

ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-1-8-92-99

УДК 623.462.22(075.8)

¹**Миронюк Микола Юрійович** (кандидат технічних наук, старший дослідник)

<https://orcid.org/0000-0002-7164-2700>

²**Іванець Григорій Володимирович** (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-4906-5265>

³**Іванець Михайло Григорович** (кандидат технічних наук, старший дослідник)

<https://orcid.org/0000-0002-3106-7633>

²**Воїнов Валерій Вікторович** (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-5732-5960>

¹*Національний університет оборони України, Київ, Україна*

²*Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків*

³*Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси*

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ДОВЖИНИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ ОПРОМІНЕННЯ СФЕРИЧНИХ ЛІНЗОВИХ ІМІТАТОРІВ НА ОСНОВІ ВХІДНИХ ДАНИХ ПРО ЕФЕКТИВНУ ПЛОЩУ РОЗСІЮВАННЯ ЦІЛІ

Боездатність є основним показником бойової готовності військового підрозділу, яка характеризує можливості вести бойові дії та виконувати бойові завдання. Підтримання підрозділів та частин протиповітряної оборони Сухопутних військ у постійній бойовій готовності до виконання поставлених завдань неможливе без проведення достатньої кількості військових навчань із застосуванням бойових засобів ураження сучасних повітряних мішеней, що імітують реально існуючі на цей час засоби повітряного нападу, а також хибні цілі при веденні бойових дій.

Одним із основних елементів цільового спорядження сучасних та перспективних мішеневих безпілотних авіаційних комплексів є засоби імітування ефективної площі розсіювання повітряних цілей різних типів в радіолокаційному діапазоні хвиль надвисоких частот. Найбільш прийнятним пасивним імітатором ефективної площі розсіювання повітряних цілей є лінза Люнеберга. Розроблено методичку оцінювання довжини хвилі опромінення пасивного імітатора ефективної площі розсіювання на основі сферичних лінз Люнеберга. Вона дозволяє визначити реальну довжину радіохвилі опромінення та уточнювати параметри сферичної лінзи для імітації повітряної цілі із заданою ефективною площею розсіювання при сталому радіусі лінзи.

Ключові слова: *лінзові імітатори повітряних цілей, повітряна мішень, засоби повітряного нападу, ефективна площа розсіювання, методика.*

Вступ

Обороноздатність держави характеризує її здатність до захисту у разі збройної агресії або збройного конфлікту. В сучасних умовах при появі нових воєнних загроз національній безпеці України вирішальне значення відводиться готовності особового складу Збройних Сил України (ЗСУ) до виконання завдань за призначенням [1].

Успішність виконання бойових завдань військовими підрозділами визначається їх боездатністю, тобто таким станом військового підрозділу, який дозволяє їм успішно вести бойові дії в будь-яких умовах обстановки й реалізувати свої бойові можливості. Боездатність є основним

показником бойової готовності військового підрозділу, яка характеризує можливості вести бойові дії та виконувати бойові завдання [2].

До складу військ протиповітряної оборони Сухопутних військ (ППО СВ) входять частини та підрозділи, що озброєні:

зенітними ракетними комплексами;
зенітним артилерійським і комбінованим озброєнням;
радіотехнічними системами.

Одне із важливих завдань, яке покладається на війська ППО у складі Сухопутних військ, полягає у захисті військ, критичних об'єктів інфраструктури держави від ударів повітряного нападу противника при веденні бойових дій.

Підтримання військ (сил) у постійній бойовій готовності неможливе без проведення достатньої кількості військових навчань із застосуванням бойових засобів ураження сучасних повітряних мішеней (ПМ), що імітують реально існуючі на цей час засоби повітряного нападу, а також хибні цілі при веденні бойових дій [3].

Одним із перспективних напрямів розвитку мішеневої обстановки є створення ПМ на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з використанням лінз Люнеберга (ЛЛ). Переваги таких ПМ полягають в наступному:

значне зменшення габаритних розмірів мішеней в порівнянні з літальними апаратами, що імітуються;

простота побудови та відносно низька вартість виробництва.

З огляду на зазначене, виникає необхідність оцінювання довжини хвилі опромінення пасивного імітатора повітряної цілі на основі сферичних ЛЛ із заданими характеристиками.

Проблемам побудови та створення перспективних пасивних імітаторів повітряної цілі присвячена ціла низка робіт.

Так в роботі [4] надано результати стану оснащення авіації збройних сил різних країн ПМ. Наведені приклади бойового застосування ПМ у якості авіаційних хибних цілей, їхні тактико-технічні характеристики (ТТХ) та ефективність використання. Сформовано технічний обрис сучасного комплексу ПМ та висвітлено напрацювання вітчизняних підприємств зі створення такої техніки.

Авторами робіт [5-7] проведено порівняльний аналіз засобів імітування ефективної площі розсіювання (ЕПР) на основі кутикових відбивачів, самофокусуючих антенних решіток, ЛЛ та двоточкового імітатора з жорсткою в'язкою. За результатами порівняльного аналізу найбільш прийнятним пасивним імітатором ЕПР повітряних цілей в радіолокаційному діапазоні хвиль є ЛЛ, для якої характерні наступні особливості:

повна заміна кутикових імітаторів із забезпеченням функціонування в більш широкому кутовому секторі;

незалежність від напряму векторів електромагнітного поля;

частотна діапазонність, яка визначається тільки частотною діапазонністю опромінювача лінзи;

синфазність електромагнітного поля в апертурі лінзи, яка не порушується, якщо довжина шляхів двох променів в лінзі буде відрізнятися на ціле число довжин хвиль.

В роботах [8, 9] проведено аналіз перспективних зразків ПМ, які застосовуються у збройних силах США. Наведені дані показали, що 67,5% з них оснащені реактивними двигунами і є високошвидкісними літаками з максимальною швидкістю польоту 600...900 км/год, здатними імітувати тактичні бойові літаки та крилаті ракети.

Сучасні і перспективні ПМ можуть використовуватися і як хибні повітряні цілі [10] під час бойових дій з метою виявлення засобів ППО противника та відволікання їх від справжніх

літальних апаратів, що змушує противника максимально витратити засоби ураження зенітно-ракетних комплексів. Так під час війни у Лівані 1982 року ізраїльські БПЛА допомагали у виявленні сирійських систем ППО, США використовували хибні цілі у війні в Перській затоці проти іракської ППО. У 2020 році азербайджанські війська у війні з Вірменією за Нагірний Карабах активно застосовували у якості авіаційних хибних цілей літаки АН-2, десятки яких були спеціально переобладнані у безпілотний варіант [11].

Російськими військами у війні з Україною також застосовувалися ПМ типу Е-95М, "Дань" власного виробництва, які також у своєму складі мають ЛЛ, у якості хибних цілей з метою виявлення районів розгортання українських систем ППО [12].

ЛЛ, прикріплена до БПЛА, збільшує його радіолокаційну помітність, "перетворюючи" його, наприклад, на гелікоптер [13]. Це змушує противника вжити заходів ППО із використанням ракет або зенітних гармат. У разі масованого застосування дронів, оснащених лінзою, можна ввести в оману радіолокаційні підрозділи противника, які попередять про наближення до об'єкту прикриття бойових гелікоптерів. Так можна виявити не тільки дислокацію систем ППО протидіючої сторони, а й змусити противника витратити потрібні боєприпаси на таку дешеву ціль як дрон.

В роботах [14-17] описані сферичні ЛЛ, виготовлені з використанням різних технологій трьохвимірного друку: сферичні ЛЛ з радіальними отворами [14], сферичні ЛЛ у вигляді набору діелектричних кубиків різного розміру [15, 17]. В якості недоліків використання трьохвимірного друку відмічені наступні: обмеженість габаритів друкованого виробу.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що питанням вибору довжини радіохвилі опромінення та уточнення параметрів сферичної ЛЛ для імітації повітряної цілі із заданою ЕПР приділено недостатньо уваги. Це вказує на необхідність розробки методики вибору довжини радіохвилі опромінення та уточнення параметрів сферичної ЛЛ для імітації повітряної цілі із заданою ЕПР.

Мета дослідження полягає в розробці методики вибору довжини радіохвилі опромінення та уточнення параметрів сферичної ЛЛ для імітації повітряної цілі із заданою ЕПР при незмінному радіусі лінзи.

Матеріали та методи

Для досягнення визначеної мети у дослідженні використано такі методи дослідження: системного аналізу; математичного моделювання; синтезу результатів дослідження – для розроблення методики вибору довжини радіохвилі опромінення та уточнення параметрів сферичної ЛЛ для імітації повітряної цілі із заданою ЕПР.

Результати

Професійна підготовленість до виконання завдань за призначенням (ведення бойових дій) характеризується комплексом знань, умінь, навченості особового складу веденню бойових дій

у різних обставини та у відповідності з їх призначенням, наявністю професіонального та бойового досвіду особового складу військового підрозділу [18].

Бойова підготовка – це цілеспрямований та організований процес навчання військовослужбовців військових частин і підрозділів, а також злагодження органів управління (штабів) тактичного рівня, військових частин (підрозділів) з метою досягнення їх готовності до виконання завдань за призначенням як у мирний час, так і в особливий період. Метою бойової підготовки у Збройних Силах України є забезпечення готовності військових частин і підрозділів до ефективного виконання завдань за призначенням в будь-яких умовах обстановки, участі у міжнародних операціях з підтримки миру та безпеки і досягнення сумісності із збройними силами держав-членів НАТО [19].

Підтримання підрозділів та частин ППО СВ у постійній готовності до виконання бойових завдань неможливе без проведення достатньої кількості військових навчань із застосуванням бойових засобів ураження сучасних ПМ, що імітують реально існуючі на цей час засоби повітряного нападу, а також хибні цілі при веденні бойових дій.

Як функціональний елемент системи бойової підготовки, ПМ призначені для створення тактичної мішеневої обстановки з імітацією поодиноких або групових повітряних цілей під час проведення бойових стрільб зенітно-ракетних та зенітно-артилерійських військ, навчань розрахунків радіотехнічних підрозділів ППО СВ.

Важливим елементом цільового спорядження мішеневих БПЛА [20, 21] є засоби імітування ЕПР повітряних цілей різних типів в радіолокаційному діапазоні довжин хвиль надвисоких частот. Одним із найбільш прийнятних пасивних імітаторів ЕПР повітряних цілей [4] в радіолокаційному діапазоні хвиль є ЛЛ.

Усі лінзові імітатори ЕПР повітряних цілей складаються із діелектричних лінз різних модифікацій.

Сферичні пасивні діелектричні імітатори ЕПР – це відбивачі, які побудовані на основі діелектричних ЛЛ сферичної форми. Особливість сферичної діелектричної ЛЛ полягає в тому, що завдяки сферичній симетрії фокусуюча здатність цієї лінзи не залежить від напрямку падіння електромагнітної хвилі [22, 23]. Лінзовий діелектричний імітатор на основі ЛЛ являє собою більшу в порівнянні з довжиною хвилі неоднорідну діелектричну сферу, частина поверхні якої у вигляді “шапочки” (сегменту) металізована. Відбиття електромагнітної хвилі в діелектричній сфері відбувається від металізованої поверхні.

Форма металізованої поверхні визначає індикатрису розсіювання сферичної ЛЛ.

Максимальне моностатичне числове значення ЕПР [4,5], створюваної ЛЛ із металізованою частиною поверхні у вигляді “шапочки”, визначається апертурним методом за формулою:

$$\sigma_{\text{лінзи}} = 4 \frac{\pi^3 r_{\text{лінзи}}^4}{\lambda_{\text{хв}}^2}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{лінзи}}$ – моностатична ЕПР ЛЛ з металізованим сегментом у вигляді “шапочки”;

$r_{\text{лінзи}}$ – радіус лінзи;

$\lambda_{\text{хв}}$ – довжина електромагнітної хвилі опромінення.

При проведенні бойових стрільб зенітних ракетних та зенітних артилерійських комплексів, навчань розрахунків радіотехнічних підрозділів ППО СВ або під час веденні бойових дій виникає задача створення ПМ, які імітують конкретні повітряні цілі при роботі по них радарів із заданими діапазонами довжин хвиль. Тому виникає необхідність обґрунтованого підходу до оцінювання довжини електромагнітної хвилі опромінення та уточнення параметрів сферичних ЛЛ при створенні на їх основі пасивних імітаторів повітряних цілей із заданою ЕПР.

У відповідності з виразом (1) після нескладних перетворень можна записати:

$$\lambda_{\text{хв}} = 2\pi \cdot r_{\text{лінзи}}^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\sigma_{\text{лінзи}}}}. \quad (2)$$

Аналіз виразу (2) показує, якщо відома ЕПР повітряної цілі та радіус лінзи, то можна визначити довжину електромагнітної хвилі опромінювання пасивного імітатора, коли $\sigma_{\text{цілі}} = \sigma_{\text{лінзи}}$.

При виготовленні сферичних відбивачів у вигляді багатошарових ЛЛ дискретність зміни діелектричної проникності та додаткові конструктивні похибки призводять до зменшення їх ЕПР в порівнянні з теоретичним значенням [15-17]. Коефіцієнт зниження ЕПР $K_{\text{зн}}$ уявляє собою відношення максимального теоретичного значення ЕПР лінзового імітатора до максимального реального його значення для даної довжини хвилі опромінення. Він характеризує залежність ЕПР ЛЛ від діелектричного матеріалу, конструктивних особливостей, технології виготовлення і показує на скільки вона зміниться в порівнянні з теоретичним значенням.

З врахуванням цього, реальна довжина хвилі опромінення ЛЛ з металізованим сегментом у вигляді “шапочки” обчислюється наступним чином:

$$\lambda_{\text{хв,реал}} = \frac{\lambda_{\text{хв}}}{\sqrt{K_{\text{зн}}}}, \quad (3)$$

де $\lambda_{\text{хв,реал}}$ – реальна довжина електромагнітної хвилі опромінення; $K_{\text{зн}}$ – коефіцієнт зниження ЕПР.

В теперішній час для виготовлення сферичних ЛЛ широко застосовуються діелектричні матеріали типу PLA та PETG [24, 25, 27]. Використання сферичних ЛЛ, виготовлених на основі технології 3D-друку, забезпечує зниження теоретичного значення ЕПР такого відбивача для діелектричного матеріалу типу PLA в 1,5-1,59, а для матеріалу типу PETG в 1,76-1,9 раз.

В таблиці 1 наведені теоретичні розрахунки довжини хвилі опромінення $\lambda_{хв}$ для заданого радіуса сферичної ЛЛ фронтального перевипромінювання з металізованим сегментом у вигляді “шапочки”.

Таблиця 1

Розрахунки теоретичної довжини хвилі опромінення для заданого радіуса сферичної ЛЛ з металізованим сегментом у вигляді “шапочки” для імітації ЕПР повітряної цілі

ЕПР цілі $\sigma_{цілі}$, що імітується лінзою, м ²	Радіус сферичної ЛЛ $r_{лінзи}$, см	Довжина хвилі опромінювання $\lambda_{хв}$, см
1	5	2,78
	5,5	3,36
1,5	5,5	2,75
	6	3,27
2	6	2,83
	7	3,86
3	6	2,5
	7	3,15

Використання даних таблиці 1 дозволяє знаходити для заданих параметрів лінзи теоретичну довжину хвилі опромінення, яка забезпечує необхідну ЕПР цілі, вибраної для імітації.

Нехай для сферичної, для прикладу, шестишарової ЛЛ радіусом ($r_{лінзи} = 7$ см), виготовленої на основі технології 3D-друку із діелектричного матеріалу типу PLA, необхідно знайти реальну довжину хвилі опромінення, яка забезпечує імітацію ЕПР тактичного винищувача ($\sigma_{цілі} = 3$ м²).

Спочатку необхідно знайти теоретичне значення довжини хвилі опромінення. Для цього в таблиці 1 в колонці ЕПР цілі, що імітується лінзою, вибираємо її значення рівне 3 м². Далі в горизонтальному рядку в стовпці радіус сферичної ЛЛ знаходимо значення $r_{лінзи} = 7$ см. Цим значенням відповідає теоретична довжина хвилі опромінення $\lambda_{хв} = 3,15$ см. Тоді реальна довжина хвилі опромінення ЛЛ у відповідності з виразом (3) буде дорівнювати $\lambda_{хв,реал.} = 2,52$ см.

Розглянутий лінзовий імітатор повітряної цілі сферичної форми має металізовану “шапочку”, що забезпечує індикатрису розсіювання біля 170° в азимутальній та меридіональній площинах.

Моно статична індикатриса розсіювання імітатора являє собою тіло обертання із віссю, яка проходить через центр лінзи і центр металеві “шапочки”.

Форма індикатриси залежить від кутового розміру “шапочки” і визначається на основі

геометричної побудови з врахуванням “затемнення”, яке створює “шапочка” при великих кутах відхилення лінії візування від вісі відбивача (імітатора).

Конструктивні ускладнення дозволяють розширити індикатрису ще більше і отримати в одній із площин колову направленість, але за рахунок зменшення ЕПР і звуження індикатриси в іншій площині.

Конструкції можуть відрізнятися одна від одної формою металізованої поверхні. Замість сегментної “шапочки” може застосовуватися суцільний екваторіальний пояс шириною h , що призводить до ефекту “затіннення”, дія якого зменшує ЕПР.

Таким чином отримують лінзу Люнеберга “екваторіального перевипромінювання” яка має діаграму вторинного випромінювання вузьку в кутомісній площині але рівномірну безперервну в азимутальній.

В цьому випадку максимальне моно статичне числове значення ЕПР, створюваної ЛЛ, виражається формулою:

$$\sigma_{лінзи}^1 = 4 \frac{\pi^3 r_{лінзи}^4}{(\lambda_{хв}^1)^2} \cdot \left(1 - \frac{2h}{\pi \cdot r_{лінзи}}\right)^2, \quad (4)$$

де: $\lambda_{хв}^1$ – довжина електромагнітної хвилі опромінення ЛЛ із суцільним екваторіальним поясом;

$\sigma_{лінзи}^1$ – моно статична ЕПР ЛЛ із суцільним екваторіальним поясом;

h – ширина суцільного екваторіального поясу.

З виразу (4) видно, що моно статична ЕПР ЛЛ $\sigma_{лінзи}^1$ залежить від співвідношення ширини суцільного екваторіального поясу та радіусу лінзи $\left(k = \frac{h}{r_{лінзи}}\right)$ для заданого значення $\lambda_{хв}^1$.

Залежність нормованої моно статичної ЕПР від співвідношення ширини суцільного екваторіального поясу та радіусу лінзи k представлена на рис. 1.

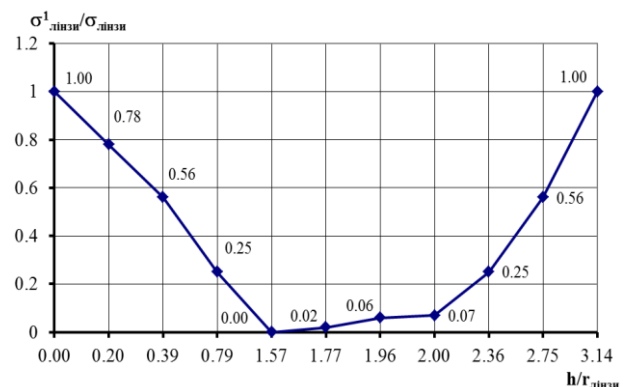


Рисунок 1. Графік залежності нормованої моно статичної ЕПР від співвідношення ширини суцільного екваторіального поясу та радіусу лінзи

Таблиця 2

Розрахунки теоретичної довжини хвилі опромінення для заданого радіуса сферичної ЛЛ із суцільним екваторіальним поясом та значення коефіцієнта k для імітації ЕПР повітряної цілі

ЕПР цілі, м ²	Радіус сферичної ЛЛ $r_{\text{ЛЛ}}, \text{см}$	Довжина хвилі опромінювання $\lambda_{\text{хв}}^1, \text{см}$ сферичної ЛЛ із суцільним екваторіальним поясом для заданого значення коефіцієнта $k = h/r_{\text{ЛЛ}}$					
		$k = 0,098$	$k = 0,157$	$k = 0,196$	$k = 0,262$	$k = 0,314$	$k = 0,392$
1	5	2,6	2,5	-	-	-	-
	5,5	3,2	3	2,94	2,8	2,69	2,5
1,5	5,5	2,58	2,5	-	-	-	-
	6	3,07	2,94	2,86	2,73	2,62	-
2	6	2,65	2,55	2,5	-	-	-
	7	3,62	3,47	3,38	3,22	3,09	2,9
3	6	-	-	-	-	-	-

Таблиця 3

Розрахунки ширини суцільного екваторіального поясу для заданого радіуса сферичної ЛЛ при різних значеннях коефіцієнта k

Радіус сферичної ЛЛ $r_{\text{ЛЛ}}, \text{см}$	Ширина суцільного екваторіального поясу $h, \text{см}$					
	$k = 0,098$	$k = 0,157$	$k = 0,196$	$k = 0,262$	$k = 0,314$	$k = 0,392$
5	0,49	0,785	0,98	1,31	1,57	1,96
5,5	0,54	0,86	1,08	1,44	1,73	2,16
6	0,58	0,94	1,18	1,57	1,88	2,36

Обговорення

Нехай для сферичної шестишарової ЛЛ радіусом $r_{\text{ЛЛ}} = 6 \text{ см}$, виготовленої на основі технології 3D-друку із діелектричного матеріалу типу PLA, необхідно знайти реальну довжину хвилі опромінення та уточнити ширину суцільного екваторіального поясу h при значенні коефіцієнта $k = 0,098$, що забезпечують імітацію ЕПР винищувача з ЕПР $\sigma_{\text{цілі}} = 1,5 \text{ м}^2$.

Спочатку необхідно знайти теоретичне значення довжини хвилі опромінення. Для цього в таблиці 2 в колонці ЕПР цілі, що імітується лінзою, вибираємо її значення рівне $1,5 \text{ м}^2$. Потім в горизонтальному рядку в стовпці радіус сферичної ЛЛ знаходимо значення $r_{\text{ЛЛ}} = 6 \text{ см}$. Цим значенням при $k = 0,098$ відповідає теоретична довжина хвилі опромінення $\lambda_{\text{хв}}^1 = 3,07 \text{ см}$.

Далі в таблиці 3 радіусу сферичної ЛЛ $r_{\text{ЛЛ}} = 6 \text{ см}$ та значенню коефіцієнта $k = 0,098$ відповідає ширина суцільного екваторіального поясу $h = 0,58 \text{ см}$.

Тоді реальна довжина хвилі опромінення ЛЛ у відповідності з виразом (7) буде дорівнювати $\lambda_{\text{хв.реал}}^1 = 2,5 \text{ см}$.

Висновки

Таким чином, підтримання підрозділів та

Аналіз наведених даних (рис.1) показує, що залежність моностатичної ЕПР від співвідношення ширини суцільного екваторіального поясу та радіусу лінзи $k = h/r_{\text{ЛЛ}}$ носить коливальний характер. По мірі збільшення співвідношення $k = h/r_{\text{ЛЛ}}$ від 0 до 1,57 моностатична ЕПР $\sigma_{\text{ЛЛ}}^1$ монотонно зменшується відповідно від $\sigma_{\text{ЛЛ}}^1$ до 0. Потім на відрізку від 1,57 до 3,14 $\sigma_{\text{ЛЛ}}^1$ монотонно збільшується від 0 до $\sigma_{\text{ЛЛ}}^1$ [26].

З отриманих результатів випливає, що доцільно розглядати тільки ті імітатори з ЛЛ з суцільним екваторіальним поясом, для яких співвідношення

$$k = \frac{h}{r_{\text{ЛЛ}}} \text{ не перевищує } 0,4.$$

З виразу (4) випливає, що співвідношення для знаходження $\lambda_{\text{хв}}^1$ має вигляд:

$$\lambda_{\text{хв}}^1 = 2\pi \cdot r_{\text{ЛЛ}}^2 \cdot \left(1 - \frac{2h}{\pi \cdot r_{\text{ЛЛ}}}\right) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\sigma_{\text{ЛЛ}}^1}}, \quad (5)$$

Якщо $\sigma_{\text{цілі}} = \sigma_{\text{ЛЛ}}^1$, то отримаємо:

$$\lambda_{\text{хв}}^1 = 2\pi \cdot r_{\text{ЛЛ}}^2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\sigma_{\text{цілі}}}} \cdot m, \quad (6)$$

$$\text{де } m = \left(1 - \frac{2k}{\pi}\right).$$

З врахуванням впливу діелектричного матеріалу, конструктивних особливостей та технології виготовлення на “відбивні” властивості сферичного лінзового імітатора ЕПР, вираз для реальної довжини хвилі опромінення запишеться наступним чином:

$$\lambda_{\text{хв.реал}}^1 = \frac{\lambda_{\text{хв}}^1}{\sqrt{K_{\text{зн}}}}, \quad (7)$$

де $\lambda_{\text{хв.реал}}^1$ – реальна довжина електромагнітної хвилі опромінення ЛЛ із суцільним екваторіальним поясом.

В таблиці 2 наведені розрахунки теоретичної довжини хвилі опромінення $\lambda_{\text{хв}}^1$ для заданого радіуса ЛЛ $r_{\text{ЛЛ}}$ та коефіцієнта k , які забезпечують ЕПР цілі, що імітується пасивним лінзовим імітатором.

Для заданого радіусу ЛЛ знаходиться ширина суцільного екваторіального поясу у відповідності з виразом:

$$h = k \cdot r_{\text{ЛЛ}}. \quad (8)$$

В таблиці 3, що розміщена в додатку, наведені розрахунки ширини суцільного екваторіального поясу для заданого значення радіуса сферичної ЛЛ при різних значеннях коефіцієнта k .

Використання даних таблиці 2 та таблиці 3 дозволяє знаходити для заданих значень ЕПР цілі та радіусу сферичної ЛЛ теоретичну довжину хвилі опромінення, а також уточнювати ширину суцільного екваторіального поясу.

частин ППО СВ у постійній бойовій готовності неможливе без проведення достатньої кількості військових навчань із застосуванням бойових засобів ураження сучасних ПМ, що імітують реально існуючі на цей час засоби повітряного нападу, а також хибні цілі при веденні бойових дій.

Одним із основних елементів цільового спорядження сучасних та перспективних мішеневих безпілотних авіаційних комплексів є засоби імітування ЕПР повітряних цілей різних типів в радіолокаційному діапазоні хвиль надвисоких частот. Найбільш прийнятним пасивним імітатором ЕПР сучасних повітряних засобів нападу є сферична ЛЛ.

При виготовленні сферичних відбивачів у вигляді багаточастотних ЛЛ дискретність зміни діелектричної проникності та додаткові конструктивні похибки призводять до зменшення їх ЕПР в порівнянні з теоретичним значенням. Розроблено методику вибору реальної довжини хвилі опромінення пасивного імітатора ЕПР сучасних засобів повітряного нападу на основі сферичних лінз із заданою ЕПР при відомому радіусі ЛЛ.

Подальші дослідження в цьому напрямку доцільно спрямувати на пошук можливості групового застосування ПМ для створення потрібної мішеневої обстановки на полігоні.

Список використаних джерел

1. Про Збройні Сили України : Закон України від 06.12.1991 № 1934-XII : станом на 19 берез. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1934-12#Text> (дата звернення: 02.05.2025).
2. AFI 10-210. Force readiness reporting, 6 December 2024. URL: https://static-publishing.af.mil/production/1/af_a4/publication/afi10-210/afi10-210.pdf (дата звернення 02.04.2025).
3. Military Unmanned Systems. – Annual Handbook. – ISSUE 29. – May 2021. – Shephard. – 392 p.
4. Богославець С.О., Науменко Б.Ю., Лужбіна О.Б. Технічний обрис повітряної мішені в інтересах Повітряних Сил Збройних Сил України. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2022. Вип. №18 (25). С. 14 – 19.
5. 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.
6. 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), pp. 1345–1351. doi: <https://doi.org/10.1109/8.99043>.
7. 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: 10.1002/mmce.22411.
8. Богославець С.О. Тенденції розвитку високошвидкісних безпілотних літаків у світі та в Україні / С.О. Богославець, П.М. Тешенко. // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2019. №15. - С. 55 – 61.
9. Military Unmanned Systems. Annual Handbook. ISSUE 26. Shephard, April 2018. 368 p.
10. AIR TARGET. Power of Precision. Military System & Technology/ URL: <https://www.militarysystems-tech.com/suppliers/modern-leading-edge-acoustical-scoring-systems-quality-practice-and-performance/air-target> (дата звернення 02.07.2024).
11. РФ хоче кошмарити українську ППО азербайджанською тактикою з Ан-2, однак "запізніться" на два роки | Defense Express. Військовий портал Defense Express - все про військову справу. URL: https://defence-ua.com/news/rf_hoche_koshmariti_ukrajinsku_ppo_azerbajdzhans_kuju_taktikoku_z_an_2_odnak_zapiznitsja_na_dva_roki-8375.html (дата звернення: 09.04.2025).
12. Окупанти запустили по Україні дрони з “лінзою Лунеберга”: чому це небезпечно. Новини України - останні новини України сьогодні - УНІАН. URL: <https://www.unian.ua/weapons/linza-lyunberga-rosiya-zapuskaye-po-ukrajini-novi-droni-12792708.html> (дата звернення: 10.04.2025).
13. Мандровська О. Інженери замаскували БПЛА під вертольоти за допомогою однієї деталі: навіщо це потрібно військовим. ФОКУС. URL: <https://focus.ua/uk/digital/611391-inzheneri-zamaskuvali-bpla-pid-vertoloti-za-dopomogoyu-odniyeyi-detali-navisho-ce-potribno-vijskovim> (дата звернення: 11.04.2025).
14. Changsheng D. Permittivity of composites used for Luneburg lens antennas by drilling holes based on 3-D printing technique /D. Changsheng, C. Ziqing, L. Yong, W. Haidong, J. Chao, Y. Shiwes //Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology. -2017. – Vol. 15(4). – P. 646-651.
15. Liang M. A 3-D Luneburg Lens Antenna Fabricated by Polymer Jetting Rapid Prototyping /M. Liang, W.R. Ng, K. Chang, K. Gbele, M.E. Gehm, H. Xin //IEEE Transaction on Antennas and Propagation. -2014. – Vol.62(4). – P. 1799-1807.
16. Larimore Z. Additive Manufacturing of Luneburg Lens Antennas Using Space-Filling Curves and Fused Filament Fabrication /Z. Larimore, S. Jensen, A. Good, A. Lu, J. Suarez, M. Mirotznik //IEEE Transaction on Antennas and Propagation. -2018. – Vol. 66(6). – P. 2818-2827.
17. Xin H. 3D printed microware and THz devices using polymer jetting techniques /H. Xin, M. Liang //Proceeding of the IEEE. -2017. –Vol. 105(4).-P. 737-755.
18. Ivanets H., Horielyshev S., Ivanets M. Formalized mathematical model for assessing the combat capability of military units/ H. Ivanets, S. Horielyshev, M. Ivanets // ISSN 2078-7480. Честь і закон (Honor and Law). Харків: НАНГУ, 2024. №2 (89). С. 62-69. DOI: 10.33405/2078-7480/2024/2/89/309190.
19. Настанова з бойової підготовки у Збройних Силах України (ВК/ДП) 7-00(03).01 : Головне управління доктрин та підготовки Генерального штабу Збройних Сил України. – К. : ГУДП ГШ ЗСУ, 2020. – 57 с.
20. Богославець С.О. Результати обґрунтування вимог до повітряних мішеневих комплексів / С.О. Богославець, О.В. Вовченко / Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2015. №11(18). – С. 30-35.
21. HIS Jane's All the Worlds Aircraft: Unmanned 2012 – 2013. – 358 p.
22. Larimore Z., Jensen S., Good A., Lu A., Suares J., Mirotznik. “Additive manufacturing of Luneburg lens antennas using spase-filling curves and fused filament fabrication”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, vol.66, no. 6, pp. 2818-2827.
23. Broadband 3-D luneburg lenses based on metamaterials of radially diverging dielectric rods. IEEE Xplore. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7803571> (date of access: 12.05.2025).
24. Пластик PLA. Хімічні та фізичні характеристики. 3D друк, 3D принтери, 3D ручки, 3D пластик в Україні. URL: <https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/3-pla-plastic-for-3d-printing-properties-applications-benefits> (дата звернення : 12.04.2025).
25. Що таке PETG пластик: властивості, параметри та

налаштування 3D-друку. LBL - Український виробник матеріалів для 3D друку. URL: https://lbl-corp.com/blog/shcho-take-petg/?srsltid=AfmBOoqfiO08PI4uUz46QW8X_JO3ZaktQqfYCdQqAXRb3RfLmLSqvY6t (дата звернення: 14.04.2025).

26. Justification of the feasibility of creating prospective air targets based on luneberg lenses / G. Ivanets et al. Bulletin of the national technical university «khpі» series: engineering and CAD.

2024. No. 2. P. 62–69. URL: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.2.07> (date of access: 15.04.2025).

27. V. Mirmenko, P. Yablonsky, V. Tyurin, A. Salii, O. Avramenko та M. Kasianenko, “Determination of efficiency of weapon systems maintenance as condition for DM distribution”, *Advances Mil. Technol.*, т. 17, № 2, с. 325–339, жовт. 2022. Дата звернення: 9 трав. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3849/aimt.01463>.

¹**Mykola Myroniuk** (Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher)

<https://orcid.org/0000-0002-8240-1232>

²**Grigoriy Ivanets** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-4906-5265>

³**Mikhailo Ivanets** (Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher)

<https://orcid.org/0000-0002-3106-7633>

²**Valerii Voinov** (PhD in Engineering, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-5732-5960>

¹*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

²*Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine*

³*State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Cherkasy, Ukraine*

METHODOLOGY FOR SELECTING THE RADIATION WAVELENGTH AND REFINING THE PARAMETERS OF A LUNEBURG SPHERICAL LENS FOR SIMULATING AN AERIAL TARGET WITH A SPECIFIED RADAR CROSS-SECTION

Combat readiness is the primary indicator of a military unit's ability to engage in combat operations and accomplish assigned missions. One of the key tasks assigned to air defense troops within the Ground Forces is the protection of military units and critical state infrastructure from enemy air attacks during combat. Maintaining the constant combat readiness of air defense units and formations in the Ground Forces is impossible without conducting a sufficient number of military exercises using modern aerial targets that simulate currently existing means of aerial attack, as well as decoys during combat operations.

One of the main components of the target equipment in modern and advanced unmanned aerial target systems is the means to simulate the radar cross-section (RCS) of various types of air targets in the ultra-high frequency (UHF) radar waveband. The most suitable passive simulator of an air target's radar cross-section in this frequency range is the Lüneburg lens. The type of dielectric material, design features, and manufacturing technology affect the RCS of such passive simulators. When manufacturing spherical reflectors in the form of multilayer Lüneburg lenses, the discrete changes in dielectric permittivity and additional design imperfections lead to a reduction in their radar cross-section compared to theoretical values.

A method has been developed for selecting the wavelength for illuminating passive simulators of the radar cross-section of modern aerial attack means, based on spherical Lüneburg lenses. This method enables the selection of a realistic illumination wavelength and the refinement of lens parameters to simulate an air target with a specified radar cross-section given a known lens radius.

Keywords: lens-based air target simulators, aerial target, aerial attack means, radar cross-section, method.

References

1. Pro Zbroini Syly Ukrainy : Zakon Ukrainy vid 06.12.1991 № 1934-XII : stanom na 19 berez. 2025 r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1934-12#Text> (date of access: 02.05.2025).
2. AFI 10-210. Force readiness reporting, 6 December 2024. URL: https://static.e-publishing.af.mil/production/1/af_a4/publication/afi10-210/afi10-210.pdf (date of access: 02.04.2025).
3. Military Unmanned Systems. – Annual Handbook. – ISSUE 29. – May 2021. – Shephard. – 392 p.
4. Bohoslavets S.O., Naumenko B.Iu., Luzhina O.B. Tekhnichniy obrys povitrianoi misleni v interesakh Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsii. 2022. Vyp.

№18 (25). S. 14 – 19.

5. Volynets V.L., Mamonova N.L., Nelson O.V. Porivnialnyi analiz pasyvnnykh zasobiv imituvannya efektyvnoi ploshchi rozsiuvannya povitrianykh tsilei. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsii. 2014. Vyp. №10 (17). S. 66 – 71.
6. 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), pp. 1345–1351. doi: <https://doi.org/10.1109/8.99043>.
7. 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: 10.1002/mmce.22411.
8. Bohoslavets S.O. Tendentsii rozvytku vysokoshvydkisnykh

bezpilotnykh litakiv u sviti ta v Ukraini / S.O. Bohoslavets, P.M. Teshenko. // Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsii. 2019. №15. – S. 55 – 61.

9. Military Unmanned Systems. Annual Handbook. ISSUE 26. Shephard, April 2018. 368 p.

10. AIR TARGET. Power of Precision. Military System & Technology/ URL: <https://www.militarysystems-tech.com/suppliers/modern-leading-edge-acoustical-scoring-systems-quality-practice-and-performance/air-target> (date of access: 02.07.2024).

11. RF kholche koshamarty ukrainsku PPO azerbajdzhanskoiu taktykoiu z An-2, odnak "zapiznytsia" na dva roky | Defense Express. Viiskovyi portal Defense Express - vse pro viiskovu spravu. URL: https://defence-ua.com/news/rf_hoche_koshamarti_ukrajinsku_ppo_azerbajdzhans_koju_taktikoju_z_an_2_odnak_zapiznitsja_na_dva_roki-8375.html (date of access: 09.04.2025).

12. Okupanty zapustyly po Ukraini drony z "linzoiu Liuneberha": chomu tse nebezpechno. Novyny Ukrainy - ostanni novyny Ukrainy sohodni - UNIAN. URL: <https://www.unian.ua/weapons/linza-lyuneberga-rosiya-zapuskaye-po-ukrajini-novi-droni-12792708.html> (date of access: 10.04.2025).

13. Mandrovska O. Inzheneriy zamaskuvaly BPLA pid vertoloty za dopomohoiu odniiei detali: navishcho tse potribno viiskovym. FOKUS. URL: <https://focus.ua/uk/digital/611391-inzheneri-zamaskuvali-bpla-pid-vertoloti-za-dopomogoyu-odniyeyi-detali-navishcho-ce-potribno-vijskovim> (date of access: 11.04.2025).

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

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

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

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

18. Ivanets H., Horielyshev S., Ivanets M. Formalized mathematical model for assessing the combat capability of military units/ H. Ivanets, S. Horielyshev, M. Ivanets // ISSN 2078-7480. Chest i zakon (Honor and Law). Kharkiv: NANHU, 2024. №2 (89). S. 62-69. DOI: 10.33405/2078-7480/2024/2/89/309190.

19. Nastanova z boiovoi pidhotovky u Zbroinykh Sylakh Ukrainy (VKDP) 7-00(03).01) : Holovne upravlinnia doktryn ta pidhotovky Heneralnoho shtabu Zbroinykh Syl Ukrainy. – K. : HUDP HSh ZSU, 2020. – 57 s.

20. Bohoslavets S.O. Rezultaty obgruntuvannia vymoh do povitrianykh mishenevykh kompleksiv / S.O. Bohoslavets, O.V. Vovchenko / Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsii. 2015. №11(18). – S. 30-35.

21. HIS Jane's All the Worlds Aircraft: Unmanned 2012 – 2013. – 358 p.

22. Larimore Z., Jensen S., Good A., Lu A., Soares J., Mirotznik. "Additive manufacturing of Luneburg lens antennas using space-filling curves and fused filament fabrication", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, vol.66, no. 6, pp. 2818-2827.

23. Broadband 3-D luneburg lenses based on metamaterials of radially diverging dielectric rods. IEEE Xplore. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7803571> (date of access: 12.05.2025).

24. Plastyk PLA. Khimichni ta fizychni kharakterystyky. 3D druk, 3D pryntery, 3D ruchky, 3D plastyk v Ukraini. URL: <https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/3-pla-plastic-for-3d-printing-properties-applications-benefits> (date of access: 12.04.2025).

25. Shcho take PETG plastyk: vlastyvoli, parametry ta nalashuvannia 3D-druku. LBL - Ukrainnyi vyrobnyk materialiv dlia 3D druku. URL: <https://lbl-corp.com/blog/shcho-take-petg/?srsltid=AfmBOoqfiO08PI4uUz46QW8XJO3ZaktQqfYCdQqAXRb3RfLmLSqvY6t> (date of access: 14.04.2025).

26. Justification of the feasibility of creating prospective air targets based on luneberg lenses / G. Ivanets et al. Bulletin of the national technical university «khpі» series: engineering and CAD. 2024. No. 2. P. 62–69. URL: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.2.07> (date of access: 15.04.2025).

27. V. Mirnenko, P. Yablonsky, V. Tyurin, A. Salii, O. Avramenko ra M. Kasianenko, "Determination of efficiency of weapon systems maintenance as condition for DM distribution", Advances Mil. Technol., V 17, № 2, P. 325–339, 2022. URL: <https://doi.org/10.3849/aimt.01463>.