



ІВАНЕЦЬ ГРИГОРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

*кандидат технічних наук, доцент,
старший науковий співробітник,
Харківський національний університет
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
<https://orcid.org/0000-0002-4906-5265>*



ГОРЕЛИШЕВ СТАНІСЛАВ АНАТОЛІЙОВИЧ

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри тактики,
Національна академія Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>*



ІВАНЕЦЬ МИХАЙЛО ГРИГОРОВИЧ

*кандидат технічних наук, старший дослідник,
провідний науковий співробітник – провідний інженер-випробувач,
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки
<https://orcid.org/0000-0002-3106-7633>*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЕФЕКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ РОЗСІЮВАННЯ ЛІНЗОВИХ ІМІТАТОРІВ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ ДЛЯ РІЗНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Підтримання підрозділів протиповітряної оборони у складі частин Збройних Сил України та Національної гвардії України у постійній бойовій готовності до виконання бойових завдань передбачає під час військових навчань з особовим складом проведення бойових стрільб по сучасних повітряних мішенях. Повітряні мішені імітують реально існуючі засоби повітряного нападу противника, а під час ведення бойових дій використовуються як хибні повітряні цілі. Одним із найперспективніших пасивних імітаторів ефективною поверхні розсіювання повітряних цілей у радіолокаційному діапазоні хвиль є багатошарова лінза Люнеберга.

Під час створення таких лінзових імітаторів дискретність зміни її частотна залежність діелектричної проникності, а також додаткові технологічні похибки призводять до зменшення значення їх ефективною площі розсіювання порівняно з теоретичними. Цю обставину необхідно брати до уваги у процесі створення конкретних мішеней або хибних повітряних цілей.

Розроблено алгоритм розрахунково-експериментального способу оцінювання реальних значень ефективною поверхні розсіювання пасивних імітаторів на основі лінз Люнеберга з використанням бездунної камери. Вимірювання та оцінювання реального значення ефективною поверхні розсіювання лінзових імітаторів ґрунтується на використанні еталонного відбивача у вигляді металеві сфери з відомою ефективною поверхнею розсіювання.

Результати експериментальних досліджень засвідчили, що показники ефективною поверхні розсіювання імітаторів повітряних цілей залежать як від діелектричного матеріалу, технології, так і від частоти опромінення.

***Ключові слова:** ефективна поверхня розсіювання; імітатор повітряної цілі; лінза Люнеберга; діелектричний матеріал; технологія; еталонна сфера.*

Постановка проблеми. Підтримання підрозділів протиповітряної оборони (ППО) у складі частин Збройних Сил України і Національної гвардії України у постійній бойовій готовності до виконання бойових завдань передбачає під час військових навчань з особовим складом проведення бойових стрільб по сучасних повітряних мішенях. Повітряні мішені імітують реально існуючі сучасні засоби повітряного нападу противника, а також хибні цілі під час ведення бойових дій. Головним елементом цільового спорядження сучасних і перспективних мішеневих БПЛА є засоби імітування ефективною поверхні розсіювання (ЕПР) повітряних цілей різних типів. Сьогодні у провідних країнах світу та Європейського Союзу найперспективнішим напрямом створення пасивних імітаторів ЕПР повітряних цілей у радіолокаційному діапазоні хвиль вважається використання багат шарових сферичних лінз Люнеберга (ЛЛ), які відрізняються одна від одної геометричними розмірами, матеріалом і формою металізованої поверхні [1, 2]. Вибір необхідних параметрів дає змогу значно (у десятки разів) збільшувати значення ЕПР та імітувати більш значущі цілі [3].

Використання ЛЛ в імітаторах повітряних цілей здатне значно зменшити вартість тренувань підрозділів ППО, підвищити реалізм навчальних стрільб і створювати універсальні мішені для різних сценаріїв бойових дій.

Для виготовлення сферичних ЛЛ використовуються різні діелектричні матеріали, а також різноманітні діелектричні композиційні матеріали, зокрема синтетичний полімер і діелектричні речовини. Під час створення сферичних імітаторів повітряних цілей у вигляді багат шарових ЛЛ властивості діелектричного матеріалу, дискретність зміни діелектричної проникності та невиконання особливостей технології виготовлення призводять до погіршення значень їх ЕПР порівняно з теоретично можливими.

Отже, виникає потреба у дослідженні впливу діелектричного матеріалу й технології виготовлення ЛЛ на значення ЕПР імітаторів повітряних цілей, виготовлених на їх основі. Зазначене варто враховувати під час створення повітряних мішеней і хибних повітряних цілей із заданими значеннями ЕПР на конкретній частоті їх опроміювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання щодо використання діелектричних

матеріалів із різними властивостями, особливостей технології виготовлення та застосування сферичних ЛЛ як пасивних імітаторів повітряних цілей висвітлено у низці праць. Авторами дослідження [3] розглянуто властивості діелектричних та різних композиційних матеріалів, які можуть застосовуватися для виготовлення сферичних ЛЛ, зокрема пінні діелектричні матеріали, пінополістирол, пінопласт і т. ін. Композиційні діелектричні матеріали містять синтетичний полімер і різноманітні керамічні порошки. Вони мають невелику вагу і хороші діелектричні властивості, що уможливило створення різних конструкцій сферичних ЛЛ.

У працях [4–7] авторами описано сферичні ЛЛ, виготовлені з використанням різних технологій тривимірного друку. Так, у [4, 5] розглянуто підхід до створення сферичної ЛЛ із радіальними отворами, а у працях [6, 7] – сферичні ЛЛ у вигляді діелектричних кубиків різного розміру. Досліджується, яким чином на діелектричну проникність і тангенс кута втрати еквівалентних матеріалів лінз можуть впливати форми й напрями отворів і пористість. Проте за цією технологією створено лише ЛЛ із двома шарами, що не дає змоги у повному обсязі зменшити дискретність змін діелектричної проникності.

У працях [8, 9] розглянуто питання створення багат шарових ЛЛ із плавним характером діелектричної проникності. Водночас використано такий підхід, що діелектрична проникність кожного шару постійна, але дискретно змінюється від одного шару до іншого. Науковці зазначають, що реалізація ЛЛ із кількістю шарів більше 10 недоцільна і суттєво не змінює характеристик лінзи. На практиці найбільша технологічність властива 4 – 6-шаровим лінзам.

Авторами праці [9] проведено й порівняльний аналіз різних способів пошарової апроксимації сферичних ЛЛ, як-от: розбиття лінзи на шари за показником заломлення; рівномірне розбиття за діелектричною проникністю; рівномірне розбиття по радіусу. Унаслідок досліджень встановлено, що найкраще наближення діелектричної проникності до теоретичного закону зміни для шестишарової ЛЛ забезпечується в разі рівномірного розбиття її на шари по радіусу. Водночас середня абсолютна похибка наближення діелектричної проникності до теоретичного значення становить не більше 6,7 %.

Процеси виготовлення ЛЛ за допомогою друкування на 3D-принтері з використанням технології струминної полімеризації розглянуто у дослідженні [10]. Особливість таких ЛЛ полягає в тому, що до структури тіла лінзи входять електромагнітні кристали. При цьому як основний матеріал тіла лінзи використовується неоднорідний діелектрик. Зміна параметрів діелектрика відбувається шляхом контролю щільності його заповнення під час 3D-друкування. У процесі створення ЛЛ діелектрична проникність має змінюватися від двох одиниць у центрі до однієї одиниці поблизу поверхні.

У праці [11] наведено приклади реалізації багатошарових ЛЛ з елементів у вигляді півсфер різного радіуса. Ці елементи виготовлені з пористого діелектрика або пінополістиролу. Автори зазначають, що такий спосіб виготовлення складний, а похибки щодо точності виконання шарів під час їх збільшення погіршують відбивні характеристики лінзи.

У працях [12–15] досліджується ефективність застосування кутикових і лінзових імітаторів сучасних повітряних цілей. Результати показали, що серед кутикових імітаторів найбільшу ЕПР забезпечує квадратний імітатор, але водночас він має найвужчі індикатриси в обох площинах і менш міцну конструкцію. Найбільш широкі моностаціональні індикатриси в обох площинах забезпечують трикутні імітатори, що й визначає їх переваги у використанні, попри відносно низьке значення ЕПР. За умов однакових геометричних розмірів імітатори на основі ЛЛ мають найбільшу ЕПР і дають змогу перекрити весь радіолокаційний діапазон довжин хвиль та імітувати ЕПР більшості сучасних повітряних цілей. При цьому найбільшу ЕПР забезпечують імітатори на основі сферичної ЛЛ із металізованим сегментом у вигляді «шапочки».

Отже, аналіз джерел показав, що питання впливу діелектричного матеріалу і технології виготовлення на значення ЕПР імітаторів повітряних цілей на основі багатошарових сферичних ЛЛ досліджено недостатньо. Неврахування цих питань у процесі проектування імітаторів повітряних цілей може призвести до отримання засобу з незапланованими значеннями ЕПР, появи ефекту нестабільності ЕПР у різних частотних діапазонах, деградації та температурної нестабільності, а також інших серйозних технічних проблем.

Мета статті – дослідження впливу діелектричного матеріалу та особливостей технології виготовлення на ефективну поверхню розсіювання імітаторів повітряних цілей на основі багатошарових сферичних лінз

Люнеберга для врахування у процесі створення повітряних мішеней і хибних цілей із заданими значеннями ефективної поверхні розсіювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– запропонувати методичний підхід до оцінювання впливу діелектричного матеріалу та особливостей технології виготовлення на величину ЕПР імітаторів повітряних цілей на основі сферичних ЛЛ;

– провести експериментальні дослідження щодо оцінювання реальної ЕПР імітаторів повітряних цілей на основі багатошарових сферичних ЛЛ;

– оцінити співвідношення ЕПР імітаторів повітряних цілей на основі багатошарових сферичних ЛЛ, виготовлених із різних діелектричних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Головною характеристикою засобів повітряного нападу як радіолокаційних цілей є їх ефективна поверхня розсіювання. ЕПР характеризує відбивні властивості цілі й визначає її енергетичну характеристику вторинного випромінювання у точці приймання і не залежить від інтенсивності первинної хвилі.

Одним із найбільш прийнятних і перспективних пасивних імітаторів ЕПР повітряних цілей у радіолокаційному діапазоні хвиль є ЛЛ, що являє собою багатошарову кулю з різними значеннями діелектричної проникності шарів і, відповідно, їх коефіцієнтів заломлення.

Для класичної ЛЛ без втрат діелектрична проникність плавно змінюється вздовж радіуса сфери від $\varepsilon=1$ на поверхні лінзи до $\varepsilon=2$ у центрі лінзи відповідно до закону [16]:

$$\varepsilon(a) = 2 - \left(\frac{a}{r}\right)^2, \quad (1)$$

де $\varepsilon(a)$ – функція зміни діелектричної проникності лінзи;

r – радіус лінзи, м;

a – радіальна координата довільної точки всередині лінзи, м.

Якщо частина поверхні сферичної лінзи металізована, то вона стає імітатором ЕПР, який діє у просторовому куті, що дорівнює куту, який охоплює металеве покриття. У дослідженні розглядаються пасивні імітатори ЕПР, побудовані на основі діелектричних ЛЛ сферичної форми, частина поверхні якої у вигляді «шапочки» (сегмента) металізована. Відбиття електромагнітної хвилі у діелектричній

сфері відбувається від металізованої поверхні. Максимальна моностатична ЕПР [12, 15] у такому разі визначається апертурним методом за формулою

$$S_L = 4 \frac{\pi^3 r^4 f^2}{c^2}, \quad (2)$$

де S_L – моностатична ЕПР ЛЛІ із металізованим сегментом у вигляді «шапочки», м²;

f – частота електромагнітного опромінення, Гц;

Гц;

c – швидкість світла, м/с.

Для виготовлення сферичних ЛЛІ необхідно мати діелектричний матеріал, який допускає неперервну зміну діелектричної проникності $\varepsilon(a)$ за градієнтним законом (1). У реальних умовах точно реалізувати цей закон практично неможливо. Тому на практиці створюють багатошарову конструкцію зі ступінчастою апроксимацією закону зміни діелектричної проникності. При цьому в межах одного шару такої конструкції діелектрична проникність постійна, а точність апроксимації до характеристик ідеальної лінзи із плавною зміною діелектричної проникності забезпечується за рахунок кількості й товщини шарів. Чим більша кількість шарів, тим точніше апроксимація характеристики реальної лінзи і тим ближче вона до ідеальної. Найбільш технологічним є створення 4–6-шарових лінз. ЕПР сферичних ЛЛІ, що використовуються як імітатори повітряних цілей, залежить не тільки від їх абсолютних розмірів і частоти опромінення, а й від властивостей діелектричного матеріалу і технології виготовлення ЛЛІ. Під час створення сферичних лінзових імітаторів у вигляді багатошарових конструкцій дискретність зміни діелектричної проникності й додаткові технологічні похибки призводять до зменшення значення їх ЕПР порівняно з теоретично можливим.

Як імітатори ЕПР розглядаємо шестишарові сферичні ЛЛІ із кубічними отворами, що виготовлено з різних діелектричних матеріалів. Такі ЛЛІ мають радіуси 4,5 см і металізований сегмент у вигляді «шапочки». Лінзи

виготовлено на основі технології 3D-друку із діелектричних матеріалів двох видів PET та PETG. Поліетилентерефталатгліколь (PETG) є термопластичним полієфіром, що забезпечує високу хімічну стійкість і довговічність. PETG – це адаптація PET (поліетилентерефтанату), де «G» означає гліколь. PETG властиві більша міцність і довговічність, а також він стійкіший до ударів і впливу вищих температур. Завдяки низьким температурам формування PETG його легко формувати під вакуумом і під тиском або згинати. PETG являє собою прозорий аморфний матеріал, температура силювання якого становить 80–85 °С, температура плавлення – 180–230 °С. Щільність PETG становить 1,26–1,28 кг/дм³. Діелектрична проникність PETG – у діапазоні 2,81–3,3 [17]. На відміну від PETG пластик типу PET схильний до кристалізації при високих температурах, що робить його непрозорим і послабляє його структуру.

Досліджуємо шестишарові сферичні ЛЛІ, виготовлені з різних діелектричних матеріалів на основі рівномірного розбиття лінзи на шари за діелектричною проникністю [9, 13, 17]. У цьому випадку залежність діелектричної проникності від радіуса ділиться на частини з рівним кроком по $\varepsilon(a)$, тобто радіуси шарів $r = a_1, a_2 \dots a_{N-1}, a_N = const$. Для розрахунку діелектричної проникності використовується вираз $\varepsilon'_i = \varepsilon(a_{i-1} + 0,5 \cdot (a_i - a_{i-1}))$, тобто середнє значення в кожному шарі лінзи. Тож отримуємо рівномірне розбиття за діелектричною проникністю (за $\varepsilon(a)$). Така функція апроксимації дає змогу наблизити зміну діелектричної проникності до плавного закону (1) за рахунок зміни щільності заповнення діелектрика у конструкції лінзи.

У таблиці 1 наведено параметри шарів ЛЛІ під час рівномірного розбиття лінзи на шари за діелектричною проникністю [9].

Зовнішній вигляд сферичної ЛЛІ і її поперечний розріз показано на рис. 1.

Таблиця 1 – Параметри шарів ЛЛІ

Параметри шарів	Номер шару					
	1	2	3	4	5	6
Відносний радіус шару, (a_i / r)	0,4082	0,5774	0,7071	0,8165	0,9129	1
Діелектрична проникність шарів, ε'_i	1,9583	1,7571	1,5875	1,4197	1,2523	1,0851

Джерело: розроблено авторами



а б

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд ЛЛ (а) та її поперечний розріз (б)
Джерело: розроблено авторами

Для врахування впливу діелектричного матеріалу та особливостей технології виготовлення на величину ЕПР імітаторів повітряних цілей на основі сферичних ЛЛ уведемо поняття коефіцієнта зниження, що показує, у скільки разів реальне значення ЕПР імітатора менше за теоретичне (розрахункове). Коефіцієнт зниження ЕПР являє собою відношення теоретичного (розрахункового) значення ЕПР лінзового імітатора до реального (експериментального) його значення для цієї частоти опромінення. Він характеризує залежність реальної ЕПР ЛЛ від діелектричного матеріалу та особливостей технології виготовлення, а також показує, на скільки вона зміниться порівняно з теоретичним значенням. Для імітатора повітряної цілі на основі металізованої сферичної ЛЛ у вигляді «шапочки» коефіцієнт зниження ЕПР K_{zn} визначається таким чином:

$$K_{zn} = \frac{S_L}{S_0}, \quad (3)$$

де S_L – теоретичне (розрахункове) значення ЕПР ЛЛ із металізованим сегментом у вигляді «шапочки» (2), м²;

S_0 – реальне (експериментальне) значення ЕПР ЛЛ із металізованим сегментом у вигляді «шапочки», м².

Алгоритм оцінювання впливу діелектричного матеріалу та особливостей технології виготовлення на величину ЕПР імітаторів повітряних цілей на основі сферичних ЛЛ такий.

Крок 1. Описується матеріал, розміри, особливості технології виготовлення сферичних ЛЛ, вибраних для проведення експерименту.

Крок 2. Для вибраних ЛЛ оцінюють теоретичні значення ЕПР для цієї частоти

опромінення. Для кожної металізованої сферичної ЛЛ у вигляді «шапочки» теоретичне (розрахункове) моностатичне значення ЕПР визначається відповідно до формули (2).

Крок 3. Експериментальним шляхом установлюються реальні значення ЕПР сферичних ЛЛ залежно від частоти опромінення.

Крок 4. Для вибраних ЛЛ розраховуються показники зниження ЕПР згідно з формулою (3).

Крок 5. Здійснюється аналіз отриманих результатів і формулюються висновки.

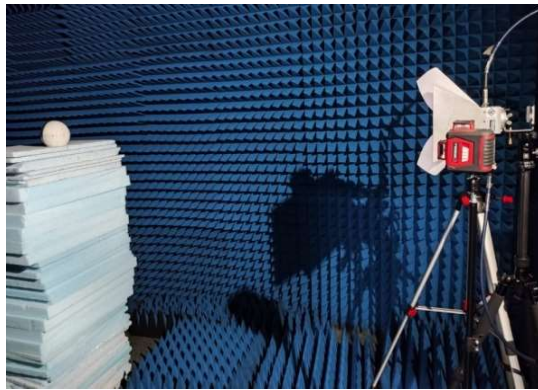
Вимірювання реального (експериментального) значення ЕПР ЛЛ S_0 проводились у безлунній камері (БЛК). Вона являє собою спеціальне приміщення, стіни якого вкриті радіопоглинальним матеріалом, що у широкий смугі частот і кутів має низький коефіцієнт відбиття під час падіння плоскої електромагнітної хвилі.

На рисунку 2 наведено загальний вигляд БЛК та обладнання експериментального вимірювального стенда, до складу якого входять: передавальна і вимірювальна антени, лазерний рівень (див. рис. 2а), а також портативний векторний аналізатор ланцюгів (НВЧ-аналізатор FieldFox) (див. рис. 2б).

Експериментальна установка (вимірювальний стенд) у такій конфігурації дає змогу вимірювати значення моностатичної ЕПР об'єктів у діапазоні частот 4–15 ГГц.

Вимірювання реального значення ЕПР сферичних ЛЛ ґрунтується на використанні еталонного відбивача з відомою ЕПР S_E .

Сутність способу полягає в тому, що вимірюють потужність прийнятого сигналу, відбитого і від еталонного відбивача P_E з відомою ЕПР S_E , і від сферичних ЛЛ, ЕПР яких необхідно визначити P .



а



б

Рисунок 2 – Обладнання вимірювального стенда:
а – передавальна, вимірювальна антени і лазерний рівень;
б – KeysightN9951A – портативний НВЧ-аналізатор FieldFox
Джерело: розроблено авторами

Тоді реальне (експериментальне) значення ЕПР сферичних ЛЛ S_0 обчислюється за формулою

$$S_0 = S_E \frac{P}{P_E}, \quad (4)$$

де S_E – ЕПР еталонного відбивача, м²;

P – потужність прийнятого сигналу від сферичних ЛЛ, дБ;

P_E – потужність прийнятого сигналу від еталонного відбивача, дБ.

Оскільки потужність прийнятих сигналів вимірюється у децибелах, то співвідношення (P/P_E) записується таким чином:

$$\frac{P}{P_E} = 10^{0,1U}, \quad (5)$$

де $U = P - P_E = 10 \lg P - 10 \lg P_E = 10 \lg(P/P_E)$ – різниця прийнятих сигналів, дБ.

З урахуванням виразу (5) вираз (4) набуде вигляду

$$S_0 = S_E \cdot 10^{0,1U}. \quad (6)$$

Як еталонний відбивач (еталон) ЕПР під час експерименту вибрано металічну сферу з радіусом $a = 4,5$ см. Для обчислення ЕПР еталонної сфери використовують такі формули [18]:

$$S_E = S_m \cdot F(ka), \quad (7)$$

де

$$S_m = \pi a^2, \quad (8)$$

$$F(ka) = \left| \frac{2}{ka} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot (2n+1) \cdot \left\{ \frac{J_n(ka)}{h_n^{(1)}(ka)} - \frac{\frac{d}{ka}(ka \cdot J_n(ka))}{\frac{d}{ka}(ka \cdot h_n^{(1)}(ka))} \right\} \right|^2, \quad (9)$$

$$J_n(ka) = \sqrt{\frac{\pi}{2ka}} \cdot J_{n+\frac{1}{2}}(ka), \quad (10)$$

$$h_n^{(1)}(ka) = \sqrt{\frac{\pi}{2ka}} \cdot H_{n+\frac{1}{2}}^{(1)}(ka), \quad (11)$$

де a – радіус сфери, м;

S_m – максимальна ЕПР еталона (сфери), м²;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, м⁻¹;

$J_n(ka)$ – сферична функція Бесселя;

$h_n^{(1)}(ka)$ – сферична функція Ханкеля;

$J_{n+\frac{1}{2}}(ka)$ – функція Бесселя першого роду;

$H_{n+\frac{1}{2}}^{(1)}(ka)$ – функція Ханкеля першого роду.

Значення ЕПР еталона (сфери) з радіусом $a = 4,5$ см залежно від частоти опромінення наводимо на рис. 3.

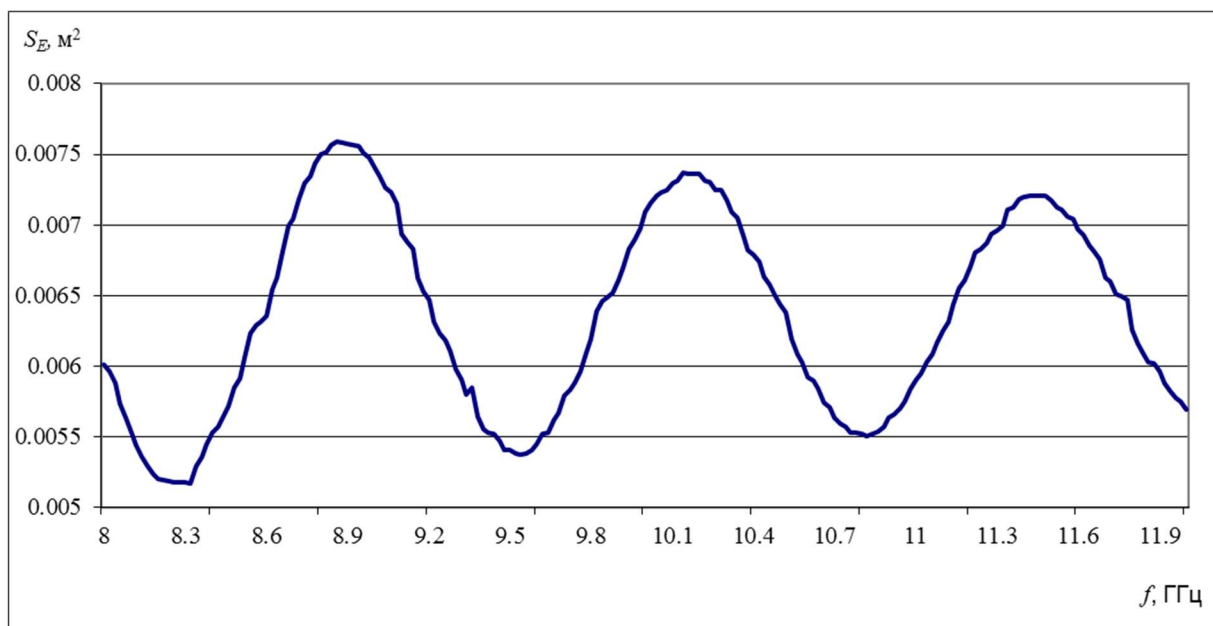


Рисунок 3 – Значення ЕПР еталонної сфери залежно від частоти опромінення
Джерело: розроблено авторами за даними [18]

Під час проведення експерименту мінімальна відстань R_{\min} до сферичних ЛЛ визначається відповідно до виразу [19]:

$$R_{\min} = \frac{\pi \cdot f \cdot a^2}{\Delta\phi \cdot c}, \quad (12)$$

де $\Delta\phi = \frac{\pi}{8}$ – максимальна похибка фази на краю еталона, що досліджується.

Отже, методика розрахунково-експериментального способу вимірювання реальних значень ЕПР сферичних ЛЛ полягає в такому:

а) для заданої частоти опромінення за допомогою експериментальної установки (вимірювального стенда) БЛК вимірюються потужності відбитих сигналів у децибелах від сферичних ЛЛ (P) та еталона (P_E) відповідно;

б) на основі експериментальних даних знаходиться різниця прийнятих сигналів U у децибелах;

в) проводиться розрахунок ЕПР еталонної металічної сфери S_E відповідно до виразу (7);

г) обчислюються теоретичні моностатичні ЕПР сферичних ЛЛ S_0 для заданої частоти опромінення згідно з виразом (6);

д) проводиться аналіз отриманих результатів і формулюються висновки.

Частотні залежності теоретичного значення ЕПР і реальних значень ЕПР для ЛЛ, виготовлених із матеріалу типу РЕТ та РЕТG, наведено на рис. 4.

Аналіз отриманих результатів (див. рис. 4) показав, що відбивні властивості ЛЛ залежать як від діелектричного матеріалу, з якого їх виготовлено, так і від частоти опромінення. На одних відрізках частот відбивні властивості (ЕПР) лінзи із діелектричного матеріалу типу РЕТG перевершують відбивні властивості (ЕПР) лінз із діелектричного матеріалу типу РЕТ, а на інших ділянках частот навпаки – лінза із діелектричного матеріалу типу РЕТ перевершує відбивні властивості (ЕПР) лінзи із діелектричного матеріалу типу РЕТG.

Залежності коефіцієнта зниження ЕПР K_{zn} від частоти для ЛЛ, виготовлених із матеріалу типу РЕТ та РЕТG, подано на рис. 5.

Аналіз одержаних результатів (див. рис. 5) показав, що коефіцієнти зниження ЕПР ЛЛ також залежать і від діелектричного матеріалу, з якого їх виготовлено, і від частоти опромінення. Для ЛЛ, виготовлених із діелектричного матеріалу типу РЕТ, значення коефіцієнта зниження ЕПР K_{zn} перебуває в діапазоні 1,45–2,43, а для ЛЛ із діелектричного матеріалу типу РЕТG – у діапазоні 1,53–2,27.

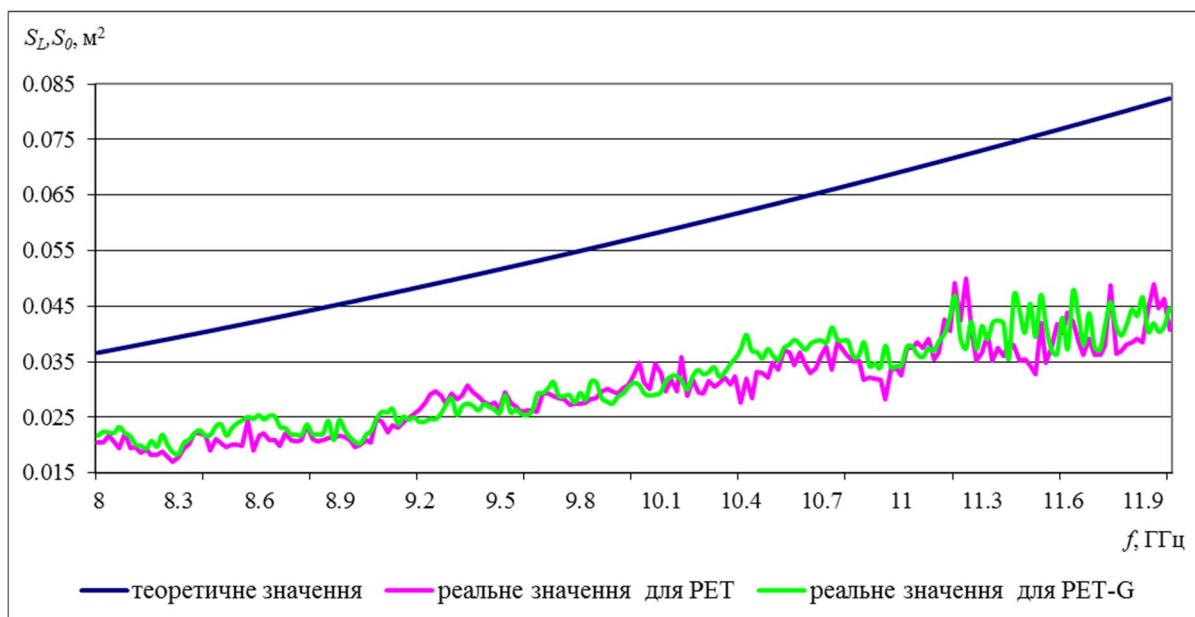


Рисунок 4 – Частотні залежності теоретичного і реального значень ЕПР для ЛЛ із металізованим сегментом у вигляді «шапочки» для діелектричних матеріалів типу PET та PETG
Джерело: розроблено авторами

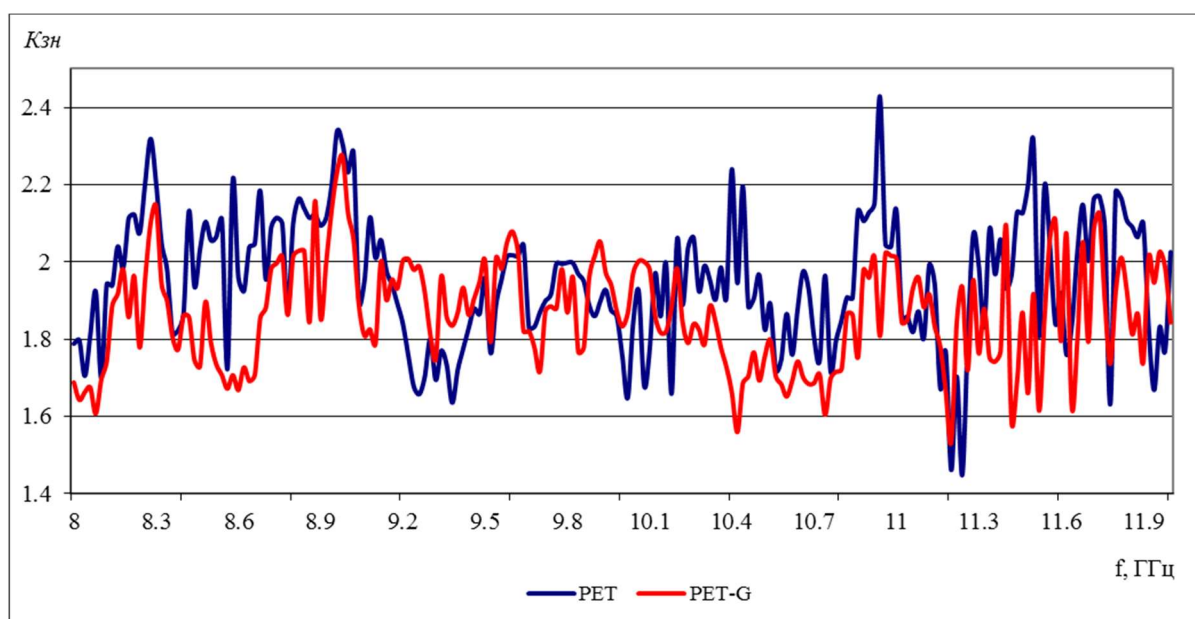


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта зниження ЕПР від частоти для ЛЛ із металізованим сегментом у вигляді «шапочки» для діелектричних матеріалів типу PET та PETG
Джерело: розроблено авторами

Середнє значення K_{zn} для ЛЛ із діелектричного матеріалу типу PET становить 1,95, тобто в середньому реального значення ЕПР такої лінзи менше теоретичного на 2,9 дБ. Середнє значення K_{zn} для ЛЛ із діелектричного матеріалу типу PETG становить 1,86, тобто в

середньому реального значення ЕПР такої лінзи менше за теоретичне на 2,7 дБ.

Отже, результати експериментальних досліджень показали, що відбивні властивості лінзи з діелектричного матеріалу типу PETG на 0,2 дБ перевершують відбивні властивості (ЕПР) лінз із діелектричного матеріалу типу PET.

Висновки й перспективи подальших досліджень.

1. У процесі виготовлення імітаторів повітряних цілей на основі багатошарових ламп Люнеберга властивості діелектричного матеріалу, дискретність зміни діелектричної проникності та особливості технології виготовлення призводять до зменшення їх ефективної поверхні розсіювання порівняно з теоретичним значенням. Запропоновано методичний підхід до оцінювання впливу цих факторів на величину зміни реальної ЕПР імітаторів повітряних цілей.

2. Розроблено алгоритм розрахунково-експериментального способу оцінювання реальних значень ЕПР імітаторів повітряних цілей на основі багатошарових сферичних ЛЛ із використанням безлунних камер. Вимірювання й оцінювання реального значення ЕПР сферичних ЛЛ ґрунтується на використанні еталонного відбивача у вигляді металевої сфери з відомою ЕПР.

3. Результати експериментальних досліджень засвідчили, що показники зниження ЕПР імітаторів повітряних цілей порівняно з теоретичними значеннями для діелектричних матеріалів типу PET та PETG залежать як від діелектричного матеріалу, з якого їх виготовлено, так і від частоти опромінення. Середнє значення коефіцієнта зниження ЕПР для ЛЛ із діелектричного матеріалу типу PET становить близько 2,9 дБ, а для ЛЛ із діелектричного матеріалу типу PETG – близько 2,7 дБ.

Отримані результати дослідження будуть використовуватися на практиці під час проєктування компактних і дешевих імітаторів повітряних цілей із заданими відбивними характеристиками, а також у процесі створення хибних цілей, що ускладнюють роботу ППО противника.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на виявлення залежностей від частоти опромінення характеристик нових більш дешевих та ефективніших діелектричних матеріалів, із яких можливо створювати імітатори повітряних цілей.

Перелік джерел посилання

1. Military unmanned systems. Annual Handbook. Iss. 29. Shephard, May 2021. 392 p.

2. Air target: Power of Precision. Military System & Technology. URL: <https://surl.li/grkggl> (accessed: 25 February 2025).

3. Bor, J., Lafond, O., Merlet, H., Le Bars, P., Himdi, M. Foam Based Luneburg Lens Antenna at 60 GHz. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. 2014. Vol. 44. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIERL13092405>.

4. Changsheng, D., Ziqing, C., Yong, L., Haidong, W., Chao, J., Shiwes, Y. Permittivity of composites used for Luneburg lens antennas by drilling holes based on 3-D printing technique. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*. 2017. Vol. 15 (4). P. 646–651.

5. Liang, M., Ng, W. R., Chang, K., Gbele, K., Gehm, M. E., Xin, H. A 3-D Luneburg Lens Antenna Fabricated by Polymer Jetting Rapid Prototyping. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*. 2014. Vol. 62 (4). P. 1799–1807.

6. Larimore, Z., Jensen, S., Good, A., Lu, A., Suarez, J., Mirotznik, M. Additive Manufacturing of Luneburg Lens Antennas Using Space-Filling Curves and Fused Filament Fabrication. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*. 2018. Vol. 66 (6). P. 2818–2827.

7. Xin H., Liang M. 3D printed microware and THz devices using polymer jetting techniques. *Proceeding of the IEEE*. 2017. Vol. 105 (4). P. 737–755.

8. Fuchs B., Coq Le L., Lafond O., Rondineau S. Design optimization of multishell Luneburg Lenses. *IEEE Trans. AP*. 2007. Vol. 55, no. 2. P. 283–289.

9. Розробка методики пошарової апроксимації сферичних лінз Люнеберга / Г. В. Іванець та ін. *Випробування та сертифікація*. Черкаси, 2025. Вип. 1 (7). С. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.07.2025.07>.

10. Kubach, A., Shoykhetbrod, A., Herschel, R. 3D Printed Luneburg Lens for Flexible Beam Steering at Millimeter Wave Frequencies. *IEEE 47th European Microwave Conference (EuMC)*. 2017. P. 234–247.

11. Baev, S., Hadjistamov, B., Dankov, P. Luneburg Lenses as Communication Antennas. *Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculte de Physique*. 2009. No. 102. P. 67–84.

12. Волинець В. Л., Мамонова Н. Л., Нельсон О. В. Порівняльний аналіз пасивних засобів імітування ефективної площі розсіювання повітряних цілей. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2014. Вип. № 10 (17). С. 66–71.

13. Baldauf, J., Lee, S.-W., Lin, L., Jeng, S.-K., Scarborough, S. M., Yu, C. L. High frequency scattering from trihedral corner reflectors and other benchmark targets: SBR versus experiment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1991. Vol. 39 (9). P. 1345–1351. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.99043>.

14. Zaker, Reza & Sadeghzadeh, Arezoo. Passive techniques for target radar cross section reduction: A comprehensive review. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020. Vol. 30 (8). e22411. DOI: <https://doi.org/10.1002/mmce.22411>.

15. Обґрунтування доцільності створення перспективних повітряних мішеней на основі лінз Люнеберга / Г. В. Іванець та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Машинознавство та САІР*. 2024. № 2. С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.2.07>.

16. Sayanskiy A., Glybovski S., Akimov V., Belov P., Meshkovskiy I. Broadband 3D Luneburg lens based on met-amaterials of radially diverging dielectric rods. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2017. Vol. 16. P. 1520–1523.

17. Malkin A. I., Knyazev N. S. Dielectric permittivity and permeability measurement system. *REIT*. 2017. Vol. 1814. P. 45–51. URL: <https://surl.li/qiiyem> (accessed: 2 May 2025).

18. Можаров Є. О., Галкін Н. К. Калібрування ширококутового стенду для вимірювання характеристик об'єктів. *Журнал радіоелектроніки*. 2018. № 10. С. 15–25.

19. Скосирьов В. М. Підвищення інформативності радіолокаційних систем на основі технологій надширококутових сигналів. *Журнал радіоелектроніки*. 2012. № 7. С. 1–10.

Reference

1. NATO (2021). Military unmanned systems. Annual Handbook. Iss. 29. Shephard [in English].

2. Military System & Technology (2025). Air target: Power of Precision. Retrieved from: <https://surl.li/grkggg> (accessed 25 February 2025) [in English].

3. Bor, J., Lafond, O., Merlet, H., L Bars, P., Himdi, M. (2014). Foam Based Luneburg Lens Antenna at 60 GHz. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, no. 44, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIERL13092405> [in English].

4. Changsheng, D., Ziqing, C., Yong, L., Haidong, W., Chao, J., Shiwes, Y. (2017).

Permittivity of composites used for Luneburg lens antennas by drilling holes based on 3-D printing technique. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, no. 15 (4), pp. 646–651 [in English].

5. Liang, M., Ng, W. R., Chang, K., Gbele, K., Gehm, M. E., Xin, H. (2014). A 3-D Luneburg Lens Antenna Fabricated by Polymer Jetting Rapid Prototyping. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, no. 62 (4), pp. 1799–1807 [in English].

6. Larimore, Z., Jensen, S., Good, A., Lu, A., Suarez, J., Mirotznik, M. (2018). Additive Manufacturing of Luneburg Lens Antennas Using Space-Filling Curves and Fused Filament Fabrication. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, no. 66 (6), pp. 2818–2827 [in English].

7. Xin, H., Liang, M. (2017). 3D printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques. *Proceeding of the IEEE*, no. 105 (4), pp. 737–755 [in English].

8. Fuchs, B., Coq, Le L., Lafond, O., Rondineau, S. (2007). Design optimization of multishell Luneburg Lenses. *IEEE Trans. AP*, no. 55 (2), pp. 283–289 [in English].

9. Ivanets H. V., Horielyshev S. A., Ivanets M. H., Voinov V. V., Stavtyskiy O. M., Baulin D. S. (2025). *Rozrobka metodyky posharovoi aproksymatsii sferychnykh linz Liuneberha* [Development of a method for layer-by-layer approximation of Lüneberg spherical lenses]. *Vyprobuvannia ta sertyfikatsiia*, no. 1 (7), pp. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.07.2025.07> [in Ukrainian].

10. Kubach, A., Shoykhetbrod, A., Herschel, R. (2017). 3D Printed Luneburg Lens for Flexible Beam Steering at Millimeter Wave Frequencies. *IEEE 47th European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 234–247 [in English].

11. Baev, S., Hadjistamov, B., Dankov, P. (2009). Luneburg Lenses as Communication Antennas. *Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculte de Physique*, no.102, pp. 67–84 [in English].

12. Volynets V. L., Mamonova N. L., Nelson O. V. (2014). *Porivnialnyi analiz pasyvnykh zasobiv imituvannia efektyvnoi ploshchi rozsiuvannia povitrianykh tsilei* [Comparative analysis of passive means of simulating the radar cross section of air targets]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo naukovо-doslidnogo instytutu aviatsii*, no.10 (17), pp. 66–71 [in Ukrainian].

13. Baldauf, J., Lee, S.-W., Lin, L., Jeng, S.-K., Scarborough, S. M., Yu, C. L. (1991). High frequency scattering from trihedral corner reflectors and other benchmark targets: SBR versus experiment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, no. 39 (9), pp. 1345–1351. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.99043redf> [in English].

14. Zaker, Reza & Sadeghzadeh, Arezoo. (2020). Passive techniques for target radar cross section reduction: A comprehensive review. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, no. 30 (8), e22411. DOI: <https://doi.org/10.1002/mmce.22411> [in English].

15. Ivanets H. V., Voinov V. V., Horielyshev S. A., Nakonechnyi O. A., Ivanets M. H., Vasylieva O. M., Bashtakov Ye. H. (2024). *Obgruntuvannya dotsilnosti stvorennia perspektivnykh povitrianykh mishenei na osnovi linz Liuneberha* [Justification of the feasibility of creating promising air targets based on Luneberg lenses]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 2, pp. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.2.07> [in Ukrainian].

16. Sayanskiy, A., Glybovski, S., Akimov, V., Belov, P., Meshkovskiy, I. (2017). Broadband 3D Luneburg lens based on met-amaterials of radially diverging dielectric rods. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, no. 16, pp. 1520–1523 [in English].

17. Malkin, A. I., Knyazev, N. S. (2017). Dielectric permittivity and permeability measurement system. *REIT*, pp. 45–51. Retrieved from: <https://surl.li/qiiyem> (accessed 2 May 2025) [in English].

18. Mozharov Ye. O., Halkin N. K. (2018). *Kalibruvannya shyrokosmuhovoho stendu dlia vymiryuvannya kharakterystyk ob'ektiv* [Calibration of a broadband stand for measuring the characteristics of objects]. *Zhurnal radioelektroniky*, no. 10, pp. 15–25 [in Ukrainian].

19. Skosyrov V. M. (2012). *Pidvyshchennia informatyvnosti radiolokatsiinykh system na osnovi tekhnolohii nadshyrokosmuhovyykh syhnaliv* [Increasing the information content of radar systems based on ultra-wideband signal technologies]. *Zhurnal radioelektroniky*, no. 7, pp. 1–10 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції / Received: 05.06.2025

Прорецензовано / Revised: 20.06.2025

Схвалено до друку / Accepted: 25.06.2025

IVANETS HRYHORII

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher, Ivan Kozhedub National Air Force University
<https://orcid.org/0000-0002-4906-5265>*

HORIELYSHEV STANISLAV

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Tactics,
National Academy of the National Guard of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>*

IVANETS MYKHAILO

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Leading Researcher – Leading Test Engineer,
State Research Institute for Testing and Certification
of Armament and Military Equipment
<https://orcid.org/0000-0002-3106-7633>*

DEFINING THE FREQUENCY DEPENDENCIES OF THE RADAR CROSS SECTION OF LENS SIMULATORS OF AIR TARGETS FOR VARIOUS DIELECTRIC MATERIALS

The main characteristic of air attack weapons, such as radar targets is their radar cross section. This parameter characterises the reflective properties of the target and determines its energy characteristics in terms of secondary radiation at the reception point and does not depend on the intensity of the primary wave.

One of the most acceptable and promising passive simulators of the radar cross section of air targets in the radar wave range is the multilayered Luneburg lens. However, when manufacturing spherical lens-based simulators as multilayer structures, the discreteness of dielectric permittivity and additional technological errors lead to a reduction in their radar cross section compared to theoretically achievable values.

A methodological approach has been proposed to evaluate the influence of these factors on the deviation of the actual radar cross section of lens-based simulators from their theoretical values.

An algorithm for a computational and experimental method has been developed to estimate the real values of the radar cross section of passive simulators based on multilayered spherical Luneburg lenses using anechoic chambers. The measurement and evaluation of the real radar cross section of lens-based simulators rely on a reference reflector in the form of a metal sphere with a known radar cross section.

The experimental results demonstrated that the reduction in radar cross section of air target simulators compared to theoretical values depends on both the dielectric material (such as PET and PETG) and the irradiation frequency. The average radar cross section reduction coefficient for simulators made of PET-type dielectric material is approximately 2.9 dB.

The obtained research results will be used in practice in the design of compact and cheap air target simulators with specified reflective characteristics, as well as in the creation of false targets that complicate the work of enemy air defenses.

Keyword: *radar cross section; air target simulator; Luneburg lens; dielectric material; technology; reference sphere; anechoic chamber.*