

Г. В. ІВАНЕЦЬ, С. А. ГОРЕЛИШЕВ, М. Г. ІВАНЕЦЬ, С. О. КРАВЧЕНКО, О. А. НАКОНЕЧНИЙ, О. М. СТАВИЦЬКИЙ

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КУТОВИХ ІМІТАТОРІВ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ

Важливим елементом цільового спорядження сучасних та перспективних мішеневих безпілотних літальних апаратів є засоби імітування ефективної площі розсіювання повітряних цілей різних типів в радіолокаційному діапазоні довжин хвиль надвисоких частот. Найбільш поширеними пасивними імітаторами повітряних цілей є кутові імітатори (трикутні, квадратні, колові та біконічні). Проведені дослідження показали, що серед кутових імітаторів повітряних цілей найбільшу ефективну площу розсіювання забезпечує квадратний імітатор, але в той же час він має найбільш вузькі індикатриси в обох площинах та менш міцну конструкцію. Найбільш широкі моностаціонарні індикатриси в обох площинах забезпечують трикутні імітатори повітряних цілей, що і визначає їх переваги у використанні, незважаючи на відносно низьке значення ефективної площі розсіювання. У порівнянні з іншими кутові імітатори прості по конструкції, технологічні при виготовленні, мають високу механічну жорсткість, забезпечують досить не погані значення ефективної площі розсіювання в широких діапазонах ракурсів опромінення при порівняно малих фізичних розмірах. Розроблено модель оцінювання параметрів кутових імітаторів повітряних цілей, яка дозволяє проводити розрахунки їх значень на основі вхідних даних про ефективну площу розсіювання цілі та частоту електромагнітної хвилі опромінення. Отримані дані моделювання підтверджують перспективність застосування розробленої моделі для оцінювання параметрів кутових імітаторів при створенні мішеней засобів повітряного нападу.

Ключові слова: кутові імітатори повітряних цілей, ефективна площа розсіювання, повітряна мішень, модель, алгоритм

G. IVANETS, S. HORIELYSHEV, M. IVANETS, S. KRAVCHENKO, A. NAKONECHNYI, O. STAVYTSKYI

MODEL FOR EVALUATING THE PARAMETERS OF CORNER REFLECTORS FOR AERIAL TARGETS

An important element of the target equipment of modern and prospective target drones is the means for simulating the radar cross-section (RCS) of various types of aerial targets in the microwave frequency band. The most common passive aerial target simulators are corner reflectors (triangular, square, circular, and biconical). Conducted research has shown that among corner reflectors for aerial targets, the square reflector provides the largest radar cross-section. However, it also has the narrowest backscattering patterns in both planes and a less robust structure. Triangular corner reflectors for aerial targets provide the widest monostatic backscattering patterns in both planes, which defines their advantages in use, despite their relatively low RCS value. Compared to others, corner reflectors are simple in design, manufacturable, possess high mechanical rigidity, and provide sufficiently good RCS values over wide ranges of illumination aspects with relatively small physical dimensions. A model for evaluating the parameters of corner reflectors for aerial targets has been developed. It allows for calculating their values based on input data about the target's radar cross-section and the frequency of the illuminating electromagnetic wave. The obtained simulation data confirm the prospects of using the developed model for evaluating corner reflector parameters when creating targets for air attack means.

Keywords: corner reflectors for aerial targets, radar cross-section (RCS), aerial target, model, algorithm

Постановка проблеми. Основною характеристикою як реальних радіолокаційних цілей, так і хибних цілей, які створюють пасивні завади, є ефективна площа розсіювання (ЕПР). Виходячи з цього, найважливішим елементом цільового спорядження сучасних та перспективних мішеневих безпілотних авіаційних комплексів та авіаційних хибних цілей є засоби імітування ЕПР повітряних цілей різних типів в радіолокаційному діапазоні хвиль надвисоких частот [1–3].

Мішені з імітаторами повітряних цілей використовуються в ході тренувань, навчань розрахунків зенітно-ракетних та зенітно-артилерійських військ, бойової обслуги радіотехнічних військ. В процесі підготовки до проведення таких навчань та бойових стрільб із залученням радіолокаційних засобів зенітно-ракетних та зенітно-артилерійських комплексів, які працюють в заданому діапазоні частот хвиль, потребує вирішення задачі створення повітряних мішеней (ПМ) на базі кутових імітаторів повітряних цілей із заданими значеннями ЕПР.

Досвід сучасних бойових дій авіації показав, що їх ефективність значною мірою залежить від живучості в повітрі. Під живучістю будемо розуміти здатність авіації залишатися невразливою у створеній ворогом повітряній обстановці і вико-

нувати поставлені завдання [4, 5]. Для забезпечення живучості та індивідуального захисту літального апарату широко застосовуються хибні повітряні цілі, які відвертають увагу ворожої протиповітряної оборони на себе.

На сьогоднішній день широко використовуються в якості імітаторів повітряних цілей різні типи кутових імітаторів ЕПР. Завдяки дешевизні та простоті виготовлення такі повітряні мішені (ПМ) можуть виконувати функції хибних повітряних цілей, імітуючи бойові засоби повітряного нападу противника.

З огляду на зазначене, виникає необхідність дослідження методів та моделей оцінювання параметрів пасивних кутових імітаторів різних типів при створенні ПМ засобів повітряного нападу на основі даних про ЕПР цілі та частоту електромагнітної хвилі опромінення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання створення та використання різних типів кутових пасивних імітаторів ЕПР повітряних цілей у радіолокаційному діапазоні хвиль висвітлені в цілій низці робіт. Так, у роботі [6] проведено оцінку вторинного випромінювання тригранних кутових відбивачів у високочастотному діапазоні

© Г.В. Іванець, С.А. Горелишев, М.Г. Іванець, С.О. Кравченко, О.А. Наконечний, О.М. Ставицький, 2026

довжин хвиль, які використовуються в якості основного відбиваючого елементу радіолокаційної повітряної буксирної хибної цілі тактичної авіації. Наведені результати показують, що для отримання досить високих значень ЕПР хибної цілі доцільно використовувати “зчетверений” кутовий відбивач.

Авторами робіт [7-10] надані результати аналізу стану оснащення перспективними зразками ПМ авіації збройних сил різних країн, основу яких складають імітатори ЕПР засобів повітряного нападу. Наведені приклади бойового застосування авіаційних хибних цілей, їхні тактико-технічні характеристики (ТТХ) та ефективність використання. Результати проведеного аналізу цільового спорядження сучасних і перспективних ПМ підтверджують той факт, що майже 70% з них мають засоби імітування ЕПР в радіолокаційному діапазоні довжин хвиль, оснащені реактивними двигунами і є високошвидкісними літаками з максимальною швидкістю польоту 600...900 км/год, здатними імітувати тактичні бойові літаки та крилаті ракети.

У роботах [11-13] зазначено, що кутові імітатори ЕПР засобів повітряного нападу противника є одними із найпоширеніших типів ширококутних відбивачів. Величина ЕПР кутових імітаторів визначається напрямом падіння хвилі опромінення, розмірами та формою граней відбивача, матеріалу, з якого він виготовлений. Переваги кутових імітаторів полягають у простоті конструкції, технологічності при виготовленні, високій механічній жорсткості, але вони не завжди забезпечують необхідні значення ЕПР сучасних повітряних цілей у широких діапазонах ракурсів опромінення при порівняно малих фізичних розмірах.

Авторами робіт [14, 15] наведені результати порівняльного аналізу засобів імітації ЕПР повітряних цілей на основі кутових відбивачів, самофокусуємих антенних решіток, лінз Люнеберга (ЛЛ) та двоточкового імітатора з жорсткою зв'язкою. Зазначено, що, за умов однакових розмірів і частот, імітатори на основі кутових відбивачів за ефективністю імітації ЕПР сучасних повітряних цілей у радіолокаційному діапазоні довжин хвиль дещо поступаються імітаторам на базі ЛЛ.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел щодо проблем створення та використання пасивних імітаторів повітряних цілей показав, що питанням оцінювання параметрів різних кутових імітаторів при створенні ПМ засобів повітряного нападу із заданою ЕПР приділено недостатньо уваги. Це вказує на необхідність подальших досліджень методів та способів оцінювання їхніх параметрів для імітації заданих повітряних цілей.

Мета дослідження полягає у розробці моделі оцінювання параметрів пасивних кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести теоретичні дослідження ефективності застосування кутових імітаторів повітряних цілей, їх переваг та недоліків;
- розробити модель оцінювання параметрів

кутових імітаторів повітряних цілей на основі вхідних даних про ЕПР цілі та частоту електромагнітної хвилі опромінення.

Виклад основного матеріалу. ПМ використовуються для імітації реально існуючих сучасних засобів повітряного нападу противника, а також хибних цілей при веденні бойових дій. Зазвичай, ПМ є літальним засобом, який може мати вигляд різних літальних апаратів, зокрема, звичайних безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Серед основних вимог до сучасних та перспективних ПМ перш за все виділяють досить малі габаритні розміри мішеней, відносна простота побудови та виготовлення, дешевизна [7, 16].

Основу мішеневих безпілотних літальних апаратів складають засоби імітування повітряних цілей різних типів у радіолокаційному діапазоні довжин хвиль надвисоких частот. Найбільш поширені пасивні імітаторами ЕПР повітряних цілей – це кутові імітатори (трикутні, квадратні, колові та біконічні) [11, 14, 16].

Кутові імітатори є жорсткою конструкцією, яка складається із двох або більше взаємно перпендикулярних ідеально провідних граней, механічно і електрично зв'язаних між собою. Розміри кутових імітаторів значно перевищують довжину електромагнітної хвилі опромінення. Основна їх перевага полягає в тому, що значна частина електромагнітної енергії, яка падає на них з будь-якого напрямку в межах внутрішнього кута, відбивається в напрямку, протилежному напрямку опромінення. Величина ЕПР кутових імітаторів залежить від розмірів і форми граней відбивача, матеріалу, з якого він виготовлений, а також від напрямку падіння хвилі опромінення.

Серед кутових імітаторів найбільшу ЕПР забезпечує квадратний імітатор, але в той же час він має найбільш вузькі індикатриси в обох площинах та менш міцну конструкцію.

Найбільш широкі моностатичні індикатриси в обох площинах забезпечують трикутні імітатори ЕПР, що і визначає їх переваги у використанні, незважаючи на відносно низьке максимальне моностатичне значення ЕПР.

Максимальне моностатичне значення ЕПР кутового імітатора трикутного типу [11, 14] визначається за формулою:

$$S_1 = \frac{4\pi \cdot a^4 \cdot f^2}{3c^2}, \quad (1)$$

де S_1 – моностатична ЕПР кутового імітатора трикутного типу;

a – розмір грані;

f – частота електромагнітної хвилі опромінення;

c – швидкість світла.

Залежність величини ЕПР кутового імітатора трикутного типу для різних розмірів грані наведена на рис. 1.

Аналіз графіка (рис.1) показує, що при збільшенні розміру грані та частоти радіохвилі

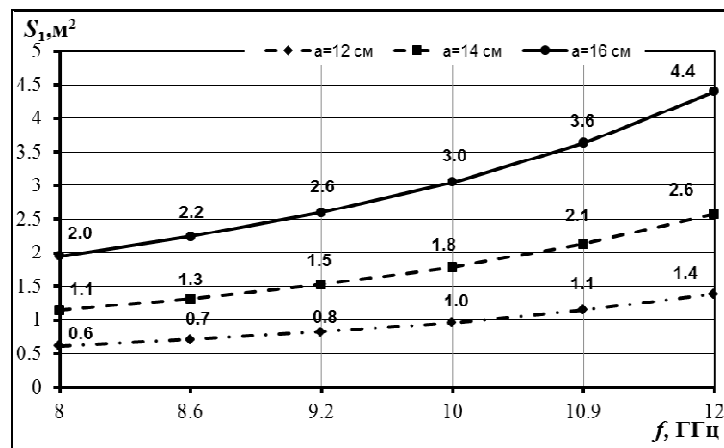


Рисунок 1 – Залежність ЕПР кутового імітатора трикутного типу від частоти хвилі опромінення для різних розмірів грані

Максимальне моностатичне значення ЕПР кутового імітатора квадратного типу [11,14] визначається за формулою:

$$S_2 = \frac{12\pi \cdot a^4 \cdot f^2}{c^2}, \quad (2)$$

де S_2 – моностатична ЕПР кутового імітатора квадратного типу; a – розмір грані.

Залежність ЕПР кутового імітатора квадратного типу від частоти хвилі опромінення для різних розмірів грані наведена на рис. 2.

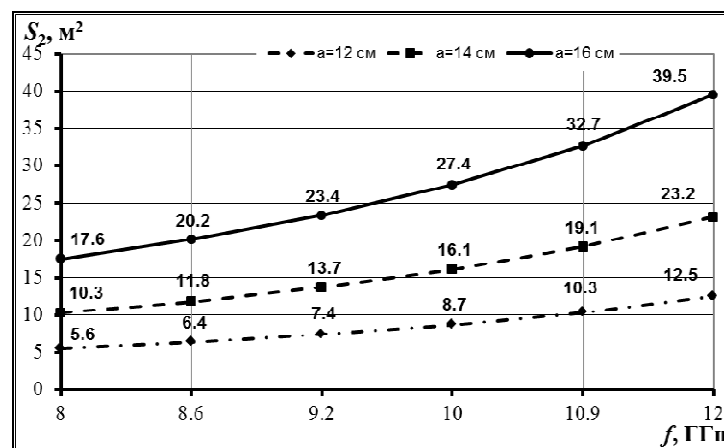


Рисунок 2 – Залежність ЕПР кутового імітатора квадратного типу від частоти хвилі опромінення для різних розмірів грані

Аналіз графіка (рис. 2) показує, що для заданого розміру грані максимальне значення ЕПР кутового імітатора квадратного типу із збільшенням частоти хвилі опромінення збільшується. Значення ЕПР кутового імітатора квадратного типу значно перевищують відповідні значення для трикутних імітаторів.

Максимальне моностатичне значення ЕПР кутового імітатора колового типу [14] визначається за формулою:

$$S_3 = \frac{16\pi \cdot a^4 \cdot f^2}{3c^2}, \quad (3)$$

де S_3 – моностатична ЕПР кутового імітатора колового типу; a – радіус грані.

Залежність ЕПР кутового імітатора колового

типу від частоти хвилі опромінення для різних радіусів грані наведена на рис. 3.

Аналіз графіка (рис. 3) показує, що для заданої частоти радіохвилі опромінення ЕПР відповідно із збільшенням радіусу грані імітатора збільшується. Це означає, що при заданій частоті радіохвилі опромінення добитися необхідної ЕПР можна шляхом зміни радіусу грані кутового імітатора колового типу. ЕПР кутового імітатора колового типу перевищує відповідні значення для імітатора трикутного типу, але значно менше, ніж для імітатора квадратного типу.

Біконічні імітатори ЕПР також належать до різновиду кутових імітаторів ЕПР і є подвійним конусом. Такий імітатор має рівномірну колову діаграму вторинного випромінювання. ЕПР біконічного імітатора при площині поляризації поля

електромагнітної хвилі, яка паралельна повздовжній осі подвійного конуса, аналогічна ЕПР циліндра з радіусом $R_{cp} = \frac{R_{max} + R_{min}}{2} = a$ та висотою h . Він досить просто виготовляється, має широку

індикатрису розсіювання. Крім того, перевага біконічного імітатора ЕПР полягає в тому, що він володіє однаковою ЕПР на горизонтальній, вертикальній, круговій та похилій поляризації під кутами $\pm 45^\circ$ при ортогональному прийомі.

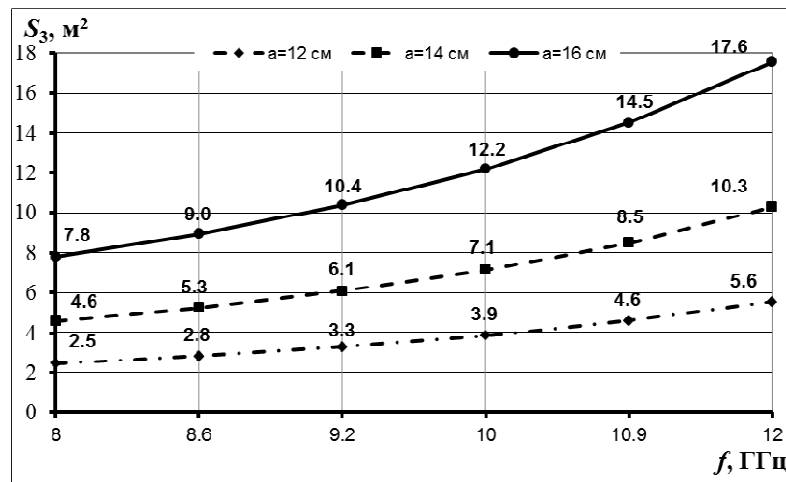


Рисунок 3 – Залежність ЕПР кутового імітатора колового типу від частоти хвилі опромінення для різних радіусів грані

Максимальне моностатичне значення ЕПР біконічного імітатора [11, 14] визначається за формулою:

$$S_4 = \frac{2\pi \cdot R_{cp}^2 \cdot h^2 \cdot f^2}{c^2}, \quad (4)$$

де S_4 – моностатична ЕПР біконічного імітатора;

R_{cp} – середній радіус конуса;

h – висота.

Залежність ЕПР біконічного імітатора від частоти хвилі опромінення для різних середніх радіусів при висоті $h = R_{cp}$ см конуса наведена на рис. 4.

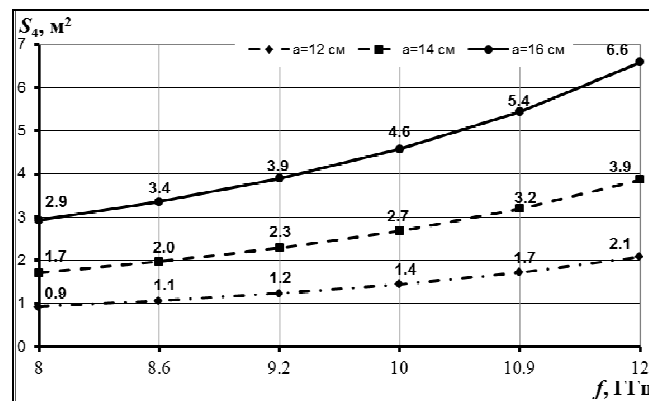


Рисунок 4 – Залежність ЕПР біконічного імітатора від частоти хвилі опромінення для різних середніх радіусів конуса

Аналіз графіка (рис. 4) показує, що для заданої частоти радіохвилі опромінення ЕПР відповідно зі збільшенням середнього радіуса конуса ЕПР біконічного імітатора збільшується. Це означає, що при заданій частоті радіохвилі опромінення добитися необхідної ЕПР можна шляхом зміни радіуса або висоти біконічного імітатора. ЕПР кутового імітатора біконічного типу перевищує відповідні значення для трикутного типу, але значно менше відповідних значення для імітаторів колового та квадратного типів.

Проведені дослідження ефективності застосування кутових імітаторів повітряних цілей показали, що за умов однакових розмірів та частоти хвилі опромінення, найбільшу ЕПР забезпечує ку-

товий імітатор квадратного типу, а найменшу – кутовий імітатор трикутного типу.

При створенні ПМ із заданими значеннями ЕПР виникає задача розрахунку параметрів кутових імітаторів та обрання найбільш оптимального варіанту. Розглянемо задачу створення ПМ, які використовують кутові відбивачі, що імітують повітряну ціль із ЕПР $S_{ц}$ на частоті опромінення. Для цього необхідно оцінити параметри кутових імітаторів ЕПР повітряної цілі. Під параметрами будемо розуміти для імітаторів трикутного та квадратного типу – розмір грані, для імітаторів колового типу – радіус грані, для імітаторів біконічного типу – середній радіус, мінімальний та максимальний радіуси, висота

конуса.

Для кутового імітатора трикутного типу у відповідності до виразу (1) при $S_1 = S_u$ після перетворень одержимо розмір грані даного імітатора:

$$a = 4 \sqrt{\frac{3S_u \cdot c^2}{4\pi \cdot f^2}}, \quad (5)$$

де S_u – ЕПР повітряної цілі.

Для кутового імітатора квадратного типу у відповідності до виразу (2) при $S_1 = S_u$ після перетворень одержимо розмір грані даного імітатора:

$$a = 4 \sqrt{\frac{S_u \cdot c^2}{12\pi \cdot f^2}}. \quad (6)$$

Для кутового імітатора колового типу у відповідності до виразу (3) при $S_1 = S_u$ після перетворень одержимо розмір (радіус) грані даного імітатора:

$$a = 4 \sqrt{\frac{3S_u \cdot c^2}{16\pi \cdot f^2}}. \quad (7)$$

Будемо вважати, що для кутового імітатора біконічного типу значення середнього радіусу та висоти конуса рівні між собою ($R_{cp} = h = a$). Тоді у відповідності до виразу (4) при $S_4 = S_u$ після перетворень одержимо:

$$a = 4 \sqrt{\frac{S_u \cdot c^2}{2\pi \cdot f^2}}. \quad (8)$$

Припустимо, що $R_{max} = k \cdot R_{min}$, тоді:

$$R_{cp} = \frac{R_{max} + R_{min}}{2} = \frac{R_{min} \cdot (k+1)}{2} = a. \quad (9)$$

З виразу (9) слідує, що:

$$R_{min} = \frac{2a}{k+1}, \quad R_{max} = k \cdot R_{min} = \frac{2k \cdot a}{k+1}. \quad (10)$$

Таким чином, у цьому випадку будемо мати:

$$h = a = 4 \sqrt{\frac{S_u \cdot c^2}{2\pi \cdot f^2}}, \quad (11)$$

$$R_{min} = \left(\frac{2}{k+1} \right) \cdot 4 \sqrt{\frac{S_u \cdot c^2}{2\pi \cdot f^2}}, \quad (12)$$

$$R_{max} = \left(\frac{2k}{k+1} \right) \cdot 4 \sqrt{\frac{S_u \cdot c^2}{2\pi \cdot f^2}}, \quad (13)$$

На основі отриманих даних розроблена модель оцінювання параметрів кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей на основі вхідних даних про ЕПР цілі та частоту електромагнітної хвилі опро-

мінення. Структура моделі представлена на рис. 5.

Вона включає об'єднані в єдине ціле логічно та інформаційно зв'язані між собою за призначенням, задачами, що розв'язуються, вхідними і вихідними даними модулі.

Модуль 1 містить вхідні дані для створення кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей, а саме ЕПР цілі для імітації та частота радіохвилі опромінення кутових імітаторів.

Модуль 2 призначений для оцінювання розміру грані трикутного імітатора повітряних цілей у відповідності до виразу (5).

Модуль 3 призначений для оцінювання розміру грані квадратного імітатора повітряних цілей у відповідності до виразу (6).

Модуль 4 призначений для оцінювання радіусу колового імітатора повітряних цілей у відповідності до виразу (7).

Дані для проведення розрахунків у модулях 2, 3, 4 надходять від модуля 1.

Модуль 5 призначений для оцінювання середнього радіусу та висоти біконічного імітатора повітряних цілей у відповідності до виразами (9) та (11).

Модуль 6 призначений для оцінювання мінімального радіусу біконічного імітатора повітряних цілей у відповідності до виразу (12).

Модуль 7 призначений для оцінювання максимального радіусу біконічного імітатора повітряних цілей у відповідності до виразу (13).

Дані для проведення розрахунків у модулях 5–7 також надходять від модуля 1.

Модуль 8 призначений для узагальнення даних проведених розрахунків та обрання оптимального варіанту створення кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей.

Проведемо моделювання параметрів кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей для конкретних засобів повітряного нападу та радіолокаційних станцій виявлення цілей. Для бойового розрахунку РЛС проводяться тренування по ПМ, які імітують багатоцільовий винищувач F-16 ($S_u = 4 \text{ м}^2$) за допомогою кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей. РЛС працює в сантиметровому діапазоні хвиль 2,5-2,6 см (діапазон частот 11,54-12 ГГц). Оцінимо параметри кутових імітаторів ЕПР для даної повітряної цілі та діапазону частот роботи радіолокаційної станції.

Оцінювання параметрів кутових імітаторів ЕПР повітряної цілі типу багатоцільового винищувача F-16 здійснюється у відповідності з розробленою моделлю (рис. 5). При оцінці мінімального та максимального радіусів біконічного імітатора заданої повітряної цілі будемо вважати $k = 2$.

Узагальнені дані моделювання для створення кутових імітаторів різних типів ЕПР повітряної цілі наведені на рис. 6.

Аналіз отриманих результатів показав, що параметри кутових імітаторів в заданому діапазоні частот практично не змінюються. Розмір грані трикутного імітатора для заданих частот знаходиться в діапазоні 15,63-15,94 см; розмір грані

квадратного імітатора для заданих частот знаходиться в діапазоні 9,03-9,2 см; радіус колового імітатора для заданих частот знаходиться в діапазоні 11,05-11,27 см (рис. 6, а). Для біконічного імі-

татора для заданих частот відповідно мінімальний радіус знаходиться в діапазоні 9,4-9,6 см, максимальний радіус – в діапазоні 18,8-19,2, середній радіус та висота – в діапазоні 14,2-14,4 (рис.6, б).

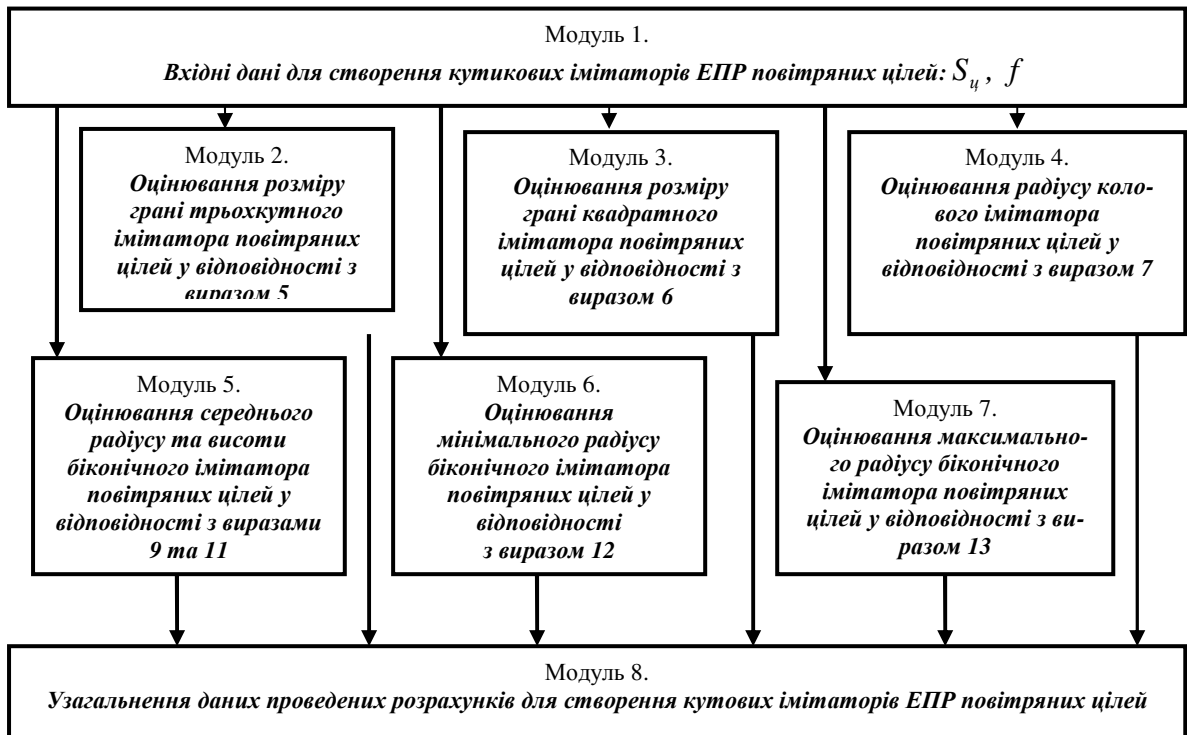


Рисунок 5 – Модель оцінювання параметрів кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей

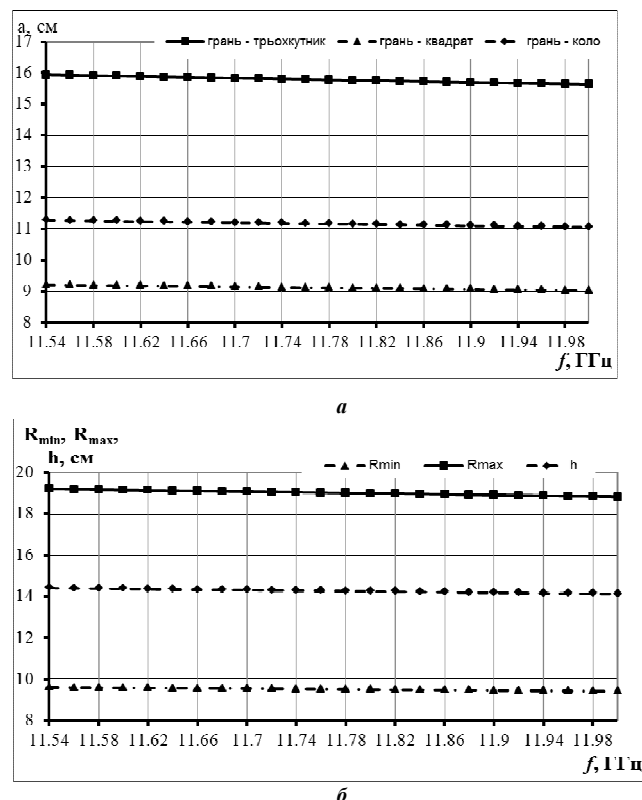


Рисунок 6 – Результати моделювання параметрів кутових імітаторів різних типів для імітування повітряної цілі типу багатоцільового винищувача F-16:

а – параметри трикутного, квадратного та колового імітатора; б – параметри біконічного імітатора

Для гарантованого забезпечення імітації багатоцільового винищувача F-16 з ЕПР не нижче

4 м² в заданому діапазоні частот розмір грані трикутного імітатора необхідно вибрати 15,94 см, квадратного – 9,2 см, радіус колового імітатора – 11,37 см, для біконічного імітатора мінімальний радіус буде складати 9,6 см, максимальний радіус – 19,2 см, середній радіус та висота – 14,4 см.

Результати проведених досліджень показали, що за однакових умов застосування найбільш ефективним для імітації запропонованої цілі в даному діапазоні частот з точки зору розмірів є кутовий імітатор квадратного типу, а найменш ефективний – кутовий імітатор трикутного типу.

Але вибір того чи іншого типу кутового імітатора визначається не тільки його розмірами для забезпечення імітації заданих повітряних цілей, вагою та відбивними “властивостями”, а також конструктивними особливостями, шириною моностатичних індикатрис в обох площинах, формою та конструктивними особливостями носіїв імітаторів засобів повітряного нападу (як правило БПЛА).

Таким чином, модель оцінювання параметрів кутових імітаторів повітряних цілей дозволяє проводити розрахунки їх параметрів на основі вхідних даних про ЕПР цілі та частоту електромагнітної хвилі опромінення.

Висновки

1. Важливим елементом цільового спорядження сучасних та перспективних мішеневих БПЛА є засоби імітування ефективної площі розсіювання повітряних цілей різних типів у радіолокаційному діапазоні довжин хвиль надвисоких частот. Найбільш поширеними імітаторами повітряних цілей є кутові імітатори трьохкутного, квадратного, колового та біконічного типу.

Проведені дослідження показали, що серед кутових імітаторів повітряних цілей найбільшу ЕПР забезпечує квадратний імітатор, але в той же час він має найбільш вузькі індикатрис в обох площинах та менш міцну конструкцію. Найбільш широкі моностатичні індикатрис в обох площинах забезпечують трьохкутні імітатори повітряних цілей, що і визначає їх переваги у використанні, незважаючи на відносно низьке значення ЕПР. У порівнянні з іншими кутові імітатори прості по конструкції, технологічні при виготовленні, мають високу механічну жорсткість, забезпечують постійне значення ЕПР у широких діапазонах ракурсів опромінення при порівняно малих фізичних розмірах.

2. Розроблена модель оцінювання параметрів кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей. Вона включає об'єднані в єдине ціле логічно та інформаційно зв'язані між собою за призначенням, задачами, що розв'язуються, вхідними і вихідними даними модулі. Використання моделі дозволяє проводити розрахунки параметрів кутових імітаторів ЕПР повітряних цілей при створенні різних ПМ засобів повітряного нападу на основі даних про ЕПР цілі та частоту електромагнітної хвилі опромінення.

Результати проведених досліджень показали, що за однакових умов застосування найбільш ефективним для імітації повітряних цілей в даному діапазоні частот з точки зору розмірів є кутовий імітатор квадратного типу, а найменш ефек-

тивний – кутовий імітатор трикутного типу. Вибір того чи іншого типу кутового імітатора визначається не тільки його розмірами для забезпечення імітації заданих повітряних цілей, вагою та відбивними “властивостями”, а також конструктивними особливостями, шириною моностатичних індикатрис в обох площинах, формою та конструктивними особливостями носіїв імітаторів засобів повітряного нападу.

Подальші дослідження в цьому напрямку доцільно спрямувати на пошук можливості збільшення номенклатури повітряних цілей для імітації їх ЕПР за допомогою кутових імітаторів.

Список літератури

1. 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: 10.12.2025).
2. Military Unmanned Systems. Annual Handbook, ISSUE 29, 2021. *Shephard*. 392 с.
3. Daly M. *IHS Jane's All the Worlds Aircraft: Unmanned 2012/2013*. Janes Information Group, 2012. 358 с.
4. Гомзин А.В., Михайлов С.А., Гуш Д.С. Оценка состояния и развития воздушных мишеней для испытания современных и перспективных комплексов вооружения. *Авиационная техника*. 2008. №4. С. 3-6.
5. Sukharevsky O., Gorelyshev S. Passing the ultra-wideband signal in layered-uniform half-space with the parameters of the ground. *Journal Electromagnetic Waves and Application*. 1997. Vol. 11 (8). P. 1091–1102.
6. Сухаревський О.І., Василець В.О., Ряполов І.С., Ряполов Є.І. Оцінка використання кутових відбивачів для імітації літаків тактичної авіації. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. №2(31). С. 73–78.
7. 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.
8. Іванець Г.В., Іванець М.Г., Шевченко А.Ф., Наконечний О.А., Ставицький О.М. Аналіз особливостей побудови та бойового застосування противником хибних повітряних цілей – безпілотних літальних апаратів з відбивачами на основі лінз Люнеберга. *Науково-технічний журнал «Випробування та сертифікація»*. Черкаси: Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 2025. № 3(9). С. 58-64. <https://doi.org/10.37701/ts.09.2025.07>
9. 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.
10. Military Unmanned Systems. Annual Handbook, ISSUE 26. *Shephard*, April 2018. 368 с.
11. Ivanets H., Voinov V., Khrol L., Kyrychenko M., Vasylieva O. Comparative analysis of airborne targets radar cross-section comet and lens simulators advantages and disadvantages. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2025. № 2 (59). С. 96-102. <https://doi.org/10.30748/nitps.2025.59.11>
12. Baldauf J., Lee S.-W., Lin L., Jeng S.-K., Scarborough S. M., Yu C. L. High frequency scattering from trihedral corner reflectors and other benchmark targets: SBR versus experiment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1991. Vol. 39 (9). P. 1345–1351. doi:10.1109/8.99043
13. Zaker R., Sadeghzadeh A. 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
14. Іванець Г.В., Іванець М.Г., Сапон В.І., Живець Ю.М., Ставицький О.М., Галузінський А.Г., Синицький Л.М. Дослідження ефективності застосування кутових та лінзових імітаторів сучасних повітряних цілей. *Науково-технічний журнал «Випробування та сертифікація»*. Черкаси: ДНДІ ВС ОБТ, 2025. № 2(8). С. 82-91. doi:10.37701/ts.08.2025.09

15. 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.
16. Богославец С.О., Вовченко О.В. Результаты обгрунтування вимог до повітряних мішеневих комплексів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2015. №11(18). С. 30–35.

References (transliterated)

1. AIR TARGET. Power of Precision. *Military System & Technology*. Available at: <https://www.militarysystemstech.com/suppliers/modern-leading-edge-acoustical-scoring-systems-quality-practice-and-performance/air-target> (accessed 10.12.2025).
2. Military Unmanned Systems. Annual Handbook, ISSUE 29, 2021. *Shephard*, 392 p.
3. Daly M. IHS Jane's All the Worlds Aircraft: Unmanned 2012/2013. Janes Information Group, 2012, 358 p.
4. Gomzin A. V., Mihajlov S. A., Gushh D. S. Ocenka sostojanija i razvittija vozdušnyh mishenej dlja ispytanija sovremennyh i perspektivnyh kompleksov voruzhenija [Assessment of the state and development of aerial targets for testing modern and perspective weapon systems]. *Aviacionnaja tehnika*, 2008, no. 4, pp. 3-6.
5. Sukharevsky O., Gorelyshev S. Passing the ultra-wideband signal in layered-uniform half-space with the parameters of the ground. *Journal of Electromagnetic Waves and Application*, 1997, Vol. 11, no. 8, pp. 1091–1102.
6. Sukharevsky O. I., Vasylets V. O., Ryapolov I. Ye., Ryapolov Ye. I. Otsinka vykorystannya kutovykh vidbyvachiv dlya imitatsiy litakiv taktychnoy aviatsiyi [Estimation of the use of corner reflectors for imitation of tactical aviation aircraft]. *Nauka i tehnika Povitryanykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrainy*, 2018, no. 2(31), pp. 73–78.
7. Bogoslavets S. O., Naumenko B. Yu., Luzhbina O. B. Tekhnichnyy obrys povitryanoi misheni v interesakh Povitryanykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrainy [Technical outline of an aerial target in the interests of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsiyi*, 2022, no. 18 (25), pp. 14–19.
8. Ivanets G. V., Ivanets M. G., Shevchenko A. F., Nakonechnyj O. A., Stavyskyj O. M. Analiz osoblyvostej pobudovy ta bojovogo zastosuvannya protyvykom hybnykh povitryanykh cilej – bezpilotnykh litalnykh aparativ z vidbyvachamy na osnovi linz Lyuneberha [Analysis of the features of construction and combat use of false aerial targets by the enemy – unmanned aerial vehicles with Luneburg lens reflectors]. *Naukovo-tehnichnyj zhurnal «Vyprovuvannya ta sertyfikatsiya»*, Cherkasy,
- Derzhavnyj naukovo-doslidnyj instytut vyprovuvan i sertyfikatsiyi ozbrojennya ta vijskovoji tekhniki, 2025, no. 3(9), pp. 58–64, doi:10.37701/ts.09.2025.07.
9. Bogoslavets S. O., Teshenko P. M. Tendentsiyi rozvytku vysokoshydkisnykh bezpilotnykh litakiv u sviti ta v Ukraini [Trends in the development of high-speed unmanned aircraft in the world and in Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsiyi*, 2019, no. 15, pp. 55–61.
10. Military Unmanned Systems. Annual Handbook, ISSUE 26. *Shephard*, April 2018, 368 p.
11. Ivanets H., Voinov V., Khrol L., Kyrychenko M., Vasylieva O. Comparative analysis of airborne targets radar cross-section corner and lens simulators advantages and disadvantages. *Nauka i tehnika Povitryanykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrainy*, 2025, no. 2 (59), pp. 96–102, doi:10.30748/nitps.2025.59.11.
12. 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, no. 9, pp. 1345–1351, doi:10.1109/8.99043.
13. Zaker R., Sadeghzadeh A. Passive techniques for target radar cross section reduction: A comprehensive review. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020, Vol. 30, no. 8, e22411, doi:10.1002/mmce.22411.
14. Ivanets G. V., Ivanets M. G., Sapon V. I., Zhyvets Yu. M., Stavyskyj O. M., Haluzinskyj A. H., Synyskyj L. M. Doslidzhennya efektyvnosti zastosuvannya kutovykh ta linzovykh imitatoriv suchasnykh povitryanykh cilej [Research of the effectiveness of corner and lens simulators of modern aerial targets]. *Naukovo-tehnichnyj zhurnal «Vyprovuvannya ta sertyfikatsiya»*, Cherkasy, DNDI VS OVT, 2025, no. 2(8), pp. 82–91, doi:10.37701/ts.08.2025.09.
15. Volynets V. L., Mamonova N. L., Nelson O. V. Porivnyalnyy analiz pasyvnykh zasobiv imituvannya efektyvnoyi ploshchi rozsiyuvannya povitryanykh cilej [Comparative analysis of passive means of simulating the effective scattering area of aerial targets]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsiyi*, 2014, no. 10 (17), pp. 66–71.
16. Bogoslavets S. O., Vovchenko O. V. Rezultaty obgruntuвання vymoh do povitryanykh mishenevykh kompleksiv [Results of substantiation of requirements for aerial target complexes]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu aviatsiyi*, 2015, no. 11(18), pp. 30–35.

Надійшла (received) 20.12.2025
Стаття прийнята до друку 20.04.2026
Опублікована 28.04.2026

Відомості про авторів / About the Authors

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

Горєлишев Станіслав Анатолійович / Horielyshev Stanislav – кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>; e-mail: port_6633@ukr.net.

Іванець Михайло Гризорович / 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

Кравченко Сергій Опанасович / Kravchenko Serhii – кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри Сухопутних військ Національного університету оборони України; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8188-3113>; e-mail: serg.kravchenko49@gmail.com.

Наконечний Олександр Анатолійович / Aleksandr Nakonechniy – 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.

Ставицький Олег Миколайович / Stavyskiy Oleg – 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