

РОЗВИТОК ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ТА СПОСОБІВ ПРОТИДІЇ ЇМ

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-82-91

УДК 621.396.96

¹Купчин Артем Валерійович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0003-2013-691X>

¹Солошенко Юрій Вікторович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0009-0002-9268-2813>

²Кошка Володимир Олегович

<https://orcid.org/0009-0007-7861-348X>

³Лук'яненко Сергій Анатолійович

<https://orcid.org/0009-0002-5936-0476>

¹Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки, Київ, Україна

²Національний університет оборони України, Київ, Україна

³Факультет перепідготовки та підвищення кваліфікації авіаційного персоналу Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Миколаїв, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 05.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 26.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ПЛОЩІ РОЗСІЮВАННЯ ЛІНЗ ЛЮНЕБЕРГА, ВСТАНОВЛЕНИХ НА БПЛА ТИПУ “ПАРОДІЯ”

У статті наведено результати теоретичного та експериментального дослідження ефективної площі розсіювання лінз Люнеберга, встановлених на російських безпілотних літальних апаратах типу “Пародія”, у діапазоні частот 8–12 GHz. Проведено чисельне моделювання багатошарових конструкцій у середовищі CST Microwave Studio та лабораторні вимірювання в безеховій камері з використанням двох методів обчислення ефективної площі розсіювання. Встановлено характер кутової та частотної залежності відбиття, визначено розбіжності між теоретичними й експериментальними результатами та оцінено можливість застосування лінз як пасивних радіолокаційних відбивачів для імітації повітряних цілей.

Результати роботи становлять інтерес для науковців і інженерів у галузі радіолокації, а також спеціалістам систем протиповітряної оборони при розробці та вдосконаленні методів протидії хибним повітряним цілям.

Ключові слова: лінза Люнеберга, ефективна площа розсіювання, хибна повітряна ціль, радіолокаційний відбивач, безпілотний літальний апарат.

Вступ

Лінза Люнеберга (ЛЛ) – це сферична діелектрична лінза зі змінним показником заломлення, яка використовується для фокусування та відбиття радіохвиль у широкому діапазоні частот [1]. Її унікальні властивості дозволяють застосовувати її у різних сферах, зокрема в авіації, безпілотних технологіях, радіолокації та комунікаціях [2].

Основна ідея полягає в тому, що показник заломлення всередині сфери змінюється від центру до поверхні за певним законом. У класичному випадку він зменшується за квадратичним законом (1) [3,4]:

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (1)$$

де $n(r)$ – показник заломлення на відстані r від центру сфери;

R – радіус лінзи.

Завдяки цьому електромагнітні хвилі, що падають на сферу, фокусуються в певних точках.

У сучасних конструкціях ЛЛ, як правило, реалізується у вигляді багатошарової діелектричної структури зі ступінчастим наближенням закону зміни показника заломлення. Діелектрична проникність кожного шару є сталою та дискретно змінюється від центра до поверхні [5].

Практичний інтерес становить використання ЛЛ як пасивних радіолокаційних відбивачів у складі безпілотних літальних апаратів. Зокрема, у фюзеляжі БПЛА типу “Пародія” розміщено дві ЛЛ (рис. 1), що дозволяє формувати хибні повітряні цілі та змінювати радіолокаційний профіль апарата залежно від поставлених завдань.

Такий підхід ускладнює ідентифікацію об'єкта засобами протиповітряної оборони.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження радіолокаційних характеристик ЛЛ у складі БПЛА, зокрема оцінка їх ефективної площі розсіювання у робочому діапазоні частот.



Рисунок 1 – Ніші фюзеляжу БПЛА “Пародія”

Метою статті є теоретичне та експериментальне дослідження ефективної площі розсіювання ЛЛ, встановлених на БПЛА типу “Пародія”, у діапазоні частот 8-12 GHz для оцінки їх радіолокаційних характеристик та можливості імітації повітряних цілей.

Матеріали та методи

Встановлено, що реалізація ЛЛ з кількістю шарів більше ніж 20 недоцільна і не призводить до істотної зміни характеристик лінзи [6,7]. Як показує практика, найбільшу технологічність мають 4-6-шарові лінзи [8,9]. Саме така кількість шарів найчастіше використовується практично.

На рис. 2 показано посилення електромагнітного поля в нульовому напрямку ЛЛ для різного електричного діаметра та кількості шарів [1]. Видно, що різниця в кількості 12 ... 20 шарів призводить до відмінностей у потужності випромінювання не більше ніж на 2-3% у всьому аналізованому діапазоні довжин хвиль.

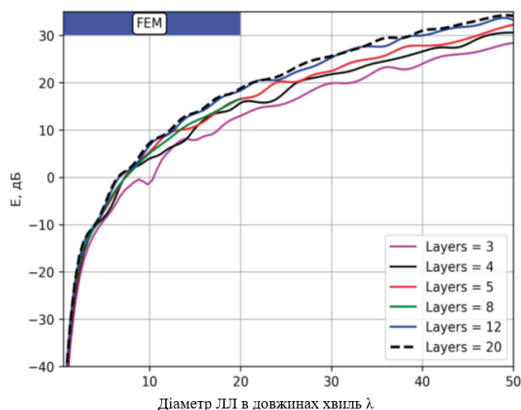


Рисунок 2 – Залежність електромагнітного поля від електричного діаметра та кількості шарів ЛЛ

Прототипування з використанням 3D принтерів відкрило нові можливості виготовлення цих лінз. Як базовий матеріал використовується PLA-пластик з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_b=3,1$. Зменшувати середню діелектричну проникність кожного шару лінзи можна за допомогою кубічних отворів. Додавання повітряних заповнень кубічної форми різного розміру та з різним кроком дозволяє зменшувати

діелектричну проникність до необхідного значення. Приклад сфери лінзи з подібним наповненням наведено на рис. 3. Регулювання діелектричної проникності здійснюється за допомогою трьох параметрів: a – розмір сторін кубічного елемента, b – відстань між елементами, n – кількість елементів. Для досягнення найбільш задовільних електродинамічних параметрів при проходженні хвилі через подібну структуру має дотримуватися умова $a \ll \lambda$, де λ - довжина хвилі.

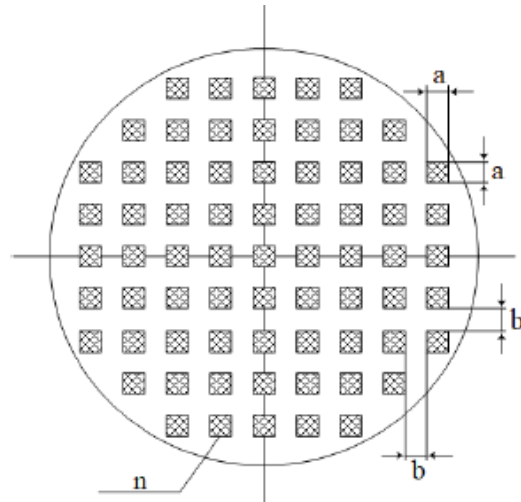


Рисунок 3 – Сфера ЛЛ з повітряними заповненнями кубічної форми різного розміру та різним кроком

У табл. 1 для різної кількості шарів (L) наводяться параметри діелектричної проникності кожного шару (ϵ) та відносний радіус (R_e) шару [6].

Таблиця 1

Параметри діелектричної проникності та відносні радіуси шарів

L	R_e	ϵ
1	0.82	1.67
2	0.63; 0.89	1.8; 1.4
3	0.53; 0.75; 0.93	1.86; 1.57; 1.28
4	0.47; 0.67; 0.82; 0.94	1.88; 1.67; 1.44; 1.22
5	0.43; 0.60; 0.74; 0.85; 0.95	1.91; 1.73; 1.55; 1.36; 1.18
6	0.39; 0.56; 0.68; 0.78; 0.88; 0.96	1.93; 1.77; 1.61; 1.46; 1.31; 1.16
7	0.37; 0.52; 0.63; 0.73; 0.82; 0.89; 0.97	1.93; 1.80; 1.67; 1.53; 1.40; 1.27; 1.13
8	0.34; 0.49; 0.59; 0.69; 0.77; 0.84; 0.91; 0.97	1.94; 1.82; 1.71; 1.59; 1.47; 1.35; 1.24; 1.12

Над наявними лінзами був проведений експеримент з використанням теоретичних та експериментальних даних.

Проведення теоретичного розрахунку ефективної площі розсіювання перфорованих лінз Люнеберга

Потенційно можливе значення ЕПР для сферичної ЛЛ знаходиться за такою формулою [10-12]

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi^3 R^4}{\lambda^2}, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі.

Графік залежності максимально досяжної ЕПР сферичної ЛЛ від частоти наведено на рис. 4.

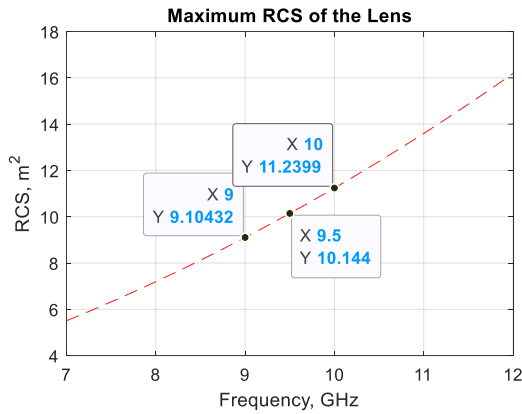


Рисунок 4 – Графік залежності максимально досяжної ЕПР сферичної ЛЛ від частоти

Розташування перфорованої ЛЛ при моделюванні у середовищі CST Microwave Studio та пов'язані з нею кути огляду показані на рис. 5.

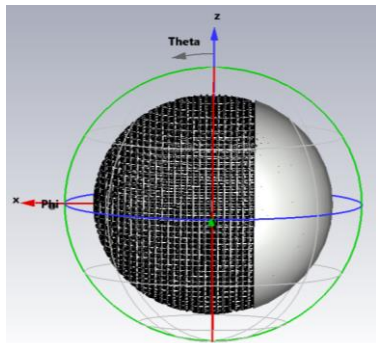


Рисунок 5 – Розташування перфорованої ЛЛ при моделюванні у середовищі CST Microwave Studio

У табл. 2 наводяться номер, радіус та діелектрична проникність (ϵ) шарів (L) для шести-, п'яти- та чотиришарової неперфорованої ЛЛ за характеристиками аналогічної перфорованої [5].

Таблиця 2

Параметри шарів неперфорованої лінзи Люнберга за характеристиками перфорованої

L	6 шарів		5 шарів		4 шарів	
	R шару [mm]	ϵ	R шару [mm]	ϵ	R шару [mm]	ϵ
1	95	1.16	95	1.18	95	1.22
2	87.08	1.31	85	1.36	82.87	1.44
3	77.19	1.46	74	1.55	67.71	1.67
4	67.29	1.61	60	1.73	47.5	1.88
5	55.42	1.77	43	1.91		
6	38.6	1.93				

Результати розрахунку ЕПР [m²] неперфорованої ЛЛ з дзеркалом (лінза діаметром $a = 190$ mm і металізованим фрагментом – чашею висотою 63 mm), що опромінюється в діапазоні частот 8-12 GHz (Theta = 90°, Phi = 0°) для шести (а), п'яти (б) та чотирьох (в) шарів наведено на рис. 6.

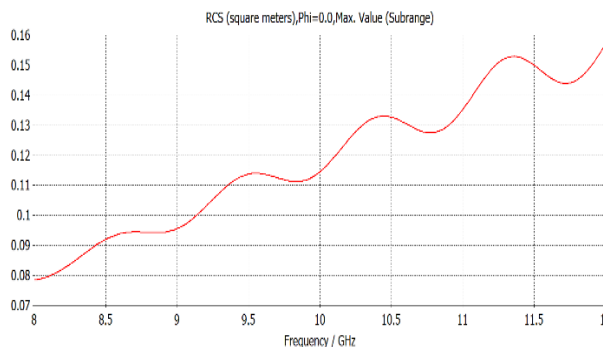
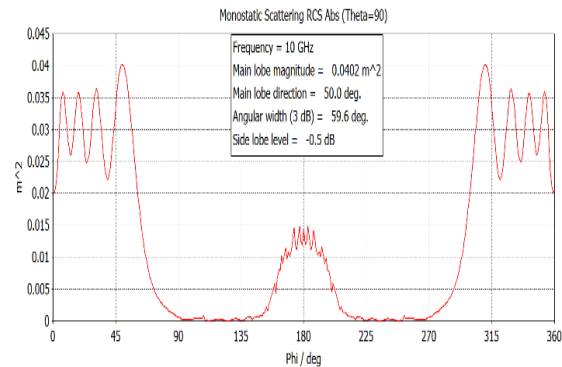
Проведення експериментального розрахунку ефективної площі розсіювання перфорованих лінз Люнберга у лабораторних умовах

Експериментальні дослідження проводилися в безеховій камері з використанням спеціальної вимірювальної установки.

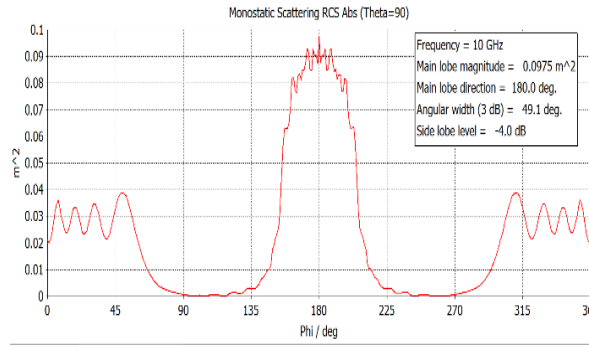
При вимірі відбиття від ЛЛ використовується пінопластовий стенд з лінзою, який обертається за допомогою спеціального майданчика з дискретом 2° в діапазоні від 0° до 360° для перфорованої лінзи.

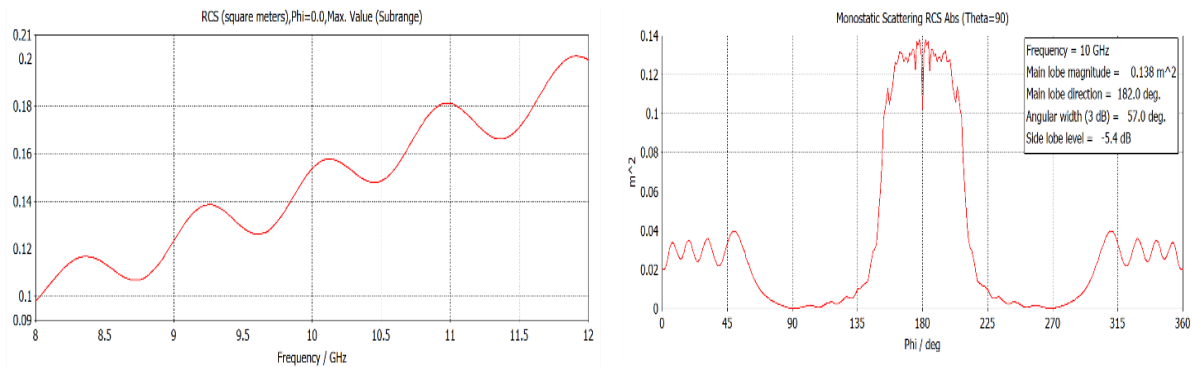


а) шість шарів



б) п'ять шарів

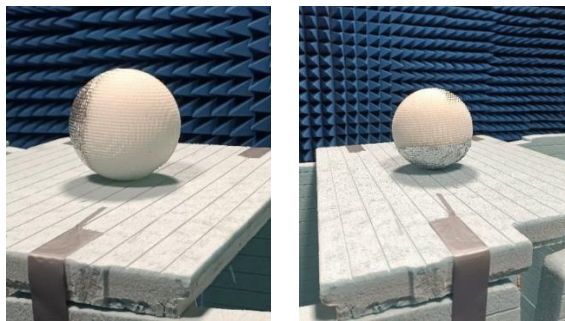




в) чотири шари

Рисунок 6 – Результати розрахунку ЕПР [m²] неперфорованої ЛЛ

Перфорована ЛЛ досліджувалась у двох позиціях (рис. 7):



а) лінза тарілочкою до випромінювача
б) лінза тарілочкою до низу

Рисунок 7 – Експериментальні дослідження ЛЛ

Для проведення експериментального розрахунку використовувалась наступна методика:

- 1) завдання діапазону частот, в якому проводяться виміри [7GHz, 12GHz], дискретно за частотою = 20 МГц і необхідний розмір вибірки, що усереднюється (N = 200 випробувань);
- 2) вибір режиму вимірів:
 - а) тільки фонові вимірювання та шум приймача;
 - б) вимірювання лінзи та її підставки на тлі шуму та відбиття від елементів камери;
- 3) проведення статистичних випробувань з опроміненням у заданому діапазоні частот, у різних позиціях для перерахованих режимів вимірювання;
- 4) формування квадратурних складових відображень відповідно до обраного режиму;
- 5) обробка даних виміру;
- 6) обчислення ЕПР лінз з урахуванням теоретичної залежності (рівняння радіолокації) з допомогою підстановки експериментальних даних:
 - метод 1 – у вигляді потужності сигналу, відбитого від лінзи;
 - метод 2 – у вигляді потужності сигналів, відбитих від лінзи та від еталона (калібровочної

цілі), а також розрахованої теоретичним шляхом ЕПР еталона (рисунок 6);

7) Розрахунок вибіркового середнього ЕПР лінзи $\sigma_t = (f_m)$ за усереднення за частотами чи кутами спостереження.

Для мінімізації впливу на результати оцінки ЕПР лінзи $\sigma_t = (f_m)$ помилкових викидів, викликаних некоректними умовами експерименту або впливом відбитків, що заважають, проводиться цензурування вихідної вибірки:

включаються максимальні значення, які суттєво перевищують теоретично розраховані значення;

виключаються значення, значно менші ніж фонове відображення.

Обробка отриманих експериментальних даних вимірювання ЕПР перфорованої лінзи Люнеберга проводилася у пакеті прикладних програм MATLAB R2022a.

Для наочності відображення отриманих результатів ЕПР у початковій позиції ($Az = 0deg$) лінза Люнеберга розташовується металевою частиною до опромінювача. Таке розташування дозволяє без розривів відобразити залежність ЕПР основної частини ЛЛ від кута опромінення.

Результати

Результати розрахунку ефективної площі розсіювання лінзи Люнеберга першим методом у першій позиції (тарілочкою до випромінювача)

На рис. 8 наведено залежності ЕПР перфорованої ЛЛ, розташованої в першій позиції від частоти. Значення наведено для трьох ракурсів: $Az = 180deg$ – опромінюється частина лінзи, протилежна до металу; $Az = 90deg$; $Az = 0deg$ – опромінюється металізована частина лінзи.

На рис. 9 показана залежність ЕПР ЛЛ від азимуту для трьох значень частоти:

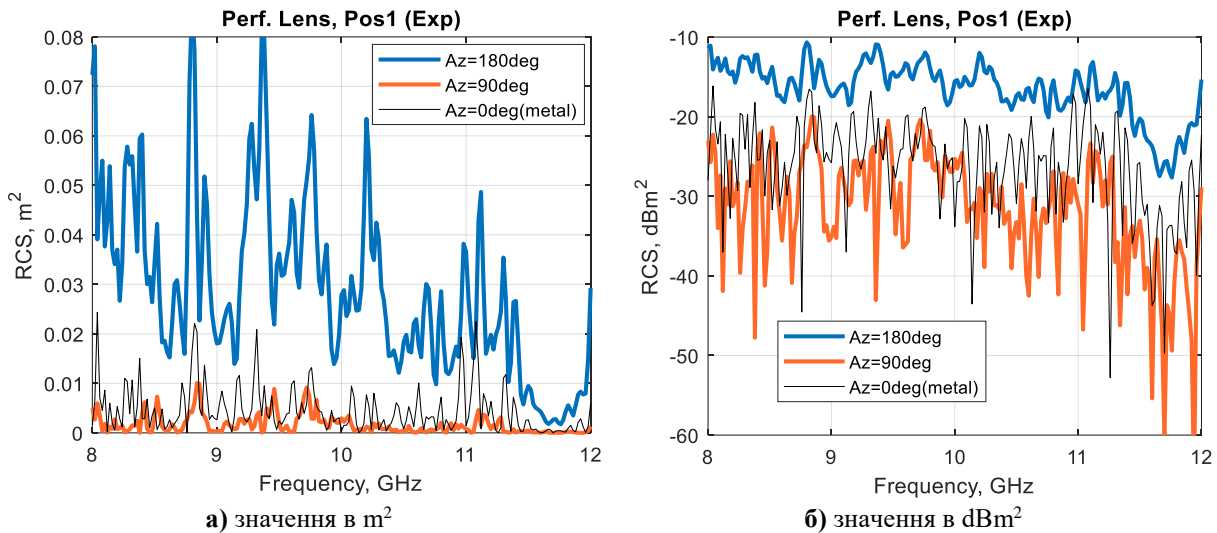


Рисунок 8 – Залежності ЕПР перфорованої ЛЛ, розташованої в першій позиції, від частоти

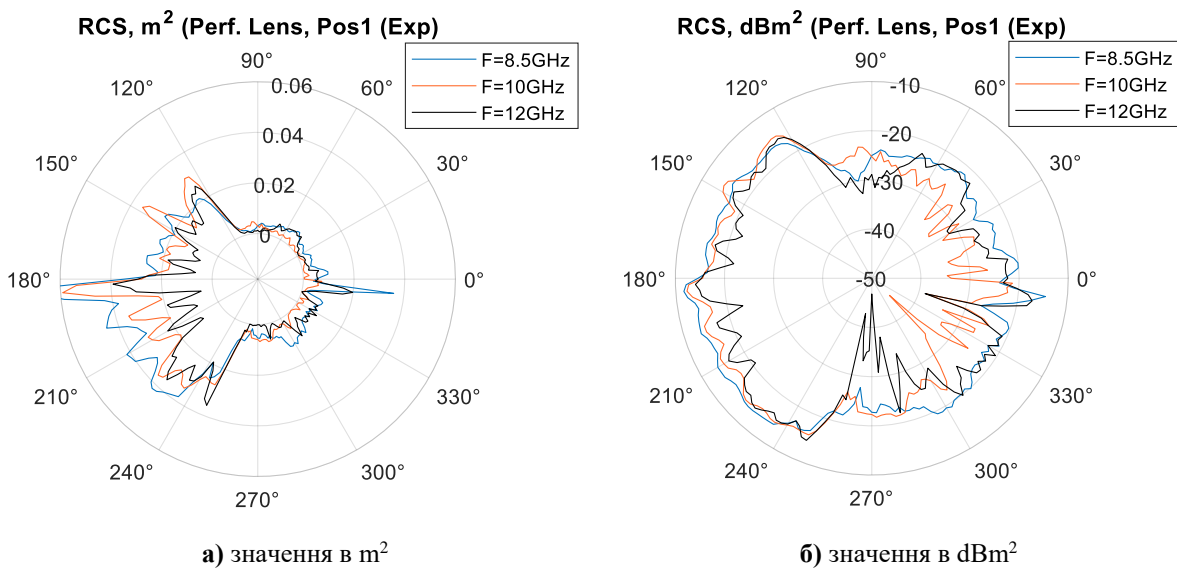


Рисунок 9 – Залежність ЕПР ЛЛ від азимуту для трьох значень частоти

На основі аналізу графіків можна стверджувати наступне:

відбиття від основної частини перфорованої лінзи значно перевищують відбиття від металізованої частини;

ЕПР перфорованої лінзи менше теоретично розрахованого значення, але при цьому перфорована лінза відображає у ширшому кутовому діапазоні.

Нерівномірний характер відбиття від перфорованої лінзи може бути наслідком суттєвих пошкоджень металевого покриття та діелектричної частини лінзи.

Істотна відмінність теоретично розрахованих та експериментальних даних пояснюється такими факторами:

неможливістю точно виміряти внутрішні розміри осередків лінзи;

невідомим значенням діелектричної проникності шарів лінзи;

невідомою кількістю шарів з різною діелектричною проникністю.

Результати розрахунку ефективної площі розсіювання лінзи Люнеберга другим методом у першій позиції (тарілочкою до випромінювача)

На рис. 10 наведено залежності ЕПР перфорованої ЛЛ, розташованої в першій позиції від частоти. Значення наведено для трьох ракурсів: $Az = 180deg$ – опромінюється частина лінзи протилежна до металу; $Az = 90deg$; $Az = 0deg$ – опромінюється металізована частина лінзи.

На рис. 11 показана залежність ЕПР ЛЛ від азимуту для трьох значень частоти:

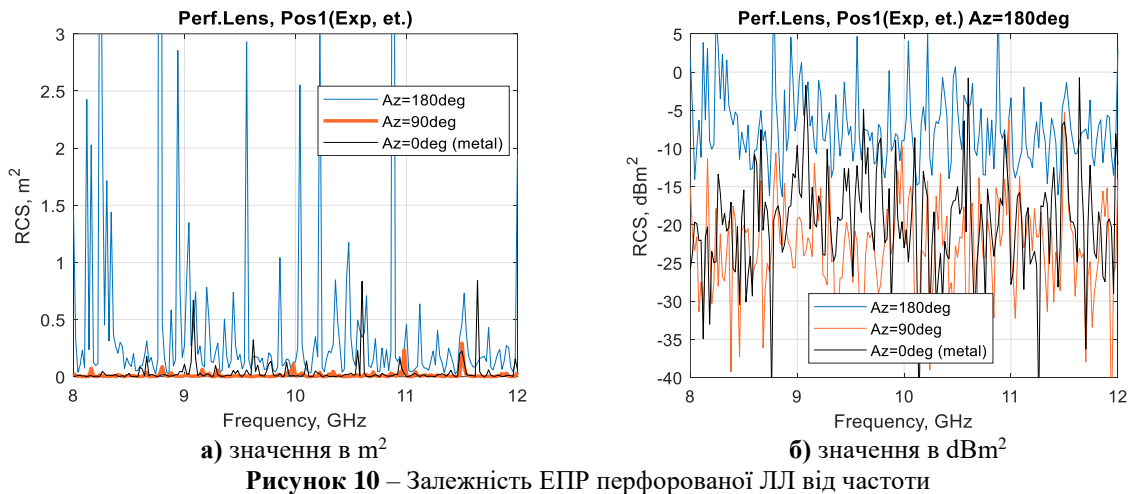


Рисунок 10 – Залежність ЕПР перфорованої ЛЛІ від частоти

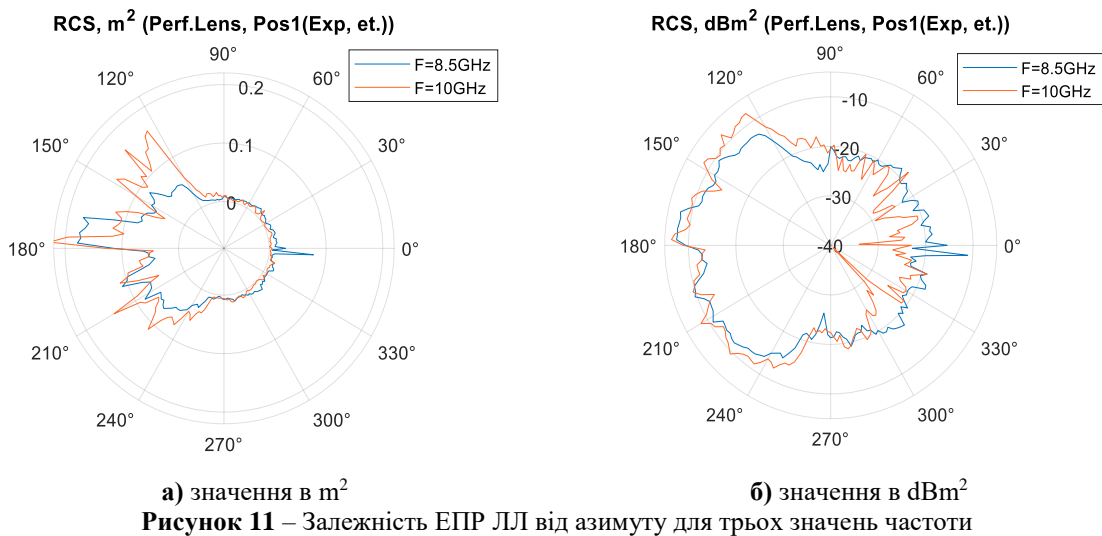


Рисунок 11 – Залежність ЕПР ЛЛІ від азимуту для трьох значень частоти

При розрахунку цим методом так само, як і при розрахунку методом 1:

відбиття від основної частини перфорованої лінзи значно перевищують відбиття від металізованої частини (у цьому варіанті відмінність у відбиттях від металеві та основної частин збільшилася на 5 dB у порівнянні з розрахунком методом 1);

перфорована лінза відображає в більш широкому кутовому діапазоні, ніж теоретично розрахована лінза;

ЕПР перфорованої лінзи має суттєву

нерівномірність, що може бути наслідком суттєвого пошкодження досліджуваного зразка лінзи.

Результати розрахунку ефективної площі розсіювання лінзи Люнеберга першим методом у другій позиції (тарілочкою вниз)

На рис. 12 наведено залежності ЕПР перфорованої ЛЛІ, розташованої в другій позиції від частоти. Значення наведено для чотирьох ракурсів: Az = 0deg; Az = 90deg; Az = 180deg; Az = 270deg.

На рис. 13 показана залежність ЕПР лінзи від азимуту для трьох значень частоти:

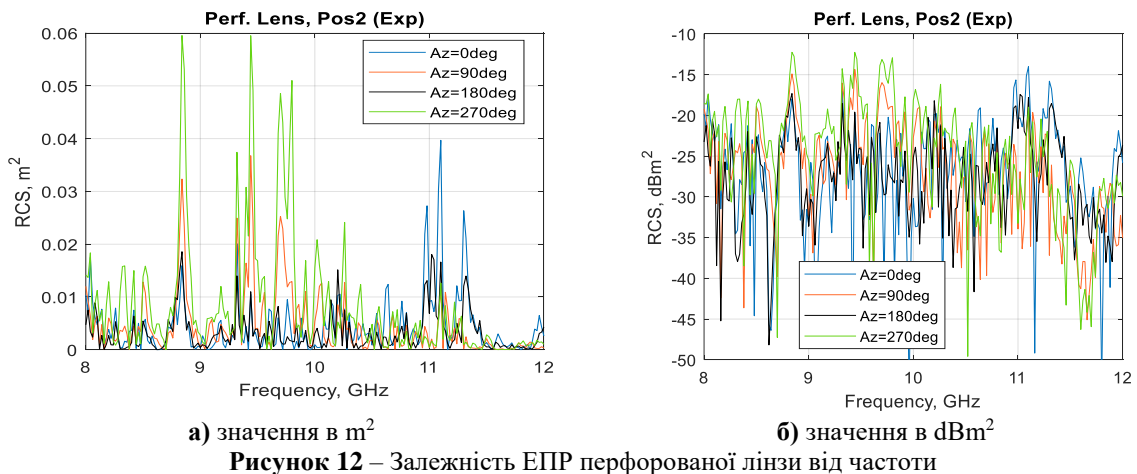
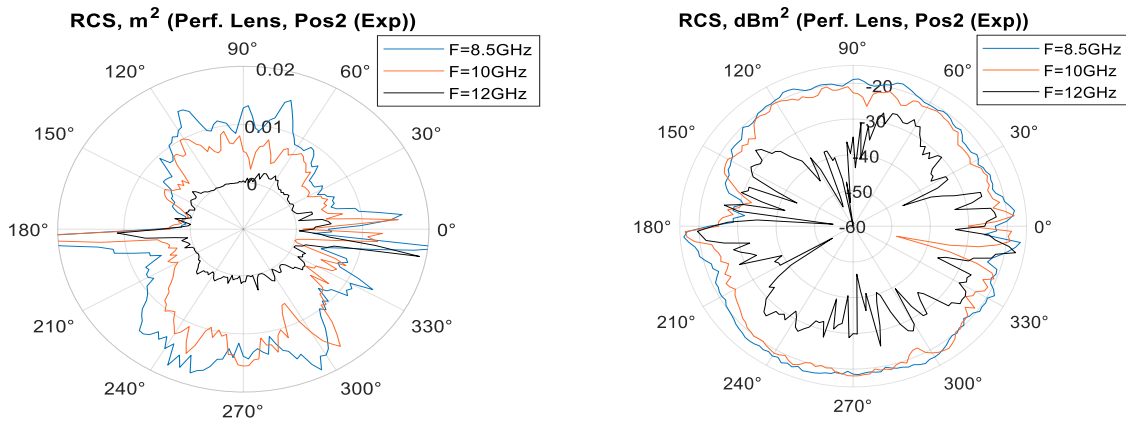


Рисунок 12 – Залежність ЕПР перфорованої лінзи від частоти



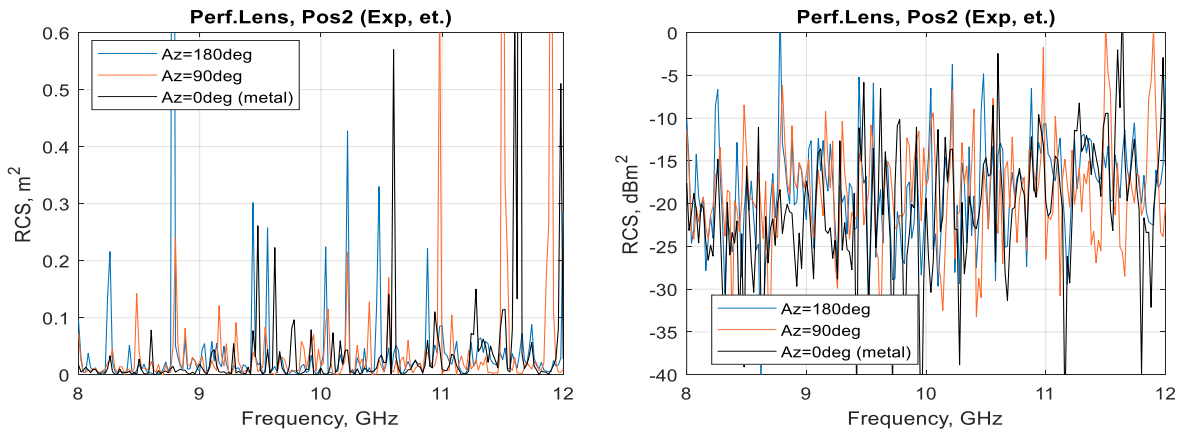
а) значення в m^2 б) значення в dBm^2
Рисунок 13 – Залежність ЕПР перфорованої лінзи від азимуту

Як видно з наведених графіків, ЕПР перфорованої ЛЛ може досягати 0,015 – 0,02 m^2 . Такий ефект може бути наслідком пошкодження металізованої частини лінзи, у цьому випадку ЕПР непошкодженої лінзи може потенційно збільшитись на 5-7 dBm^2 .

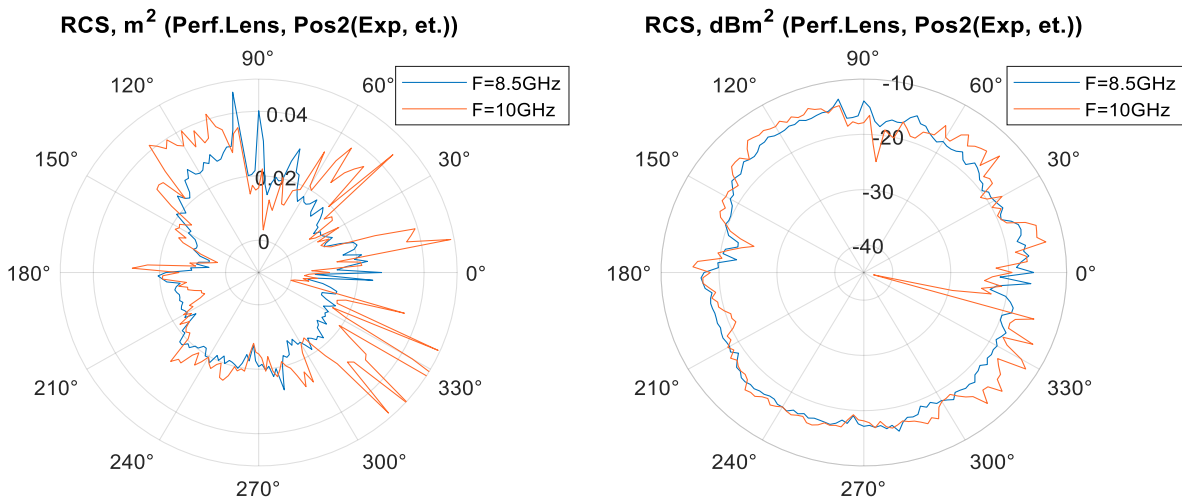
На рис. 14 наведено залежності ЕПР перфорованої ЛЛ, розташованої в другій позиції від частоти. Значення наведено для трьох ракурсів: $Az = 0deg$; $Az = 90deg$; $Az = 180deg$.

На рис. 15 показана залежність ЕПР лінзи від азимуту для трьох значень частоти:

Результати розрахунку ефективної площі розсіювання лінзи Луненберга другим методом у другій позиції (тарілочкою вниз)



а) значення в m^2 б) значення в dBm^2
Рисунок 14 – Залежність ЕПР перфорованої лінзи від частоти



а) значення в m^2 б) значення в dBm^2
Рисунок 15 – Залежність ЕПР перфорованої ЛЛ від азимуту

Згідно з наведеними графіками, ЕПР перфорованої ЛЛ може досягати $0,04 \text{ m}^2$. Суттєва нерівномірність ЕПР ЛЛ може бути наслідком пошкодження металізованої частини лінзи, у цьому випадку ЕПР непошкодженої лінзи може потенційно збільшитись на $5 - 7 \text{ dBm}^2$.

Середня оцінка ефективної площі розсіювання лінз Люнеберга

У табл. 3 наведено чисельні значення ЕПР перфорованої ЛЛ на першій позиції, розраховані теоретично та за експериментальними даними.

У табл. 4 наведено чисельні значення ЕПР перфорованої ЛЛ на другій позиції, розраховані за експериментальними даними.

Наведені у таблицях дані усереднюються по куту в діапазоні від 90° до 270° .

Таблиця 3

Чисельні значення ЕПР перфорованої ЛЛ на першій позиції

Позначення	8 – 12 GHz					9 – 10 GHz
	8 GHz	9 GHz	10 GHz	11 GHz	12 GHz	Mean value
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від 90° до 270°)						
CST, σ [m^2] (4 шари)	9.8E-2	1.2E-1	1.5E-1	1.8E-1	1.99E-1	1.3E-4
CST, σ [m^2] (5 шарів)	7.83E-2	9.6E-2	1.1E-1	1.4E-1	1.6E-1	1.1E-1
CST, σ [m^2] (6 шарів)	1.95E-2	2.3E-2	2.7E-2	2.98E-2	3.4E-2	2.5E-2
Експеримент, σ [m^2] 1 метод	5.0E-4	3.07E-4	3.0E-3	7.97E-4	1.3E-3	2.7E-3
Експеримент, σ [m^2] 2 метод	2.56E-1	8.3E-1	7.1E-2	3.2E-1	6.7E-1	1.2E-1

Таблиця 4

Чисельні значення ЕПР перфорованої ЛЛ на другій позиції

Позначення	8 – 12 GHz					9 – 10 GHz
	8 GHz	9 GHz	10 GHz	11 GHz	12 GHz	Mean value
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від 0° до 90°)						
Експеримент, σ [m^2] 1 метод	1.45E-2	2.7E-3	5.6E-3	3.1E-3	1.3E-3	6.2E-3
Експеримент, σ [m^2] 2 метод	6.03E-2	1.86E-1	2.04E-2	3.5E-2	2.23E-1	3.28E-2
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від 90° до 180°)						
Експеримент, σ [m^2] 1 метод	1.46E-2	1.9E-3	5.3E-3	1.6E-3	6.23E-4	4.7E-3
Експеримент, σ [m^2] 2 метод	1.3E-1	2.7E-1	2.4E-2	2.4E-2	1.2E-2	3.3E-2
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від 180° до 270°)						
Експеримент, σ [m^2] 1 метод	2.1E-2	3.2E-3	9.0E-3	3.8E-3	1.5E-3	8.4E-3
Експеримент, σ [m^2] 2 метод	4.4E-2	2.9E-1	1.78E-2	4.5E-2	1.9E-1	2.78E-2
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від 270° до 360°)						
Експеримент, σ [m^2] 1 метод	1.87E-2	3.8E-3	9.0E-3	5.9E-3	2.2E-3	7.1E-3
Експеримент, σ [m^2] 2 метод	4.4E-2	7.4E-2	2.2E-2	7.2E-3	1.03E-2	2.3E-2

Обговорення

1. З аналізу графіків можна зробити висновок, що ЕПР основної частини перфорованої лінзи на $10\text{-}15 \text{ dBm}^2$ (залежно від частоти) перевищує ЕПР металізованої частини в широкому кутовому діапазоні ($\approx 120^\circ$).

2. Максимальне ЕПР перфорованої лінзи, обчислене за першим методом на $5 - 7 \text{ dBm}^2$ менше теоретично розрахованого значення, що може бути наслідком неврахованого фактору, що впливає на рівень відображення від імітатора цілі. Це припущення підтверджується тим, що:

експериментальна оцінка ЕПР калібрувальної сфери (усереднене за кутовими координатами в діапазоні $9\text{-}10 \text{ GHz}$ значення) у $2\text{-}3$ рази менше (залежно від обраного теоретичного методу), ніж теоретично розраховане у CST;

максимальне ЕПР перфорованої лінзи, обчислене за другим методом, досягає та перевищує рівень теоретично розрахованого ЕПР перфорованої лінзи.

3. Відмінність теоретично розрахованих та експериментальних даних пояснюється такими факторами:

неможливістю точно виміряти внутрішні розміри осередків лінзи;

невідомим значенням діелектричної проникності матеріалу лінзи;

невідомою кількістю шарів з різною діелектричною проникністю.

4. Залежність ЕПР перфорованої лінзи на другій позиції істотно залежить від азимуту (вагається в межах $5\text{-}7 \text{ dBm}^2$), хоча теоретично повинен мати постійний рівень. Така нерівномірність може бути наслідком суттєвих пошкоджень металевого покриття та діелектричної частини лінзи.

З порівняння ЕПР перфорованої ЛЛ з ракурсу 90° при першій і другій позиціях видно, що експериментально оцінене значення ЕПР першої позиції близько до мінімальної оцінки для другої позиції. Зважаючи на суттєві пошкодження дослідного зразка, потенційно можливе збільшення ЕПР непошкодженої перфорованої лінзи на $5\text{-}7 \text{ dBm}^2$.

5. Частотні властивості досліджуваного рефлектора радіолокаційних сигналів типу лінзи Люнеберга у цілому відповідають теоретичним: характеристики радіолокаційної помітності у частотному діапазоні $8\text{-}12 \text{ GHz}$ можна у цілому вважати сталими (коливання величини ЕПР до 4 разів можна вважати незначними).

6. Максимальні значення ЕПР у робочому діапазоні кутів складають $0,02\text{-}0,06 \text{ m}^2$, що для лінзи такого розміру недостатньо високе значення. Теоретичні розрахунки для оптимальної 4 -шарової ЛЛ аналогічного розміру складає $0,5\text{-}1,5 \text{ m}^2$. Можна припустити, що реальні відбивні властивості досліджуваної лінзи в $2\text{-}3$ рази краще отриманих в результаті експерименту внаслідок наявних деформаційних пошкоджень зразка.

7. Отримані значення ЕПР рефлектора радіолокаційних сигналів типу ЛЛ відповідають повітряним цілям:

БпЛА “Зала” (zareєстровані значення ЕПР 0,04-0,09 м²);

БпЛА “Орлан” (zareєстровані значення ЕПР 0,03-0,3 м²);

БпЛА “Суперкам” (zareєстровані значення ЕПР 0,03-0,2 м²).

8. З урахуванням додаткового внеску елементів конструкції самого носія (БпЛА типу “Пародія”) характеристики радіолокаційної помітності зразка у цілому можуть відповідати БпЛА типу “Герань-1” (“Shahed-131”) та “Герань-2” (“Shahed-136”) (розрахункове значення ЕПР складає 0,1-0,7 м²).

9. Заходи протидії застосуванню противником хибних повітряних цілей:

врахування при ідентифікації повітряної цілі параметрів її руху (висота, швидкість);

комплексування радіолокаційної інформації з даними інших сенсорів (акустичних, оптичних);

додатково врахування при ідентифікації повітряної цілі сигнальної (енергетичної) інформації, а саме – порівняння ЕПР цілі для заданого ракурсу опромінення з ЕПР еталонного зразка.

10. Парне розташування ЛЛ під кутом орієнтовно 120° в різні боки забезпечує збільшення кутового діапазону підвищеного значення ЕПР, проте не впливає на його значення при опроміненні в одному напрямі.

Висновки

Отже максимальні значення ЕПР лінз Лунеберга складають 0,02-0,06 м², що для лінз такого розміру недостатньо високе значення.

Можливою причиною невисоких показників є незначні пошкодження лінз.

Отримані значення ЕПР рефлектора радіолокаційних сигналів типу лінзи Лунеберга відповідають наступним повітряним цілям: БпЛА “Зала” БпЛА, “Орлан”, БпЛА “Суперкам”.

З урахуванням додаткового внеску елементів конструкції самого носія (БпЛА типу “Пародія”) характеристики радіолокаційної помітності зразка у цілому можуть відповідати БпЛА типу “Шахед-131” (“Герань-1”) та “Шахед-136” (“Герань-2”), розрахункове значення ЕПР яких складає 0,1-0,7 м².

За результатом проведеного аналізу, виходячи з конструктивних особливостей БпЛА можна стверджувати, що БпЛА “Пародія” може бути використаний для введення в оману системи ППО шляхом імітації хибної цілі та виснаження системи ППО.

Масове використання таких імітаторів змушує ППО перерозподіляти засоби для реагування на

широкий фронт атак. Це знижує щільність захисту на пріоритетних напрямках, створюючи умови для прориву справжніх ударних БпЛА чи ракет.

Для розпізнавання застосування противником хибних повітряних цілей необхідно:

при ідентифікації повітряної цілі враховувати параметри її руху (висота, швидкість);

здійснювати комплексування радіолокаційної інформації з даними інших сенсорів (акустичних, оптичних);

додатково врахувати при ідентифікації повітряної цілі сигнальну (енергетичну) інформацію, а саме – порівняння ЕПР цілі для заданого ракурсу опромінення з ЕПР еталонного зразка.

Список використаних джерел

- [1.] R. K. Luneburg, *Mathematical Theory of Optics*. Berkeley, CA, USA: University of California Press, 1964, <https://doi.org/10.1525/9780520328266>.
- [2.] D. Cenciotti, "These devices make stealth aircraft visible on radar screens," *The Aviation Geek Club*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://theaviationgeekclub.com/these-devices-make-stealth-aircraft-visible-on-radar-screens/>. [Дата звернення: 4 бер. 2026].
- [3.] S. Fuchs, G. von Freymann, and H. Wegener, "Luneburg lens in silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 6, pp. 5156–5161, 2011, doi: 10.1364/OE.19.005156.
- [4.] U. Leonhardt and T. G. Philbin, *Geometry and Light: The Science of Invisibility*. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2010.
- [5.] ТОВ "Радіонікс", "Експериментальні та теоретичні дослідження ЕПР лінз Лунеберга: технічний звіт," Київ, Україна, 2025.
- [6.] B. Fuchs, L. Le Coq, O. Lafond, and S. Rondineau, "Design optimization of multishell Luneburg lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 2, pp. 283–289, Feb. 2007, <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.889849>.
- [7.] W. E. Kock, "Metal-lens antennas," *Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 11, pp. 828–836, 1948, <https://doi.org/10.1063/1.1723441>.
- [8.] J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Dielectric lens antennas," preprint. [Електронний ресурс]. Доступно: https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/11959/1/pre_print_Dielectric_Lens_Antennas_v2.pdf. [Дата звернення: 4 бер. 2026].
- [9.] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, *Radar Cross Section Handbook*, vol. 2. New York, NY, USA: Plenum Press, 1970, pp. 605–612.
- [10.] J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Dielectric lens antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 3, pp. 13–24, Jun. 2005, <https://doi.org/10.1109/MAP.2005.148777>.
- [11.] H. Oraizi and A. Abdolali, "Design and optimization of spherical lens antennas including Luneburg lens," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 118, pp. 321–340, 2011, <https://doi.org/10.2528/PIER11081404>.

¹Artem Kupchyn (PhD)
<https://orcid.org/0000-0003-2013-691X>
¹Yurii Soloshenko (PhD)
<https://orcid.org/0009-0002-9268-2813>
²Volodymyr Koshka
<https://orcid.org/0009-0007-7861-348X>
³Serhii Lukianenko
<https://orcid.org/0009-0002-5936-0476>

¹Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine
²National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
³Faculty of retraining and advanced training of aviation personnel of the Ivan Kozhedub National Air Force University, Mykolaiv, Ukraine

INVESTIGATION OF THE RADAR CROSS SECTION OF LUNEBURG LENSES INSTALLED ON THE PARODIYA-TYPE UAV

The article presents the results of a theoretical and experimental investigation of the radar cross section (RCS) of Luneburg lenses installed on Russian Parodiya-type unmanned aerial vehicles in the 8–12 GHz frequency range. Numerical modeling of multilayer structures was performed using CST Microwave Studio, and laboratory measurements were conducted in an anechoic chamber employing two RCS evaluation methods. The angular and frequency dependencies of the reflected signal were determined, discrepancies between theoretical and experimental results were identified, and the feasibility of using the lenses as passive radar reflectors for false aerial target simulation was assessed.

The results of this study are of interest to researchers and engineers in the field of radar, as well as to air defense specialists for developing and improving methods of countering false aerial targets.

Keywords: Luneburg lens, radar cross section, false aerial target, radar reflector, unmanned aerial vehicles.

References

- [1.] R. K. Luneburg, *Mathematical Theory of Optics*. Berkeley, CA, USA: University of California Press, 1964, <https://doi.org/10.1525/9780520328266>.
- [2.] D. Cenciotti, "These devices make stealth aircraft visible on radar screens," The Aviation Geek Club. [Online]. Available: <https://theaviationgeekclub.com/these-devices-make-stealth-aircraft-visible-on-radar-screens/>. [Accessed: Mar. 4, 2026].
- [3.] S. Fuchs, G. von Freymann, and H. Wegener, "Luneburg lens in silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 6, pp. 5156–5161, 2011, <https://doi.org/10.1364/OE.19.005156>.
- [4.] U. Leonhardt and T. G. Philbin, *Geometry and Light: The Science of Invisibility*. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2010.
- [5.] Radionix LLC, "Experimental and theoretical studies of RCS of Luneburg lenses: Technical report," Kyiv, Ukraine, 2025. (in Ukrainian)
- [6.] B. Fuchs, L. Le Coq, O. Lafond, and S. Rondineau, "Design optimization of multishell Luneburg lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 2, pp. 283–289, Feb. 2007, <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.889849>.
- [7.] W. E. Kock, "Metal-lens antennas," *Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 11, pp. 828–836, 1948, <https://doi.org/10.1063/1.1723441>.
- [8.] J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Dielectric lens antennas," preprint. [Online]. Available: https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/11959/1/pre_print_Dielectric_Lens_Antennas_v2.pdf. [Accessed: Mar. 4, 2026].
- [9.] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, *Radar Cross Section Handbook*, vol. 2. New York, NY, USA: Plenum Press, 1970, pp. 605–612.
- [10.] J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Dielectric lens antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 3, pp. 13–24, Jun. 2005, <https://doi.org/10.1109/MAP.2005.148777>.
- [11.] H. Oraizi and A. Abdolali, "Design and optimization of spherical lens antennas including Luneburg lens," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 118, pp. 321–340, 2011, <https://doi.org/10.2528/PIER11081404>.