

*Г. В. ІВАНЕЦЬ, В. В. ВОЇНОВ, С. А. ГОРЕЛИШЕВ, О. А. НАКОНЕЧНИЙ, М. Г. ІВАНЕЦЬ,
О. М. ВАСИЛЬЄВА, Є. Г. БАШКАТОВ*

ОБґРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ СТВОРЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ПОВІТРЯНИХ МІШЕНЕЙ НА ОСНОВІ ЛІНЗ ЛЮНЕБЕРГА

Для підтримання підрозділів та частин протиповітряної оборони Сухопутних військ у постійній бойовій готовності до виконання бойових завдань потрібне проведення бойових стрільб під час проведення військових навчань з особовим складом із застосуванням бойових засобів ураження по сучасним повітряним мішеням. Повітряні мішені імітують реально існуючі сучасні засоби повітряного нападу противника, а також хибні цілі при веденні бойових дій. В статті проведено обґрунтування доцільності створення перспективних повітряних мішеней на базі безпілотних літальних апаратів із застосуванням лінз Люнеберга. Запропоновано керуючий алгоритм реалізації перспективної повітряної мішені на основі лінзи Люнеберга. Він передбачає виконання наступних процедур: збір та обробку даних про тактико-технічні характеристики засобів повітряного нападу противника, існуючих лінз Люнеберга, безпілотних літальних апаратів та обробку інформації щодо засобів імітації інфрачервоного випромінювання повітряних цілей; вибір номенклатури реальних повітряних цілей для імітації повітряними мішенями, лінз для імітації ефективної площі розсіювання повітряних цілей, засобів імітації інфрачервоного випромінювання повітряних цілей та безпілотних літальних апаратів для створення повітряної мішені; компоновка повітряної мішені та виготовлення дослідного зразка; організація та проведення випробувань дослідного зразка повітряної мішені; формування рішення щодо організації виробництва повітряної мішені; аналіз ефективності організації виробництва повітряної мішені та блок корегування рішення.

Ключові слова: імітування, безпілотний літальний апарат, повітряна мішень, засоби повітряного нападу, хибна ціль, ефективна площа розсіювання, керуючий алгоритм

*G. IVANETS, V. VOINOV, S. HORIELYSHEV, A. NAKONECHNYI, M. IVANETS, O. VASILYLEVA,
Ye. BASHKATOV*

JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF CREATING PROSPECTIVE AIR TARGETS BASED ON LUNEBERG LENSES

To support the units and parts of the air defense of the Ground Forces in constant combat readiness to perform combat missions, it is necessary to conduct combat firing, including during military exercises, with personnel using combat weapons against modern air targets. Air targets imitate real existing modern means of air attack of the enemy, as well as false targets during combat operations.

The article substantiates the feasibility of creating promising air targets based on unmanned aerial vehicles using Luneberg lenses. A control algorithm for implementing a promising air target based on the Luneberg lens is proposed. It provides for the following procedures: collecting and processing data on the tactical and technical characteristics of enemy air attack weapons, existing Luneberg lenses, unmanned aerial vehicles and processing information on the means of simulating infrared radiation of air targets; selecting the nomenclature of real air targets to be imitated by air targets; lenses for simulating the effective scattering area of air targets; means of simulating infrared radiation of air targets and unmanned aerial vehicles to create an air target; layout of the air target and manufacture of a prototype; organization and testing of a prototype of the air target; formation of a solution for organizing the production of the air target; analysis of the efficiency of the organization of the production of the air target and a block for adjusting the solution.

Keywords: imitation, unmanned aerial vehicle, air target, air attack weapons, false target, radar cross section, control algorithm

Постановка проблеми. У сучасних умовах при воєнних загрозах національній безпеці України вирішальне значення відводиться готовності особового складу Збройних Сил України (ЗСУ) до виконання завдань за призначенням [1, 2].

На війська протиповітряної оборони Сухопутних військ (ППО СВ) покладається задача прикриття угруповань військ та об'єктів тилу від ударів повітряного нападу противника при веденні об'єднаннями, з'єднаннями, частинами та підрозділами операцій (бойових дій), проведенні перегруповань (маршів) та розташуванні на місці. До складу військ ППО СВ входять з'єднання, частини та підрозділи: зенітно-ракетних військ; зенітно-артилерійських військ; радіотехнічних військ.

Для підтримання підрозділів та частин ППО СВ у постійній бойовій готовності до виконання бойових завдань потрібне проведення під час військових навчань бойових стрільб з розрахунками ППО СВ із застосуванням бойових засобів ураження по сучасним повітряним мішеням (ПМ). ПМ імітують реально існуючі сучасні засоби повітряного нападу противника. Крім того, ПМ можуть використовуватися у якості хибних цілей при веденні бойових дій [3–5].

В якості ПМ можуть використовуватися літальні апарати, що застосовується для імітації повітряних цілей в рамках тренувань обслуги зенітного озброєння та радарів тощо. Такі апарати можуть мати вигляд різних літальних апаратів, зокрема, звичайних безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

На сьогоднішній день за досвідом провідних країн світу найбільш перспективним напрямом створення пасивних імітаторів ефективної площі розсіювання (ЕПР) повітряних цілей в радіолокаційному діапазоні хвиль є створення ПМ на базі БПЛА з використанням лінзи Люнеберга. Дані ПМ мають такі переваги як дешевизна і простота виготовлення. Але на даний час у нашій країні такі ПМ практично не використовуються у військах.

З огляду на зазначене, виникає необхідність дослідження можливості та доцільності створення ПМ як пасивних імітаторів ЕПР повітряних цілей на базі діелектричної лінзи Люнеберга.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами статті проаналізовані останні дослідження

© Г.В. Іванець, В.В. Воїнов, С.А. Горелишев,
О.А. Наконечний, М.Г. Іванець, О.М. Васильєва,
Є.Г. Башкатов, 2024

та публікації щодо стану сучасних і розроблення перспективних ПМ.

Так, у роботі [6–8] проведено порівняльний аналіз засобів імітації ЕПР на основі кутикових відбивачів, самофокусуємих антенних решіток, лінз Люнеберга та двохточкового імітатора з жорсткою в'язю. За результатами порівняльного аналізу зазначено, що найбільш прийнятним пасивним імітатором ЕПР повітряних цілей в радіолокаційному діапазоні хвиль є лінза Люнеберга.

Авторами роботи [9] проаналізовано стан оснащення авіації збройних сил різних країн повітряними мішенями. Наведені приклади бойового застосування ПМ у якості авіаційних хибних цілей, їхні тактико-технічні характеристики (ТТХ) та ефективність використання. На основі цього запропоновано технічний обрис сучасної ПМ в інтересах ЗСУ.

В роботі [4, 10, 11] 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 під час бойових дій з метою виявлення засобів ППО противника та відволікання їх від справжніх літальних апаратів, що змушує противника максимально витрачати засоби ураження зенітно-ракетних комплексів. Так, наприклад, 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 [12].

Російськими військами у війні з Україною також застосовувалися ПМ типу Е-95М, «Дань» власного виробництва, які також у своєму складі мають лінзи Люнеберга, у якості хибних цілей з метою виявлення районів розгортання українських систем ППО [13].

Лінза Люнеберга збільшує помітність БПЛА для радарів із будь-якого напрямку й дає змогу вводити в оману системи ППО противника. Лінза Люнеберга, яка прикріплена до БПЛА, збільшує радіолокаційну помітність дрона, «перетворюючи» його, наприклад, на гелікоптер [14]. Це змушує противника вжити заходів ППО із використанням ракет або зенітних гармат. Якщо застосувати «рій» дронів, оснащених лінзою, то можна заплутати радари противника, які можуть попередити про наближення до цілі бойових гелікоптерів. Так можна виявити не тільки дислокацію систем ППО протиборчої сторони, а й змусити противника витратити потрібні боєприпаси на таку дрібну ціль як дрон.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що розглянуті дослідження і публікації потребують узагальнення, а питанням обґрунтування доцільності створення перспективних ПМ на базі

БПЛА з використанням лінз Люнеберга приділено недостатньо уваги. Це вказує на необхідність подальших досліджень з метою обґрунтування необхідності та доцільності створення перспективних ПМ з використанням лінз Люнеберга.

Мета дослідження полягає у обґрунтуванні можливості та доцільності створення перспективних ПМ на базі БПЛА з використанням лінз Люнеберга.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні питання:

- провести теоретичне обґрунтування та експериментальні дослідження здатності ПМ з використанням лінз Люнеберга імітувати ЕПР реальних повітряних цілей противника або створювати авіаційні хибні цілі;

- запропонувати керуючий алгоритм реалізації перспективної ПМ на базі БПЛА з використанням лінз Люнеберга.

Виклад основного матеріалу.

Сучасні та перспективні ПМ повинні відповідати наступним основним вимогам [15]: збільшення номенклатури реальних повітряних цілей, які ПМ здатні імітувати; зменшення габаритних розмірів мішеней, які повинні бути набагато менші за розміри імітуємого літального апарату, за рахунок застосування сучасних технологій; раціональне поєднання натурального моделювання мішеневої обстановки із застосуванням обчислювальної техніки для віртуального моделювання й імітації; ускладнення мішеневої обстановки під час навчання шляхом комплексного застосування ПМ з наземними та морськими комплексами; підвищення рівня безпеки застосування ПМ та захисту навколишнього середовища; відносна простота побудови та дешевизна.

Одним із важливих елементів цільового спорядження сучасних та перспективних мішеневих безпілотних літальних апаратів є засоби імітування ЕПР повітряних цілей різних типів в радіолокаційному діапазоні довжин хвиль надвисоких частот [16]. Це впливає з того, що основною характеристикою як реальних радіолокаційних цілей, так і хибних цілей, які створюють пасивні завади, є ЕПР цілі і закон її розподілу. ЕПР зображає ефективну площу поперечного перерізу вторинного випромінювання еквівалентної цілі, яка ізотропно розсіює всю падаючу на неї енергію та створює в приймачі РЛС такий самий сигнал, як і від реальної цілі.

Одним із найбільш прийнятних пасивних імітаторів ЕПР повітряних цілей [6, 8] в радіолокаційному діапазоні хвиль є лінза Люнеберга, для якої характерні наступні особливості: повна заміна кутикових імітаторів із забезпеченням функціонування в більш широкому кутовому секторі; незалежність від напрямку 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 відрізнятись на ціле число довжин хвиль.

Усі лінзові імітатори ЕПР повітряних цілей складаються із діелектричних лінз різних модифікацій. Сферичні пасивні діелектричні імітатори ЕПР – це відбивачі, які побудовані на основі діелектричних лінз Люнеберга сферичної форми. Ця лінза уявляє собою багат шарову кулю з різними значеннями діелектричної проникності шарів і, відповідно, їх коефіцієнтів заломлення [17]. Як правило, коефіцієнти заломлення всередині лінзи змінюються за градієнтним законом таким чином, що падаючі в достатньо широкому діапазоні кутів паралельні пучки зондуєчих променів РЛС фокусуються в якійсь одній точці в межах деякої області внутрішньої поверхні кулі, яка покрита радіо відбиваючою плівкою-екраном.

Особливість сферичної діелектричної лінзи Люнеберга полягає в тому, що завдяки сферичній симетрії фокусувальна здатність цієї лінзи не залежить від напрямку падіння електромагнітної хвилі [17, 18]. Лінзовий діелектричний імітатор на основі лінзи Люнеберга уявляє 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 лінзи Люнеберга. Максимальне моностатичне числове значення ЕПР [6, 8, 9], створюваної лінзою Люнеберга, визначається апертурним методом за формулою:

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

де $\sigma_{\text{лінзи}}$ – моностатична ЕПР лінзи Люнеберга з металізованим сегментом у вигляді «шапочки»;

$r_{\text{лінзи}}$ – радіус лінзи;

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

Моностатична індикатриса розсіювання імітатора уявляє собою тіло обертання із віссю, яка проходить через центр лінзи і центр металізованої «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). Із виразу (1) слідує, що ЕПР, створювана лінзою Люнеберга, залежить як від радіусу самої лінзи, так і довжини електромагнітної хвилі опромінення. На рис. 1 зображена залежність максимального числового значення ЕПР лінзового імітатора повітряної цілі типу тактичного винищувача з ЕПР 3-5 м² в Х-діапазоні довжин хвиль з використанням лінзи Люнеберга типу XMR06.5 ($r_{\text{лінзи}} = 8$ см, маса 1,2 кг).

Х-діапазон хвиль – це діапазон частот сантиметрових довжин хвиль. За визначенням ІЕЕЕ, цей діапазон простягається від 8 до 12 ГГц

електромагнітного спектра (довжини хвиль від 3,75 до 2,5 см). Радари Х-діапазону використовуються для виявлення повітряних цілей (літаки, гелікоптери, балістичні та крилаті ракети).

Аналіз графіка (рис. 1) показує, що для заданого радіусу лінзи $r_{\text{лінзи}} = 8$ см, максимальне значення ЕПР зі збільшенням довжини хвилі опромінення Х-діапазону хвиль зменшується відповідно від 8,1 м² до 3,6 м².

На рис. 2 наведена залежність максимального значення ЕПР лінзового імітатора повітряної цілі від радіусу лінзи при фіксованій довжині радіохвилі опромінення рівної $\lambda_{\text{хв}} = 3$ см.

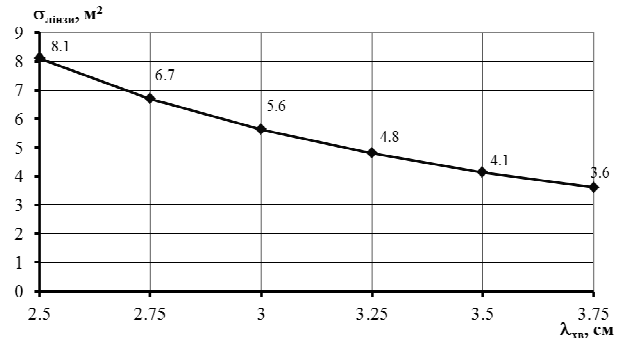


Рисунок 1 – Залежність максимального значення ЕПР лінзового імітатора повітряної цілі від довжини радіохвилі опромінення

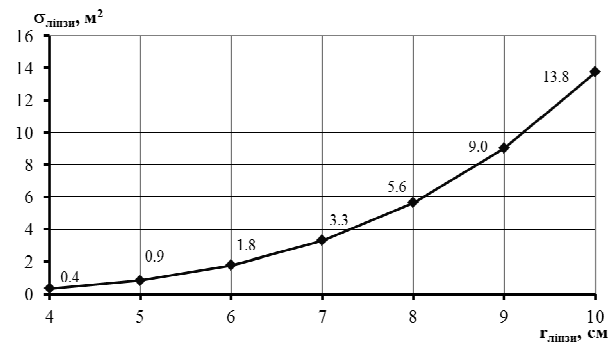


Рисунок 2 – Залежність максимального значення ЕПР лінзового імітатора повітряної цілі від радіусу лінзи при фіксованій довжині радіохвилі опромінення

Аналіз графіка (рис. 2) показує, що для фіксованої довжини радіохвилі опромінення $\lambda_{\text{хв}} = 3$ см зі збільшенням радіусу лінзи максимальне значення ЕПР лінзового імітатора повітряної цілі також збільшується відповідно від 0,4 м² до 13,8 м². Таким чином, якщо ПМ уявляє собою БПЛА з імітатором ЕПР у вигляді лінз Люнеберга радіусом від 4 см до 10 см, то вона здатна імітувати ЕПР реальних повітряних цілей різних типів в діапазоні до 14 м².

Може виникнути задача знаходження такого радіусу лінзи, щоб ПМ імітувала конкретний тип повітряної цілі із заданою максимальною ЕПР $\sigma_{\text{зад.цілі}}$ для різної довжини радіохвилі опромінення РЛС $\lambda_{\text{хв}}$. В цьому випадку радіус лінзи знаходиться наступним чином:

$$r_{\text{лінзи}} = \sqrt[4]{\frac{\sigma_{\text{зад.цілі}} \cdot \lambda_{\text{хв}}^2}{4\pi^3}} \quad (2)$$

Нехай ПМ повинна імітувати тактичний винищувач з максимальною ЕПР 5 м^2 для різних РЛС, які працюють в X-діапазоні довжин хвиль, кожна з яких має свою довжину радіохвилі опромінення. Залежність радіусу лінзи для даної ЕПР імітації тактичного винищувача від довжини радіохвилі опромінення представлена на рис. 3.

Аналіз графіка (рис.3) показує, що для фіксованої максимальної ЕПР імітації тактичного винищувача рівної 5 м^2 зі збільшенням довжини хвилі опромінення з X-діапазону хвиль радіус лінзи збільшується відповідно від 7,1 см до 8,7 см.

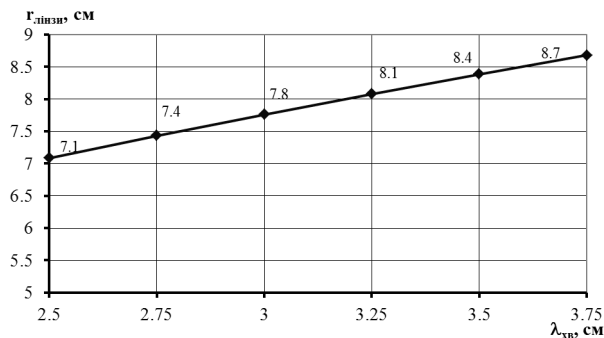


Рисунок 3 – Залежність радіуса лінзи від довжини радіохвилі опромінення при фіксованій максимальній ЕПР імітації тактичного винищувача

Якщо лінзовий імітатор повітряної цілі сферичної форми має металізовану «шапочку», то він забезпечує індикатрису розсіювання біля 170° в обох площинах. 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. В цьому випадку максимальне моностатичне числове значення ЕПР, створеної лінзою Люнеберга з суцільним екваторіальним поясом, виражається формулою:

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

де $\sigma_{\text{лінзи}}^1$ – моностатична ЕПР лінзи Люнеберга при наявності суцільного екваторіального поясу;

h – ширина суцільного екваторіального поясу.

У табл. 1 представлені значення моностатичної ЕПР в залежності від співвідношення ширини суцільного екваторіального поясу та радіусу лінзи ($h/r_{\text{лінзи}}$) від 0 до 3,14, тобто до повного металічного покриття поверхні лінзи.

Аналіз наведених в таблицях даних показує, що залежність моностатичної ЕПР від співвідношення ширини суцільного екваторіального поясу та радіусу лінзи $h/r_{\text{лінзи}}$ носить коливальний характер. По мірі збільшення співвідношення $h/r_{\text{лінзи}}$ від 0 до 1,57 моностатична ЕПР $\sigma_{\text{лінзи}}^1$ монотонно зменшується відповідно від $\sigma_{\text{лінзи}}$ до 0. Потім на відрізьку від 1,57 до 3,14 $\sigma_{\text{лінзи}}^1$ монотонно збільшується від 0 до $\sigma_{\text{лінзи}}$.

Таблиця 1 – Значення моностатичної ЕПР від співвідношення $h/r_{\text{лінзи}}$

Співвідношення $h/r_{\text{лінзи}}$	Моностатична ЕПР, $\sigma_{\text{лінзи}}^1$
0	$\sigma_{\text{лінзи}}$
0,19625	$0,78 \cdot \sigma_{\text{лінзи}}$
0,3925	$0,56 \cdot \sigma_{\text{лінзи}}$
0,785	$0,25 \cdot \sigma_{\text{лінзи}}$
1,57	0
1,76625	$0,02 \cdot \sigma_{\text{лінзи}}$
1,9625	$0,06 \cdot \sigma_{\text{лінзи}}$
2	$0,07 \cdot \sigma_{\text{лінзи}}$
2,355	$0,25 \cdot \sigma_{\text{лінзи}}$
2,7475	$0,56 \cdot \sigma_{\text{лінзи}}$
3,14	$\sigma_{\text{лінзи}}$

Залежність нормованої моностатичної ЕПР від $h/r_{\text{лінзи}}$ наведена на рис.4.

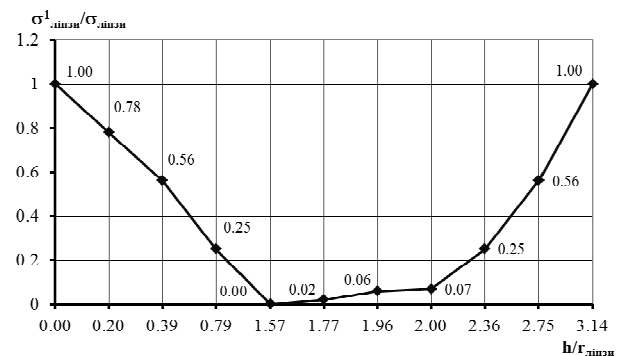


Рисунок 4 – Залежність нормованої моностатичної ЕПР від $h/r_{\text{лінзи}}$

З отриманих результатів слідує, що доцільно розглядати тільки ті імітатори з лінзами Люнеберга при наявності суцільного екваторіального поясу, для яких співвідношення $h/r_{\text{лінзи}}$ не перевищує 0,3925.

На рис. 5 наведені залежності максимальних значень ЕПР для лінзи радіусом $r_{\text{лінзи}} = 7 \text{ см}$ при наявності суцільного екваторіального поясу шириною $h = 2,8 \text{ см}$ та при його відсутності.

На рис. 5 лінія сірого кольору відображає залежність ЕПР лінзи при наявності суцільного екваторіального поясу, лінія чорного кольору – при його відсутності.

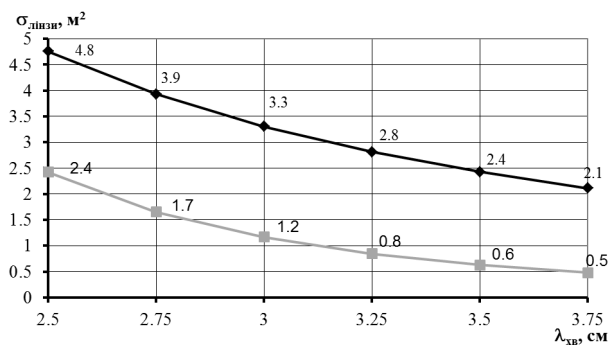


Рисунок 5 – Залежність максимального значення ЕПР лінзового імітатора повітряної цілі при наявності та відсутності суцільного екваторіального поясу від довжини радіохвилі опромінення

Аналіз отриманих розрахунків (рис. 5) показує, що внаслідок дії ефекту «затінення» при наявності екваторіального поясу значення ЕПР лінзового імітатора зменшується не менше чим на половину.

Слід зазначити, що повітряні цілі є джерелом інфрачервоного випромінювання, яке в основному визначається типом, кількістю і розташуванням двигунів та їх вихлопних пристроїв, а також наявністю чи відсутністю спеціальних пристроїв зниження інфрачервоної помітності літального апарату.

Для підвищення інтенсивності інфрачервоного випромінювання, що відповідають реальним повітряним цілям, на ПМ в якості джерела інфрачервоного випромінювання можуть використовуватися піротехнічні сполуки, які згорають при високих температурах (наприклад, шашки або трасери). Для можливості розміщення на БПЛА деякої кількості таких засобів, вони повинні мати достатньо малу масу та габарити.

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень та перевірки «відбивних» властивостей лінзового імітатора ЕПР повітряних цілей проведені експериментальні дослідження з використанням безехової камери. В якості пасивного лінзового імітатора ЕПР повітряних цілей використана сферична лінза Люнеберга радіусом $r_{\text{лінзи}} = 7$ см із суцільним екваторіальним поясом шириною $h = 2,8$ см.

При проведенні експерименту вимірювалась потужність відбитої пасивним лінзовим імітатором електромагнітної хвилі на вході приймача по відношенню до потужності передавача. Величина відносної потужності відбитої електромагнітної хвилі залежить від ЕПР пасивного лінзового імітатора.

В умовах експерименту ЕПР пасивного лінзового імітатора визначається як геометрією самої лінзи, так і матеріалами частини її металізованої поверхні.

Величина значення ЕПР в загальному випадку залежить від результату інтерференції радіохвиль, яка визначається ракурсом та довжиною хвилі опромінення лінзи, відстанню від лінзи до передавача сигналу тощо.

При першому типі експериментів лінзи на

експериментальній установці розташовувалися таким чином, що її металеве покриття у вигляді суцільного екваторіального поясу було у горизонтальному положенні. Результуюча картина відносної потужності вторинного випромінювання лінзи з врахуванням інтерференції радіохвиль на вході приймача зображена на рис. 6.

Незважаючи на осцилюючий характер залежності відносної потужності прийнятого сигналу (рис. 6), простежується тенденція її зростання при підвищенні частоти сигналу в X-діапазоні частот (від 8 ГГц до 12 ГГц включно) від 10 дБ до 17 дБ, тобто майже в 5 разів.

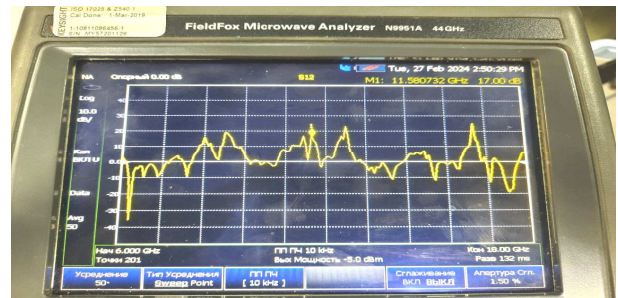


Рисунок 6 – Приклад значень відносної потужності вторинного випромінювання лінзи на вході приймача при проведенні першого типу експерименту

В разі розташування на експериментальній установці лінзи таким чином, що її металеве покриття у вигляді суцільного екваторіального поясу розташоване вертикально (другий тип експерименту), результуюча картина відносної потужності вторинного випромінювання лінзи з врахуванням інтерференції радіохвиль на вході приймача зображена на рис. 7.

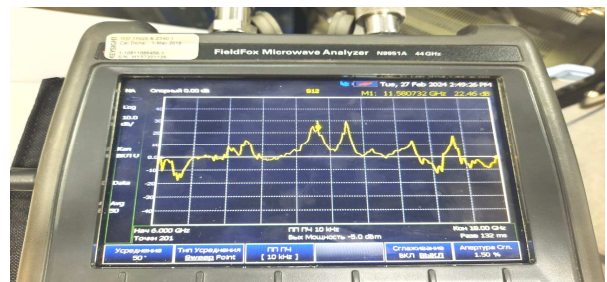


Рисунок 7 – Приклад значень відносної потужності вторинного випромінювання лінзи на вході приймача при проведенні другого типу експерименту

Аналіз отриманих даних (рис. 7) показує, що в цьому випадку простежується тенденція зростання відносної потужності прийнятого сигналу при підвищенні частоти сигналу в X-діапазоні від 10 до 22,5 дБ, тобто майже в 32 рази.

Оскільки зміни величини відносної потужності відбитої електромагнітної хвилі цілком визначаються значенням ЕПР пасивного лінзового імітатора, то тенденції залежності відносної потужності прийнятого сигналу від частоти сигналу повністю еквівалентні таким же залежностям величини ЕПР пасивного лінзового імітатора від частоти. А це означає, що з підвищенням частоти

радіосигналу ЕПР лінзового імітатора зростає і може імітувати реальні повітряні цілі.

З урахуванням отриманих результатів експериментальних досліджень можна сподіватися на те що ПМ, наприклад, у вигляді БПЛА з ЕПР, рівною $0,1 \text{ м}^2$, а в якості імітатора повітряної цілі використовується розглянута лінза Люнеберга, то ЕПР імітованої повітряної цілі може досягати до $0,5 \text{ м}^2$ в першому випадку, та до $3,2 \text{ м}^2$ в другому випадку. Це дає можливість імітувати повітряні цілі за значенням ЕПР тактичних винищувачів.

Крім того, були проведені фізичні експерименти щодо виявлення цілей у вигляді ПМ за допомогою РЛС зенітного ракетного комплексу (ЗРК) малої дальності та портативної РЛС в Х-діапазоні частот. В якості першої ПМ (ПМ1) використано звичайний БПЛА ($\sigma_{ПМ1} = \sigma_{БПЛА} = 0,5 \text{ м}^2$), а друга ПМ (ПМ2) представляла собою ПМ на базі БПЛА з використанням пасивного імітатора ЕПР повітряних цілей за допомогою сферичної лінзи Люнеберга діаметром $r_{лінзи} = 7 \text{ см}$ із суцільним екваторіальним поясом шириною $h = 2,8 \text{ см}$.

У результаті проведених досліджень було встановлено, що виявлення цілі у вигляді ПМ1 РЛС ЗРК малої дальності було значно ускладнено через

зміни ЕПР ПМ1 при обльоті РЛС від $0,5 \text{ м}^2$ до $0,05 \text{ м}^2$ внаслідок ракурсу польоту цілі. Це призводило не тільки до зриву автоматичного супроводження цілі, але й до її пропуску. Використання пасивного імітатора повітряних цілей за допомогою сферичної лінзи Люнеберга для робочої частоти РЛС призвело до підвищення ЕПР ПМ2 ($\sigma_{ПМ2} = (0,85 - 0,95) \text{ м}^2$), що дало можливість здійснити впевнене виявлення та взяття на автоматичне супроводження цілі у вигляді ПМ2.

Підвищення «помітності» повітряної цілі у вигляді ПМ2 пояснюється значним збільшенням потужності відбитої в напрямку приймача РЛС електромагнітної енергії внаслідок використання пасивного лінзового імітатора ЕПР повітряних цілей, що призвело до значного підвищення ЕПР в порівнянні з ЕПР самого БПЛА. Для частот (довжин хвиль) опромінення ПМ2 портативною РЛС ЕПР повітряної цілі складала від 1,2 до 2,4 м^2 .

Таким чином, цілі у вигляді ПМ2 впевнено виявлялися портативною РЛС і стабільно без зривів здійснювалося її автоматичне супроводження.

Для створення ПМ авторами розроблений керуючий алгоритм реалізації перспективної ПМ, який наведений на рис.8.

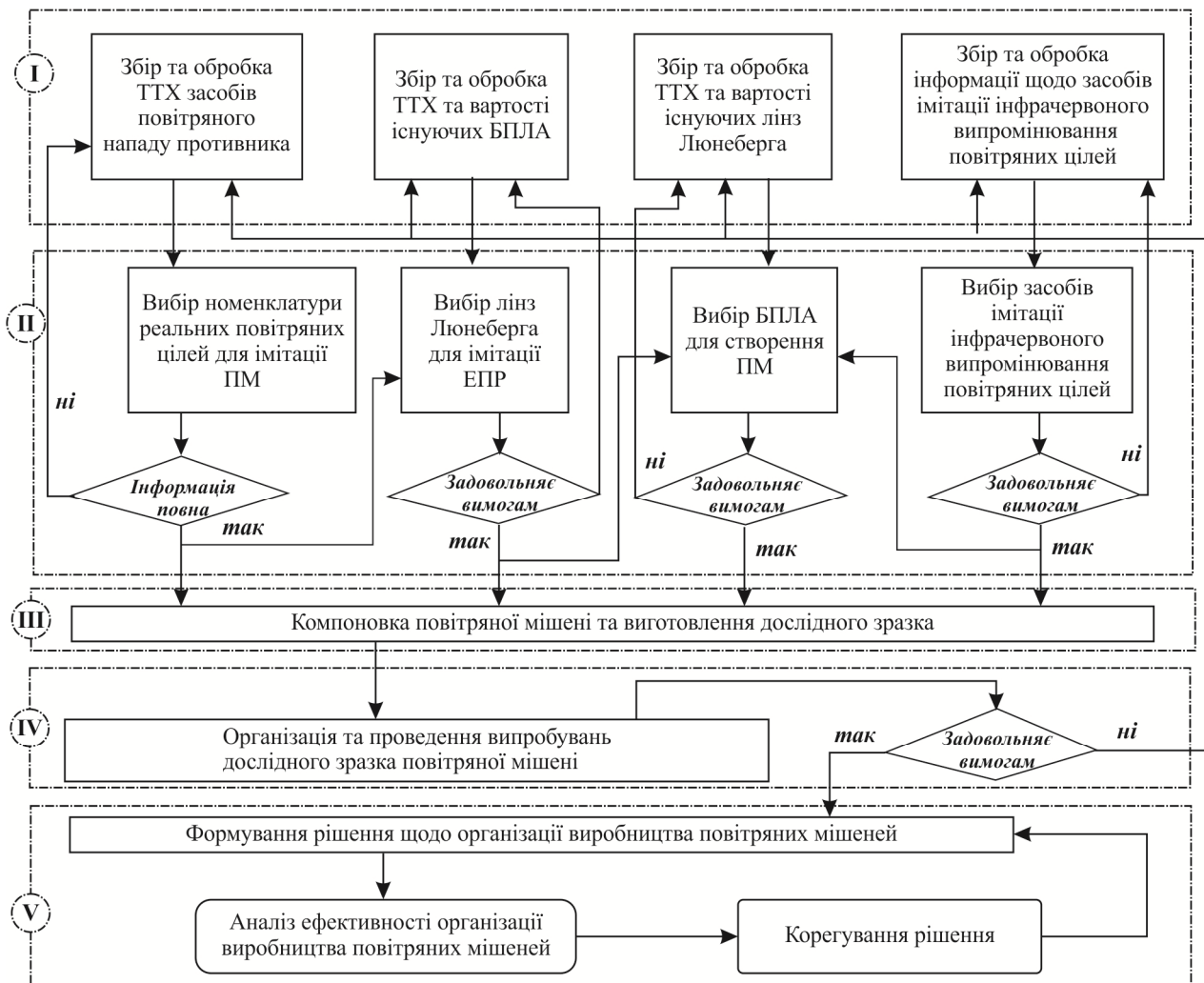


Рисунок 8 – Керуючий алгоритм реалізації перспективної повітряної мішені

Керуючий алгоритм складається з 13 блоків, які розміщені на 5 ієрархічних рівнях.

Перший рівень складають:

– блок збору та обробки ТТХ засобів повітряного нападу противника;

– блок збору та обробки ТТХ і вартості існуючих лінз Люнеберга;

– блок збору та обробки ТТХ і вартості існуючих БПЛА;

– блок збору та обробки інформації щодо засобів імітації інфрачервоного випромінювання повітряних цілей.

На другому рівні розміщені:

– блок вибору номенклатури реальних повітряних цілей для імітації ПМ;

– блок вибору лінз Люнеберга для імітації ЕПР;

– блок вибору БПЛА для створення ПМ;

– блок вибору засобів імітації інфрачервоного випромінювання повітряних цілей.

На третьому рівні розміщений блок компоновки ПМ та виготовлення дослідного зразка.

На четвертому рівні розміщений блок організації та проведення випробувань дослідного зразка ПМ.

П'ятий рівень складають блок формування рішення щодо організації виробництва ПМ, блок аналізу ефективності організації виробництва ПМ та блок корегування рішення.

Таким чином, керуючий алгоритм реалізації перспективної ПМ складається з 13 блоків, які розміщені на 5 ієрархічних рівнях і зв'язані прямими та зворотними логічними зв'язками.

Висновки

1. Для підтримання підрозділів та частин ППО СВ у постійній бойовій готовності до виконання бойових завдань потрібне проведення бойових стрільб під час проведення військових навчань з особовим складом із застосуванням бойових засобів ураження по сучасним ПМ. ПМ імітують реально існуючі сучасні засоби повітряного нападу противника, а також використовуються у якості хибних цілей при веденні бойових дій.

2. Для обґрунтування можливості та доцільності створення перспективних ПМ на базі БПЛА із застосуванням лінз Люнеберга були проведені теоретичні дослідження ЕПР пасивного лінзового імітатора повітряної цілі. Отримані теоретичні результати показали, що ПМ на базі БПЛА з імітатором у вигляді лінзи Люнеберга здатна імітувати реальні повітряні цілі з ЕПР в діапазоні від 0,4 м² до 13,8 м². Для підвищення інтенсивності інфрачервоного випромінювання, що відповідають реальним повітряним цілям, на ПМ можуть бути встановлені спеціальні шашки або трасери. Проведені експериментальні дослідження підтвердили спроможність пасивного лінзового імітатора на основі лінзи Люнеберга імітувати за значенням ЕПР реальні повітряні цілі, зокрема, тактичні винищувачі.

3. Переваги перспективних ПМ на базі БПЛА з імітатором ЕПР у вигляді лінзи Люнеберга полягають у значному зменшенні габаритних розмірів мішеней, які набагато менші імітуємого

літального апарату. Крім того, вони відрізняються простотою побудови та відносно низькою вартістю виробництва.

4. Запропоновано керуючий алгоритм реалізації перспективної ПМ на основі лінзи Люнеберга.

Подальші дослідження в цьому напрямку доцільно спрямувати на пошук можливості збільшення номенклатури повітряних цілей для імітації за допомогою ПМ, а також раціональне поєднання натурального моделювання мішеневої обстановки із застосуванням ПМ та віртуального моделювання.

Список літератури

1. Про Збройні Сили України: Закон України від 06.12.1991р. №1934-XII. Дата оновлення: 27.03.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1934-12/> (дата звернення 02.07.2024).
2. AFI 10-210. Force readiness reporting, 3 march 2016. URL: https://static.e-publishing.af.mil/production/1/af_a4/publication/afi10-210/afi10-210.pdf (дата звернення 02.07.2024).
3. Повітряний комплекс "Фазан". Інформаційний матеріал. – Харків: НДІ ПФМ ХАІ, 2014. 45 с.
4. Military Unmanned Systems. Annual Handbook. ISSUE 29. – Shephard, May 2021. 392 p.
5. 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).
6. Волинцев 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.
7. 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>.
8. Zaker, Reza & Sadeghzadeh, Areezo. 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.
9. Богославец С.О., Науменко Б.Ю., Лужбина 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.
10. Богославец С.О. Тешенко П.М. Тенденції розвитку високошвидкісних безпілотних літаків у світі та в Україні. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2019. №15. С. 55 – 61.
11. Military Unmanned Systems. Annual Handbook. ISSUE 26. Shephard, April 2018. 368 p.
12. Spakai L. BPLA v boevikh deistviyakh v Nahomom Karabakhe. Belarus Security Blog. 2021. - URL: <https://bsblog.info/bpla-v-boevykh-deistviyakh-v-nagomom-karabaxe-doklad>. (дата звернення 02.07.2024).
13. Дем'яненко В. Росіяни використовують повітряні мішені E95M у війні з Україною BTC "Бастіон" А.В. Карпенко. 2022. URL: <https://armyinform.com.ua/2022/05/18/rosiyany-vykorystovuyut-povityranyi-misheni-e95m-u-vijni-z-ukrayinoyu>. (дата звернення 02.07.2024).
14. Військові технології – дрони з лінзами Люнеберга обдурять будь-яку ППО. URL: <https://focus.ua>Діджитал>. (дата звернення 02.07.2024).
15. Богославец С.О., Вовченко О.В. Результати обґрунтування вимог до повітряних мішеневих комплексів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2015. №11(18). С. 30 – 35.
16. HIS Jane's All the Worlds Aircraft: Unmanned 2012-2013. 358 p.
17. 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.
18. Sayanskiy A., Glybovski S, Akimov V., Belov P., Meshkovskiy I.

“Broadband 3D Luneburg lensen based on met-amaterials of radially diverging dielectric rods”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol.16, pp. 1520-1523.

References (transliterated)

1. Pro Zbroyni Syly Ukrainy: Zakon Ukrainy vid 06.12.1991r. №1934-KHII. Data onovlennya: 27.03.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1934-12/> (data zvernennya 02.07.2024).
2. AFI 10-210. Force readiness reporting, 3 march 2016. URL: https://static.e-publishing.af.mil/production/1/af_a4/publication/afi10-210/afi10-210.pdf (data zvernennya 02.07.2024).
3. Povitryanyy kompleks "Fazan". Informatsiynyy material. – Kharkiv: NDI PFM KHAI, 2014. 45 p.
4. Military Unmanned Systems. Annual Handbook. ISSUE 29. – Shephard, May 2021. 392 p.
5. 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>. (data zvernennya 02.07.2024).
6. Volynets V.L., Mamonova N.L., Nel'son O.V. Porivnyal'nyy analiz pasyvykh zasobiv imituvannya efektyvnoyi ploshchi rozsiyuvannya povitryanykh tsiley. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovoho-doslidnoho instytutu aviatsiyi*. 2014. Vyp. №10 (17). P. 66 – 71.
7. 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>.
8. Zaker, Reza & Sadeghzadeh, Arezo. 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.
9. Bohoslavets S.O., Naumenko B.YU., Luzhbina O.B. Tekhnichnyy obrys povitryanoi misheni v interesakh Povitryanykh Syl Zbroynykh Syl Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovoho-doslidnoho instytutu aviatsiyi*. 2022. Vyp. №18 (25). S. 14 – 19.
10. Bohoslavets S.O. Teshenko P.M. Tendentsiyi rozvytku vysokoshvydkisnykh bezpilotnykh litakiv u sviti ta v Ukraini. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovoho-doslidnoho instytutu aviatsiyi*. 2019. №15. S. 55 – 61.
11. Military Unmanned Systems. Annual Handbook. ISSUE 26. Shephard, April 2018. 368 p.
12. Spakai L. BPLA v boevikh deistviyakh v Nahomom Karabakhe. Belarus Security Blog. 2021. - URL: <https://bsblog.info/bpla-v-boevyx-dejstviyax-v-nagomom-karabaxe-doklad>. (data zvernennya 02.07.2024).
13. Dem'yanenko V. Rosiyany vykorystovuyut povitryani misheni E95M u vijni z Ukrainoyu VT'S "Bastion" A.V. Karpenko. 2022. URL: <https://armyinform.com.ua/2022/05/18/rosiyany-vykorystovuyut-povitryani-misheni-e95m-u-vijni-z-ukrainoyu>. (data zvernennya 02.07.2024).
14. Viys'kovi tekhnolohiyi – drony z linzamy Lyuneberha obduryat bud'-yaku PPO. URL: <https://focus.ua>Didzhytal>. (data zvernennya 02.07.2024).
15. Bohoslavets S.O., Vovchenko O.V. Rezul'taty obruntuvannya vymoh do povitryanykh mishenevykh kompleksiv. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovoho-doslidnoho instytutu aviatsiyi*. 2015. №11(18). P. 30 – 35.
16. HIS Jane's All the Worlds Aircraft: Unmanned 2012-2013. 358 p.
17. Larimore Z., Jensen S., Good A., Lu A., Soares J., Miroznik. “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.
18. Sayanskiy A., Glybovski S, Akimov V., Belov P., Meshkovskiy I. “Broadband 3D Luneburg lensen based on met-amaterials of radially diverging dielectric rods”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol.16, pp. 1520-1523.

Надійшла (received) 20.08.2024

Відомості про авторів /About the Authors

Іванець Григорій Володимирович / Ivanets Grigoriy – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету протиповітряної оборони Сухопутних військ; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4906-5265>; e-mail: miwgan81@gmail.com

Войнов Валерій Вікторович / Voynov Valeriy – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, начальник науково-дослідної лабораторії факультету протиповітряної оборони Сухопутних військ; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5732-5960>; e-mail: Vvvoynov80@gmail.com

Горелішев Станіслав Анатолійович / Horielyshev Stanislav – кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, доцент кафедри тактики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>; e-mail: port_6633@ukr.net

Іванець Михайло Григорович / Ivanets Mihail – кандидат технічних наук, старший дослідник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, провідний науковий співробітник – провідний інженер-випробувач, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-7633>; e-mail: miwgan81@gmail.com

Наконечний Олександр Анатолійович / Oleksandr Nakonechnyi – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, професор кафедри озброєння військ ППО СВ, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9659-9681>; e-mail: nakon61@gmail.com

Васильєва Олена Михайлівна / Vasilyeva Olena – кандидат технічних наук, директор наукового центру електромагнітних вимірювань-начальник науково-дослідної лабораторії електромагнітних хвиль Національного наукового центру «Інститут метрології», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9586-1485>; e-mail: koropetc@ukr.net

Башкатов Євген Геннадійович / Bashkatov Yevhen – кандидат військових наук, доцент, Національна академія Національної гвардії, начальник кафедри тактики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6078-886X>; e-mail: SPU5884@ukr.net