

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛИВУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПЛАНАРНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК ЇХНЬОЇ ТОПОЛОГІЇ ТА
ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: Iryska@email.ua*

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів та розширення сфери їхнього застосування зумовлюють підвищені вимоги до радіолокаційних систем, зокрема в частині виявлення малорозмірних цілей із низькою ефективною площею розсіювання в умовах складного завадового середовища. Одним із перспективних технічних рішень для таких систем є використання планарних антенних решіток, що забезпечують електронне керування діаграмою спрямованості, високу швидкість сканування та масштабованість конструкції.

Метою даної роботи є оцінка впливу кількості випромінювальних елементів, відносної діелектричної проникності та фізичної товщини діелектричної підкладки на електродинамічні характеристики та параметри випромінювання планарних антенних решіток. У межах дослідження проаналізовано діаграми спрямованості, коефіцієнт підсилення, енергетичний потенціал та смугу робочих частот при різній кількості елементів решіток.

Робота базується на чисельному моделюванні у середовищі CST Studio Suite з використанням методу скінченних інтегралів. Застосовано параметризацію розмірів випромінювачів для корекції резонансу та метод лінійної екстраполяції для оцінки характеристик решіток з великою кількістю елементів.

У роботі досліджено електродинамічні характеристики планарних антенних решіток, побудованих на основі прямокутних мікросмужкових випромінювальних елементів із корпоративною системою живлення. Базовим елементом обрано субмасив розмірністю 2×2 , який надалі масштабовано до конфігурацій 4×4 та 8×8 елементів. Особливу увагу приділено впливу параметрів діелектричної підкладки, зокрема її відносної діелектричної проникності та фізичної товщини, на характеристики випромінювання решітки.

В результаті досліджень показано, що використання діелектричної підкладки Rogers 5880 стандартної товщини забезпечує оптимальний баланс між радіотехнічними характеристиками, механічною жорсткістю та технологічністю виготовлення. Встановлено стійку тенденцію зростання коефіцієнта підсилення та звуження головної пелюстки діаграми спрямованості при масштабуванні решітки, а також розширення робочої смуги частот у решітках з великою кількістю елементів.

Наукова новизна полягає у комплексному обґрунтуванні вибору геометричних параметрів підкладки та кількості елементів планарних антенних решіток, що базується на балансі між промисловими стандартами виготовлення та необхідною роздільною здатністю для виявлення цілей з малою ефективною площею розсіювання.

Отримані дані дозволяють проектувати ефективні радіолокаційні системи для супроводження малорозмірних об'єктів. Використання стандартної товщини підкладки (1,575 мм) суттєво спрощує та здешевлює процес промислового виробництва антенних систем.

Ключові слова: планарна антенна решітка, діаграма спрямованості, коефіцієнт відбиття.

The rapid development of unmanned aerial vehicles and the extension of their range of application increase requirements for radar systems, in particular in terms of detecting small-sized targets with a low effective scattering area in a complex interfering environment. One of the promising engineering solutions for such systems is the use of planar antenna arrays, which provide electronic control of the radiation pattern, a high scanning speed, and design scalability.

The goal of this work is to assess the effect of the number of radiating elements, the relative dielectric constant, and the physical thickness of the dielectric substrate on the electrodynamic characteristics and radiation parameters of planar antenna arrays. The study analyzes the radiation patterns, the gain, the energy potential, and the operating frequency band at different numbers of array elements.

The work is based on numerical simulation in the CST Studio Suite environment using the finite integral method. Use is made of the parameterization of the emitter dimensions for resonance correction and the linear

© I. В. Грималюк, 2026

The article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

extrapolation method for estimating the characteristics of many-element arrays.

The work investigates the electrodynamic characteristics of planar antenna arrays built on the basis of rectangular microstrip radiating elements with a corporate feed system. A 2×2 subarray was chosen as the basic element, which was subsequently scaled to 4×4 and 8×8 element configurations. Particular attention is paid to the effect of the dielectric substrate parameters, in particular its relative permittivity and physical thickness, on the radiation characteristics of the array.

It is shown that the use of the Rogers 5880 dielectric substrate of standard thickness provides an optimal balance between radio technical characteristics, mechanical rigidity, and manufacturability. A stable trend is found to gain increase and main lobe narrowing with array scaling and to frequency-band extension in many-element arrays.

The scientific novelty lies in a comprehensive justification of the choice of geometric parameters of the substrate and the number of array elements, which is based on a balance between industrial manufacturing standards and the resolution required for detecting targets with a small effective scattering area.

The obtained data allow one to design effective radar systems for small-sized object tracking. The use of a standard substrate thickness (1.575 mm) significantly simplifies the industrial process of antenna system production and reduces its cost.

Keywords: planar antenna array, radiation pattern, reflection coefficient.

Вступ. Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та розбудова так званої «економіки малих висот» поставили перед сучасними системами радіолокації та навігації безпрецедентні виклики. Малогабаритні дрони, через свою конструкцію, невеликі розміри та специфіку польоту, класифікуються як цілі з малою ефективною площею розсіювання (ЕПР), низькою швидкістю та малою висотою польоту [1–3]. Традиційні радіолокаційні системи, розраховані на виявлення великих пілотованих літаків, часто виявляються неефективними в умовах щільної міської забудови або складного рельєфу, де корисний сигнал від дрона перекривається потужними відбиттями від підстильної поверхні, споруд та рослинності [3–5].

У цьому контексті планарні антенні решітки (ПАР) стали ключовим технологічним рішенням. Завдяки здатності здійснювати електронне керування променем без механічного обертання, ПАР забезпечують високу швидкість сканування, адаптивність до заводового середовища та можливість одночасного виконання функцій зв'язку та зондування [6–8].

Постановка задачі. Надзвичайно ефективним будівельним блоком (субмасивом) для створення ПАР є конфігурація решітки розмірністю 2×2 з прямокутним елементарним випромінюючим блоком (патчем). Завдяки просторовому рознесенню чотирьох випромінюючих елементів та їхньому синфазному збудженню, така система забезпечує конструктивну інтерференцію електромагнітних хвиль у заданому напрямку. Це призводить до суттєвого звуження головного променя діаграми спрямованості, експоненційного зростання прямоспрямованості та коефіцієнта підсилення, а також покращення загальної радіаційної ефективності системи порівняно з ізольованим патчем.

Тому субмасив 2×2 було вибрано в якості базового з наступним масштабуванням до 4×4 та 8×8 елементів.

Таким чином, об'єктом дослідження є електродинамічні характеристики ПАР з кількістю елементів 2×2 , 4×4 та 8×8 елементів. Електродинамічні характеристики ПАР не тільки залежать від її топології, але вони також критично залежать від двох фундаментальних параметрів матеріалу підкладки: відносної діелектричної проникності та її фізичної товщини. Тому питання оцінки такої залежності також підлягає окремому дослідженню.

Метою даної роботи є оцінка впливу на електродинамічні характеристики та параметри випромінювання ПАР кількості випромінювальних елементів, відносної діелектричної проникності і фізичної товщини підкладки.

Для дослідження було вибрано класичну топологію планарної решітки 2x2: чотири прямокутні випромінюючі елементи (патчі) розташовані на планарній діелектричній підкладці, яка зі зворотного боку металізована для утворення екрана. Схематично така решітка показана на рис.1. Збудження елементів здійснюється через планарну мікросмушкову корпоративну лінію живлення 1, яка за допомогою системи дільників потужності та трансформаторів імпедансу зводить сигнали від усіх чотирьох патчів до єдиного центрального виходу 2.

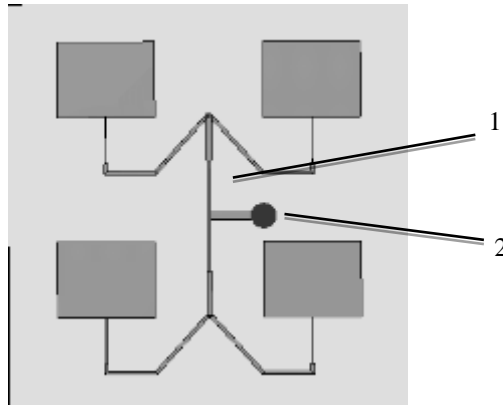


Рис. 1

Першочерговим етапом дослідження є обґрунтований вибір робочої частоти функціонування системи. Необхідно проаналізувати спектр сигналів, що найчастіше використовуються для керування та передачі даних сучасними БПЛА, а також врахувати вимоги до роздільної здатності та габаритів антенних систем.

У ході дослідження необхідно розрахувати та зіставити діаграми спрямованості, коефіцієнти відбиття та рівні бічних пелюсток для кожної з обраних конфігурацій. Також поставлено задачу обґрунтувати оптимальну складність антени, необхідну для надійного виявлення цілей з малою ефективною площею розсіювання (ЕПР) на фоні інтенсивних відбиттів та наявності перешкод.

Фізичні та технічні характеристики планарних антенних решіток.

Планарна антенна решітка являє собою сукупність випромінювальних елементів, розташованих у двох вимірах на плоскій поверхні. На відміну від лінійних решіток, планарна геометрія дозволяє керувати фазою сигналу таким чином, щоб формувати та переміщувати промінь як за азимутом, так і за кутом місця, що є критичним для повноцінного 3D-відстеження об'єктів у повітрі [9–11].

Вибір підкладки та конструкційні обмеження. Ефективність ПАР безпосередньо залежить від діелектричних властивостей матеріалів підкладки. У системах міліметрового діапазону (наприклад, 24 ГГц), де кожен міліметр похибки може призвести до фазового розсинхрону, перевага надається спеціалізованим композитам. Наприклад, підкладка Taconic RF-35 з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 3,5$ та тангенсом кута втрат $\delta = 0,0018$ забезпечує необхідну стабільність характеристик при масовому виробництві друкованих антен[12]. Для більш високих частот або широкосмугових застосувань використовується Taconic TLX-9 з нижчим значенням діелектричної проник-

ності $\epsilon_r = 2,5$, що дозволяє зменшити паразитну ємність та розширити робочу смугу пропускання [13].

Вибір підкладки є критичним етапом проектування ПАР, особливо для оборонних застосувань на частоті 5,8 ГГц. Для дослідження було обрано матеріал підкладки Rogers RT/duroid 5880. Використання матеріалу Rogers RT/duroid 5880 обґрунтовується декількома технічними перевагами, які безпосередньо впливають на ефективність виявлення цілей:

1. Мінімальні діелектричні втрати (0,0009). На частоті 5,8 ГГц втрати в діелектрику починають суттєво впливати на загальний ККД антени. Показник втрат у Rogers 5880 є одним із найнижчих серед доступних композитів. Це дозволяє максимізувати коефіцієнт підсилення решітки, зменшити самонагрів антени при роботі в режимі активного випромінювання (активна локація), забезпечити високу чутливість при прийомі слабких сигналів, відбитих від малорозмірних дронів (ЕПР яких дуже мала).

2. Низька діелектрична проникність ($\epsilon_r = 2,2$). Значення ϵ_r є оптимальним для антенних решіток з декількох причин. По-перше, збільшення смуги пропускання – чим нижча проникність, тим ширша робоча смуга частот антени, що важливо для стійкості до завад та перестроювання частоти. По-друге, ефективність випромінювання – мала величина сприяє кращому "відриву" електромагнітної хвилі від патча, що підвищує потужність випромінювання у вільному просторі. І ще одна причина: зменшення поверхневих хвиль. Це мінімізує взаємний вплив між елементами решітки, що дозволяє отримати чистішу діаграму спрямованості з низьким рівнем бічних пелюсток.

3. Стабільність характеристик. Для оборонних систем відстеження критично важливою є фазова стабільність. Rogers 5880 забезпечує ізотропність системи, тобто однакові властивості матеріалу по всіх осях, що гарантує ідентичність фаз у всіх елементах решітки.

Використання даного типу матеріалу забезпечує стійкість до агресивного середовища. Матеріал має низьке вологопоглинання, що дозволяє антені зберігати точність наведення променя при роботі в різних погодних умовах (туман, дощ, висока вологість).

4. Конструктивні переваги для частоти 5,8 ГГц. При $\epsilon_r = 2,2$ розміри випромінювальних елементів (патчів) виходять дещо більшими, ніж на високопроникних підкладках (поширений тип FR-4). У діапазоні 5,8 ГГц це є перевагою, оскільки полегшується процес виготовлення (вищі допуски на точність друку) та зменшуються втрати у фідерних лініях живлення, що з'єднують елементи решітки між собою.

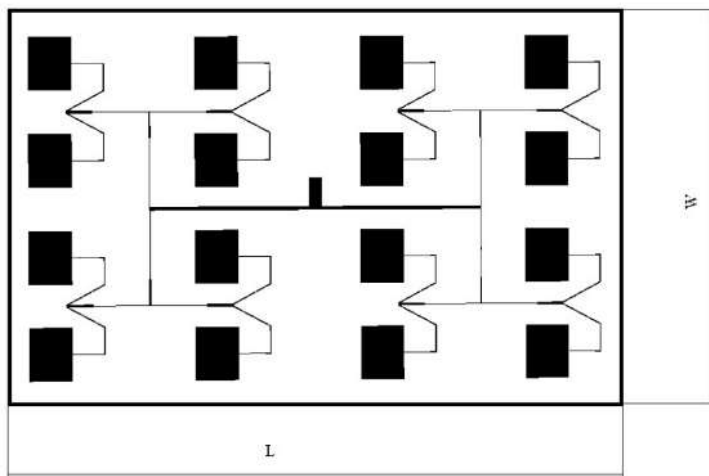
Вибір частотного діапазону: переваги та компроміси. Використання ПАР можливе в широкому спектрі частот, проте для завдань боротьби з БПЛА найчастіше розглядаються X, Ku та міліметрові діапазони [14, 15]. Для дослідження було обрано робочу частоту 5,8 ГГц [16, 17]. Вибір робочого діапазону 5,8 ГГц для проектування планарних антенних решіток зумовлений його широким використанням у безліцензійному сегменті ISM (Industrial, Scientific, Medical), що робить його стандартом для сучасних систем керування БПЛА та передачі відеосигналу високої чіткості. На цій частоті ПАР дозволяють досягти оптимального балансу між компактністю пристрою та його енергетичною ефективністю: довжина хвилі забезпечує малі габарити окремих випромінювачів, що дає змогу інтегрувати значну кількість еле-

ментів у обмежений простір корпусу радара або базової станції. Окрім того, використання діапазону 5,8 ГГц дозволяє реалізувати надзвичайно вузькоспрямовані промені, які є критично важливими для селекції та стійкого відстеження малорозмірних цілей на фоні інтенсивних наземних завад. Це забезпечує високу точність кутового супроводження та дає змогу ефективно вирішувати завдання виявлення загроз у складних умовах [11, 12].

Методи та засоби дослідження. На початковому етапі в спеціалізованому середовищі було розроблено структуру антенної решітки з $M \times N$ елементів (патчів), де $M = N$ – кількість елементів в двох напрямках по ширині і довжині в побудованій моделі.

Розрахунок геометрії проводився для обраної центральної частоти 5,8 ГГц, як зазначено раніше. В якості матеріала діелектрика було обрано високочастотний ламінат Rogers RT/duroid 5880. Порівняно зі стандартними склотекстолітами типу FR-4, даний вибір обумовлений рядом переваг: мінімізація діелектричних втрат, низька діелектрична проникність ($\epsilon = 2,2$), що в свою чергу дозволяє збільшити фізичні розміри патч-випромінювачів, що розширює їхню ефективну апертуру та зменшує інтенсивність виникнення поверхневих хвиль, які в решітках 4×4 та 8×8 призводять до деградації діаграми спрямованості та зростання рівня бічних пелюсток. Також матеріал Rogers RT/duroid 5880 характеризується низьким рівнем гігроскопічності та стабільністю діелектричної проникності в широкому діапазоні температур. Це гарантує, що при тривалій роботі передавача або зміні погодних умов резонансна частота системи відстеження не зміститься, що забезпечує безпервний супровід об'єкта.

На рис. 2 представлена спроектована геометрія планарної антенної решітки (на прикладі конфігурації 16 елементів). Візуалізація моделі дозволяє оцінити складність розводки системи живлення та оптимальне розміщення випромінювачів для забезпечення синфазного збудження. Використання даного інструменту забезпечило точний розрахунок фізичних розмірів кожного патча та параметрів корпоративної лінії живлення, що є критичним для формування вузького променя, необхідного для відстеження малорозмірних цілей.



W – ширина підкладки, L – довжина підкладки

Рис. 2

Для отримання прецизійних результатів електродинамічні розрахунки проводились з використанням CST Studio Suite. Для коректного моделювання випромінювання антени у вільний простір було задано граничні умови типу Open.

Цей тип умов реалізує алгоритм ідеально узгоджених шарів, які повністю поглинають випромінювану енергію без її відбиття назад до антени. Додавання вільного простору дозволяє програмі автоматично розрахувати необхідну відстань від поверхні антени до межі розрахункової області, що є необхідним для коректного формування діаграм спрямованості у дальній зоні. Основним інструментом аналізу виступив часовий розв'язувач (Time Domain Solver), що базується на методі скінченних інтегралів (FIT). Він дозволяє ефективно розраховувати параметри узгодження для дальньої зони випромінювання.

Першочергове моделювання розробленої топології для антенної решітки 2×2 в CST Studio Suite виявило незначне зміщення робочого резонансу відносно цільової частоти з 5,8 ГГц до 5,58 ГГц. Таке відхилення є типовим при переході від аналітичного синтезу до повнохвильового електродинамічного аналізу, оскільки останній точніше враховує реактивні складові полів поблизу країв випромінювачів та у вузлах розгалуження фідерних ліній. Для корекції частотних характеристик було застосовано параметризацію довжини патча. Основний вплив на резонансну частоту має геометрична довжина випромінювального елемента. Було перераховано довжину патчів на отримання потрібного резонансу на 5,8093 ГГц. Таким чином отримали дану частоту резонансу, що видно на графіку S_{11} параметрів (рис. 3).

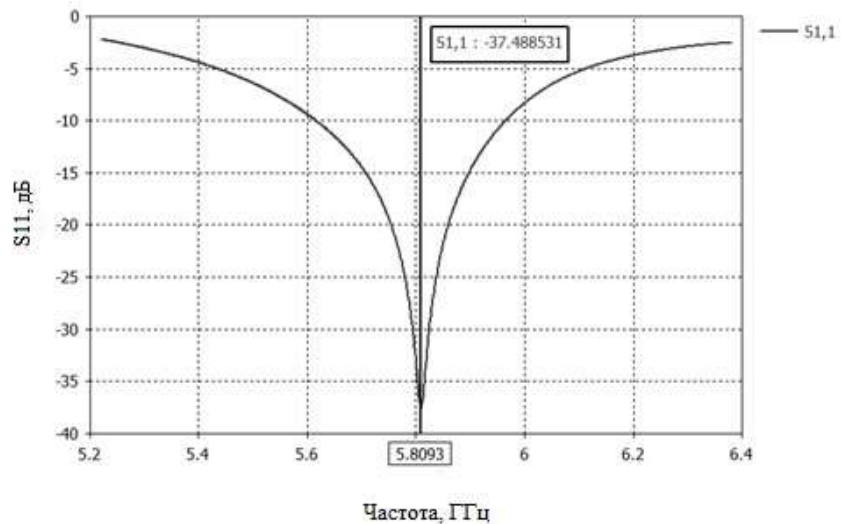


Рис. 3

Аналіз отриманих результатів. Для досягнення максимальної ефективності виявлення малорозмірних цілей необхідно забезпечити оптимальний баланс між смугою пропускання антени та її коефіцієнтом підсилення. З метою підтвердження вибору товщини підкладки 1,575 мм було проведено дослідження S_{11} - параметрів решітки від товщини підкладки у діапазоні від 0,5 мм до 3,0 мм. Графіки на рис. 4 показують залежність частотного резонансу від товщини діелектричної підкладки для моделі антенної решітки.

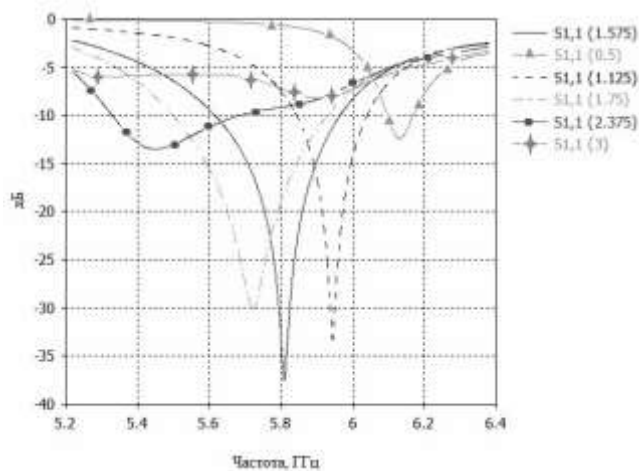


Рис. 4

У ході чисельного моделювання базової конфігурації ПАР було виявлено низку критичних закономірностей, зумовлених зміною товщини підкладки у діапазоні від 0,5 мм до 3 мм. Отримані результати дозволяють встановити фізичні взаємозв'язки між геометричними параметрами діелектрика та радіотехнічними характеристиками системи. Встановлено, що збільшення товщини підкладки супроводжується монотонним розширенням робочої смуги частот антени за рівнем -10 дБ. Даний ефект пояснюється зниженням добротності (Q-фактора) мікросмужкового випромінювача, що типово для структур із низькою діелектричною проникністю. Водночас, при досягненні товщини близько 2 мм і більше спостерігається погіршення узгодження вхідного опору, що зумовлює необхідність додаткової оптимізації параметрів живлення для компенсації реактивної складової вхідного імпедансу.

Динаміка коефіцієнта підсилення демонструє позитивну кореляцію зі зростанням товщини діелектрика, що свідчить про підвищення ефективності випромінювання. Проте, при значеннях понад 1,5 мм на робочій частоті 5,8 ГГц фіксується інтенсифікація збудження поверхневих хвиль. Це призводить до небажаного перерозподілу електромагнітної енергії в структурі, що в подальшому може стати причиною деградації діаграми спрямованості та зростання рівня бічних пелюсток.

Зміна товщини підкладки суттєво трансформує розподіл крайових полів випромінювання. Розрахунки підтвердили, що зі збільшенням товщини діелектричної підкладки резонансна частота системи зміщується в область нижчих значень. Для підтримки цільового робочого діапазону 5,8 ГГц було проведено адаптивну ітераційну корекцію лінійних розмірів випромінювачів за уточненою формулою масштабування.

На основі проведеного порівняльного аналізу встановлено, що товщина підкладки в районі 1,5 мм є оптимальною для вирішення задач виявлення та відстеження БПЛА. Даний параметр забезпечує максимальний енергетичний потенціал при збереженні високої чистоти головної пелюстки діаграми спрямованості та стабільності частотних характеристик, що є критично важливим для надійної роботи оборонних систем радіолокації. Вибір же товщини 1,575 мм (або 0,062 дюйма) для матеріалів родини Rogers (зокрема RT/duroid 5880) також не є випадковим. Це один із найбільш розповсюджених світових стандартів у виробництві друкованих плат (PCB). Більшість виробничих

ліній, роз'ємів та тримачів розраховані саме на цей габарит. Використання стандартної товщини суттєво спрощує та здешевлює процес виготовлення дослідного зразка антени.

При обраній товщині на частоті 5,8 ГГц підкладка Rogers 5880 забезпечує високий ККД випромінювання. Вона достатньо товста, щоб мінімізувати втрати в металі (провідникові втрати) і забезпечити широку смугу пропускання, але при цьому залишається достатньо тонкою, щоб не допустити домінування поверхневих хвиль, які починають інтенсивно виникати при великих значеннях товщин діелектричної підкладки.

На рис. 5 представлена отримана діаграма спрямованості (ДС) розрахованої планарної антенної решітки конфігурації 2×2 у полярній системі координат для частоти 5,8 ГГц. Отримані дані візуалізують розподіл коефіцієнта підсилення у просторі та дозволяють оцінити ефективність концентрації енергії одиничним модулем.

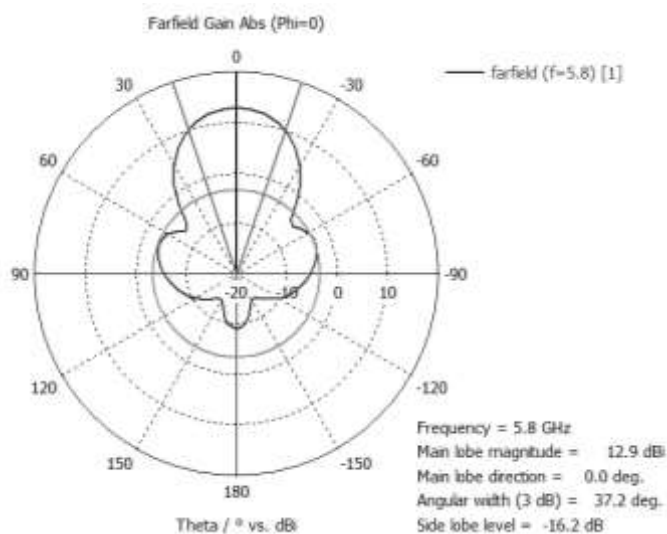


Рис. 5

Як показує графік, діаграма має симетричний вигляд відносно зенітної осі (0°), що підтверджує коректність синфазного збудження всіх чотирьох випромінювачів. Ширина головної пелюстки за рівнем -3 дБ є найбільшою серед досліджуваних конфігурацій, що забезпечує широкий сектор огляду, проте обмежує точність пеленгування одиночної цілі.

Для даної моделі було зафіксовано пікове значення підсилення на рівні 12,9 дБі. Це значення є базовим енергетичним порогом, який дозволяє впевнено виявляти БПЛА на малих відстанях, але вимагає подальшого нарощування кількості елементів для збільшення радіуса дії системи виявлення цілей.

Аналіз полярного графіка показує низький рівень задніх пелюсток, що досягнуто завдяки використанню суцільного екрана підкладки Rogers 5880. Відсутність значних бічних пелюсток свідчить про високу чистоту діаграми, що мінімізує вплив наземних об'єктів на процес відстеження цілей. Рівень бічних пелюсток в досліджуваній конфігурації $-16,2$ дБ вказує на те, що потужність випромінювання у небажаних напрямках становить менше 2,5 % від основної потужності. В умовах реального застосування це мінімізує ризик хибних спрацювань радара в разі відбиття від підстильної поверхні (землі, дерев, споруд), що є критичним при супроводженні літальних апаратів, які

летять на малих висотах. Придушення бічних пелюсток нижче рівня -15 дБ гарантує, що система відстеження буде фокусуватися виключно на головному промені, уникаючи «захоплення» завод або інших об'єктів, що знаходяться поза зоною основного спостереження.

Аналіз енергетичної ефективності розробленої ПАР на частоті 5,8 ГГц підтверджує високу якість обраних конструктивних рішень. На рис. 6 наведено графіки радіаційної (Radiation Efficiency) та загальної (Total Efficiency) ефективності системи для ПАР 2×2.

Встановлено, що в точці резонансу ці показники практично збігаються, досягаючи значень – 0,15 дБ. Збіжність графіків на цільовій частоті свідчить про мінімальний рівень втрат на відбиття (S_{11}), що вказує на ідеальне імпедансне узгодження антени з трактом живлення. Високе значення радіаційної ефективності обумовлене використанням низьковтратної підкладки Rogers 5880, що дозволяє спрямовувати майже всю підведену потужність на формування корисного сигналу для детекції БПЛА. Це забезпечує максимальний енергетичний потенціал системи при мінімальних теплових втратах у полотні решітки.

Для оцінки якості імпедансного узгодження досліджуваної ПАР у робочому діапазоні було проаналізовано частотну залежність коефіцієнта стоячої хвилі (VSWR). Згідно з отриманими результатами моделювання на центральній частоті 5,8093 ГГц значення VSWR становить 1,027. Такий результат свідчить про практично повну відсутність відбитої хвилі в тракці живлення. Це підтверджує ідеальну відповідність вхідного опору антени стандартному 50-омному хвилеводному порту, що було досягнуто завдяки прецизійній корекції довжини патч-випромінювачів в процесі моделювання.

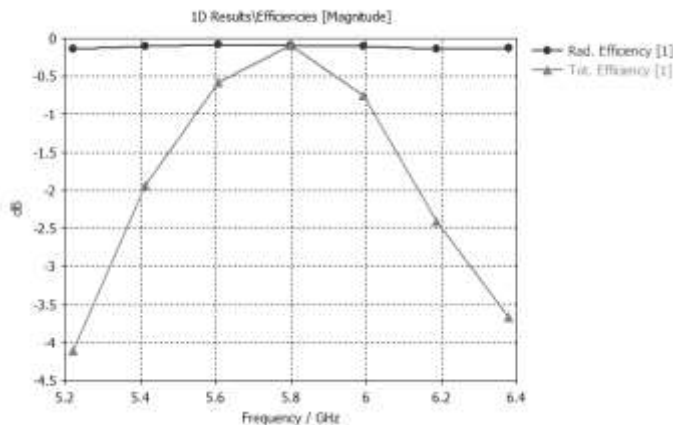


Рис. 6

Такий низький показник коефіцієнта стоячої хвилі безпосередньо корелює з отриманою загальною ефективністю системи (-0,15 дБ). Мінімальні втрати на відбиття гарантують максимальну передачу енергії до випромінювального полотна, що є критично важливим для формування високого енергетичного потенціалу при виявленні малорозмірних цілей (БПЛА) на великих відстанях.

Робота антени з VSWR, близьким до одиниці, запобігає перегріву активних компонентів передавача (підсилювачів потужності) та виключає ризик виникнення паразитних перевідбиттів у фідері, що підвищує надійність оборонної радіолокаційної системи в цілому.

Наступним етапом дослідження став перехід до розрахунків планарної антенної решітки розмірністю 4×4 елементи. Метою даного етапу було кіль-

кісне оцінювання приросту енергетичного потенціалу системи та аналіз динаміки звуження головної пелюстки діаграми спрямованості для підвищення точності відстеження малорозмірних БПЛА.

Для формування решітки було застосовано підхід, відпрацьований на попередньому етапі для решітки 2×2 : була використана підкладка Rogers 5880 зі стандартною товщиною 1,575 мм, був проведений підбір параметрів довжин патчів для отримання необхідного значення частотного резонансу на 5,8 ГГц.

На рис.7 представлено результати розрахунку коефіцієнта S_{11} . На відміну від решітки 2×2 , конфігурація 4×4 демонструє більш складну частотну залежність коефіцієнта відбиття. Наявність двох локальних мінімумів на частотах 5,78 ГГц (-14,9 дБ) та 5,98 ГГц (-12,3 дБ) свідчить про ефект взаємного зв'язку. У решітці з 16 елементів відстань між патчами стає критичним фактором.

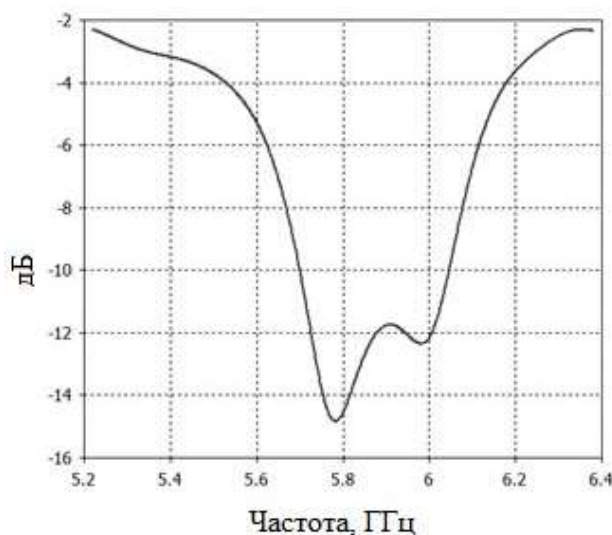


Рис. 7

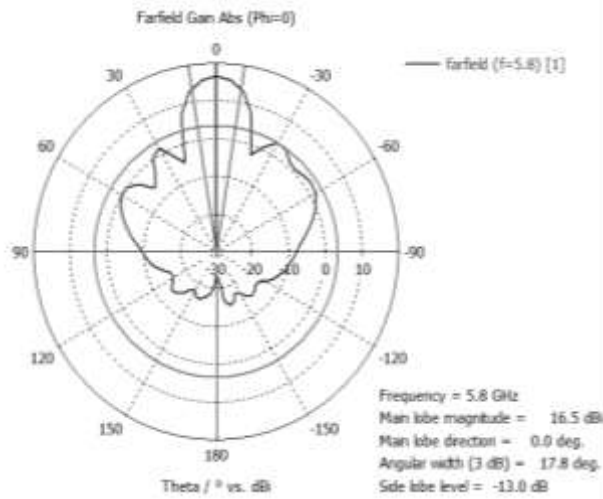
Електромагнітна взаємодія між сусідніми випромінювачами через повітря та поверхневі хвилі в підкладці призводить до «розщеплення» основного резонансу. Це класичне явище для зв'язаних резонаторів, яке в даному випадку розширює загальну робочу смугу антени.

Решітка 4×4 має довшу та складнішу систему дільників потужності. Поява другого мінімуму на частоті 5,98 ГГц може бути викликана паразитними резонансами в самих мікросмужкових лініях живлення або Т-подібних з'єднаннях. Оскільки рівень відбиття на обох частотах нижче -10 дБ, антена залишається працездатною в усьому діапазоні між цими піками.

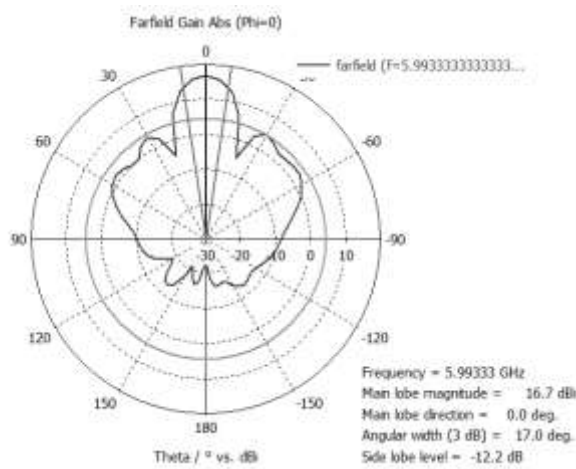
Така форма графіка фактично є перевагою для оборонних систем. Замість одного вузького піку ми отримуємо ширшу зону узгодження. Це робить систему менш чутливою до виробничих похибок або змін погодних умов (вологості, температури), що могли б «зсунути» одиночний гострий резонанс за межі робочого діапазону.

Для детального аналізу спрямованих властивостей ПАР було обрано дві характерні частотні точки: центральну робочу частоту 5,8 ГГц та частоту 5,99 ГГц. Такий підхід дозволив верифікувати стабільність діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення в межах розширеної смуги узгодження, що є критичним для завадостійких систем виявлення БПЛА.

Порівняльний аналіз діаграм спрямованості на частотах 5,8 ГГц та 5,99 ГГц, які показано на рис. 8, продемонстрував високу стабільність форми головної пелюстки.



a)



б)

Рис. 8

Незважаючи на зміщення частоти, положення максимуму випромінювання залишається незмінним (0°), що підтверджує коректну роботу фазових центрів випромінювачів та стійкість корпоративної лінії живлення до частотних деформацій.

На частоті 5,8 ГГц (основний робочий діапазон) зафіксовано пікове значення підсилення 16,5 дБі. На частоті 5,99 ГГц значення підсилення становить 16,7 дБі.

Мала різниця між цими значеннями свідчить про високу ефективність антени в усьому діапазоні, що дозволяє системі ефективно супроводжувати цілі навіть при перестроюванні робочих частот каналів зв'язку БПЛА.

Ширина променя (Angular width) та рівень бічних пелюсток (Side Lobe Level) на обох частотах залишаються в межах розрахункових норм. Це гарантує, що кутлова точність відстеження малорозмірних об'єктів не деградує при відхиленні частоти сигналу від центрального значення, забезпечуючи надійне детектування об'єктів на фоні інтенсивних відбиттів від підстильної поверхні.

Завершальним етапом дослідження став розгляд ПАР розмірністю 8×8 (64 елементи). Перехід до такої конфігурації є стратегічно важливим для оборонних систем, оскільки теоретично дозволяє подвоїти дальність виявлення цілей та суттєво підвищити кутову роздільну здатність.

При повнохвильовому моделюванні структури такої складності на початкових етапах розрахунку було зафіксовано виникнення низькочастотного резонансу в районі 2,36 ГГц.

Дане явище зумовлене значними габаритами загального антенного полотна та складністю інтегральної лінії живлення, що при недостатній щільності сітки розбиття на першому проході імітує роботу апертури як єдиного макродиполя.

З огляду на високу обчислювальну ємність повнохвильового моделювання ПАР розмірністю 8×8 , оцінка її характеристик була проведена методом лінійної екстраполяції верифікованих результатів менших конфігурацій (2×2 та 4×4). Встановлено сталу тенденцію зростання підсилення на 6,02 дБ при кожному наступному збільшенні кількості елементів решітки.

Таким чином, для конфігурації 8×8 прогнозоване значення коефіцієнта підсилення становить 22,5 дБі, що забезпечує значний енергетичний запас для виявлення цілей з малою ЕПР (дронів) на відстанях, що у 2,5 – 3 рази перевищують можливості антенної решітки 2×2 . Паралельно із цим, кутова роздільна здатність системи підвищується вдвічі (до 12°), що критично для точного відстеження траєкторії польоту БПЛА та його селекції на фоні активних радіозавад.

Висновки. В результаті проведених досліджень та аналізу отриманих даних можна сформулювати такі висновки:

Вибір діелектричної підкладки Rogers 5880 з товщиною 1,575 мм є оптимальним рішенням, оскільки дана товщина відповідає світовим стандартам виробництва високочастотних друкованих плат та забезпечує необхідну механічну жорсткість для великих решіток. Використання стандартного номіналу товщини гарантує високу повторюваність характеристик при серійному виготовленні та сумісність із типовими роз'ємами СВЧ-діапазону, забезпечуючи при цьому мінімальні втрати та стабільність резонансу в умовах експлуатації.

Встановлено стійку тенденцію зростання енергетичного потенціалу при переході від 4 елементів решітки до складних конфігурацій в 64 елементи. Кожне збільшення кількості елементів решітки забезпечує суттєвий приріст коефіцієнта підсилення та звуження головної пелюстки діаграми спрямованості. Методом екстраполяції підтверджено, що конфігурація володіє достатнім підсиленням для впевненого детектування малорозмірних БПЛА з низькою ефективною площею розсіювання на великих відстанях.

Досліджено ефект формування складної резонансної структури в решітках з великою кількістю елементів, що сприяє розширенню робочої смуги частот. Це підвищує адаптивність системи до заводового середовища та дозволяє зберігати високу точність відстеження кутових координат цілі навіть при незначних зміщеннях робочої частоти каналів керування дронами.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в комплексному обґрунтуванні вибору геометричних параметрів підкладки та кількості елементів ПАР, що базується на балансі між технологічністю виготовлення за проми-

словими стандартами та необхідною роздільною здатністю для виявлення цілей з малою ефективною площею розсіювання.

Подальший розвиток даної тематики вбачається у впровадженні методів цифрового діаграмоутворення на базі розроблених топологій. Це дозволить реалізувати алгоритми адаптивного супроводження групи швидкісних цілей та забезпечити інтелектуальне придушення активних завад, що значно посилить можливості систем виявлення малорозмірних цілей.

1. *Rojhani N, Shaker G.* Comprehensive review: effectiveness of MIMO and beamforming technologies in detecting low RCS UAVs. *Remote Sens.* March 2024. 24 p. <https://doi.org/10.3390/rs16061016>
2. *Seidaliyeva U., Ilipbayeva L., Taissariyeva K., Smailov N., Matsun E. T.* Radar-Based Drone Detection Technologies. *Encyclopedia.pub.* 9 p. <https://encyclopedia.pub/entry/53402>
3. *Xu Z., Zhou Z., Wu D., Xu X., Fellow Y. Z.* CKM-enabled joint spatial-doppler domain clutter suppression for low-altitude UAV ISAC. *Journal of latex class files.* 2021. V. 14, No. 8. 13 p.
4. *Liu Q., Song M., Yu J., Liang P., Wang T., Zeng C., Zhang Z., Gao Y., Liu L.* A circular fitting clutter suppression algorithm based on ISAC for low altitude UAVs. *Sensors.* 2025. 14 p. <https://doi.org/10.3390/s25206285>
5. *Ghofur M. J. U., Riyanto E.* AI-driven adaptive radar systems for real-time target tracking in urban environments. *Journal of Technology Informatics and Engineering (JTIE).* 2025. V. 4, No. 1. P. 135–155. <https://doi.org/10.51903/jtie.v4i1.289>
6. *Fontanesi G., Guerra A., Guidi F., V'asquez-Peralvo J. A., Shlezinger N., Zanella A., Lagunas E., Chatzinotas S., Dardari D., Djuri'c P. M.* A deep-NN beamforming approach for dual function radar-communication THZ UAV. *IEEE transactions on vehicular technology.* 2024. 13 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.17015>
7. *Costanzo S., Buonanno G.* Distributed phased-array radars exploiting collaborative beamforming and diversity techniques for remote sensing applications. *IEEE Open journal of antennas and propagation.* 2025. V. 6, No. 3. P. 864–878. <https://doi.org/10.1109/OJAP.2025.355251>
8. *Norrud H.* Antenna design of a radar phased array using drone swarms. *Lund University publications. Thesis, printed in Sweden.* 2025. 61 p. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9183205/file/9183212.pdf> (Last accessed: 20.01.2026)
9. *Ghattas N., Ghuniem A. M., Abdelsalam A. A., Magdy A.* Planar antenna arrays beamforming using various optimization algorithms. *IEEE Access.* 2023. P. 68486–68500. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292792>
10. *Hou L., Jin L., Huang K., Xiao S., Lou Y., Chen Y.* Beamspace spatial smoothing MUSIC DOA estimation method using dynamic metasurface antenna. *Entropy.* 2025. 22 p. <https://doi.org/10.3390/e27040335>
11. *Warnick K. F., Spencer J. C.* Phased array radar systems for small unmanned aerial vehicles. *Google patents. United States. Patent No: US 10, 317, 518 B2.* Jun. 11, 2019. <https://patents.google.com/patent/US10317518B2/en> (Last accessed: 20.12.2025)
12. *Jin K., Han S.-S., Baek D., Lee H. L.* Small drone detection using hybrid beamforming 24 GHz fully integrated CMOS radar. *Drones.* 2025. 14 p. <https://doi.org/10.3390/drones9070453>
13. *Lee C. U., Noh G., Ahn B. K., Yu J.-W., Lee H. L.* Tilted-beam switched array antenna for UAV mounted radar applications with 360 coverage. *Electronics.* 2019. 11 p. <https://doi.org/10.3390/electronics8111240>
14. *Parvez Shariff B. G., Mane P. R., Kumar P., ALI T., Alsath M. G. N.* Planar MIMO antenna for mmwave applications: Evolution, present status & future scope. *Heliyon.* 2023. No.9. 32 p. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13362>
15. *Choi B., Oh D., Kim S., Chong J.-W., Li Y.-C.* Long-range drone detection of 24 G FMCW radar with E-plane sectoral horn array. *Sensors.* 2018. 21 p. <https://doi.org/10.3390/s18124171>
16. *Jung J.-I., Yang J.-R.* 5.8-GHz Patch antenna with an enhanced defected ground structure for size reduction and increased bandwidth. *Journal of electromagnetic engineering and science.* 2022. V. 22, No. 3. P. 245–251. <https://doi.org/10.26866/jees.2022.3.r.83>
17. *Laabadli A.-A., Mejdoub Y., Elamri A., Tarbouch M.* Design of a miniaturized patch antenna for 2.45/5.8 GHz applications. *International journal of advances in applied sciences.* 2025. V. 14, No. 1. P. 101–110. <http://doi.org/10.11591/ijaas.v14.i1.pp101-110>

Стаття надійшла до редакції 03.03.2026
Прийнято до друку після рецензування 27.03.2026
Дата публікації 31.03.2026