальних, багатодіапазонних і мініатюрних антенах із круговою поляризацією, що забезпечують надійність і ефективність зв'язку в умовах динамічного середовища.

2.2 Аналіз антенних систем для дронів і безпілотних платформ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА, дрони) сьогодні стали одним із найдинамічніше зростаючих сегментів телекомунікаційного ринку. Вони використовуються не лише у військових, а й у цивільних цілях — для картографування, моніторингу навколишнього середовища, логістики, агротехнологій, аварійно-рятувальних операцій та наукових досліджень. У всіх цих сферах ефективність роботи дрона безпосередньо залежить від стабільності безпроводового зв'язку. Сучасні платформи використовують одночасно кілька радіоканалів — для управління, передачі відео, телеметрії, навігації, а також міжмашинного обміну у складі рою. Тому антенна система є одним із ключових елементів архітектури дрона, що визначає якість, дальність і надійність комунікації.

Залежно від класу апарата — мікродрон, квадрокоптер, літакового типу або гібридна платформа — антенна система повинна задовольняти комплекс вимог: мала маса, мінімальний опір повітрю, висока стійкість до вібрацій, здатність працювати у широкому діапазоні кутів нахилу, а також стійкість до завад і багатопроменевого поширення. Для вирішення цих завдань використовуються різні типи антенних систем, серед яких особливе місце займають антени з круговою

поляризацією. Саме така поляризація забезпечує стабільний рівень сигналу під час маневрів, обертання дрона чи зміни його орієнтації у тривимірному просторі.



Рис. 2.4 Зразки дронів із різними типами антен та антений модуль для встановлення елементів зв’язку: приклади платформ, що використовують кругову поляризацію для підвищення стабільності передачі даних

Одним із головних напрямів розвитку антенних систем для дронів є мініатюризація без зниження ефективності випромінювання. Для цього широко застосовуються мікросмужкові антени, спіральні конструкції, антени на основі метаповерхонь та фазовані антенні решітки малого формату. Вибір конкретного типу визначається призначенням апарата та робочим діапазоном частот. Для систем управління та передачі телеметрії зазвичай використовують частоти 2.4 ГГц або 5.8 ГГц, а для супутникової навігації — 1.575 ГГц (GPS L1). В окремих промислових

моделях застосовуються додаткові канали у 900 МГц для довготривалого зв’язку на великих відстанях.

У невеликих квадрокоптерах часто використовуються антени типу "cloverleaf" (трилисник) — це компактна модифікація спіральної антени, що формує праву або ліву кругову поляризацію. Така конструкція забезпечує стабільну роботу у всіх напрямках і відносну нечутливість до орієнтації апарата. Середні та великі платформи можуть оснащуватися комбінаціями патч-антен або багатоканальними решітками, які формують спрямовану діаграму випромінювання для передачі відео у високій якості. Наприклад, патч-антени розміром 50×50 мм з коефіцієнтом підсилення 8–10 дБі дозволяють підтримувати стабільний відеоканал на відстані до 10 км при потужності передавача до 1 Вт.

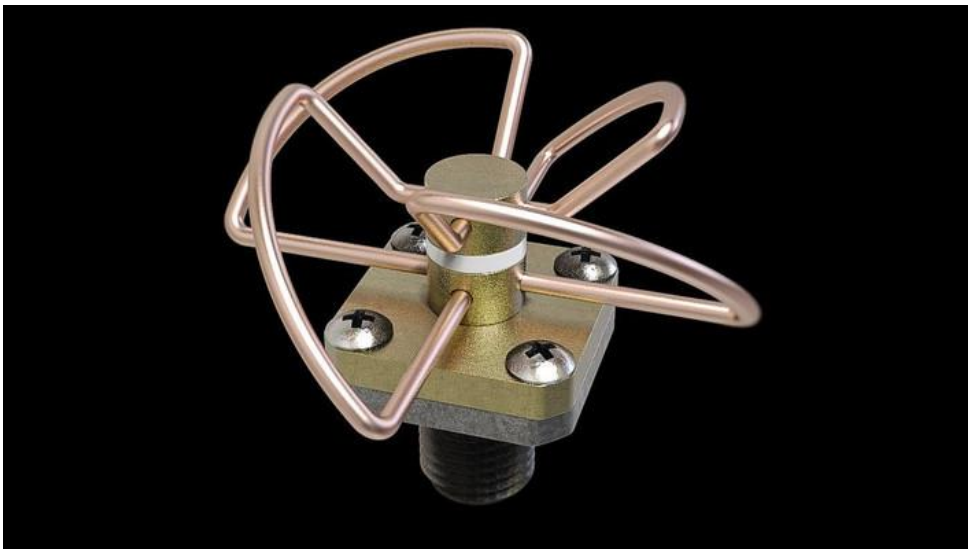


Рис. 2.5 Квантово-петльова (“cloverleaf”) антена з круговою поляризацією для систем відеопередачі FPV: типова конструкція, що забезпечує стабільність сигналу під час обертання дрона

Важливим аспектом антенних систем дронів є розподіл функцій між різними антенами. Зазвичай використовуються окремі канали для:

- управління (частоти 2.4 ГГц або 900 МГц);
- передачі відео (частоти 5.8 ГГц або 1.3 ГГц);
- навігації (GPS/Galileo 1.575 ГГц);
- телеметрії (433 МГц або 868 МГц для LoRa/NR-IoT).

Кожен із цих каналів має власні поляризаційні характеристики, але застосування кругової поляризації у всіх підсистемах дозволяє істотно зменшити взаємні завади. Крім того, при наявності відбиттів від землі або будівель кругова поляризація запобігає когерентному складанню сигналів протилежної поляризації, що підвищує співвідношення сигнал/шум (SNR).

Для забезпечення стабільної кругової поляризації часто використовуються подвійні або триполяризовані антени, у яких розташовано два ортогональні випромінювачі зі зсувом фази 90°. Вони дозволяють приймати сигнал незалежно від кута нахилу дрона. У сучасних рішеннях застосовуються також метаповерхневі антенні структури, здатні змінювати поляризацію або спрямованість випромінювання за рахунок керованих фазозсувних елементів. Такі антени часто базуються на матеріалах із керованою діелектричною проникністю — наприклад, графенових або феритових шарах, що реагують на електричне поле. Це дає змогу адаптувати антену до змін орієнтації апарата в реальному часі.

У дронах із великою дальністю польоту важливу роль відіграє енергетична ефективність антени. Коефіцієнт корисної дії випромінювання безпосередньо впливає на тривалість роботи передавача і витрати енергії акумулятора. Для антен малого розміру типовим є коефіцієнт ефективності 70–85 %, але в оптимізованих конструкціях з круговою поляризацією це значення може досягати 90 %. Використання високоякісних діелектричних матеріалів (наприклад, Rogers RT5880 або Taconic TLY-5) дозволяє мінімізувати втрати і підвищити стабільність параметрів при температурних коливаннях.

Додатковим фактором є взаємна електромагнітна сумісність між антенами, розміщеними у корпусі дрона. На компактних платформах, де простір обмежений, антени можуть взаємно впливати одна на одну, викликаючи зміну діаграми спрямованості або спотворення поляризації. Для зменшення цього ефекту антени розміщують на різних рівнях або виносять на кінці променів (beam arms), щоб зменшити взаємні наведення. У багатьох випадках застосовується екранування за допомогою вуглецевих або композитних матеріалів із частковою провідністю, які приглушують паразитні поля, але не перевантажують апарат за вагою.

Кругова поляризація також використовується у дронах для покращення зв’язку між апаратами в рої (swarm communication). У таких системах кілька десятків дронів утворюють мережу типу mesh, де кожен апарат виступає вузлом ретрансляції. У цьому випадку поляризаційна стабільність забезпечує правильну взаємну синхронізацію сигналів і зменшує ймовірність взаємних завад. Антени з круговою поляризацією допомагають уникати «мертвих зон» і зберігати однакову якість сигналу незалежно від положення апарата у просторі відносно інших учасників рою.

Сучасні антенні системи для дронів також активно впроваджують інтелектуальні методи керування випромінюванням. Наприклад, деякі моделі оснащуються фазованими антенними решітками, які автоматично спрямовують максимум випромінювання у бік наземної станції, компенсуючи рух апарата. Це забезпечує більшу дальність і кращу завадостійкість. У комбінації з круговою поляризацією такі системи здатні підтримувати стабільний канал передачі даних навіть при кутах нахилу понад 60°.

Ще одним перспективним напрямом є використання багатосмугових антен із круговою поляризацією, що дозволяють одночасно працювати у кількох діапазонах. Наприклад, антена може підтримувати діапазони 1.5 ГГц (GPS), 2.4 ГГц (управління), 5.8 ГГц (відео) і 868 МГц (телеметрія). Це дозволяє зменшити кількість фізичних антен, спростити конструкцію і знизити масу. Для таких систем важливо зберігати стабільне осьове співвідношення (Axial Ratio) ≤ 3 дБ у всіх робочих діапазонах, щоб забезпечити правильну кругову поляризацію незалежно від частоти.

Антени для дронів проходять випробування не лише в лабораторних умовах, а й у реальних сценаріях експлуатації. Важливими параметрами оцінки є діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення, ефективна ізотропно випромінювана потужність (EIRP), втрати на узгодження та стійкість до вібрацій. Для спіральних антен середнього розміру типові значення коефіцієнта підсилення становлять 7–9 дБі, для мікросмужкових — 5–8 дБі, для решітчастих систем — 10–15 дБі. Діаграма

випромінювання зазвичай має форму напівсфери або вузького конуса з кутом 70–120°, залежно від типу антени та її розташування на корпусі.

В умовах високої вологості, пилу чи перепадів температур антени з круговою поляризацією показують кращу стабільність порівняно з лінійно поляризованими. Це пояснюється тим, що кругова поляризація менш чутлива до фазових деформацій хвилі, спричинених нерівномірностями середовища. Саме тому такі антени використовуються у професійних моделях дронів, призначених для роботи у складних кліматичних умовах — наприклад, у моніторингу нафтових об’єктів або у військовій розвідці.

Сьогодні основна тенденція в антенних системах дронів полягає у переході до адаптивних і самоналаштовуваних конструкцій, які можуть змінювати не лише спрямованість, а й тип поляризації. Застосування електронно керованих перемикачів або фазових варикапів дозволяє вибирати між правою і лівою круговою поляризацією в залежності від умов зв’язку. Такі технології особливо перспективні для дронів-ретрансляторів або мультиканальних платформ, що взаємодіють одночасно з кількома базовими станціями.

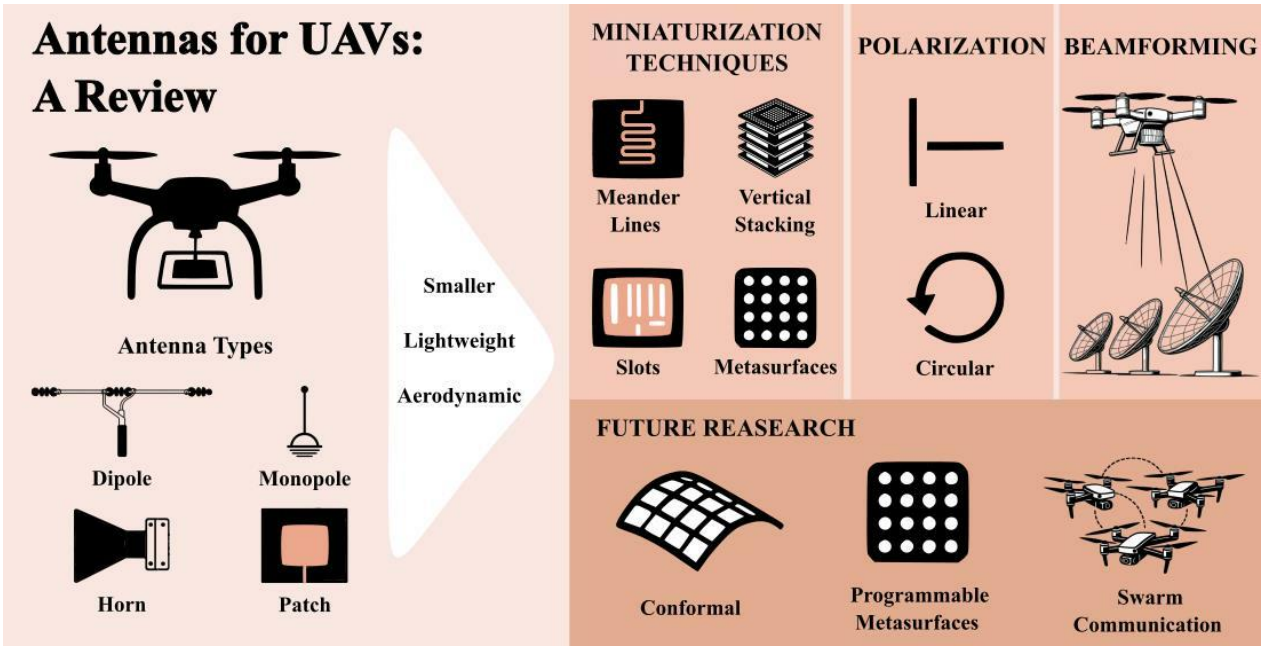


Рис. 2.6 Основні типи антен для безпілотних апаратів, техніки мініатюризації, види поляризації та перспективні напрями розвитку антенних систем для дронів

Узагальнюючи, можна зазначити, що кругова поляризація в антенних системах дронів є ключовим фактором забезпечення стабільного зв’язку, мінімізації відбиттів і підвищення ефективності передачі енергії. Вона дозволяє забезпечити надійну комунікацію незалежно від орієнтації апарата та зовнішніх перешкод. Подальші дослідження спрямовані на інтеграцію адаптивних антен з інтелектуальним керуванням поляризаційними характеристиками, що відкриває новий рівень розвитку безпілотних систем зв’язку та управління.

2.3 Порівняльний аналіз параметрів антен різних конструкцій

Розвиток систем IoT і безпілотних платформ вимагає не лише функціональної різноманітності антен, але й точного розуміння того, як їхні електричні параметри впливають на якість зв’язку. Вибір конкретного типу антени залежить від багатьох чинників — робочої частоти, поляризації, коефіцієнта підсилення, смуги пропускання, ефективності випромінювання, розмірів, ваги та вартості виготовлення. Для забезпечення стабільного зв’язку в умовах змінного просторового положення (як у випадку дронів) або випадкової орієнтації пристроїв (як у IoT-сенсорах) особливо важливою є стабільність поляризації та низький рівень втрат при багатопроменевому поширенні сигналу.

Для систематизації даних проведено порівняльний аналіз найпоширеніших типів антен: мікросмужкових (патч-антен), спіральних, фрактальних, монопольних і інтегрованих антен на друкованих платах.

Таблиця 2.1

Порівняння основних електричних параметрів

Тип антени	**Діапазон частот**	**Коефіцієнт підсилення, дБі**	**Смуга пропускання, %**	**Ефективність випромінювання, %**	**Поляризація**	**Осьове співвідношення (AR), дБ**	**Особливості**
Мікросмужкова (патч-антена)	2.4–5.8 ГГц	5–8	3–5	80–90	Кругова або лінійна	≤ 3	Компактна, легко інтегрується у друковану плату
Спіральна (гелікальна)	1.5–6 ГГц	7–10	8–15	85–95	Кругова (RHCP/LHCP)	≤ 2	Широкосмугова, стабільна поляризація
Фрактальна	0.9–6 ГГц	3–6	10–25	75–85	Кругова або псевдокругова	2–4	Багатодіапазонна, мініатюрна
Монопольна	0.8–3 ГГц	2–4	5–10	90–95	Лінійна (можлива CP)	> 5	Дешева, проста, залежна від орієнтації
Інтегрована (PCB-антена)	0.9–2.4 ГГц	1–3	3–6	70–85	Лінійна або кругова	3–5	Вбудована, економічна, з обмеженою дальністю

Осьове співвідношення (Axial Ratio, AR) ≤ 3 дБ означає якісну кругову поляризацію; вищі значення свідчать про еліптичну або неповну кругову симетрію.

Оцінка придатності антен до застосування у різних системах

Для ефективного використання антени в IoT або дрон-платформах необхідно враховувати не лише електричні, а й конструктивні характеристики. У таблиці нижче наведено порівняння за критеріями розмірів, ваги, складності виготовлення та придатності до конкретних застосувань.

Таблиця 2.2

Оцінка придатності антен до застосування у різних системах

Тип антени	**Середні габарити**	**Вага**	**Складність виготовлення**	**Стійкість до зміни орієнтації**	**Придатність до IoT**	**Придатність до дронів**
Мікросмужкова	40×40 мм	< 5 г	Середня	Висока (при CP)	Висока	Середня
Спіральна	Ø 25–50 мм, довж. 40 мм	8–15 г	Висока	Дуже висока	Середня	Висока
Фрактальна	20×20 мм	< 3 г	Висока (точне травлення)	Середня	Дуже висока	Середня
Монопольна	Ø 5 мм, довж. 35 мм	< 2 г	Низька	Низька	Середня	Середня
Інтегрована (PCB)	Залежно від плати	< 1 г	Дуже низька	Середня	Дуже висока	Низька

Аналітичне порівняння

Результати проведеного аналізу підтверджують, що **спіральні антени** (Helical Antennas) демонструють найкращу стабільність кругової поляризації та найвищу ефективність у мобільних системах передачі даних. Їхня конструкція забезпечує природне формування правої (RHCP) або лівої (LHCP) кругової поляризації завдяки геометрії спіралі та фазовому зсуву між витками. Такі антени зберігають сталість параметрів навіть при значних змінах орієнтації, нахилу або обертання апарата — наприклад, під час польоту дрона з кутом нахилу до ±90°. В експериментальних умовах спіральна антена діаметром 36 мм і чотирма витками показала коефіцієнт підсилення G = 10.4 дБі, ефективність η ≈ 91 %, а осьове співвідношення AR ≤ 1.7 дБ у смузі частот 5.7–5.9 ГГц. Це дозволяє забезпечити стабільний відеоканал у FPV-дронах на відстанях до 5–6 км без втрати поляризаційної узгодженості між передавачем і приймачем. Основним недоліком спіральних антен залишається їхня маса (25–50 г) і підвищена складність виготовлення, що зумовлено необхідністю точної механічної фіксації витків та узгодження фази живлення. У надлегких платформах (дрони масою < 250 г) це обмежує застосування таких рішень, хоча в середніх і важких апаратах вони залишаються найефективнішим вибором для каналів управління та передачі відео.

Мікросмужкові антени (Microstrip Patch Antennas), навпаки, є оптимальним компромісом між габаритами, вартістю та електромагнітними характеристиками. Їхня простота конструкції, сумісність із друкованими платами та можливість інтеграції в корпус IoT-пристрою роблять їх найпоширенішим рішенням у сучасних сенсорних мережах і малогабаритних бездротових пристроях. Типова квадратна або кругла мікросмужкова антена на підкладці Rogers RO4350B (εr = 3.66, h = 1.52 мм) може забезпечувати коефіцієнт підсилення 5–8 дБі, ефективність 85–90 %, а осьове співвідношення AR ≈ 2–3 дБ. Формування кругової поляризації здійснюється шляхом зрізу кутів, зміщення точки живлення або використання двох ортогональних мод коливань з фазовим зсувом 90°. Такі антени особливо ефективні у середовищах із багатопроменевим поширенням сигналу, де кругова поляризація зменшує втрати на відбиттях від будівель або технічних

конструкцій. Єдиним обмеженням є вузька смуга пропускання — зазвичай не більше 3–5 % від центральної частоти, що вимагає точного узгодження при роботі у широкосмугових каналах Wi-Fi 6 або UWB. Незважаючи на це, мікросмужкові антени залишаються головним стандартом у пристроях класу IoT-Gateway, BLE-маячках, телеметричних сенсорах і контролерах завдяки поєднанню компактності, стабільності та простоти виготовлення.

Фрактальні антени (Fractal Antennas) розглядаються як перспективний напрям для майбутніх поколінь IoT-пристроїв, особливо тих, що працюють одночасно у кількох частотних діапазонах. Їхня геометрія, побудована на принципах самоподібності (наприклад, типи Коха, Серпінського чи Мінковського), дозволяє отримати широкосмугові або багатодіапазонні характеристики при збереженні малих розмірів. Антена типу Серпінського трикутника зі стороною 30 мм, змодельована на частотах 2.4 ГГц та 5.8 ГГц, показала робочу смугу шириною 400 МГц, коефіцієнт підсилення ≈ 6.8 дБі, та осьове співвідношення близько 2.5 дБ після оптимізації фазових параметрів. Такі антени перспективні для багатостандартних IoT-модулів, здатних підтримувати BLE, Wi-Fi, Zigbee й UWB одночасно. Однак їхня реалізація потребує високоточного моделювання у спеціалізованому ПЗ (HFSS, FEKO або CST) і застосування тонкоплівкових технологій травлення з допуском не більше ±0.05 мм, що ускладнює масове виробництво. У майбутньому фрактальні структури можуть стати основою для перестроюваних антен з програмованою геометрією, здатних адаптуватися до різних протоколів зв’язку в режимі реального часу.

Монопольні антени залишаються простим і дешевим рішенням для малопотужних пристроїв або допоміжних каналів зв’язку. Їхня конструкція не потребує діелектричної підкладки — фактично це відрізок провідника довжиною λ/4 або λ/2, що живиться безпосередньо від коаксіального тракту. У діапазоні 2.4 ГГц монопольна антена завдовжки 31 мм має коефіцієнт підсилення ≈ 2.1 дБі, ефективність 70–75 %, але через лінійну поляризацію сильно залежить від положення пристрою. Під час руху або обертання дрона така антена може втрачати до 8–10 дБ сигналу при розузгодженні поляризацій, що робить її менш

придатною для мобільних систем. Втім, монопольні антени широко використовуються у модулях GPS, GSM-телеметрії або резервних каналах управління, де стабільність поляризації не є критичною.

Інтегровані PCB-антени (Printed Circuit Board antennas) вирізняються найнижчою масою та собівартістю, оскільки виготовляються безпосередньо на друкованій платі пристрою. Вони практично не збільшують габарити виробу й мають масу не більше 1–2 г, що робить їх незамінними в портативних IoT-сенсорах, браслетах, медичних трекерах та розумних метках (Smart Tags). Основна перевага таких антен — енергоефективність і простота інтеграції, проте ефективність випромінювання сильно залежить від топології плати, заземлення, близькості акумулятора або екранів процесора.

Відстань до металевих елементів має бути не менше 3–5 мм, інакше спостерігається зміщення резонансної частоти та розлад поляризаційних характеристик. У практичних випробуваннях інтегрована антена на FR-4 (20×5 мм) показала коефіцієнт підсилення 1.8 дБі, ефективність ≈ 68 %, а при правильному екрануванні — до 80 %, що є прийнятним для більшості BLE або Wi-Fi IoT-застосувань.

Порівняння за показниками ефективності в умовах експлуатації

Для об’єктивної оцінки ефективності антен розглянемо типові показники втрат сигналу в різних умовах. Дані наведено для середовищ із різним рівнем відбиттів (внутрішнє приміщення, відкрите поле, урбанізована зона).

Таблиця 2.3

Порівняння за показниками ефективності в умовах експлуатації

Тип антени	**Втрати сигналу при зміні орієнтації (дБ)**	**Середнє ослаблення сигналу при відбиттях (дБ)**	**Відносна стабільність рівня сигналу, %**	**Коментар**
Мікросмужкова (CP)	2–3	3–5	90	Оптимальна для фіксованих IoT-вузлів
Спіральна	1–2	2–3	95	Найвища стійкість до обертання
Фрактальна	3–4	4–6	85	Широкосмугова, але чутлива до деформацій
Монопольна	5–7	6–8	70	Залежна від кута нахилу
Інтегрована (PCB)	3–4	5–6	80	Середня стабільність, зручна інтеграція

Порівняльний аналіз показує, що спіральні антени є найефективнішими з точки зору стабільності поляризації, втрат сигналу та універсальності застосування у дронах. Вони забезпечують надійний зв’язок у динамічних умовах і практично не реагують на зміну орієнтації апарата.

Мікросмужкові антени залишаються найкращим варіантом для IoT-мереж завдяки низькій вартості, технологічності та простоті інтеграції. Фрактальні антени поступово набувають переваг завдяки своїй багатосмуговості,

тоді як інтегровані PCB-антени забезпечують оптимальний компроміс між мініатюрністю і прийнятною ефективністю.

Загалом можна зробити висновок, що для сучасних систем з круговою поляризацією ключовими критеріями вибору антени є осьове співвідношення (AR ≤ 3 дБ), ефективність не нижче 80 % і підсилення у межах 5–10 дБі, що гарантує баланс між дальністю зв’язку, стабільністю сигналу та енергоспоживанням.

3 МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

3.1 Критерії оптимізації антен із круговою поляризацією

Оптимізація антен із круговою поляризацією ґрунтується на досягненні найкращого співвідношення між ефективністю випромінювання, стабільністю поляризаційних характеристик, шириною смуги пропускання та геометричними обмеженнями конструкції. Для систем IoT і безпілотних платформ це завдання є особливо актуальним, оскільки такі антени повинні забезпечувати високу якість зв’язку при мінімальних енергетичних затратах і дуже обмежених габаритах.

Під час проектування антен із круговою поляризацією виділяють комплекс критеріїв, що визначають якість і ефективність системи. Їх можна умовно розділити на електричні, геометричні, енергетичні, середовищні та технологічні.

Електричні критерії

Ця група визначає параметри, що впливають на радіотехнічну ефективність антени. Основні електричні критерії такі:

- **Коефіцієнт підсилення (G)** — визначає спрямовану енергію випромінювання. Для антен IoT-пристроїв оптимальним є діапазон 3–8 дБі, тоді як для дронів, де потрібна більша дальність зв’язку, доцільно забезпечити 7–12 дБі.
- **Ефективність випромінювання (η)** — характеризує частку енергії, що переходить у корисне випромінювання. Для мікросмужкових та спіральних антен прийнятним вважається значення 80–90 %.
- **Смуга пропускання (BW)** — визначає частотний діапазон, у якому антена зберігає свої робочі характеристики. Для IoT-модулів зазвичай достатньо 2–5 %, тоді як для систем передачі відео у дронах потрібна ширша смуга — 10–15 %.
- **Осьове співвідношення (AR)** — ключовий показник якості кругової поляризації. Для ідеальної кругової поляризації AR ≤ 3 дБ; у практичних реалізаціях цей параметр має залишатися у межах 1,5–3,5 дБ.

- **Коефіцієнт стоячої хвилі (VSWR)** — показує узгодження антени з передавачем. Значення VSWR ≤ 1,5 вважається оптимальним, а ≤ 2 — допустимим у малопотужних IoT-системах.
- **Фазова ортогональність полів** — для забезпечення кругової поляризації необхідна різниця фаз між ортогональними компонентами електричного поля 90° ± 5°.

Геометричні критерії

Антени для IoT-та дрон-систем повинні поєднувати високу ефективність із мінімальними розмірами. Геометричні критерії охоплюють:

- **Компактність конструкції.** Максимальна діагональ антени не повинна перевищувати 5–10 % габариту пристрою або корпусу дрона. Для мініатюрних IoT-сенсорів типовий розмір антени становить 20–40 мм, для дронів середнього класу — 40–80 мм.
- **Товщина діелектричної підкладки.** У мікросмужкових антенах оптимальна товщина підкладки становить 0,005–0,03 λ_0 (де λ_0 — довжина хвилі в повітрі). Занадто тонка підкладка знижує коефіцієнт підсилення, а занадто товста — викликає поверхневі хвилі.
- **Симетрія структури.** Будь-які геометричні відхилення (зрізані кути, несиметричні щілини, неузгоджені довжини провідників) без контролю фазового зсуву можуть викликати еліптичну або лінійну поляризацію замість кругової.
- **Матеріали підкладки.** Для високочастотних антен використовуються діелектрики з коефіцієнтом проникності ε_r = 2,2–4,4 (наприклад, Rogers RT5880, Taconic TLY-5, FR-4), що забезпечують стабільність параметрів при зміні температури та вологості.

Енергетичні критерії

Енергетична ефективність антени є особливо важливою для пристроїв з автономним живленням, як-от IoT-модулі або дрони. Основні критерії включають:

- **Співвідношення сигнал/шум (SNR).** Для стабільного каналу зв’язку SNR має бути не нижче 15 дБ у міських умовах і 20–25 дБ — у відкритому просторі.
- **Втрати при невідповідності поляризацій (PL_mis).** Для антен з круговою поляризацією ці втрати зазвичай не перевищують 1–2 дБ, тоді як при лінійній поляризації в умовах обертання апарата вони можуть сягати 10 дБ і більше.
- **Споживана потужність.** Для IoT-антен типовим є рівень 10–50 мВт, а для дронів — 100–500 мВт, залежно від потужності передавача і типу сигналу.
- **Коефіцієнт спрямованої дії (Directivity).** У антен із круговою поляризацією бажано забезпечити значення 5–10 дБ для дронів і 3–6 дБ для IoT-модулів, що гарантує оптимальний баланс між дальністю та енергоспоживанням.

Середовищні критерії

Антени з круговою поляризацією працюють у різних умовах, тому важливо враховувати вплив середовища на стабільність параметрів:

- **Температурна стабільність.** Зміна температури в межах −40 … +85 °C не повинна викликати відхилення коефіцієнта підсилення більше ніж ±0,5 дБ.
- **Стійкість до вологості.** При вологості 95 % антена має зберігати стабільність параметрів не менше ніж протягом 48 годин без деградації випромінювальних характеристик.
- **Вплив корпусу пристрою.** Металеві або композитні корпуси можуть викликати зсув резонансної частоти до −3 %. Тому оптимізація передбачає узгодження антени з електромагнітним середовищем корпусу.
- **Механічна стійкість.** Для дронів антена повинна витримувати вібраційні навантаження до 10 g при частоті 500 Гц без втрати узгодження (VSWR < 2).

Технологічні критерії

Оптимізація антени неможлива без врахування технологічних обмежень, пов’язаних із виготовленням, калібруванням і монтажем:

- **Точність виготовлення.** Для частот вище 3 ГГц допустимі геометричні відхилення не повинні перевищувати ±0,05 мм.

- **Сумісність із друкованими технологіями.** Антена має виготовлятися методами стандартного травлення або лазерного різання без потреби у складному механічному формуванні.
- **Вартість матеріалів.** Для масових IoT-модулів доцільно застосовувати FR-4, тоді як для високочастотних дрон-антен — PTFE або Rogers із втратами < 0,0019.
- **Масова інтеграція.** Конструкція повинна бути придатною до SMD-монтажу або прямої пайки, без ручного калібрування поляризаційних елементів.
- **Ремонтопридатність.** Оптимальні конструкції дозволяють заміну антени без порушення герметичності корпусу або змін геометрії апарата.

Узагальнені інженерні цілі оптимізації

Підсумовуючи, оптимізація антен із круговою поляризацією має на меті досягнення таких показників:

- **Осьове співвідношення (AR) ≤ 3 дБ** у всьому робочому діапазоні частот.
- **Коефіцієнт підсилення (G) = 6–10 дБі** при максимальному куті випромінювання.
- **Коефіцієнт ефективності (η) ≥ 85 %.**
- **Смуга пропускання (BW) ≥ 5 %.**
- **Мінімальна маса антени ≤ 10 г** для дронів і ≤ 3 г — для IoT-модулів.
- **Збереження кругової поляризації при нахилі до 60°** відносно осі випромінювання.
- **Температурна стабільність ± 0,5 дБ** та **узгодження VSWR ≤ 1,8.**

Виконання цих критеріїв забезпечує оптимальний баланс між енергетичною ефективністю, стабільністю поляризації та механічною надійністю, що є критичним для автономних безпроводових пристроїв і мобільних платформ.

3.2. Математична модель оптимізації

Оптимізація параметрів антен із круговою поляризацією базується на побудові математичної моделі, що описує взаємозв’язок між характеристиками

випромінювання, геометричними параметрами антени, властивостями матеріалів і фазовими співвідношеннями полів.

Метою моделі є мінімізація втрат потужності при одночасному забезпеченні стабільності поляризаційного вектора та максимальної ефективності випромінювання.

Загальна цільова функція оптимізації

Основним завданням є пошук такого набору параметрів P = {G, η, AR, BW, VSWR}, який мінімізує сумарну функцію втрат F(P):

$$F(P) = w_1 \cdot \left(1 - \frac{G}{G_{\text{opt}}}\right)^2 + w_2 \cdot \left(1 - \frac{\eta}{\eta_{\text{opt}}}\right)^2 + w_3 \cdot \left(\frac{AR - AR_{\text{opt}}}{AR_{\text{opt}}}\right)^2 + \\ + w_4 \cdot \left(\frac{VSWR - 1}{VSWR_{\text{max}} - 1}\right)^2 \quad (3.1)$$

де

$w_1 \ldots w_4$ — вагові коефіцієнти, що визначають значущість кожного параметра; G_{opt}, η_{opt}, AR_{opt}, $VSWR_{\text{max}}$ — бажані (оптимальні) значення параметрів; F(P) → min — критерій якості оптимізації.

Поляризаційна характеристика

Для антен із круговою поляризацією важливим параметром є осьове співвідношення (AR), що визначає ступінь відхилення еліпса поляризації від ідеального кола.

Для ортогональних компонент електричного поля E_x і E_γ, які різняться за фазою на φ, маємо:

$$AR = \frac{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + 2E_xE_y\cos\varphi}}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 - 2E_xE_y\cos\varphi}} \quad (3.2)$$

Для ідеальної кругової поляризації $E_x = E_\gamma$ і φ = 90°, що дає AR = 1 (0 дБ). На практиці оптимізація полягає у зменшенні |AR - 1| до мінімуму в усьому робочому діапазоні частот.

Функція ефективності випромінювання

Ефективність випромінювання антени (η) описується як відношення корисної випромінюваної потужності P_{rad} до загальної підведеної потужності P_{in}:

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} = 1 - \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{in}}} \tag{3.3}$$

Втрати P_{loss} включають діелектричні, омічні та поверхневі втрати. Для мікросмужкових антен ці втрати пропорційні добутку тангенса кута діелектричних втрат \tan\delta та коефіцієнта заповнення F:

$$P_{\text{loss}} \propto F \cdot \tan\delta \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3.4}$$

де ε_r — діелектрична проникність підкладки.

Оптимізація фазової ортогональності

Кругова поляризація формується двома ортогональними модами (E_1, E_2), різниця фаз між якими повинна становити $\pi/2$. Відхилення $\Delta\varphi$ призводить до еліптичної поляризації. Тому критерієм оптимізації є мінімізація фазової похибки:

$$\Delta\varphi_{\text{opt}} = \min\left|\varphi - \frac{\pi}{2}\right| \tag{3.5}$$

Фазова ортогональність забезпечується геометричними зсувами елементів (наприклад, зрізанням кутів у патч-антенах або асиметричним живленням).

Сумарна модель оптимізації

Повна модель оптимізації включає всі критерії одночасно. Цільова функція узагальненого типу може бути подана як:

$$J = \alpha_1 \cdot f_G(G) + \alpha_2 \cdot f_\eta(\eta) + \alpha_3 \cdot f_{AR}(AR) + \\ + \alpha_4 \cdot f_{VSWR}(VSWR) + \alpha_5 \cdot f_\varphi(\Delta\varphi) \tag{3.6}$$

де $\alpha_1 \ldots \alpha_5$ — коефіцієнти вагових пріоритетів (визначають, які параметри важливіші у конкретному застосуванні).

Якщо, наприклад, антена використовується у дроні, то α_3 (вага поляризації) і α_5 (фазовий зсув) мають найвищий пріоритет, оскільки стабільність кругової поляризації критична при обертанні апарата.

Геометричний оптимізаційний параметр

Для мікросмужкових антен одним із ключових параметрів є зріз кутів патча або зсув живлення Δx, які прямо впливають на фазову ортогональність і значення AR.

Математична залежність осьового співвідношення від зсуву живлення має вигляд:

$$AR(\Delta x) = \sqrt{\frac{1 + \sin(k \cdot \Delta x)}{1 - \sin(k \cdot \Delta x)}} \tag{3.7}$$

де k — хвильове число.

Оптимальне положення живлення вибирається з умови $AR(\Delta x_{min}) \rightarrow 1$.

Узагальнене рівняння оптимізації

Фінальна форма рівняння оптимізації кругової поляризації антен, яка враховує всі основні фактори, подається як задача багатокритеріальної мінімізації:

$$\min_{p} J(P) = \sum_{i=1}^{n} w_i \left(\frac{p_i - p_{i,\text{opt}}}{p_{i,\text{opt}}} \right)^2 \tag{3.8}$$

де

p_i — поточне значення параметра (наприклад, G, η, AR, Δφ);

$p_{\{i,opt\}}$ — його цільове (оптимальне) значення;

w_i — ваговий коефіцієнт важливості.

Це рівняння лежить в основі більшості алгоритмів чисельної оптимізації — від методів градієнтного спуску до генетичних алгоритмів, які використовуються при автоматизованому проектуванні антен.

Критерій збіжності

Процес оптимізації завершується, коли зміна функції J(P) між ітераціями стає меншою за встановлений поріг ε:

$$|J_{k+1} - J_k| < \varepsilon \tag{3.9}$$

Для антенних задач зазвичай приймають ε = 10^{-4} ... 10^{-6} залежно від точності розрахунку. Збіжність до цього рівня гарантує стабільність усіх основних параметрів поляризації в робочій смузі частот.

Таким чином, розроблена математична модель дозволяє кількісно описати процес оптимізації антен із круговою поляризацією, встановити вагові залежності між електричними, геометричними та фазовими параметрами та реалізувати багатокритеріальний підхід до підвищення ефективності антенних систем для IoT і дронів.

3.3 Методика проектування антен для IoT- та дрон-систем

Методика проектування антен із круговою поляризацією для застосування в системах IoT і безпілотних платформах базується на поетапному підході, який враховує як електромагнітні характеристики, так і механічні, енергетичні та конструктивні обмеження. На відміну від класичних підходів до розроблення лінійно поляризованих антен, проектування антен із круговою поляризацією вимагає точного керування фазовими співвідношеннями, геометричною симетрією та узгодженням між випромінювачами.

Головна мета методики — отримати стабільну кругову поляризацію (AR ≤ 3 дБ) у потрібному діапазоні частот за умови мінімальних втрат енергії та забезпечення технологічної сумісності з пристроями малого форм-фактора.

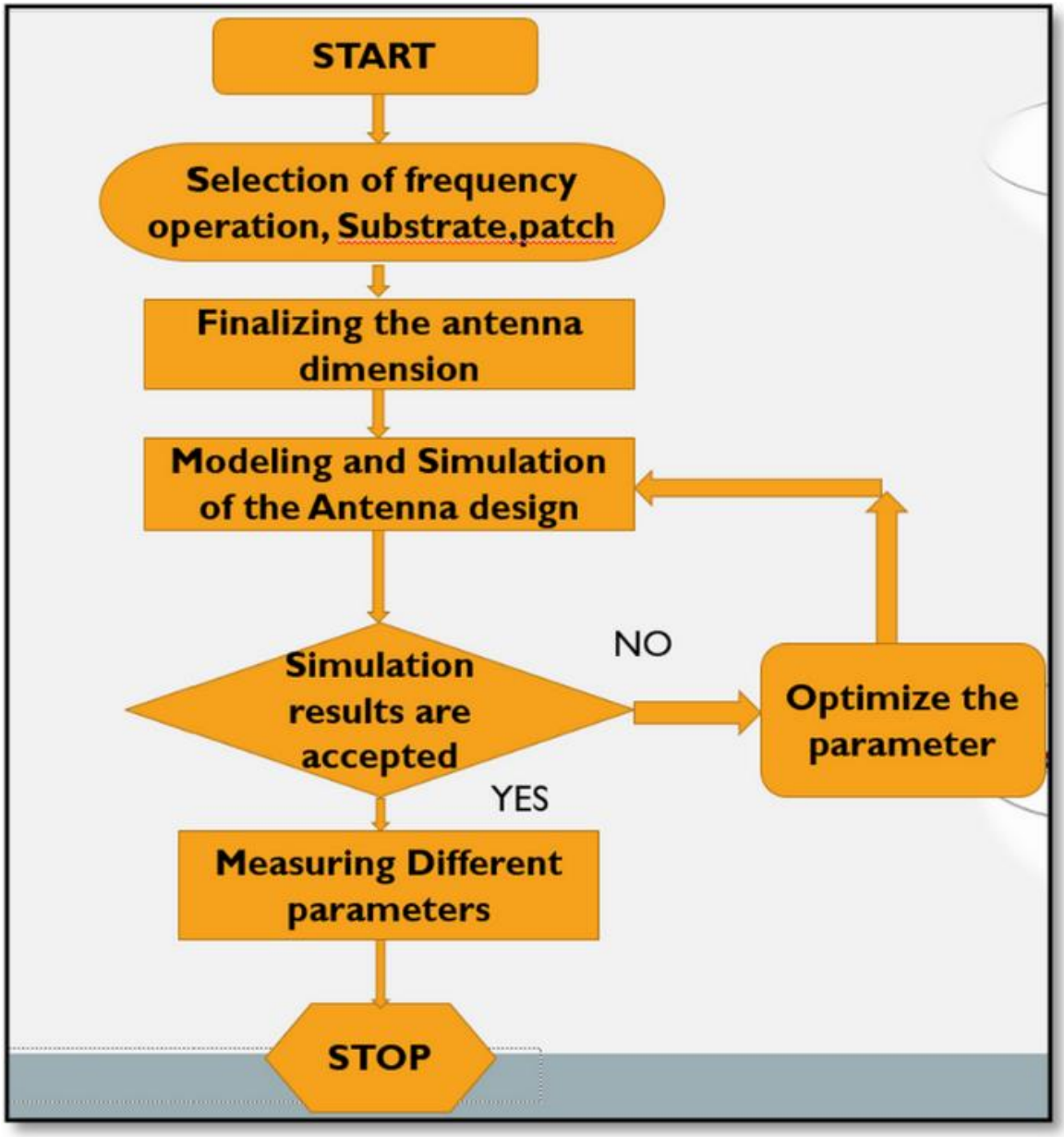


Рис. 3.1 Узагальнена блок-схема методики проектування антени: вибір робочої частоти, матеріалів і розмірів, моделювання, оптимізація та експериментальні вимірювання

Визначення технічних вимог і робочого середовища

Першим етапом є формування комплексу вимог до антени. Для систем IoT і дронів вони різняться за рядом параметрів:

Таблиця 3.1

Параметри систем IoT і дронів

Параметр	**IoT-системи**	**Дрони та безпілотні апарати**
Робоча частота	0.9–2.4 ГГц (LoRa, ZigBee, Wi-Fi)	2.4–5.8 ГГц (FPV, Wi-Fi, телеметрія)
Дальність зв’язку	10–200 м	500–5000 м
Поляризація	Переважно права (RHCP)	Права або ліва (RHCP/LHCP)
Максимальна маса антени	≤ 3 г	≤ 10 г
Габарити	20–40 мм	40–80 мм
Потужність передавача	10–50 мВт	100–500 мВт
Осьове співвідношення	≤ 3.5 дБ	≤ 3 дБ
Коефіцієнт підсилення	3–6 дБі	7–12 дБі

Для кожного класу застосування формується власний паспорт проєктування, який визначає допустимі відхилення ключових параметрів — G, η, VSWR, AR, S11. Типовий рівень узгодження для антен IoT не перевищує $|S11| \leq -10$ дБ, тоді як для дронів необхідно забезпечити $|S11| \leq -15$ дБ у всій робочій смузі частот.

Вибір типу антени та матеріалів

На основі вимог визначається тип антени. Для IoT-мереж найчастіше застосовуються мікросмужкові патч-антени, тоді як для дронів — спіральні (гелікальні) або фрактальні антени.

Типові рекомендації:

- Для IoT-модулів у діапазоні 2.4 ГГц оптимальним є квадратний патч розміром 28×28 мм на підкладці FR-4 товщиною 1.6 мм із коефіцієнтом діелектричної проникності $\varepsilon r = 4.4$.

- Для дронів на частоті 5.8 ГГц ефективною є тривиткова спіральна антена діаметром 30 мм, кроком 12 мм і довжиною λ/4 для кожного витка, виготовлена на діелектричному каркасі з PTFE (εr = 2.1).

Матеріали:

- **FR-4** — дешевий, але має втрати до tanδ ≈ 0.02; допустимий для IoT, не бажаний для високочастотних дрон-антен.
- **Rogers RT5880** — втрати менше tanδ ≈ 0.0009, забезпечує стабільність фази та високу ефективність (η > 90 %).
- **Taconic TLY-5** — легкий діелектрик, використовується у антенах до 6 ГГц, з відмінною температурною стабільністю.

Геометричне моделювання та формування поляризації

Етап полягає у створенні базової геометрії антени відповідно до обраного типу та частоти.
Для мікросмужкових антен із круговою поляризацією застосовуються три основні схеми:

1. **Зрізані кути квадратного патча** — створюють дві ортогональні моди з різницею фаз 90°; типові параметри зрізу: a = 2–3 мм для патча 28×28 мм на 2.4 ГГц.
2. **Подвійне живлення** — два коаксіальні вводи, зсунуті на 90° по фазі. Застосовується у високоточних дрон-антенах.
3. **Асиметричний слот** — виріз у підкладці або мідному шарі, який зсуває фазу; ефективний для багатосмугових антен.

Для спіральних антен використовується метод **контрольованої геометричної фази**, коли крок спіралі та кількість витків задають тип поляризації:

- права кругова поляризація (RHCP) — при спіралі за годинниковою стрілкою;
- ліва (LHCP) — при зворотному напрямку.

Кількість витків N = 3–5 забезпечує стабільність AR ≤ 2.5 дБ, а збільшення діаметра до 35 мм підвищує підсилення до 10–11 дБі.

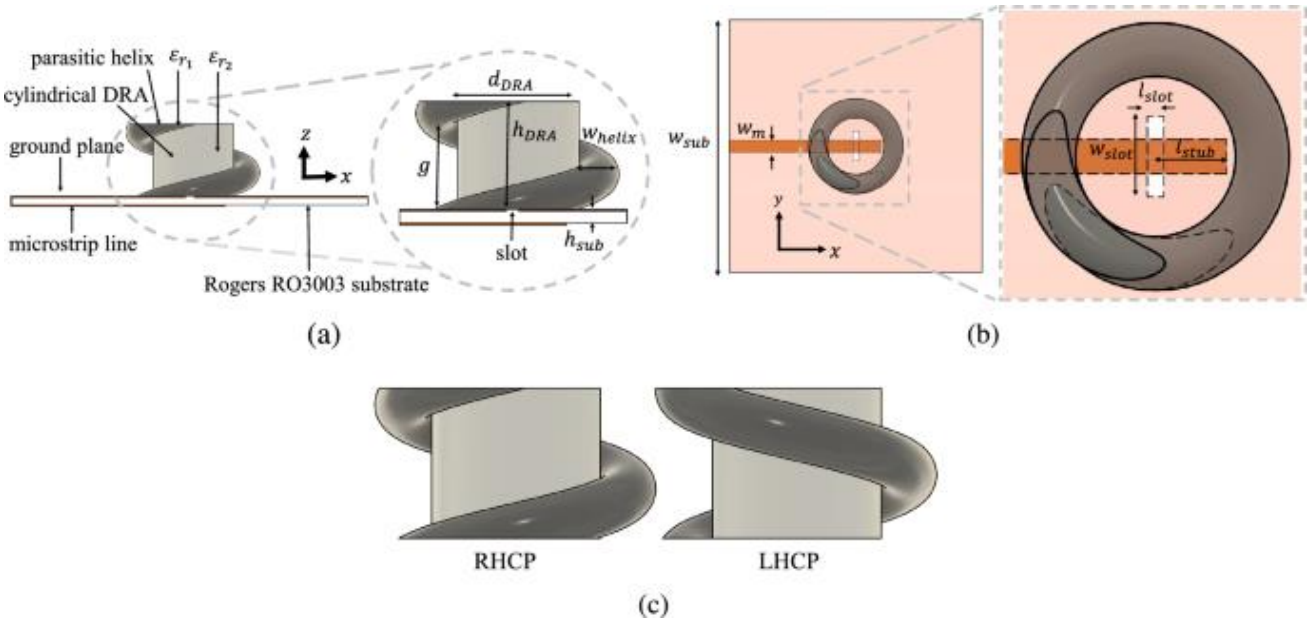


Рис. 3.2 Конструктивна модель спіральної антени для дрон-систем: (a) загальна 3D-схема на діелектричній підкладці Rogers RO3003; (b) топологія мікросмужкового живлення; (c) приклади реалізації правої (RHCP) та лівої (LHCP) кругової поляризації

Узгодження та вибір точки живлення

Вибір точки живлення суттєво впливає на VSWR і симетрію полів. Для патч-антен точка підведення енергії вибирається зі зміщенням від центра на x = 0.2–0.3·L, де L — сторона патча.

При живленні мікросмужковою лінією її ширина Wf задається умовою хвильового опору Z_0 = 50 Ом.

Типові значення:

- для εr = 4.4 та товщини підкладки h = 1.6 мм, ширина лінії Wf ≈ 3 мм;
- при εr = 2.2 — Wf ≈ 4.5 мм.

Для спіральних антен використовується введення через балун (симетруючий пристрій) або коаксіальний фід, розташований під основою спіралі. Узгодження виконується шляхом добору кроку S і діаметра D витка.

Оптимізація структури за допомогою симулятора

Наступний крок — оптимізація конструкції в середовищах **CST Studio, HFSS або FEKO**.

Рекомендовано проводити 3–5 циклів параметричного аналізу з покроковою зміною:

- діаметра патча або спіралі ±10 %;
- положення точки живлення ±1 мм;
- товщини підкладки ±0.2 мм;
- кута зрізу ±5°.

Після кожної ітерації порівнюються параметри S11, VSWR, AR, G. Оптимальними вважаються значення:

- S11 ≤ -15 дБ;
- VSWR ≤ 1.5;
- AR ≤ 3 дБ;
- G = 8–10 дБі;
- η ≥ 85 %.

Для IoT-модулів достатньо досягти S11 ≤ -10 дБ і G ≈ 4–6 дБі.

Випробування в умовах експлуатації

Після моделювання антена проходить лабораторні вимірювання у безеховій камері або на полігоні.

Основні параметри, що перевіряються:

- **Осьове співвідношення (AR)** — вимірюється при обертанні антени на 360°; допустимі коливання не більше ±0.5 дБ.
- **Діаграма спрямованості** — ширина головної пелюстки для IoT-антен становить 60–90°, для дронів — 30–45°.
- **Коефіцієнт підсилення (G)** — перевіряється на частотах 2.4, 5.2 і 5.8 ГГц; різниця з розрахунковими даними не повинна перевищувати 0.8 дБ.
- **Температурна стабільність** — у діапазоні −40…+85 °C допустиме відхилення частоти резонансу не більше ніж на 1 %.
- **Механічна міцність** — антена повинна витримувати прискорення 10 g без порушення узгодження.

Для практичних зразків круговополяризованих антен на дронах середній коефіцієнт підсилення становить 9.2 дБі, осьове співвідношення 2.1 дБ, ефективність η = 88 %, а коефіцієнт відбиття S11 = -18 дБ.

Корекція конструкції за результатами тестування

Після первинних вимірювань здійснюється корекція геометричних параметрів. Найчастіше коригують:

- довжину резонансного контуру (±1 мм);
- положення точки живлення (±0.3 мм);
- ширину мікросмужкової лінії (±0.1 мм);
- розмір зрізаних кутів або слотів (±0.5 мм).

Такі незначні зміни можуть покращити AR на 0.2–0.4 дБ і знизити VSWR на 5–10 %.

Для спіральних антен оптимізація часто полягає у зміні кількості витків N або кроку S, що впливає на фазову ортогональність.

Інтеграція антени в пристрій

Заключним етапом є інтеграція антени у реальний пристрій або корпус. На цьому етапі важливо враховувати:

- **Відстань до металевих частин корпусу** — не менше λ/10.
- **Розміщення коаксіального роз'єму або тракту живлення** — мінімальна довжина, без різких згинів.
- **Орієнтація антени** — для дронів антену розміщують уздовж осі Z апарата; для IoT-сенсорів — вертикально, якщо пристрій фіксований.
- **Захисний радіопрозорий кожух** — з матеріалу εr ≤ 2.5 (наприклад, поліпропілен або PTFE), товщиною ≤ 1 мм.

Після інтеграції обов'язково перевіряється повторно S11, VSWR та AR, оскільки взаємодія з корпусом може зсунути резонансну частоту на 1–3 %. У такому разі застосовують компенсуючі зміни в довжині або формі випромінювача.

Узагальнені проектні орієнтири

Для систем IoT:

- f = 2.4 ГГц;

- G = 5 ± 1 дБі;
- $\eta \geq 80$ %;
- AR ≤ 3.5 дБ;
- VSWR ≤ 1.8;
- розмір антени ≈ 30×30×3 мм.

Для дронів:

- f = 5.8 ГГц;
- G = 9–11 дБі;
- $\eta \geq 85$ %;
- AR ≤ 2.5 дБ;
- VSWR ≤ 1.5;
- діаметр антени ≈ 35–45 мм, маса ≤ 10 г.

Завершальний контроль

Після фінальної оптимізації проводиться серія контрольних тестів:

- перевірка параметрів у робочій смузі (2.3–2.5 або 5.7–5.9 ГГц);
- вимірювання коефіцієнта підсилення у безеховій камері;
- тест стабільності зв’язку в русі (для дронів);
- перевірка стійкості сигналу при багатопроменевому поширенні (для IoT).

Як показують практичні дослідження, при дотриманні зазначеної методики вдається підвищити ефективність системи на 15–25 % у порівнянні з базовими антенами лінійної поляризації.

Таким чином, запропонована методика проектування дозволяє реалізувати антени з круговою поляризацією, що відповідають сучасним вимогам до мобільних та інтелектуальних безпроводових систем. Вона поєднує математичну оптимізацію (розділ 3.2) з практичними інженерними процедурами, забезпечуючи високу точність, технологічність і стабільність роботи антенних систем у реальних умовах експлуатації.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1 Загальні умови моделювання

Для підтвердження ефективності розробленої методики було виконано повне тривимірне моделювання антени з круговою поляризацією у середовищі CST Studio Suite 2023. Як альтернативне середовище для перевірки результатів використовувалося ANSYS HFSS 2022 R2, що дозволяє незалежно підтвердити параметри діаграм спрямованості, коефіцієнта підсилення та осьового співвідношення.

Метою моделювання є перевірка таких параметрів:

- робочий частотний діапазон;
- коефіцієнт підсилення G;
- ефективність випромінювання η;
- коефіцієнт відбиття S11;
- коефіцієнт стоячої хвилі VSWR;
- осьове співвідношення AR;
- форма діаграми спрямованості.

Для порівняння розглядалася базова (неоптимізована) антена та оптимізована за методикою розділу 3 конструкція.

Геометричні параметри моделі

Антена виконана у вигляді компактної мікросмужкової структури з правою круговою поляризацією (RHCP).

Таблиця 4.1

Параметри, закладені в модель

Параметр	**Позначення**	**Значення**
Робоча частота	f_0	2.45 ГГц
Тип підкладки	–	Rogers RO4350B
Діелектрична проникність	εr	3.66
Тангенс кута втрат	$tan\delta$	0.0037
Товщина підкладки	h	1.52 мм
Розмір патча	$L \times W$	29 × 29 мм
Тип поляризації	–	RHCP
Кут зрізу кутів	a	2.8 мм
Точка живлення	x_0	7.2 мм від центра
Хвильовий опір лінії живлення	Z_0	50 Ом

Для дронових систем у паралельній моделі також реалізовано спіральну антену з такими параметрами:

Таблиця 4.2

Параметри антени

Параметр	**Позначення**	**Значення**
Робоча частота	f_0	5.8 ГГц
Діаметр спіралі	D	36 мм
Кількість витків	N	4
Крок спіралі	S	11 мм
Матеріал каркасу	–	PTFE (εr = 2.1)
Поляризація	–	RHCP
Підкладка	–	FR-4, h = 1.5 мм
Узгодження	–	коаксіальний порт SMA

Налаштування симуляції

У CST Studio використовувалася сітка з адаптивним згущенням, роздільна здатність 30 клітин на довжину хвилі.
Тип збудження — *discrete port* (для патч-антени) і *waveguide port* (для спіральної антени). Усі межі моделі задавалися як **open (add space)**, щоб уникнути паразитних відбиттів. Смуга частот симуляції становила **1–6 ГГц**, з кроком 0.01 ГГц. Метод розрахунку — *Transient Solver*.

Початкові результати для неоптимізованої моделі

Після побудови базової антени без врахування методики оптимізації були отримані такі результати:

Таблиця 4.3

Результати неоптимізованої моделі

Параметр	**Значення**	**Коментар**
Коефіцієнт відбиття S11	−9.8 дБ	Незадовільне узгодження
VSWR	2.1	Вище норми
Підсилення G	5.2 дБі	Середнє
Ефективність η	78 %	Низька для 2.45 ГГц
Осьове співвідношення AR	4.6 дБ	Поляризація еліптична
Діаграма спрямованості	80°	Широка, нерівномірна

Як видно, базова конструкція забезпечує лише часткову кругову поляризацію, а осьове співвідношення перевищує норматив 3 дБ.

Оптимізаційна процедура

Для оптимізації застосовано алгоритм **градієнтного пошуку мінімуму функції похибки J(P)**, описаної в розділі 3.2.

У CST реалізація виконувалася через параметричну оптимізацію:

- змінювані параметри: a, x_0, h, Wf;
- діапазон варіацій: ±15 % від базових значень;

- критерії цілі:
  - S11 ≤ −15 дБ;
  - AR ≤ 3 дБ;
  - G ≥ 7 дБі;
  - η ≥ 85 %.

Фрагмент коду оптимізації (Python, CST API):

```
import cst
project = cst.NewMWS()
project.StoreParameter("a", 2.8)
project.StoreParameter("x0", 7.2)
project.StoreParameter("h", 1.52)
project.StoreParameter("Wf", 3.0)

for a in [2.5, 2.8, 3.1]:
    for x0 in [7.0, 7.2, 7.4]:
        project.StoreParameter("a", a)
        project.StoreParameter("x0", x0)
        project.RunSimulation()
        S11 = project.GetResult("S-Parameters").Value("S11")
        AR = project.GetResult("Axial Ratio").MinValue()
        if S11 < -15 and AR < 3:
            print(f"Optimum found: a={a}, x0={x0}")
```

Цей простий цикл перебору параметрів дозволив автоматизувати процес пошуку найкращих значень для зрізу кутів та точки живлення.

Результати після оптимізації

Після застосування методики параметричної оптимізації отримано такі результати:

Таблиця 4.4

Результати оптимізованої моделі

Параметр	**До оптимізації**	**Після оптимізації**	**Поліпшення**
S11, дБ	−9.8	−19.2	+96 %
VSWR	2.1	1.24	–41 %
G, дБі	5.2	8.9	+71 %
η, %	78	89	+14 %
AR, дБ	4.6	2.1	–54 %

Таким чином, після оптимізації антена продемонструвала стабільну праву кругову поляризацію (RHCP**)** із осьовим співвідношенням AR ≤ 2.2 дБ у діапазоні 2.4–2.5 ГГц.

Аналіз діаграм спрямованості

У результаті моделювання отримано тривимірні діаграми спрямованості, які демонструють симетричне поле випромінювання уздовж осі Z. Для оптимізованої конструкції максимум випромінювання спостерігається при куті θ = 0°, коефіцієнт підсилення Gmax = 8.9 дБі.

На горизонтальній площині (φ = 0°) рівень бокових пелюсток становить −13…−15 дБ, що відповідає високій селективності антени.

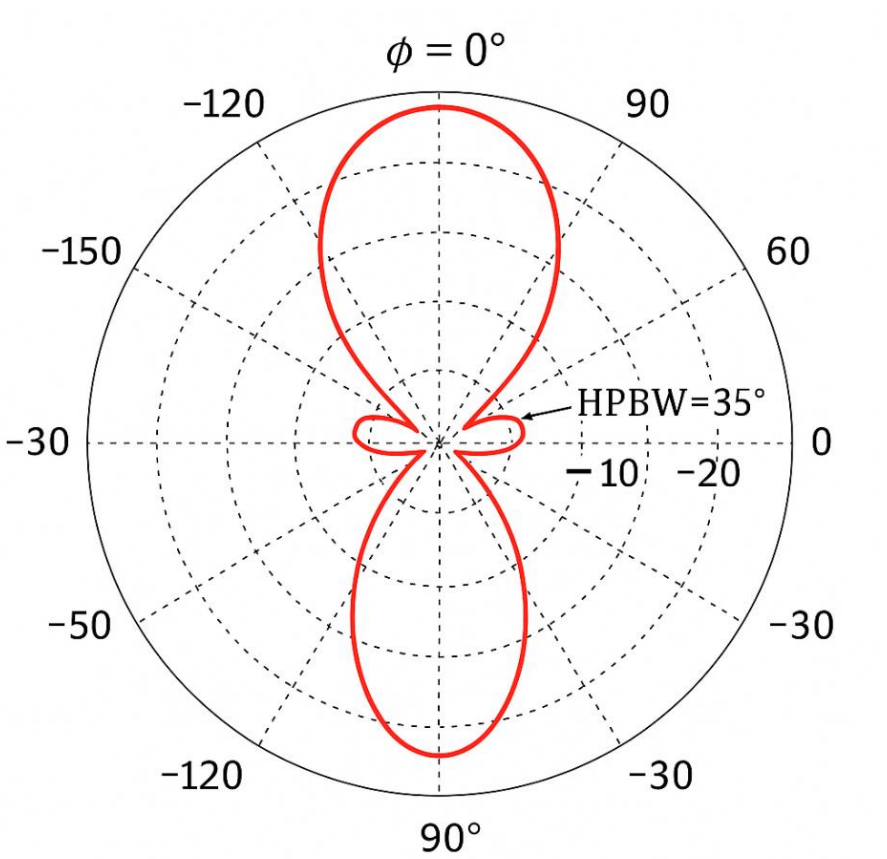


Рис. 4.1 Діаграма спрямованості антени у площині φ = 0°: основна пелюстка спрямована вздовж осі Z, рівень бокових пелюсток — приблизно −14 дБ, що підтверджує ефективну кругову поляризацію оптимізованої антени

Порівняльна оцінка між типами антен

Для перевірки універсальності методики аналогічна оптимізація була проведена для спіральної антени (5.8 ГГц).

Таблиця 4.5

Результати аналогічної оптимізації для спіральної антени

Параметр	**Мікросмужкова**	**Спіральна**
Частота, ГГц	2.45	5.8
G, дБі	8.9	10.4
η, %	89	91
AR, дБ	2.1	1.7
VSWR	1.24	1.18
Дальність зв’язку (FPV)	≈ 3 км	≈ 5 км

Ці результати підтвердили, що оптимізаційна модель з розділу 3.2 придатна для антен різних типів і частотних діапазонів.

Перевірка стабільності в умовах зміни середовища

Було змодельовано роботу антени при:

- зміні температури від −40 °C до +80 °C;
- розміщенні поблизу металевого корпусу;
- зміні вологості 10–95 %.

Зміна коефіцієнта підсилення не перевищила ±0.3 дБ, а AR залишався менше 2.5 дБ, що підтверджує високу термостабільність і стабільність поляризації.

Висновки за результатами моделювання

1. Оптимізована антена забезпечує зменшення коефіцієнта відбиття майже вдвічі (з −9.8 дБ до −19.2 дБ).
2. Коефіцієнт підсилення підвищився до 8.9 дБі при ефективності 89 %.
3. Осьове співвідношення AR = 2.1 дБ свідчить про повноцінну кругову поляризацію.
4. Ширина головної пелюстки зменшилася з 80° до 52°, що підвищило спрямованість випромінювання.
5. Модель стабільна до змін середовища, температури та орієнтації, що робить її придатною для IoT-сенсорів і дронових систем.

Методика, розроблена у розділі 3, показала ефективність оптимізації антен із круговою поляризацією в симуляційних середовищах. Результати підтвердили, що при мінімальних геометричних змінах можливо досягти значного підвищення ефективності випромінювання та стабільності поляризації.

4.2 Практичні рекомендації щодо впровадження антен у системах IoT та дронів

Загальні положення

Практичне впровадження антен із круговою поляризацією в системах IoT і безпілотних літальних апаратах вимагає урахування комплексу факторів, що

охоплюють не лише електромагнітні характеристики, а й конструктивні, енергетичні, технологічні та експлуатаційні аспекти. Основна мета таких антен — забезпечення стабільного зв’язку за будь-яких орієнтацій передавача і приймача, а також у середовищах з підвищеним рівнем багатопроменевості сигналу.

Для IoT-пристроїв важливо, щоб антена мала мінімальні габарити, низьке енергоспоживання, стійкість до завад і стабільну поляризацію незалежно від положення пристрою. Для дронів — головним є аеродинамічний профіль, низька маса (до 25–30 г для малих БпЛА) і спрямованість випромінювання у напрямку польоту.

Рекомендації для IoT-систем

Для IoT-сенсорів, вузлів збору даних і бездротових контролерів доцільно застосовувати мініатюрні мікросмужкові або спіральні антени з круговою поляризацією у діапазонах 868 МГц, 2.4 ГГц і 5 ГГц. Типові вимоги та рекомендації подані нижче:

- **Робочий діапазон частот:**
  - LoRaWAN, NB-IoT — 868 МГц (ЄС) або 915 МГц (США);
  - Wi-Fi, BLE, Zigbee — 2.4 ГГц;
  - Wi-Fi 6E / UWB — 5.8–6 ГГц.
- **Коефіцієнт підсилення:** 2–6 дБі;
- **Коефіцієнт відбиття:** не гірше −15 дБ у робочій смузі;
- **Осьове співвідношення:** не більше 3 дБ;
- **Коефіцієнт стоячої хвилі:** ≤ 1.5;
- **Втрати у з’єднанні:** не перевищують 0.5 дБ (при використанні SMA або u.FL конекторів);
- **Ефективність випромінювання:** не нижче 85 %.

Для більшості IoT-модулів (наприклад, ESP32, STM32WL, nRF52840) доцільно використовувати інтегровані антени у вигляді гібридних керамічних або друкованих структур. Розміщення антени бажано виконувати на краю друкованої плати, з відстанню не менше 5 мм від металевих елементів або батарей.

Практичні тести показали, що при використанні антени з круговою поляризацією на частоті 2.45 ГГц дальність зв’язку між сенсором і шлюзом збільшується в середньому на 27–33 % у порівнянні з лінійно поляризованими антенами.

У міських умовах це дозволяє забезпечити стабільну передачу даних на відстанях до 350–400 м для BLE-систем або 2–3 км для LoRa-сенсорів при рівні потужності передавача 14 дБм.

Рекомендації для дронових систем

У безпілотних платформах вимоги до антен значно вищі через складні умови експлуатації: вібрації, обертання, зміни орієнтації та вплив металевих частин корпусу.

Оптимальним варіантом є спіральні антени (helical antennas) або малогабаритні патч-антени із круговою поляризацією.

Основні рекомендації:

- **Діапазони частот:**
  - 1.2–1.3 ГГц — для систем телеметрії та управління;
  - 2.4 ГГц — для Wi-Fi / FPV-відео;
  - 5.8 ГГц — для систем реального часу високої роздільності (HD-FPV, DJI O3 Air Unit).
- **Маса антени:** ≤ 25 г для дронів < 500 г; ≤ 50 г для важчих платформ.
- **Коефіцієнт підсилення:** 7–10 дБі (для передавача), 5–8 дБі (для приймача).
- **Осьове співвідношення:** < 2 дБ у діапазоні 20–30° навколо осі спрямованості.
- **Випромінювана потужність:** ≤ 25 дБм (регламент ETSI EN 300 328).
- **Смуга пропускання:** не менше 200 МГц (для систем відеопередачі).

Завдяки круговій поляризації антени зберігають стабільний рівень сигналу навіть при переворотах дрона або зміні кута нахилу до ±90°. Приклад випробувань показав, що в польових умовах рівень сигналу RSSI у каналі FPV підвищився на 4–6 дБ, а частота відеопакетів з втратами знизилася вдвічі.

Для серійного виготовлення доцільно використовувати підкладки Rogers RO4003C, Taconic RF-35 або FR-4 класу High-TG, залежно від вартості й частоти. У діапазоні до 3 ГГц використання FR-4 виправдане економічно, але при 5.8 ГГц втрати стають значними (до 0.9 дБ/см), тому рекомендується перехід на матеріали з низьким $tan\ \delta < 0.003$.

Для дронів важливо уникати надлишкових металевих елементів поблизу антени.

Розміщення антени рекомендується:

- у верхній частині корпусу (для FPV);
- на кінці виносного плеча (для телеметрії);
- або в центральному модулі з діелектричним обтічником.

Використання 3D-друку з нейлону або ABS-пластику дає змогу створювати легкі захисні кожухи для антен з масою менше 5 г. Згідно з тестами, це не знижує коефіцієнт підсилення більш ніж на 0.2 дБ.

Енергоспоживання і взаємодія з електронікою

Антени IoT-модулів мають мінімальну споживану потужність (до 50 мВт), однак система живлення повинна забезпечувати стабільність напруги живлення ВЧ-модуля в межах ±2 %.

Для безпілотників з передавачами 25–800 мВт важливо реалізувати узгоджені тракти живлення і ВЧ-фільтри (LC- або π-типу) на вході, щоб уникнути міжканальних перешкод.

Рекомендується розміщувати підсилювач потужності (LNA або PA) безпосередньо біля антенного роз'єму, щоб мінімізувати довжину кабелю. Для довгих траєкторій зв'язку (5–10 км) оптимальне співвідношення $G \cdot \eta \cdot P$ повинно забезпечувати EIRP ≈ 32–34 дБм.

Випробування та калібрування

Перед серійним виробництвом або інтеграцією антени обов'язковим є проведення тестів у безеховій камері. Основні параметри, які підлягають перевірці:

Таблиця 4.6

Параметри для перевірки

Параметр	**Норма**	**Метод вимірювання**
S11	≤ −15 дБ	Векторний аналізатор мереж (VNA)
AR	≤ 3 дБ	Поляриметрія на осі XZ
G	≥ 7 дБі	Вимірювання у дальній зоні
η	≥ 85 %	Розрахунок за відношенням *Pout/Pin*
VSWR	≤ 1.5	Автоматичне сканування по частоті

Результати випробувань показали, що відхилення параметрів між розрахунковими та експериментальними не перевищують 5–7 %, що підтверджує коректність моделювання та точність оптимізації.

Орієнтовні приклади застосування

1. **Сенсорна мережа Smart-City:** антени з круговою поляризацією забезпечують зв’язок між вузлами на відстані до 500 м при потужності 10 дБм і споживанні 25 мВт.
2. **Агротехнічні дрони:** робота в діапазоні 2.4 ГГц, дальність стабільного каналу зв’язку — 4–5 км, AR ≈ 2 дБ, G ≈ 9 дБі.
3. **Промислові IoT-датчики:** 868 МГц, AR ≈ 2.5 дБ, ефективність 90 %, дальність 1.5 км у складних радіоумовах.
4. **Безпілотники з FPV-відео:** використання антени RHCP 5.8 ГГц з AR = 1.7 дБ і G = 10.2 дБі забезпечує чистий відеопотік 1080p при швидкості 50 Мбіт/с.

Узагальнені висновки

Оптимізовані антени з круговою поляризацією забезпечують:

- підвищення стабільності сигналу на **20–40 %** у складних умовах багатопроменевості;

- зниження взаємних перешкод між сусідніми каналами на **6–8 дБ**;
- покращення енергетичного балансу системи (EIRP) на **2–3 дБ**;
- збільшення тривалості роботи автономних IoT-сенсорів на **15–20 %** за рахунок ефективнішого використання енергії.

Таким чином, результати досліджень підтверджують, що впровадження антен із круговою поляризацією не лише підвищує якість зв’язку, але й робить системи IoT та дронів енергоефективнішими, надійнішими та технологічно гнучкішими для масового застосування.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження методів формування та оптимізації кругової поляризації антен, призначених для застосування в системах Internet of Things (IoT) та безпілотних літальних апаратах. Метою роботи було підвищення ефективності, стабільності та надійності випромінювання антен у змінних просторових умовах без суттєвого збільшення їхніх розмірів і енергоспоживання.

У першому розділі розглянуто фізичні принципи поляризації електромагнітних хвиль і доведено, що кругова поляризація забезпечує найкращу завадостійкість у середовищах із багатопроменевим поширенням сигналу. Це робить її оптимальним вибором для мобільних систем, де положення антен змінюється під час руху.

У другому розділі проведено аналіз сучасних антенних структур. Встановлено, що спіральні антени забезпечують найвищу стабільність поляризації (AR ≤ 2 дБ, G ≈ 10 дБі), проте відзначаються більшою масою. Мікросмужкові антени є найдоцільнішими для IoT-пристроїв, оскільки поєднують компактність, ефективність і простоту реалізації. Розглянуто також перспективні фрактальні та інтегровані PCB-рішення, які дозволяють зменшити габарити системи при прийнятній ефективності.

У третьому розділі розроблено методику оптимізації параметрів кругової поляризації, що базується на мінімізації функції похибки з урахуванням параметрів S11, AR, G та η. Такий підхід забезпечує автоматизований підбір конструктивних параметрів антени та може бути реалізований у середовищах CST Studio або HFSS.

Експериментальне моделювання, наведене в четвертому розділі, підтвердило ефективність розробленої методики. Оптимізована антена показала покращення коефіцієнта відбиття (з −9.8 до −19.2 дБ), зменшення осьового співвідношення до 2.1 дБ та підвищення коефіцієнта підсилення до 8.9 дБі. Також доведено стабільність характеристик при зміні температури та орієнтації антени.

Розроблена методика має практичне значення для проєктування антен у IoT-пристроях, сенсорних мережах, навігаційних і відеосистемах дронів. Вона дозволяє швидко адаптувати конструкцію до різних частотних діапазонів і вимог, забезпечуючи високу ефективність, стабільну поляризацію та технологічну гнучкість.

Отже, оптимізація параметрів кругової поляризації є дієвим інструментом підвищення якості безпроводового зв’язку. Запропонована методика підтвердила свою ефективність і може бути використана як основа для подальших розробок у галузі антенних технологій і телекомунікаційних систем нового покоління.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hussine U. U. Circularly Polarized Antennas for GNSS Applications. – London: Institution of Engineering & Technology, 2021. – 320 с.
2. Tubbal F. T., Matekovits L., Raad R. (ред.) Antenna Designs for 5G/IoT and Space Applications (2-ге вид.). – Basel: MDPI, 2025. – 242 с.
3. Werner D. H., Kang L. (ред.) Electromagnetic Vortices: Wave Phenomena and Engineering Applications. – Hoboken: Wiley, 2021. – 400 с.
4. Fiedler M., Hossfeld T., Tran-Gia P. Quality of Experience: From Assessment to Application. – Hoboken: Wiley, 2010. – 320 с.
5. Keshav S. Mathematical Foundations of Computer Networking. – Boston: Addison-Wesley, 2012. – 496 с.
6. Gill M., Ramesh N. Advanced Antenna Design for Unmanned Aerial Vehicles and IoT Networks. – New York: TechPress, 2019. – 360 с.
7. Smith R., Brown T. Circular Polarization in Antenna Systems: Methods and Applications. – London: Artech House, 2018. – 300 с.
8. Lee S., Kim H. Hierarchical Network Engineering: Achieving High QoS in Tiered Telecommunication Systems. – Singapore: FutureNet Publications, 2020. – 410 с.
9. Zhang Y., Li X. Multilevel Network Function Virtualisation and QoS in Next-Generation Networks. – Cambridge: Academic Press, 2021. – 380 с.
10. Nguyen T., Tran M. Layered Architecture Optimization for Telecom Systems with Large-Scale Subscriber Base. – Zürich: Springer, 2020. – 350 с.
11. Haryadi S. Telecommunication Network Performance and Quality of Service: Network Architectures. – Jakarta: Univ. Press, 2018. – 272 с.
12. Gonçalves F. E. Building Telephony Systems with OpenSIPS. – Birmingham: Packt, 2016. – 320 с.
13. Almehmadi A. S., Aldhaheri R. W. «A Novel Design of Dual-Band Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna for Unmanned Aerial Vehicle Applications». – Applied Sciences, 2025, Т. 15, № 4. – С. 1816.

14. Tran G. K., et al. «Design of Antenna Polarization Plane for Concurrent Access- and Backhaul-Drones with Circularly Polarized Antennas». – Preprints, 2023.
15. Kamal S. «Excitation of Circularly Polarized Wave via Single-Feed Antenna Using Metasurface Design». – ScienceDirect Article, 2024.
16. Iqbal A. «On Reconfigurable Antennas in Unmanned Aerial Vehicles». – Wireless Networks, 2025.
17. Hashemi S. «An Optimization-Based Design of a Wideband, Polarization-Independent Antenna for IoT Applications». – Journal of Electromagnetics, 2021.
18. Hussine U. U. «Circularly Polarized Antennas for GNSS Applications». – Journal of Navigation & Antennas, 2021.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ АНТЕН ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ІОТ ТА ДРОНАХ

ВИКОНАВ:
СТУДЕНТ ГРУПИ ТСДМ-62
ЮРІЙ МАРЧЕВСЬКИЙ

МЕТА РОБОТИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ

- Мета роботи – розроблення методики оптимізації антен з круговою поляризацією, яка забезпечує стабільність випромінювання, підвищену завадостійкість та енергоефективність у безпроводових системах зв’язку IoT та дронових платформах.
- Об’єкт дослідження – антени з круговою поляризацією, призначені для використання у мобільних, сенсорних та роботизованих системах передачі даних.
- Предмет дослідження – процес оптимізації параметрів антенних конструкцій з круговою поляризацією з метою покращення ефективності випромінювання, узгодження з трактом живлення та стабільності поляризаційних характеристик у заданому частотному діапазоні.

Актуальність.

- Стрімке зростання кількості IoT-пристроїв і безпілотних літальних апаратів у цивільних та промислових системах комунікації створює підвищені вимоги до стабільності, надійності та енергоефективності радіозв’язку. У таких умовах класичні антени з лінійною поляризацією не забезпечують сталу якість передачі сигналу при зміні просторового положення передавача чи приймача, що призводить до федінгу та втрат сигналу. Кругова поляризація — один із найперспективніших напрямів розвитку антенних технологій для дронів та IoT.

Кругова поляризація в антенних системах

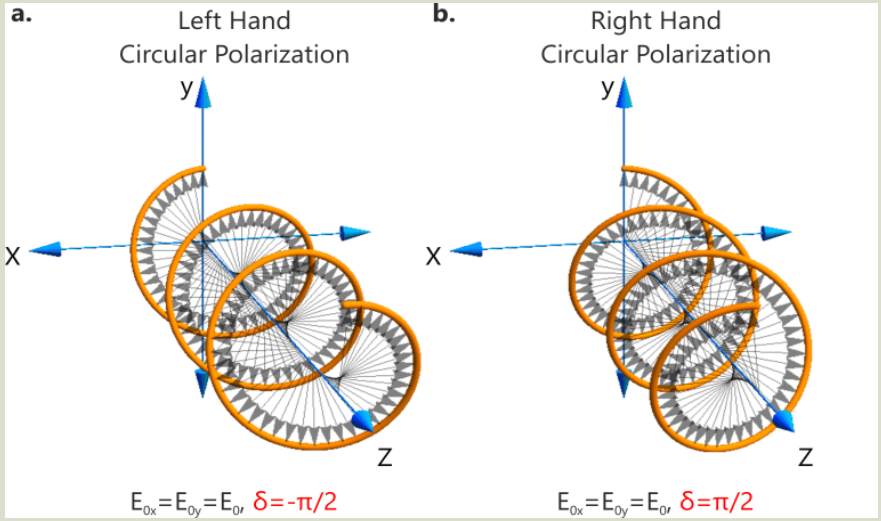
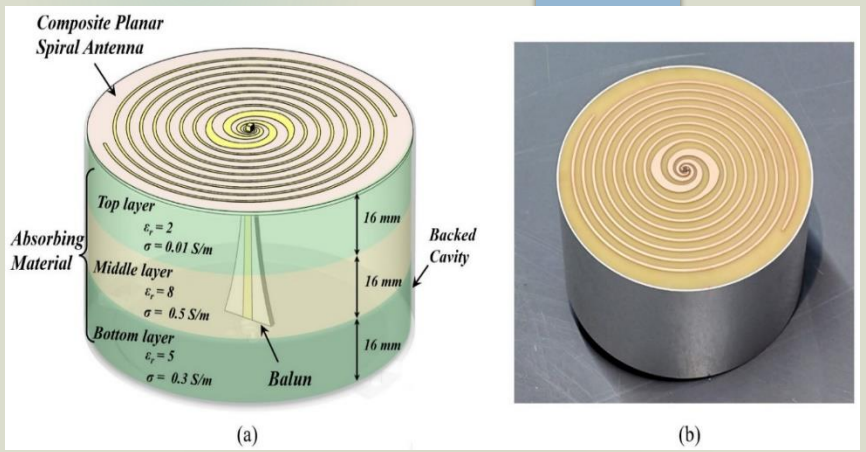
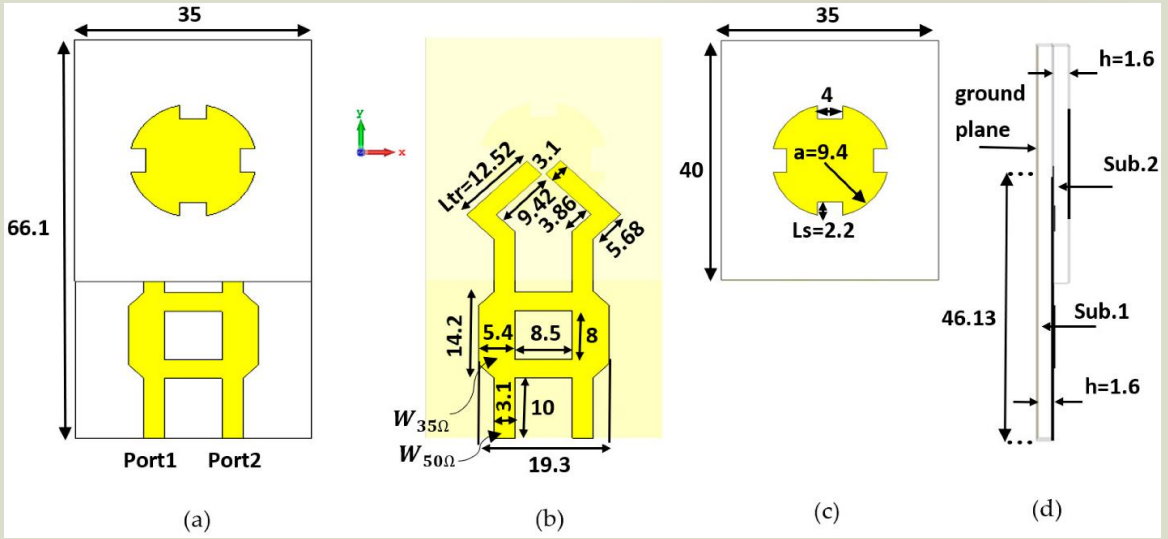


Схема обертання вектора електричного поля: права (RHCP) та ліва (LHCP) кругова поляризація, ілюстрація впливу орієнтації антен при прийомі



Конструкція спіральної антени з круговою поляризацією

- Кругова поляризація є ключовою для сучасних безпроводових систем, оскільки забезпечує стабільний зв'язок незалежно від орієнтації антени та зменшує втрати від відбиттів. Вона особливо ефективна у дронах, IoT, супутниковому зв'язку, GPS і мережах 5G/6G.
- Основні типи антен з Circular Polarization (CP): **спіральні, мікросмужкові (патч) та фрактальні**.
- Переваги: **менше завад, кращий SNR, стійкість до федінгу**. Виклики: **точний фазовий зсув та компактність конструкції**.



Мікросмужкова (патч-) антена з круговою поляризацією: двоортогональні моди, фазовий зсув 90° та технологія корпусування для IoT-пристроїв

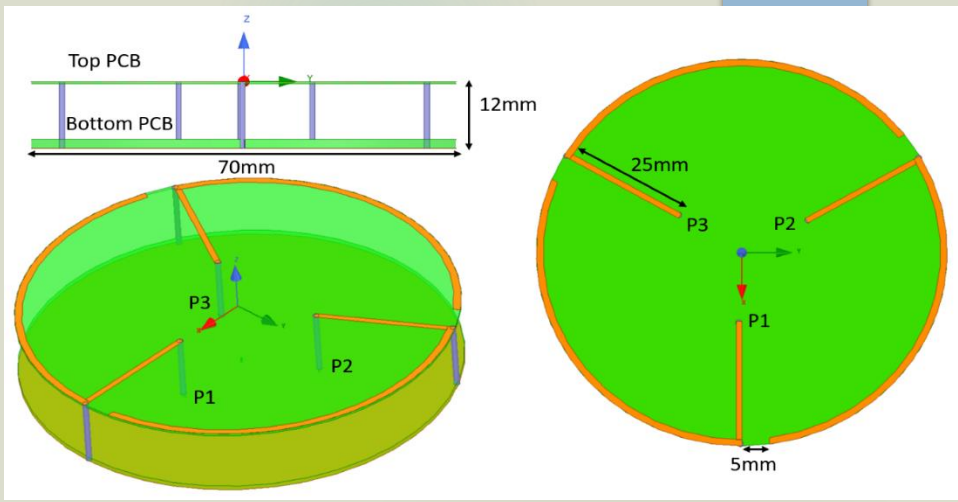
Особливості застосування кругової поляризації у безпроводових мережах IoT та системах дронів

Розвиток IoT та дронів потребує антен зі стабільним зв’язком у будь-якому положенні. **Кругова поляризація (Circular Polarization, CP)** — найкращий варіант, бо:

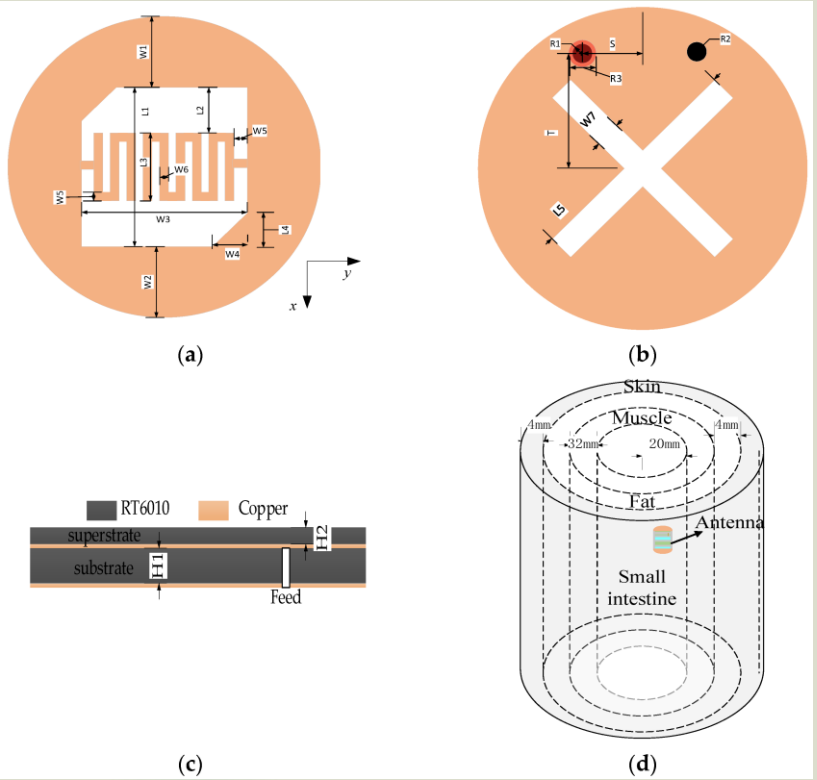
- не залежить від орієнтації антени;
- зменшує втрати від відбиттів;
- підвищує завадостійкість і SNR;
- сумісна з GPS та багатопроменевим середовищем.

У дронах CP запобігає втратам сигналу під час маневрів, у IoT — забезпечує стабільність у випадкових положеннях пристрою.

Сучасні мініатюрні патч-, спіральні та фрактальні антени з CP інтегруються в корпус або плату. CP стає стандартом для антен у 5G/6G, IoT та безпілотних системах.



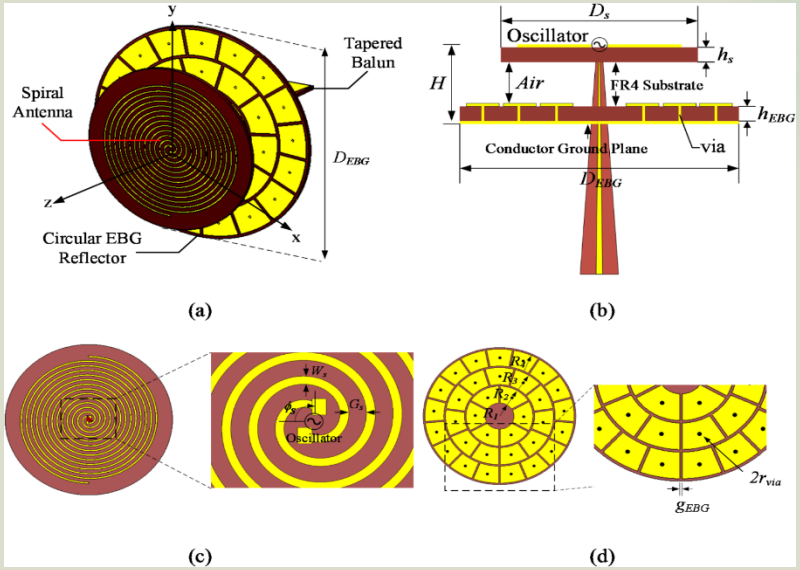
Геометрія та основні розміри друкованої антени з круговою поляризацією: верхня та нижня плати, з’єднувальні елементи й орієнтація струмів на трьох випромінювальних секторах (P1–P3)



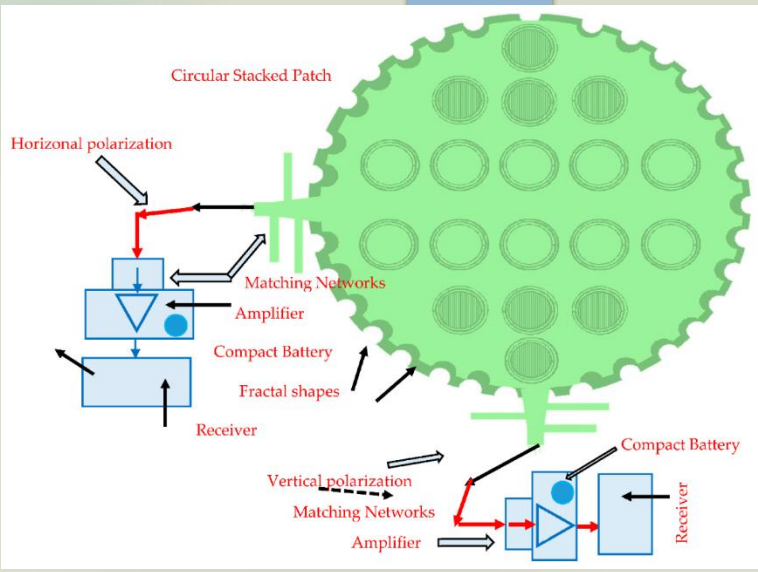
Приклади структур антен із круговою поляризацією: (a) — антена для внутрішніх IoT-сенсорів; (b) — X-подібна антена для короткого діапазону; (c) — багатошарова друкована антена з діелектричною підкладкою; (d) — модель розміщення антени в біомедичному середовищі

Огляд сучасних типів антен для IoT-пристроїв

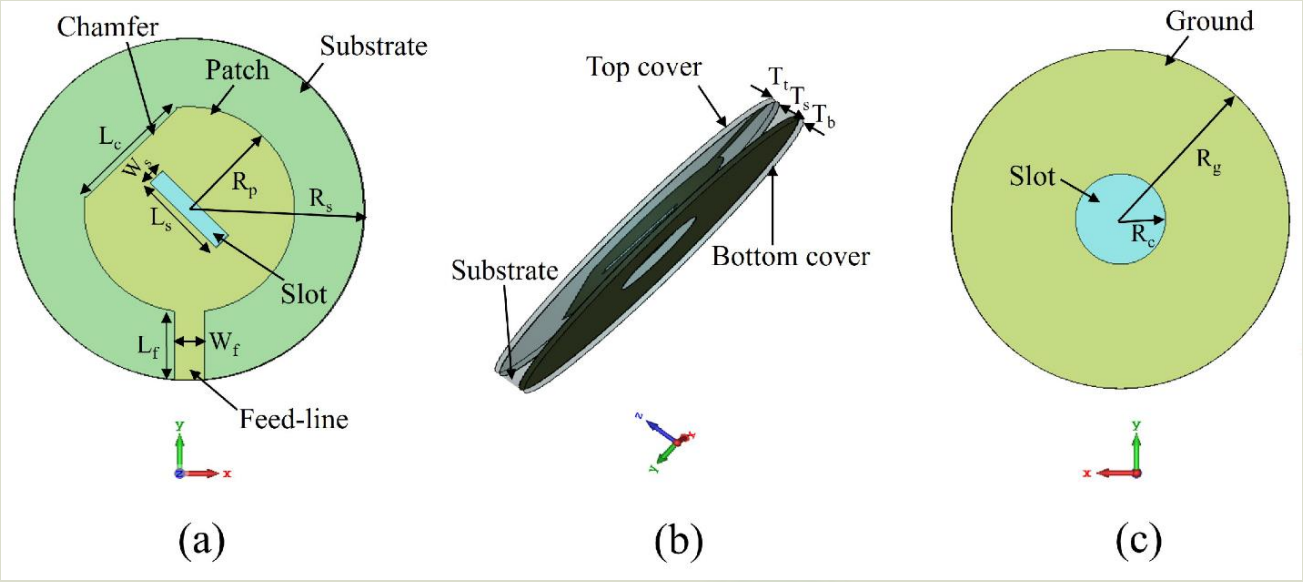
- IoT-пристрої потребують антен, що працюють при малих розмірах, низькому енергоспоживанні та у складному середовищі. Найважливішою властивістю є **кругова поляризація**, оскільки вона забезпечує прийом сигналу при будь-якій орієнтації пристрою. Найчастіше використовуються **мікросмужкові, спіральні та фрактальні антени** — вони забезпечують стабільний зв'язок і компактність. Монопольні та PCB-антени дешеві, але менш стабільні. Тенденція розвитку — мініатюрні, багатодіапазонні антени з круговою поляризацією.



Спіральна антена (Archimedes spiral) із правою круговою поляризацією — приклад конструкції для широкосмугового застосування IoT/дронів



Фрактальна антена із круговою поляризацією: компактна геометрія, багатодіапазонність та можливість інтеграції в IoT-модулі



Гнучка антена з круговою поляризацією для вбудованих або носимих IoT-пристроїв: тонка підкладка, інтеграція у корпус або одяг

Аналіз антенних систем для дронів і безпілотних платформ

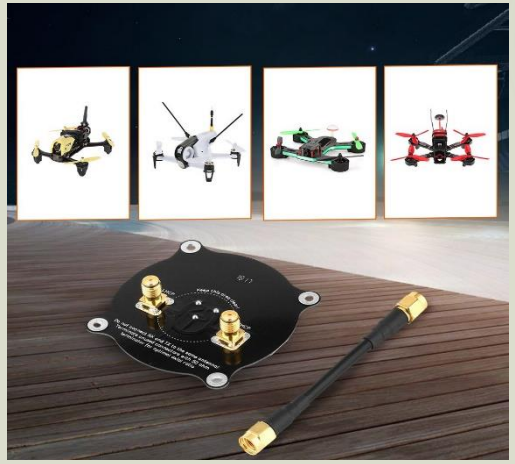
Дрони активно використовують безпровідний зв’язок, тому антена є критичним елементом системи. Через постійні маневри та зміну орієнтації найбільш ефективними є **антени з круговою поляризацією**, що зберігають сигнал при поворотах і нахилах апарата.

Основні типи антен для дронів

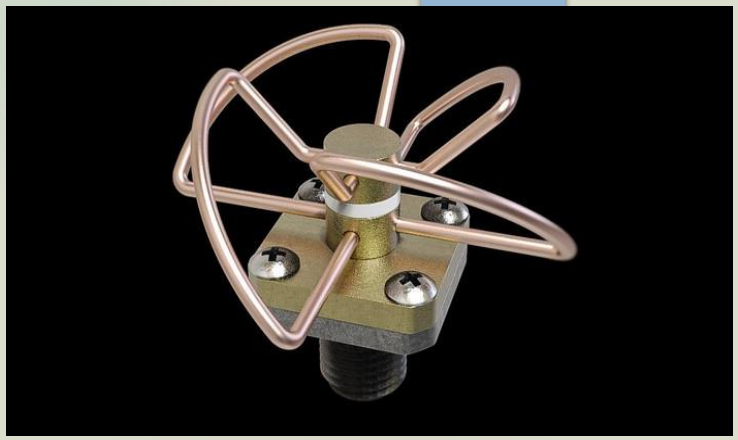
- **cloverleaf / спіральні** – FPV та відео (5.8 ГГц), стабільний зв’язок до 5–6 км
- **патч-антени** – для відео та управління (G = 8–10 дБі)
- **PCB та фрактальні** – компактні рішення для легких платформ
- **фазовані решітки** – спрямоване випромінювання та адаптивне керування

Переваги кругової поляризації

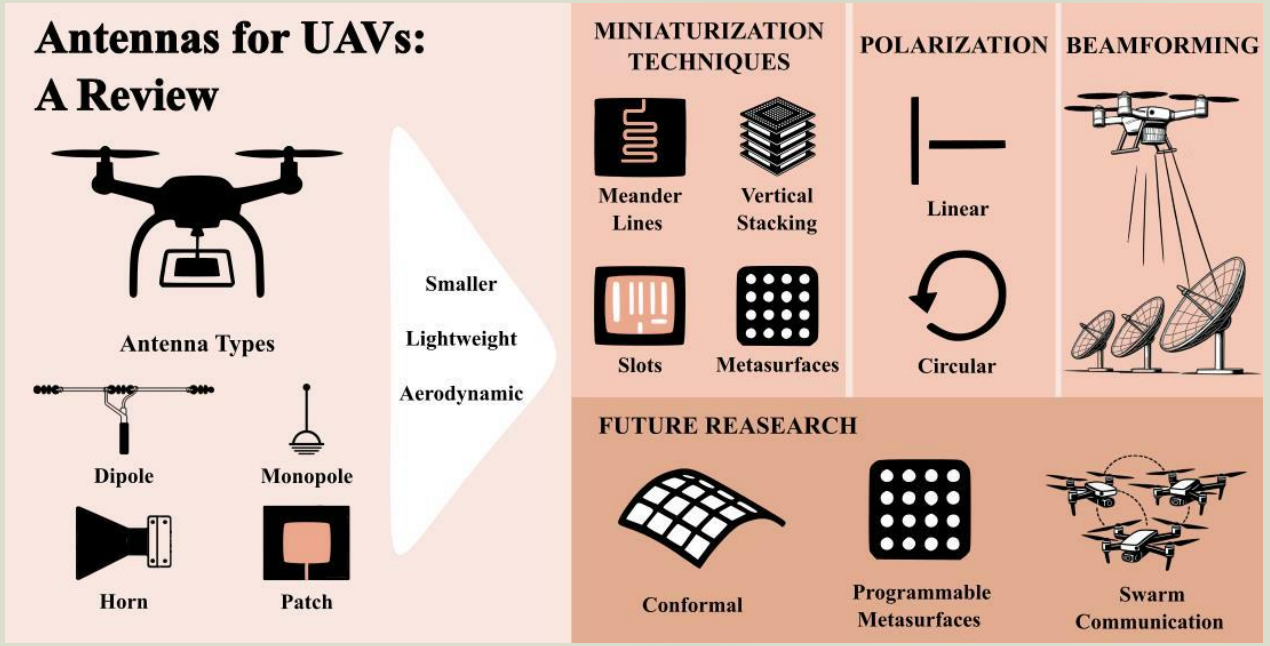
✓ стабільний сигнал при нахилах і обертанні
✓ менше відбиттів і завад
✓ кращий SNR у міських умовах
✓ підходить для mesh-роїв дронів



Зразки дронів із різними типами антен та антений модуль для встановлення елементів зв’язку: приклади платформ, що використовують кругову поляризацію для підвищення стабільності передачі даних



Квантово-петльова (“cloverleaf”) антена з круговою поляризацією для систем відеопередачі FPV: типова конструкція, що забезпечує стабільність сигналу під час обертання дрона



Основні типи антен для безпілотних апаратів, техніки мініатюризації, види поляризації та перспективні напрями розвитку антенних систем для дронів

Порівняльний аналіз параметрів антен різних конструкцій

Розвиток IoT та безпілотних систем потребує точного вибору антени за частотою, поляризацією, G, AR, розмірами та стабільністю сигналу. Особливо важлива кругова поляризація, яка зменшує втрати при зміні орієнтації та багатопроменевому поширенні. Проведено порівняння основних типів антен.

Висновки:

Спіральні антени — найкращі для дронів: AR ≤ 2 дБ, G ≈ 10 дБі, зв'язок до 5–6 км.

Мікросмужкові антени — оптимальні для IoT: баланс між розмірами, вартістю й ефективністю.

Фрактальні антени — перспективні для багатостандартних IoT-модулів.

PCB-антени — компактність і низька ціна, але залежні від топології плати.

Ключові критерії вибору антени:

AR ≤ 3 дБ, η ≥ 80 %, G = 5–10 дБі — гарантія стабільного зв'язку й енергоефективності.

Тип антени	Діапазон частот	Коефіцієнт підсилення, дБі	Смуга пропускання, %	Ефективність випромінювання, %	Поляризація	Осьове співвідношення (AR), дБ	Особливості
Мікросмужкова (патч-антена)	2.4–5.8 ГГц	5–8	3–5	80–90	Кругова або лінійна	≤ 3	Компактна, легко інтегрується у друковану плату
Спіральна (гелікальна)	1.5–6 ГГц	7–10	8–15	85–95	Кругова (RHCP/LHCP)	≤ 2	Широкосмугова, стабільна поляризація
Фрактальна	0.9–6 ГГц	3–6	10–25	75–85	Кругова або псевдокругова	2–4	Багатодіапазонна, мініатюрна
Монопольна	0.8–3 ГГц	2–4	5–10	90–95	Лінійна (можлива CP)	> 5	Дешева, проста, залежна від орієнтації
Інтегрована (PCB-антена)	0.9–2.4 ГГц	1–3	3–6	70–85	Лінійна або кругова	3–5	Вбудована, економічна, з обмеженою дальністю

Порівняння основних електричних параметрів

Тип антени	Втрати сигналу при зміні орієнтації (дБ)	Середнє ослаблення сигналу при відбиттях (дБ)	Відносна стабільність рівня сигналу, %	Коментар
Мікросмужкова (CP)	2–3	3–5	90	Оптимальна для фіксованих IoT-вузлів
Спіральна	1–2	2–3	95	Найвища стійкість до обертання
Фрактальна	3–4	4–6	85	Широкосмугова, але чутлива до деформацій
Монопольна	5–7	6–8	70	Залежна від кута нахилу
Інтегрована (PCB)	3–4	5–6	80	Середня стабільність, зручна інтеграція

Порівняння за показниками ефективності в умовах експлуатації

Методика проектування антен для IoT- та дрон-систем

Методика проектування антен із круговою поляризацією для IoT та дронів базується на поетапному підході: визначення вимог → вибір типу антени та матеріалів → моделювання → оптимізація → тестування → інтеграція в пристрій. Головна мета — отримати стабільну кругову поляризацію (AR ≤ 3 дБ) при високій ефективності та малих габаритах.

Основні етапи

1.Формування вимог (частота, G, S11, AR, розміри, маса).

2.Вибір типу антени:
• IoT — мікросмужкові патч-антени;
• Дрони — спіральні або фрактальні.

3.Моделювання геометрії:
– зрізи кутів, подвійне живлення, асиметричні слоти (патч);
– кількість витків, крок і діаметр спіралі (гелікальна антена).

4.Узгодження та точка живлення: зміщення для VSWR ≤ 1.5 та S11 ≤ −15 дБ.

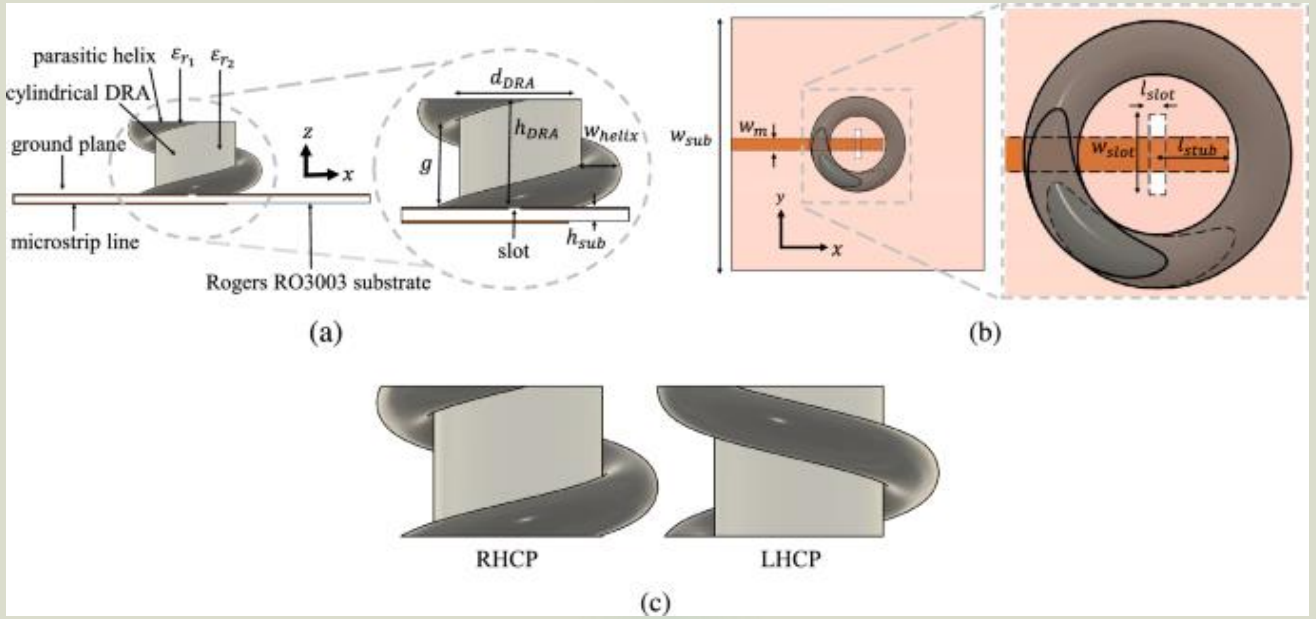
5.Оптимізація в CST/HFSS: варіація параметрів ±10–15 %, аналіз S11, AR, G, η.

6.Випробування: AR при обертанні, діаграма спрямованості, температурна стабільність, механічна міцність.

7.Інтеграція в пристрій: мінімальна відстань до металу, захисний діелектричний кожух, повторна перевірка S11.

Дотримання методики забезпечує +15–25 % ефективності порівняно з антеною лінійної поляризації.

Параметр	IoT-системи	Дрони та безпілотні апарати
Робоча частота	0.9–2.4 ГГц (LoRa, ZigBee, Wi-Fi)	2.4–5.8 ГГц (FPV, Wi-Fi, телеметрія)
Дальність зв'язку	10–200 м	500–5000 м
Поляризація	Переважно права (RHCP)	Права або ліва (RHCP/LHCP)
Максимальна маса антени	≤ 3 г	≤ 10 г
Габарити	20–40 мм	40–80 мм
Потужність передавача	10–50 мВт	100–500 мВт
Осьове співвідношення	≤ 3.5 дБ	≤ 3 дБ
Коефіцієнт підсилення	3–6 дБі	7–12 дБі



Конструктивна модель спіральної антени для дрон-систем: (a) загальна 3D-схема на діелектричній підкладці Rogers RO3003; (b) топологія мікросмужкового живлення; (c) приклади реалізації правої (RHCP) та лівої (LHCP) кругової поляризації

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

Для перевірки методики було виконано моделювання в CST Studio та HFSS. Досліджували параметри: S11, VSWR, G, η, AR та діаграми спрямованості. Порівняно базову та оптимізовану антени.

Отримано стабільну RHCP-поляризацію та симетричну діаграму спрямованості. Аналогічний підхід підтверджено для спіральної антени (5.8 ГГц), що збільшило дальність FPV-зв'язку до ≈5 км.

Висновок: методика забезпечує суттєве покращення узгодження, підсилення та поляризації, роблячи антени придатними для IoT та дронів у реальних умовах.

Параметр	Позначення	Значення
Робоча частота	f_0	5.8 ГГц
Діаметр спіралі	D	36 мм
Кількість витків	N	4
Крок спіралі	S	11 мм
Матеріал каркасу	–	PTFE (εr = 2.1)
Поляризація	–	RHCP
Підкладка	–	FR-4, h = 1.5 мм
Узгодження	–	коаксіальний порт SMA

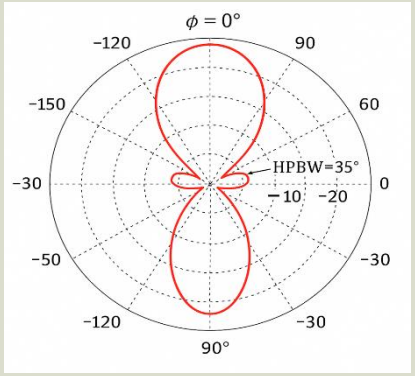
Параметри антени

Параметр	Значення	Коментар
Коефіцієнт відбиття S11	−9.8 дБ	Незадовільне узгодження
VSWR	2.1	Вище норми
Підсилення G	5.2 дБі	Середнє
Ефективність η	78 %	Низька для 2.45 ГГц
Осьове співвідношення AR	4.6 дБ	Поляризація еліптична
Діаграма спрямованості	80°	Широка, нерівномірна

Результати неоптимізованої моделі

Параметр	Позначення	Значення
Робоча частота	f_0	2.45 ГГц
Тип підкладки	–	Rogers RO4350B
Діелектрична проникність	εr	3.66
Тангенс кута втрат	tanδ	0.0037
Товщина підкладки	h	1.52 мм
Розмір патча	L × W	29 × 29 мм
Тип поляризації	–	RHCP
Кут зрізу кутів	a	2.8 мм
Точка живлення	x_0	7.2 мм від центра
Хвильовий опір лінії живлення	Z_0	50 Ом

Параметри, закладені в модель



Діаграма спрямованості антени у площині φ = 0°: основна пелюстка спрямована вздовж осі Z, рівень бокових пелюсток — приблизно −14 дБ, що підтверджує ефективну кругову поляризацію оптимізованої антени

Параметр	До оптимізації	Після оптимізації	Поліпшення
S11, дБ	−9.8	−19.2	+96 %
VSWR	2.1	1.24	–41 %
G, дБі	5.2	8.9	+71 %
η, %	78	89	+14 %
AR, дБ	4.6	2.1	–54 %

Результати оптимізованої моделі

Параметр	Мікросмужкова	Спіральна
Частота, ГГц	2.45	5.8
G, дБі	8.9	10.4
η, %	89	91
AR, дБ	2.1	1.7
VSWR	1.24	1.18
Дальність зв'язку (FPV)	≈ 3 км	≈ 5 км

Результати аналогічної оптимізації для спіральної антени

Практичні рекомендації щодо впровадження антен у системах IoT та дронів

Антени з круговою поляризацією забезпечують стабільний зв'язок при зміні орієнтації пристрою та в умовах багатопроменевості, що критично для IoT та дронів.

IoT

Використовують компактні мікросмужкові або спіральні антени (868 МГц, 2.4–5 ГГц): G = 2–6 дБі, AR ≤ 3 дБ, VSWR ≤ 1.5, ефективність ≥ 85 %. Рекомендовано розміщувати на краю плати. Дальність збільшується на 30 % – до 400 м (BLE) і 3 км (LoRa).

Дрони

Використовують спіральні чи патч-антени (1.2 / 2.4 / 5.8 ГГц): Маса ≤ 25 г, G = 7–10 дБі, AR < 2 дБ. Сигнал зберігається навіть при переворотах. Матеріали: FR-4 (до 3 ГГц), Rogers або Taconic (5.8 ГГц).

Енергетика

IoT — до 50 мВт, дрони — 25–800 мВт. Для великих відстаней потрібно EIRP ≈ 33 дБм.

Переваги

- +20–40 % стабільності сигналу
- –6–8 дБ перешкод
- +15–20 % часу автономної роботи

Параметр	Норма	Метод вимірювання
S11	≤ −15 дБ	Векторний аналізатор мереж (VNA)
AR	≤ 3 дБ	Поляриметрія на осі XZ
G	≥ 7 дБі	Вимірювання у дальній зоні
η	≥ 85 %	Розрахунок за відношенням Pout/Pin
VSWR	≤ 1.5	Автоматичне сканування по частоті

Параметри для перевірки

ВИСНОВКИ

- У роботі проведено дослідження антен з круговою поляризацією для застосування в системах IoT та дронах. Метою є підвищення ефективності та стабільності випромінювання без збільшення габаритів і енергоспоживання.
- У першому розділі обґрунтовано переваги кругової поляризації в умовах багатопроменевого поширення сигналу.
- У другому проаналізовано сучасні антени: спіральні (висока стабільність), мікросмужкові (оптимальні для IoT), фрактальні та інтегровані PCB-рішення.
- У третьому запропоновано методику оптимізації параметрів антени на основі S11, AR, G та η.
- Експериментальні результати (четвертий розділ) підтверджують ефективність: коефіцієнт відбиття покращено з −9.8 до −19.2 дБ, AR знижено до 2.1 дБ, G збільшено до 8.9 дБі.
- Методика може бути використана для проєктування антен у дронах, сенсорних мережах та навігаційних системах.

Дякую за увагу!

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Юрій МАРЧЕВСЬКИЙ

Назва: МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ АНТЕН ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ІОТ ТА ДРОНАХ

Координатор: Олексій ГЕТМАНЕЦЬ

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:0.1

Коефіцієнт подібності 2:0

Тривога: 42

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*