

*Г. В. ІВАНЕЦЬ, С. А. ГОРЕЛИШЕВ, М. Г. ІВАНЕЦЬ, В. В. ВОЙНОВ, О. М. СТАВИЦЬКИЙ,
О. А. НАКОНЕЧНИЙ, А. Г. ГАЛУЗІНСЬКИЙ*

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СФЕРИЧНОЇ ЛІНЗИ ЛЮНЕБЕРГА З КУБІЧНИМИ ОТВОРАМИ

Російські війська у війні проти України все частіше почали вдаватися до застосування хибних повітряних цілей. В якості імітаторів засобів повітряного нападу в радіолокаційному діапазоні хвиль використовуються безпілотні летальні апарати (БПЛА), які обладнані сферичними лінзами Люнеберга з кубічними отворами. Дані лінзи виготовляються з використанням технології тривимірного друку. У статті проведено аналіз конструкції та виявлені особливості технології виготовлення подібної сферичної лінзи. Лінза є багатшаровою конструкцією, зменшення діелектричної проникності кожного шару якої здійснюється за допомогою кубічних отворів. Додавання отворів кубічної форми різного розміру та з різним кроком дозволяє зменшити діелектричну проникність до необхідного значення. При виготовленні багатшарової сферичної лінзи прагнуть добитися найкращого наближення ступеневої апроксимації закону зміни діелектричної проникності до теоретичного. Проведені дослідження показали, що починаючи з шестишарової лінзи абсолютна похибка наближення ступеневої апроксимації діелектричної проникності до теоретичного значення змінюється незначно. З врахуванням цього на практиці найбільш технологічним є процес виготовлення шестишарових лінз Люнеберга. Конструктивно лінза є неоднорідною діелектричною сферою, половина якої у вигляді “шапочки” металізована. Така форма та розміри металізованої поверхні забезпечують індикатрису розсіювання не менше 170° в обох площинах та дозволяють імітувати не тільки ударні БПЛА типу “Shahed-136/Герань”, а й інші засоби повітряного нападу противника.

Ключові слова: лінза Люнеберга, діелектрична проникність, конструкція, технологія виготовлення, імітування, засоби повітряного нападу, ефективна площа розсіювання

*G. IVANETS, S. HORIELYSHEV, M. IVANETS, V. VOINOV, O. STAVYTSKYI, A. NAKONECHNYI,
A. GALUZINSKYI*

FEATURES OF THE DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF A SPHERICAL LUNEBERG LENS WITH CUBIC HOLES

Russian troops in the war against Ukraine have increasingly resorted to the use of false air targets. Unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with spherical Luneberg lenses with cubic holes are used as simulators of air attack weapons in the radar wave range. These lenses are produced using 3D printing technology. The article analyzes the design and defines the features of the manufacturing technology of such a spherical lens. The lens is a multilayer structure, the reduction of the dielectric constant of each layer of which is carried out by means of cubic holes. Adding cubic holes of different sizes and with different pitch allows you to reduce the dielectric constant to the required value. When manufacturing a multilayer spherical lens, they strive to achieve the best approximation of the step approximation of the law of change in permittivity to the theoretical value. The studies have shown that, starting with a six-layer lens, the absolute error in the approximation of the step approximation of permittivity to the theoretical value changes insignificantly. Taking this into account, in practice the most technologically advanced process is the manufacturing of six-layer Luneberg lenses. Structurally, the lens is a non-uniform dielectric sphere, half of which is metallized in the form of a “cap”. This shape and size of the metallized surface provide a scattering indicatrix of at least 170° in both planes and allow simulating not only strike UAVs such as the “Shahed-136/Geran” but also other enemy air attack vehicles.

Keywords: Luneberg lens, permittivity, design, manufacturing technology, imitation, air attack weapons, radar cross section

Вступ. Постановка проблеми. У війні з Україною агресор все частіше вдається до застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які використовуються як хибні цілі для протидії українській системі протиповітряної оборони (ППО) з метою підвищення ефективності використання ударних дронів-камікадзе.

В якості імітаторів засобів повітряного нападу в радіолокаційному діапазоні хвиль використовуються БПЛА, які оснащені сферичними лінзами Люнеберга (ЛЛ) з кубічними отворами, що виготовлені з використанням технології тривимірного друку. Основна задача таких лінз полягає в імітації більш значимих цілей, таких наприклад, як ударні дрони типу “Shahed-136”, “Герань” або інші засоби повітряного нападу противника. Для прикладу, лінза Люнеберга з діаметром у 44 см може мати ефективну площу розсіювання у Х-діапазоні у 100 м^2 . Тобто невеликий БПЛА з таким відбивачем на РЛС буде відображатися як стратегічний бомбардувальник В-52 [1].

Крім того, для підтримання підрозділів та частин ППО СВ України у постійній бойовій готовності до виконання бойових завдань в рамках тренувань обслуги зенітного озброєння та радарів в

якості повітряних мішеней також можуть використовуватися БПЛА з ЛЛ [2].

З огляду на зазначене, виникає необхідність проведення аналізу конструкції та особливостей технології виготовлення сферичних ЛЛ з кубічними отворами, а також їх можливостей для імітації повітряних цілей. Наявність таких даних дозволить обґрунтовано підходити до протидії засобам імітації повітряних цілей противника та створювати більш ефективніші засоби нападу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання конструкції та технології виготовлення сферичних ЛЛ, а також використання для цього різноманітних діелектричних матеріалів висвітлені в цілій низці робіт.

На сьогоднішній день існують різні та досить оригінальні варіанти виготовлення таких лінз, але більшість з них реалізує ступінчасте наближення діелектричної проникності (відповідно і коефіцієнта заломлення) до теоретичного закону зміни, тобто лінза реалізується у вигляді багатшарового

© Г.В. Іванець, С.А. Горелишев, М.Г. Іванець,
В.В. Войнов, О.М. Ставицький, О.А. Наконечний,
А.Г. Галузінський, 2025

матеріалу з різними параметрами діелектричної проникності.

Для наближення діелектричної проникності до теоретичного значення можуть застосовуватися різні оптимізаційні алгоритми, наприклад, квадратурне наближення параметрів стратифікації до теоретичного закону [3].

У роботі [4] показано, що реалізація зміни діелектричної проникності матеріалу може здійснюватися завдяки вирізам по параболічному профілю, але таку конструкцію лінзи надзвичайно важко реалізувати на практиці внаслідок малої механічної міцності.

У роботі [5] розглянуті приклади конструктивної реалізації багатошарових ЛЛ у вигляді напівсфер різного радіусу, виготовлених із пористого діелектрику або пінополістиролу. Автори відмічають, що даний спосіб виготовлення складний, а похибки в точності виконання шарів при їх збільшенні приводять до погіршення "відбивних" характеристик лінзи.

Авторами робіт [6, 7] розглянута можливість покращення характеристик багатошарової лінзи за рахунок внесення в матеріал кожного шару неоднорідності різного розміру та форми або, навпаки, створення проникних отворів та щілин. Крім того, тіло лінзи може складатися із дискретних елементів з різними коефіцієнтами заломлення.

У роботах [8-11] описані сферичні ЛЛ, виготовлені з використанням різних технологій тривимірного друку: сферичні ЛЛ з радіальними отворами [8], сферичні ЛЛ у вигляді діелектричних кубиків різного розміру [9, 11]. Як недоліки використання тривимірного друку відмічені наступні: обмеженість габаритів друківаного виробу, достатньо висока вартість обладнання та матеріалів.

Основною задачею при виготовленні ЛЛ за допомогою тривимірного прототипування є вибір оптимальної геометрії заповнення основного елементу конструкції тіла лінзи.

У роботі [12] проаналізовані можливості виготовлення ЛЛ за допомогою друкування на 3D-принтері з використанням технології струминної полімеризації, яка включає в структуру електромагнітні кристали.

У роботі [13] зазначено, що як матеріал для виготовлення сферичних ЛЛ можуть використовуватися пінні діелектричні матеріали, показник заломлення яких залежить від щільності, наприклад, пінополістирол, пінопласт тощо. Крім того, можуть застосовуватися різні діелектричні композиційні матеріали з хорошими технологічними властивостями. Такі матеріали включають синтетичний полімер і діелектричні речовини, наприклад, керамічні порошки. Композиційні матеріали мають невелику масу і хороші діелектричні властивості. Тому їх використання дозволяє створювати різні конструкції сферичних лінз.

Проведений порівняльний аналіз [2, 14-16] засобів імітації ЕПР на основі кутикових відбивачів, самофокусуємих антенних решіток, ЛЛ та двох

точкових зв'язаних імітаторів показав, що, за умов однакових розмірів і частот, імітатори на основі ЛЛ різних конструкцій мають найбільшу ЕПР та дозволяють перекрити весь радіолокаційний діапазон довжин хвиль та ЕПР більшості сучасних повітряних цілей.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що питання аналізу конструкції та виявлення особливостей виготовлення сферичних ЛЛ є актуальною науково-практичною задачею. На погляд авторів, одним із шляхів, що на даний час являється перспективним напрямком, є створення ЛЛ з кубічними отворами, половина поверхні яких у вигляді "шапочки" (сегменту) металізована. Але даний напрямок потребує проведення більш детального аналізу.

Мета дослідження полягає у здійсненні аналізу особливостей конструкції та технології виготовлення сферичної ЛЛ з кубічними отворами, наполовину металізованої у вигляді сегменту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні питання:

- провести теоретичне обґрунтування необхідної кількості шарів ЛЛ та зробити оптимізаційне розділення значень діелектричної проникності для кожного шару;

- визначити конструктивні особливості технології виготовлення багатошарових лінз Люнеберга.

Виклад основного матеріалу.

Російськими військами у війні з Україною застосовувалися хибні цілі типу Е-95М, «Дань» власного виробництва з ЛЛ, які забезпечують імітацію малорозмірних аеродинамічних маневруючих цілей та здатні частково імітувати крилаті ракети і літаки тактичної авіації [2, 16]. У стандартних варіантах як імітатори ЕПР повітряних цілей або хибних цілей використовуються друковані на 3D-принтері сферичні ЛЛ з кубічними отворами, які наполовину обернені фольгою.

Використання хибних повітряних цілей на базі сферичних ЛЛ під час бойових дій спрямоване перш за все на виявлення засобів ППО та відволікання їх від справжніх бойових літальних апаратів противника, а також для змушування до максимальної витрати засобів ураження зенітно-ракетних та зенітно-артилерійських комплексів.

Основним елементом усіх лінзових імітаторів ЕПР повітряних цілей є діелектричні лінзи різних типів. Частіше всього застосовуються ті чи інші модифікації діелектричних ЛЛ. Ці лінзи є багатошаровими сферами з різними значеннями діелектричної проникності шарів і, відповідно, їх коефіцієнтів заломлення [17, 18].

Діелектрична проникність ідеальної ЛЛ без втрат плавно змінюється вздовж радіусу від $\varepsilon = 1$ на поверхні лінзи до $\varepsilon = 2$ у центрі відповідно до закону:

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

де R – радіус лінзи, r – радіальна координата довільної точки всередині лінзи.

Вигляд закону (1) зміни діелектричної проникності від нормованого значення радіальної координати ЛЛ (r/R) наведено на рис. 1.

Будемо вважати, що радіус лінзи R набагато більше довжини хвилі опромінення λ . Це означає, що на відстанях порядку довжини хвилі опромінення діелектрична проникність змінюється дуже мало. У цьому випадку показник заломлення [19] дорівнює:

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

де $n(r)$ – показник заломлення.

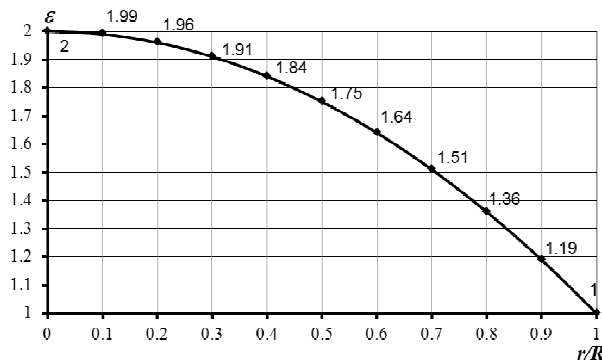


Рисунок 1 – Вид закону зміни діелектричної проникності ε від нормованого значення радіальної координати ЛЛ r/R

Виготовлення ЛЛ із плавною зміною діелектричної проникливості вздовж радіуса (1) – досить складна задача. На практиці, зазвичай, переходять до степеневі апроксимації закону діелектричної проникливості за допомогою багатошарової конструкції. У межах одного шару діелектрична проникливість постійна. Чим тонший шар і більше їх число, тим точніша апроксимація і ближчі характеристики реальної лінзи до характеристик ідеальної лінзи із плавною зміною діелектричної проникності. Але, як показує досвід виготовлення ЛЛ, найбільшою технологічністю володіють лінзи, кількість шарів L яких дорівнює від 4 до 6. Тому така кількість шарів частіше за все використовується на практиці.

Для виготовлення сферичних ЛЛ використовуються різноманітні діелектричні матеріали, а також різноманітні діелектричні композиційні матеріали, які включають синтетичний полімер і діелектричні речовини. У більшості

випадків ЛЛ реалізується у вигляді багатошарового матеріалу з різними параметрами діелектричної проникності за технологією 3D-друку [8-11,13]. Дискретність зміни діелектричної проникності та додаткові конструктивні похибки призводять до зменшення їх ЕПР в порівнянні з теоретичним значенням на 2-3 дБ.

Для створення ЛЛ з необхідним коефіцієнтом заломлення в якості основного матеріалу тіла лінзи необхідно використовувати неоднорідний діелектрик. Змінювати параметри можна, якщо контролювати щільність його заповнення при 3D-друці.

Розглянемо варіант зменшення середньої діелектричної проникності кожного шару сферичної ЛЛ за допомогою кубічних отворів. Додавання повітряних отворів кубічної форми різного розміру та з різним кроком дозволяє зменшити діелектричну проникність до необхідного значення. В загальному випадку, процес включає створення повітряних “кишень” всередині підкладки лінзи, зміна розмірів та кількості яких дозволяє змінювати ефективну діелектричну проникність. Ступінчастий градієнтний показник заломлення можна створити, якщо змінювати щільність діелектрика [4]. Такий підхід ідеально підходить для 3D-друку, оскільки для створення градієнта можна використовувати один полімер.

Лінзовий діелектричний імітатор ЕПР повітряних цілей на основі сферичних ЛЛ з кубічними отворами є більшою порівняно із довжиною хвилі неоднорідною діелектричною сферою, половина якої у вигляді “шапочки” (сегменту) металізована фольгою. Зовнішній вид сферичної ЛЛ такого типу показано на рис. 2.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд сферичної ЛЛ із перфорацією отворів

Зменшення діелектричної проникності кожного шару лінзи досягається за рахунок кубічних отворів, різні розміри яких та відстані між ними дозволяє зменшити діелектричну проникність до необхідного значення. Структура першого шару такої лінзи з подібним заповненням приведена на рис. 3.

Регулювання діелектричної проникності відбувається за допомогою трьох параметрів: а –

розмір сторін кубічного елементу, b – відстань між елементами, n – кількість елементів. Наявність повітряних отворів кубічної форми дозволяє зменшити діелектричну проникність лінзи до необхідного значення. Крім того, чим більше повітря міститься в діелектричному матеріалі, тим менша діелектрична проникність і, відповідно, менші втрати, а, отже, кращі “відбивні” властивості та характеристики лінзи.

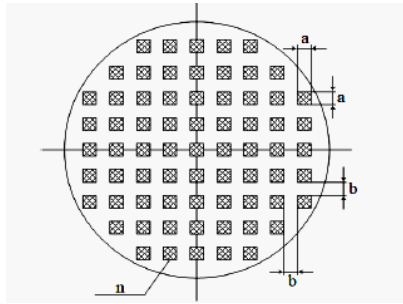


Рисунок 3 – Структура ЛЛ із перфорацією отворів

Для прикладу, у таблиці 1 наведені параметри діелектричної проникності кожного шару і нормоване значення їх радіуса для багатшарових сферичних ЛЛ [4]. Розглянуто п'ять типів ЛЛ з різною кількістю шарів L від 4 до 8.

Таблиця 1 – Відповідність значення діелектричної проникності кількості шарів ЛЛ

L	r/R	ε_l	L	r/R	ε_l
4	0,47	1,88	7	0,37	1,93
	0,67	1,67		0,52	1,80
	0,82	1,44		0,63	1,67
	0,94	1,22		0,73	1,53
5	0,43	1,91	8	0,82	1,40
	0,60	1,73		0,89	1,27
	0,74	1,55		0,97	1,13
	0,85	1,36		0,34	1,94
6	0,95	1,18		0,49	1,82
	0,39	1,93		0,59	1,71
	0,56	1,77		0,69	1,59
	0,68	1,61		0,77	1,47
	0,78	1,46		0,84	1,35
	0,88	1,31		0,91	1,24
	0,96	1,16		0,97	1,12

Очевидно, що при виготовленні сферичної ЛЛ прагнуть добитися якомога найкращого наближення ступеневої апроксимації закону зміни діелектричної проникності за допомогою багатшарової конструкції до теоретичного. Це зазвичай можна досягти, збільшуючи кількість шарів лінзи. З іншого боку, додавання кожного шару збільшує складність реалізації такої лінзи.

Похибка наближення значень діелектричної проникності характеризує невідповідність між теоретичним законом їх зміни (рис. 1) та

ступінчатим наближенням до нього. Абсолютна похибка наближення – це абсолютна різниця між результатом ступінчатого наближення та теоретичним законом зміни діелектричної проникності.

Як критерій ефективності наближення ступеневої апроксимації закону зміни діелектричної проникності до теоретичного виберемо середню абсолютну похибку наближення, яка розраховується наступним чином:

$$\Delta = \frac{\sum_{l=1}^L |\varepsilon_{nl} - \varepsilon_{ml}|}{L}, \quad (3)$$

де Δ – середня абсолютна похибка наближення; ε_{nl} – наближене значення діелектричної проникності l -того шару; ε_{ml} – теоретичне значення діелектричної проникності l -того шару; L – кількість шарів. Графік середньої абсолютної похибки наближення діелектричної проникності до теоретичного закону зміни Δ розрахований за виразом (3) та наведений на рис. 4.

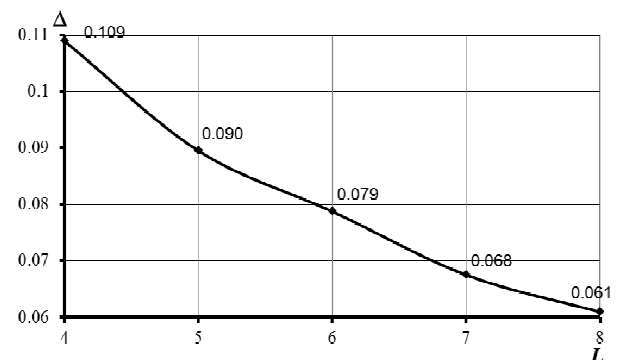


Рисунок 4 – Середня абсолютна похибка наближення діелектричної проникності до теоретичного закону зміни

Аналіз даних графіка (рис. 4) показує, що зі збільшенням кількості шарів закон розподілу наближається до безперервного, про що свідчить значення абсолютної похибки наближення. Починаючи з шестишарової ЛЛ абсолютна похибка наближення до теоретичного значення змінюється незначно. З урахуванням того, що збільшення шарів суттєво ускладнює реалізацію такої лінзи, оберемо створення шестишарових ЛЛ.

На рис. 5 наведено можливе оптимізаційне розділення лінзи на шість шарів, де показано теоретичний (суцільна лінія) та розрахований (пунктирна) закони розподілу для нормованих радіусів r/R і діелектричної проникності ε .

Для підбору параметрів отворів (a, b, n) можна скористатися програмним пакетом типу ANSYS HFSS, використання якого дозволяє проводити

параметричний аналіз – Parametris i Design of Experiments [4]. Суть використання цього підходу полягає в тому, щоби, змінюючи параметри геометрії моделі, наблизитися до необхідних параметрів діелектричної проникності шарів ЛЛ із перфорацією отворів.

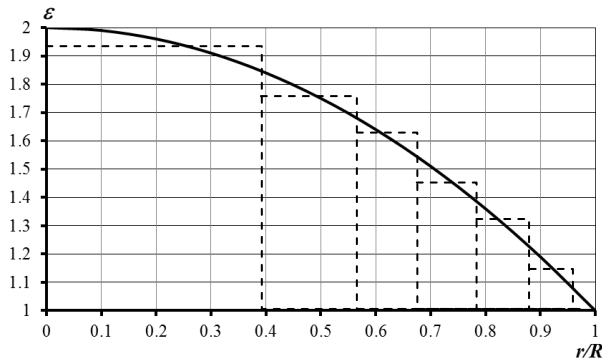


Рисунок 5 – Оптимізаційне розділення шестишарової лінзи

Конструктивно така сферична лінза (рис. 2) є неоднорідною діелектричною сферою, половина якої у вигляді “шапочки” металізована. Така форма та розміри металізованої поверхні забезпечує індикатрису розсіювання лінзи не менше 170° в обох площинах.

Максимальна моностатична ЕПР [2, 17, 19], яка створюється ЛЛ з металізованим сегментом у вигляді “шапочки”, визначається апертурним методом за формулою:

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

де σ – ЕПР ЛЛ з металізованим сегментом у вигляді “шапочки”; λ – довжина електромагнітної хвилі опромінення.

Для виготовлення ЛЛ за технологією 3D-друку широко використовується найбільш розповсюджений та відносно дешевий діелектрик типу PLA-пластик [20,21]. Дискретність зміни діелектричної проникності та додаткові конструктивні похибки при виготовленні лінзи призводять до зменшення їх ЕПР порівняно з теоретичним значенням від 2 до 3 дБ. Вплив діелектричного матеріалу, конструктивних особливостей та технології виготовлення на “відбивні” властивості ЛЛ враховують за допомогою коефіцієнта зниження ЕПР, який показує, у скільки разів реальне значення ЕПР менше за теоретичне. З урахуванням цього максимальне реальне значення ЕПР такої лінзи обчислюється наступним чином:

$$\sigma_{\text{лінзи}} = \frac{\sigma}{K_{\text{зн}}}, \quad (5)$$

де $\sigma_{\text{лінзи}}$ – реальне значення ЕПР сферичною ЛЛ; $K_{\text{зн}}$ – коефіцієнт зниження ЕПР.

На рис. 6 зображена залежність максимального реального значення ЕПР ЛЛ від довжини хвилі опромінення для сантиметрового діапазону при коефіцієнт зниження ЕПР $K_{\text{зн}} = 1,995$ (≈ 3 дБ).

Аналіз графіка (рис. 6) показує, що, наприклад, для імітації засобів повітряного нападу типу ударних БПЛА в сантиметровому діапазоні хвиль ЛЛ повинна мати радіус сфери 9-10 см.

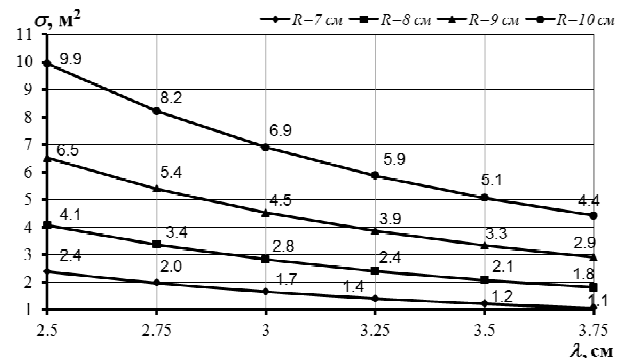


Рисунок 6 – Залежність максимального реального значення ЕПР ЛЛ від довжини радіохвилі опромінення

Сферичні ЛЛ з кубічними отворами, виготовлені на основі 3D-друку, мають малу масу та досить низьку вартість виробництва, що дозволяє організувати їх масове виробництво та застосування.

Висновки

1. Російські війська у війні проти України все частіше почали вдаватися до застосування БПЛА, які використовуються як хибні повітряні цілі для протидії українській системі протиповітряної оборони з метою підвищення ефективності використання ударних дронів-камікадзе. Як імітатори засобів повітряного нападу в радіолокаційному діапазоні хвиль використовуються сферичні ЛЛ з кубічними отворами, які виготовлені з використанням технології тривимірного друку.

2. Сферична ЛЛ є багатошаровою конструкцією. Зменшення діелектричної проникності кожного шару ЛЛ здійснюється за допомогою кубічних отворів. Додавання повітряних отворів кубічної форми різного розміру та з різним кроком дозволяє зменшити діелектричну проникність до необхідного значення. Регулювання діелектричної проникності відбувається за допомогою трьох параметрів: розміру сторін кубічного елемента, відстані між елементами та кількості елементів.

3. При виготовленні сферичної ЛЛІ прагнуть добитися найкращого наближення степеневій апроксимації закону зміни діелектричної проникності за допомогою багат шарової конструкції до теоретичного. Це досягається збільшенням кількості шарів лінзи. З іншого боку, додавання кожного шару збільшує складність реалізації лінзи. Проведені дослідження показали, що починаючи з шестишарової ЛЛІ абсолютна похибка наближення степеневій апроксимації діелектричної проникності до теоретичного значення змінюється незначно. З урахуванням цього на практиці найбільш технологічними вважаються шестишарові лінзи.

4. Конструктивно сферична ЛЛІ є неоднорідною діелектричною сферою, половина якої у вигляді “шапочки” металізована. Така форма та розміри металізованої поверхні забезпечують індикатрису розсіювання не менше 170^0 в обох площинах та дозволяють імітувати не тільки ударні БПЛА типу “Shahed-136/Герань”, а й інші засоби повітряного нападу противника, за рахунок збільшення радіусу лінзи.

Подальші дослідження в цьому напрямку доцільно спрямувати на пошук способів розбиття ЛЛІ на шари з метою максимального наближення параметрів діелектричної проникності реальної лінзи до ідеального неперервного закону зміни.

Список літератури

1. Як та навіщо РФ у дронах використовує лінзу Лյунеберга та чи є такі у ЗСУ. Defense express. URL: https://defence-ua.com/news/jak_ta_navishcho_rf_u_dronah_vikorisovuje_linzu_ljuneberga_ta_chi_je_taki_u_zsu-16946.html (дата звернення 20.01.2025).
2. 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 Лյунеберга. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. 2024. №2. С. 60-67. DOI: 10.20998/2079-0775.2024.2.07
3. Fuchs B., Coq Le L., Lafond O., Rondineau S. Design optimization of multishell Luneburg Lenses. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007. V. 55, №2. P. 283-289.
4. Денисов Д.В., Тангамьям А.А. Расчет линзы Лյунеберга в ANSYS HFSS для подготовки к изготовлению с помощью 3D-печати. *Вестник СибГУТИ*. 2020. Вып. №3. С. 54-63.
5. Baev S., Hadjistamov B., Dankov P. Luneburg Lenses as Communication Antennas. *Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski"*, Faculte de Physique. 2009. №102. P. 67-84.
6. Zouganelis G., Budimir D. Effective dielectric constant and design of sliced Luneburg lens. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2007. V. 49, №10. P. 2332-2337.
7. Hunt John, Kundtz Nathan, Landy Nathan, Nguyen Vinh, Perram Tim, Starr Anthony and Smith David R.. Broadband Wide Angle Lens Implemented with Dielectric Metamaterials. *Sensors*. 2011. №11. P. 79.
8. 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.
9. 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.
10. Larimore Z., Jensen S., Good A., Lu A., Soares 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.
11. Xin H. Liang M. 3D printed microwave and THz devices using polymer

- jetting techniques. *Proceeding of the IEEE*. 2017. Vol. 105(4). P. 737-755.
12. Kubach A., Shoykhetbrod A., Herschel R. 3D Printed Luneburg Lens for Flexible Beam Steering at Millimeter Wave Frequencies. *IEEE 2017 47th European Microwave Conference (EuMC)*. DOI: 10.23919/EuMC.2017.8230965
13. Bor J., Lafond O., Merlet H., Bars P. Le, Himdi M. Foam Based Luneburg Lens Antenna at 60 GHz. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. 2014. Vol. 44. P. 1-7.
14. 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>.
15. 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.
16. Дем'яненко В., Карпенко А. Росіяни використовують повітряні мішені Е95М у війні з Україною BTC “Бастіон”. 2022. URL: <https://armyinform.com.ua/2022/05/18/rosianyany-vykorystovuyut-povitryani-misheni-e95m-u-vijni-z-ukrayinoyu>. (дата звернення 02.01.2025).
17. 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.
18. Sayanskiy A., Glybovski S., Akimov V., Belov P., Meshkovskiy I. Broadband 3D Luneburg lense based on met-amaterials of radially diverging dielectric rods, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol.16, pp. 1520-1523.
19. 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.
20. Пластик PLA. Хімічні та фізичні характеристики. <https://3d4u.com.ua/blog/post>. (дата звернення 20.01.2025)
21. Malkin A.I., Knyazev N.S. Dielectric permittivity and permeability measurement system. *REIT*. 2017. Vol. 1814, P. 45-51.

References (transliterated)

1. Yak ta nashcho RF u dronakh vykorystovuye linzu Lyuneberha ta ye taki u ZSU. Defense express. URL: https://defence-ua.com/news/jak_ta_navishcho_rf_u_dronah_vikorisovuje_linzu_ljuneberga_ta_chi_je_taki_u_zsu-16946.html (data zvernennya 20.01.2025).
2. H. V. Ivanets', V. V. Voinov, S. A. Horyelishiev, O. A. Nakonechnyy, M. H. Ivanets', O. M. Vasylyeva, YE. H. Bashkativ. Obgruntuuvannya dotsil'nosti stvorenniya perspektivnykh povitryanykh misheney na osnovi linz Lyuneberha. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR. 2024. №2. Z. 60-67. DOI: 10.20998/2079-0775.2024.2.07
3. Fuchs B., Coq Le L., Lafond O., Rondineau S. Design optimization of multishell Luneburg Lenses. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007. V. 55, №2. P. 283-289.
4. Denisov D.V., Tangamyam A.A. Raschet linzy Lyuneberga v ANSYS HFSS dlya podgotovki k izgotovleniyu s pomoshch'yu 3D-pechati. *Vestnik SibGUTY*. 2020. Vyp. №3. S. 54-63.
5. Baev S., Hadjistamov B., Dankov P. Luneburg Lenses as Communication Antennas. *Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski"*, Faculte de Physique. 2009. №102. P. 67-84.
6. Zouganelis G., Budimir D. Effective dielectric constant and design of sliced Luneburg lens. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2007. V. 49, №10. P. 2332-2337.
7. Hunt John, Kundtz Nathan, Landy Nathan, Nguyen Vinh, Perram Tim, Starr Anthony and Smith David R.. Broadband Wide Angle Lens Implemented with Dielectric Metamaterials. *Sensors*. 2011. №11. P. 79.
8. 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.
9. 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.
10. Larimore Z., Jensen S., Good A., Lu A., Soares 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.

11. 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.
12. Kubach A., Shoykhetbrod A., Herschel R. 3D Printed Luneburg Lens for Flexible Beam Steering at Millimeter Wave Frequencies. *IEEE 2017 47th European Microwave Conference (EuMC)*. DOI: 10.23919/EuMC.2017.8230965
13. Bor J., Lafond O., Merlet H., Bars P. Le, Himdi M. Foam Based Luneburg Lens Antenna at 60 GHz. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. 2014. Vol. 44. P. 1-7.
14. 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>.
15. 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.
16. Dem'yanenko V., Karpenko A. Rosiyany vykorystovuyut povitryani misheni E95M u viyni z Ukrainoyu VT-S "Bastion". 2022. URL: <https://armyinform.com.ua/2022/05/18> rosiyany-vykorystovuyut-povitryani-misheni-e95m-u-vijni-z-ukrainoyu. (data zvernennya 02.01.2025).
17. Volynets' V.L., Mamonova N.L., Nel'son O.V. Porivnyal'nyy analiz pasyvnnykh zasobiv imituvannya efektyvnoyi ploshchi rozsiyuvannya povitryanykh tsiley. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsiyi*. 2014. Vip. №10 (17). Z. 66 – 71.
18. Sayanskiy A., Glybovskiy S., Akimov V., Belov P., Meshkovskiy I. Broadband 3D Luneburg lense based on met-amaterials of radially diverging dielectric rods. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol.16, pp. 1520-1523.
19. Bohoslavets' S.O., Naumenko B.YU., Luzhbina O.B. Tekhnichnyy opys povitryanoyi misheni v interesakh Povitryanykh Syl Zbroynykh Syl Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsiyi*. 2022. Vip. №18 (25). Z. 14 – 19.
20. Plastyk P.L.A. Khimichni ta fizychni kharakterystyky. <https://3d4u.com.ua>blog>post>. (data zvernennya 20.01.2025)21. Malkin A.I., Knyazev N.S. Dielectric permittivity and permeability measurement system. *REIT*. 2017. Vol. 1814, P. 45-51.

Надійшло (received) 20.01.2025

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.

Горєлишев 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

Войнов Валерій Вікторович / Voinov Valerii – 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: Vvvoinov80@gmail.com

Ставицький Олег Миколайович / Stavytskyi Oleq – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідної лабораторії факультету протиповітряної оборони Сухопутних військ Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6442-5002>; e-mail: oleqstavis@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.

Галузінський Андрій Георгійович / Galuzinskiy Andrii – провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету протиповітряної оборони Сухопутних військ Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7073-2061>; e-mail: aqaluzinskiy09@gmail.com.