

О.І. Сухаревський, В.О. Василець, І.Є. Ряполов, Є.І. Ряполов

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОЦІНКА ВИКОРИСТАННЯ КУТОВИХ ВІДБИВАЧІВ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ ЛІТАКІВ ТАКТИЧНОЇ АВІАЦІЇ

За допомогою методів математичного моделювання отримано значення ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) моделі літака Су-27 та тригранних кутових відбивачів у високочастотному діапазоні довжин хвиль. Оцінено характеристики вторинного випромінювання тригранних кутових відбивачів, які використовуються в якості основного розсіювального елемента, запропонованої радіолокаційної повітряної хибної цілі тактичної авіації, що буксирується. Приведені результати показують, що, якщо необхідно отримати досить високі значення ЕПР хибної цілі при зондуванні з передньої півсфери, то необхідно використовувати «зчетверений» кутовий відбивач, а якщо необхідно зімітувати точні медіанні значення ЕПР реального об'єкта в більш вузькому тілесному куті ракурсів опромінення, краще використати один нахилений кутовий відбивач. Отримані результати доцільно використовувати на етапі розробки повітряних хибних цілей для імітації вторинного випромінювання різних складних аеродинамічних об'єктів, в якості відбивного елемента яких застосовуються кутові відбивачі.

**Ключові слова:** вторинне випромінювання, ефективна поверхня розсіяння, кутовий відбивач, методи математичного моделювання, хибна ціль.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Досвід локальних війн показав, що ефективність бойових дій авіації в значній мірі залежить від її живучості в повітрі. Під живучістю розуміється здатність авіації залишатися невразливою від протидії супротивника в створеній ним несприятливій повітряній обстановці і виконувати поставлені завдання [1–2].

Спочатку ця проблема охоплювала великий комплекс різноманітних заходів щодо поліпшення льотно-тактичних характеристик і устаткування літаків. До них належали: збільшення швидкості і дальності польоту; підвищення маневреності; бронювання життєво важливих елементів і зменшення вразливих площин конструкцій; дублювання і резервування бортових систем; захист від радіаційного випромінювання і ударної хвилі, протипожежний захист [1–2].

Однак, розвиток вогневих радіолокаційних засобів протиповітряної оборони змусив конструкторів літальної техніки розробити додаткові засоби захисту. Серед них особливе місце займає буксирувана радіолокаційна ціль, яка призначена для забезпечення індивідуального захисту літального апарату шляхом перенацілювання атакуючої ракети на буксирувану хибну ціль.

На сьогоднішній день використання буксируваної хибної цілі тактичної авіації, основним елементом відбиття електромагнітної хвилі (ЕМХ) якої є кутові відбивачі, досліджено недостатньо, тому тема статті є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для імітації рухомих об'єктів хибні цілі часто виконують

у вигляді буксируваних літальних апаратів найпростішої конструкції. Геометричні розміри таких літальних апаратів значно менше об'єктів, що захищаються, проте сигнали від хибних цілей на вході приймача повинні перевищувати сигнали, відбиті від об'єкта захисту. Для цього ЕПР хибних цілей штучно збільшують шляхом установки на них підсилювачів – ретрансляторів сигналів або пасивних пере-відбивачів [3].

Вперше хибні цілі, що буксируються, застосовували під час другої світової війни, коли з метою зниження ефективності німецької протиповітряної оборони (ППО) авіація союзників використовувала в якості хибних цілей буксирувані металеві сітки. Ці сітки, створюючи потужні відбиваючі сигнали, відволікали на себе станції гарматного наведення [3].

Сучасні хибні цілі, що буксируються на тонкому канаті, мають вигляд найпростіших літальних апаратів (рис. 1).

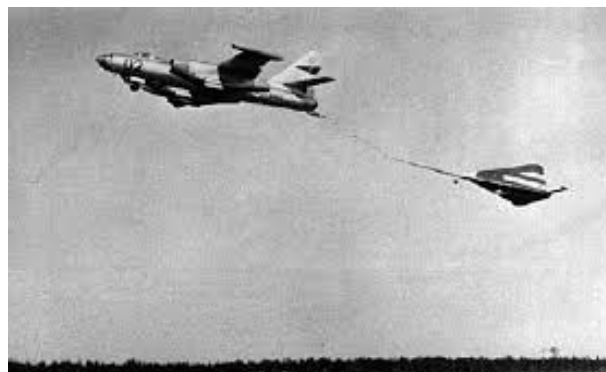


Рис. 1. Літак Іл-28 з хибною ціллю

Хибні цілі відносяться до класу перешкод, що імітують і представляють собою різного виду відби-

вачі, які мають великі значення ЕПР. Основним завданням хибних цілей є замикання на себе контуру управління зброєю, а також створення на екранах радіолокаційних станцій (РЛС) оглядового типу відміток цілей, координати яких не збігаються з координатами об'єктів, що захищаються [2].

Характеристики помітності хибної цілі забезпечують спеціальні пристрої, які забезпечують необхідні величини ЕПР. Наприклад, в радіолокаційному діапазоні довжин хвиль можуть бути встановлені пасивні відбивачі (кутові відбивачі, лінзи Люнеберга) або активні радіолокаційні хибні цілі.

Кутові відбивачі є жорсткою конструкцією, що складається з взаємно перпендикулярних ідеально провідних граней, механічно і електрично з'єднаних між собою, розміри яких значно перевищують довжину падаючої ЕМХ. Найважливішою властивістю кутових відбивачів є те, що значна частка високочастотної енергії, падаючої на них з будь-якого напрямку в межах внутрішнього кута, відбивається назад в бік джерела опромінення. Завдяки цьому кутові відбивачі навіть невеликих розмірів мають значні ЕПР. Інтенсивність розсіяння падаючих радіохвиль залежить від розмірів і форми граней відбивача, матеріалу, з якого він виготовлений, а також від напрямку падіння хвилі [3].

Кутовий відбивач є одним з найпоширеніших типів ширококутних моностатичних відбивачів, який використовується, в тому числі, в якості хибної цілі. У порівнянні з іншими типами відбивачів кутовий відбивач простий по конструкції, технологічний при виготовленні, забезпечує великі значення ЕПР в широких діапазонах ракурсів опромінення при порівняно малих фізичних розмірах [3].

**Мета статті** – оцінка вторинного випромінювання тригранних кутових відбивачів у високочастотному діапазоні довжин хвиль, які використовуються в якості основного відбиваючого елементу проектованої радіолокаційної повітряної хибної цілі тактичної авіації, що буксирується.

### Виклад основного матеріалу

На рис. 2 наведено зовнішній вигляд моделі літака Су-27. Габаритні розміри об'єкта, що моделюється (21,93×14,70×5,93) м.

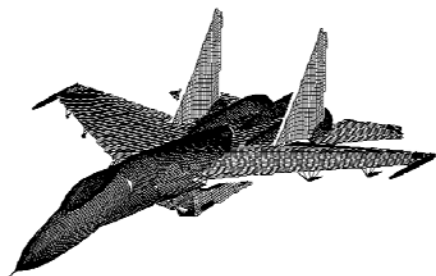


Рис. 2. Зовнішній вигляд моделі літака Су-27

На рис. 3 наведено зовнішній вигляд моделі тригранного кутового відбивача, для якого проведені дослідження вторинного випромінювання у високочастотному діапазоні довжин хвиль з метою імітації рівня ЕПР літака Су-27 в певному діапазоні ракурсів зондування. Габаритні розміри (1,00×0,15×0,15) м.

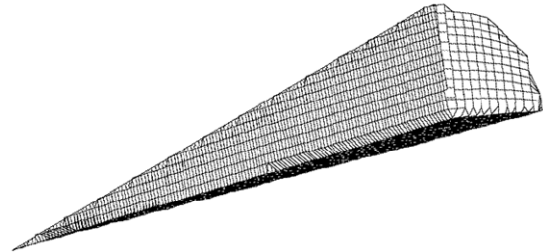


Рис. 3 Зовнішній вигляд моделі тригранного кутового відбивача

Методи моделювання вторинного випромінювання складних аеродинамічних об'єктів, які використовувалися при отриманні ЕПР Су-27, наведені в [4; 6–17].

Основною характеристикою, яка визначає властивості об'єкту, що відбиває електромагнітні хвилі, є ЕПР:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{p}^{np} \cdot \vec{E}_S|^2}{|\vec{p}^0 \cdot \vec{E}^0|^2}, \quad (1)$$

де  $R$  – відстань від об'єкта до точки спостереження;  $\vec{p}^{np}$ ,  $\vec{p}^0$  – орти поляризації приймальної і передавальної антен відповідно;  $\vec{E}_S$  – комплексна амплітуда поля, що розсіяно в напрямку точки прийому сигналу;  $\vec{E}^0$  – комплексна амплітуда поля плоскої монохроматичної ЕМХ, що зондує об'єкт.

Передбачається, що зондування проводиться плоскою монохроматичною ЕМХ одиничної амплітуди з ортом поляризації  $\vec{p}^0$  і напрямком поширення, що характеризується ортом  $\vec{R}^0$ , яка падає на поверхню об'єкта, розташованого в вільному просторі (рис. 2):

$$\vec{E}^0(\vec{x}) = \vec{p}^0 \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})), \quad (2)$$

$$\vec{H}^0(\vec{x}) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})), \quad (3)$$

де  $k_0$  – хвильове число у вільному просторі ( $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – довжина падаючої монохроматичної хвилі),  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  – абсолютні діелектрична і магніт-

тна проникності вакууму,  $\vec{x}$  – радіус-вектор точки на поверхні об'єкту.

Поле, розсіяне об'єктом в напрямку  $\vec{r}^0$ , за допомогою леми Лоренца може бути представлено у вигляді:

$$\vec{p}^{np} \cdot \vec{E}_S = -jk_0 \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} \cdot \int_S \left( \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (\vec{p} \cdot \vec{N}^\perp) + (\vec{p} \times \vec{r}^0) \cdot \vec{E}^\perp \right) \exp(-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{x})) dS, (4)$$

де  $\vec{E}^\perp = \vec{n} \times \vec{E}$ ,  $\vec{N}^\perp = \vec{n} \times \vec{N}$ ,  $(\vec{E}, \vec{N})$  – повне поле;

$\vec{n}$  – орт зовнішньої нормалі до поверхні інтегрування  $S$ , що охоплює даний об'єкт.

Поверхня  $S$  вибрана так, щоб вона збігалася з поверхнею об'єкта всюди за винятком околиць зламів, де вона проходить по тороїдальній поверхні кругового перетину, "натягнутого" на злам.

Поверхню можна представляється у вигляді суми  $S=S_1+S_0$ , де  $S_1$  збігається з гладкими ділянками поверхні, а  $S_0$  – сукупність тороїдальних околиць кромки. Таким чином, інтеграл в (4) являє собою суму інтегралів по поверхнях  $S_1$  і  $S_0$ .

Поле, розсіяне гладкою частиною поверхні об'єкта  $S_1$  в напрямку  $\vec{r}^0$ , може бути представлено у вигляді частини виразу (4):

$$\vec{p}^{np} \cdot \vec{E}_{S_1} = -jk_0 \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} \cdot \int_{S_1} \left( \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (\vec{p} \cdot \vec{N}^\perp) + (\vec{p} \times \vec{r}^0) \cdot \vec{E}^\perp \right) \exp(-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{x})) dS. (5)$$

Вираз для поля, розсіяного кромочними локальними ділянками розсіювання, можна представити у вигляді:

$$\vec{p}^{np} \cdot \vec{E}_{S_0} = -jk_0 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} (\vec{p} \cdot \vec{F}(\vec{r}^0)), (6)$$

де

$$\vec{F}(\vec{r}^0) = \int_{S_0} \left[ \vec{N}^\perp - \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{E}^\perp \times \vec{r}^0) \right] \exp(-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{x})) dS.$$

Метод розрахунку ЕПР тригранного кутового відбивача довільних форми і умов опромінення наведено в [5; 12–17].

Зокрема, кутовий відбивач може використовуватися всередині носової частини (під обтічником) буксированої радіолокаційної хвильної цілі. З огляду на те, що обтічник буде виготовлений з радіопрозо-

рого матеріалу (склопластик), на даному етапі достатньо оцінити можливість імітації літальних апаратів безпосередньо за допомогою кутового відбивача. Одним із запропонованих способів використання кутового відбивача є застосування «зчтвєреного» кутового відбивача, вісь якого спрямована вздовж осі хвильної цілі. Це дозволяє отримувати однакові діаграми розсіювання в чотирьох секторах опромінення з передньої напівсфери. З метою більш точної імітації ЕПР реального об'єкту необхідно використовувати кутові відбивачі з вирізами на гранях. Схема такого відбивача приведена на рис. 4. Варіюючи величинами  $d_1$ ,  $d_2$ , можна отримувати різні рівні вторинного випромінювання об'єкта.

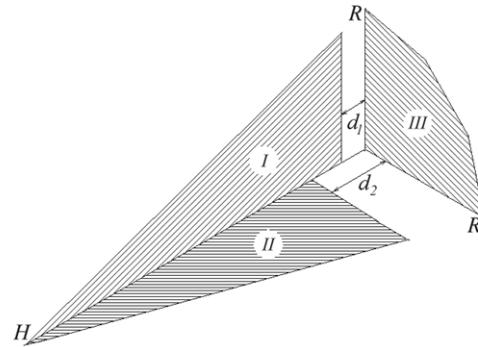


Рис. 4. Модель кутового відбивача з вирізами на гранях

На рис. 5. наведено залежності медіанних значень ЕПР моделі літака Су-27 і «зчтвєрених» кутових відбивачів, що його імітують, від азимута зондування об'єктів. Довжина хвилі в наведених результатах приймалася рівною 3 см.

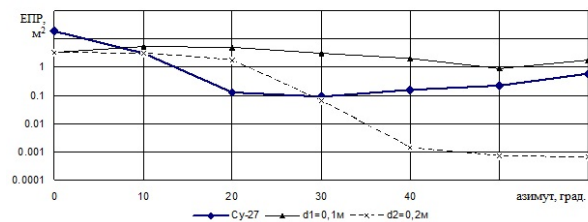


Рис. 5. Залежність медіанних значень ЕПР моделі Су-27 і зчтвєреної кутового відбивача з вирізами від азимута опромінення

Медіанні значення отримані в десятиградусному діапазоні азимутальних кутів і являють собою значення ЕПР, що використовуються при розрахунках дальності виявлення об'єкта з ймовірністю 0,5. Нестабільність положення об'єктів під час опромінення імітувалась випадковим вибором кута місця зондування в діапазоні  $-7 \dots +1$  градус щодо площини горизонту. Кількість значень ЕПР, отриманих в кожному десятиградусному азимутному діапазоні, дорівнює 500.

Результати показують досить високий рівень ЕПР кутового відбивача на широкому діапазоні

азимутів опромінення і непоганий якісний збіг залежності медіанної ЕПР літака і кутового відбивача. Недоліком запропонованої схеми є недостатній рівень ЕПР кутового відбивача при носовому зондуванні (азимут 0 градусів).

Іншим запропонованим способом використання кутового відбивача є застосування одного кутового відбивача, вісь якого відхилена вниз відносно осі хибної цілі, що дозволяє отримувати високі значення ЕПР при носовому зондуванні. На рис. 6. наведено залежності медіанних значень ЕПР моделі літака Су-27 і "нахиленого" кутового відбивача, що його імітує, від азимута зондування об'єктів. Наведено залежності ЕПР кутового відбивача для кутів нахилу щодо осі хибної цілі 20 і 30 градусів.

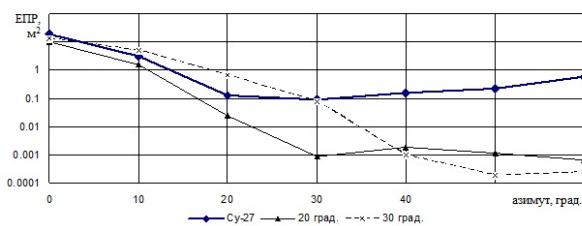


Рис. 6. Залежність медіанної ЕПР моделі Су-27 і нахиленого кутового відбивача від азимута опромінення

Результати показують добрий якісний і кількісний збіг залежності медіанної ЕПР літака і кутового відбивача в широкому діапазоні азимутів зондування (0 ... 30 градусів).

## Висновки

В статті проведено оцінку вторинного випромінювання тригранних кутових відбивачів у високо-частотному діапазоні довжин хвиль, які використовуються в якості основного відбиваючого елементу проєктованої радіолокаційної повітряної буксирної хибної цілі тактичної авіації.

Отримані результати дозволяють зробити наступні практичні висновки:

– якщо необхідно отримати досить високі значення ЕПР хибної цілі при зондуванні з передньої півсфери (азимут 0..60 град.), то необхідно використовувати «зчетверений» кутовий відбивач. При цьому використання вирізів на гранях сприяє схожості залежності ЕПР кутового відбивача з ЕПР імітованого об'єкта;

– якщо необхідно зімітувати точні медіанні значення ЕПР реального об'єкта в більш вузькому тілесному куті ракурсів опромінення (азимут 0..30 град.), краще використовувати один нахилений кутовий відбивач.

Отримані результати доцільно використовувати на етапі розробки повітряних хибних цілей для імітації вторинного випромінювання різних складних аеродинамічних об'єктів, в якості відбивного елементу яких застосовуються кутові відбивачі.

## Список літератури

1. Краснов А.Б. О повышении живучести авиации в воздухе / А.Б. Краснов // Военная мысль. – 1990. – № 3. – С. 26-32.
2. Гомзин А.В. Оценка состояния и развития воздушных мишеней для испытаний современных и перспективных комплексов вооружения / А.В. Гомзин, С.А. Михайлов, Д.С. Гущина // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2008. – №4. – С. 3-6.
3. Никольский Б.А. Методы и средства радиоэлектронной защиты летательных аппаратов: учеб. пособие Ч. 2 / Б.А. Никольский. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 79 с.
4. Sukharevsky O.I. (Ed.). Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects, CRC Press, 2014. – 334 с. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7130989>.
5. Sukharevsky O.I. Scattering characteristics computation method for corner reflectors in arbitrary illumination conditions / O.I. Sukharevsky, V.A. Vasilets, S.V. Nechitaylo // International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), 21-24 April, 2015, Kharkiv, Ukraine. – P. 222-224. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2015.7136836>.
6. Ultrawideband Radar. Application and Design / edited by J.D. Taylor. – Boca Raton, London, New York: SRC Press Taylor & Francis Group, 2012. – 520 p.
7. Мартынов Н.А. Оценка характеристик рассеяния электромагнитных волн на сложных телах, частично покрытых радиопоглощающими материалами / Н.А. Мартынов, Г.Н. Мироненко // Радиотехника. – 1996. – № 6. – С. 102-105.
8. Юссеф Н.Н. Эффективная площадь отражения сложных радиолокационных целей / Н.Н. Юссеф // ТИИЭР. – 1989. – Т. 77, № 5. – С. 100-112.
9. Sukharevsky O. Scattering characteristics of Mi-8MT helicopter based on measurements of object scale model in an anechoic chamber / O. Sukharevsky, V. Vasilets, I. Ryapolov, M. Brechka // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – №1 (1). – С. 109-114. <https://doi.org/10.30748/soi.2017.147.20>.
10. Knott E.F. Radar Cross Section / E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley. – Boston, London: Artech House, 1993. – 611 p.
11. Захаров Е.В. Численный анализ дифракции радиоволн / Е.В. Захаров, Ю.В. Пименов. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с., ил.
12. Каценеленбаум Б.З. Высокочастотная электродинамика / Б.З. Каценеленбаум. – М.: Наука, 1966. – 240 с.
13. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с., ил.
14. Beckmann P. The Depolarisation of Electromagnetic Waves / P. Beckmann. – Colorado, Boulder: The Golem Press, 1968. – 163 p.

15. Менцер Дж.Р. Дифракция и рассеяние радиоволн: пер с англ. / Дж.Р. Менцер. – М.: Советское радио, 1958. – 148 с.
16. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции / П.Я. Уфимцев. – М.: Советское радио, 1962. – 244 с.
17. Борзов А.Б. Цифровое моделирование полей рассеяния коротких радиоволн элементами сложных радиолокационных сцен / А.Б. Борзов, Э.А. Засовин, А.В. Соколов [и др.] // Радиоэлектроника. – 1999. – № 12. – С. 19-24.

## References

1. Krasnov, A.B. (1990), “O povyshennyi zhyvuchesty avyatsyy v vozdukh” [On increasing the survivability of aviation in the air], *Military Thought*, No. 3, pp. 51-58.
2. Gomzin, A.V., Mikhailov, S.A. and Gushchina, D.S. (2008), “Otsenka sostoiannya y razvytiya vozdushnykh myshenei dlia yspytanykh sovremennykh y perspektivnykh kompleksov vooruzheniya” [Evaluation of the State and Development of Aerial Targets Contemporary and Promising Arms Systems], *Russian Aeronautics. Aircraft Equipment*, No. 4, pp. 3-6.
3. Nykolskiy, B.A. (2007), “Metody y sredstva radyoelektronnoi zashchyty letatelnykh apparatov” [Methods and means of radio-electronic protection of aircraft], Samar. Gos. Aerokosm Un-t, Samara, 79 p.
4. Sukharevsky, O.I. (2014), *Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects*, CRC Press, 334 p. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7130989>.
5. Sukharevsky, O.I., Vasilets, V.A. and Nechitaylo, S.V. (2015), Scattering characteristics computation method for corner reflectors in arbitrary illumination conditions, *International Conference on Antenna Theory and Techniques*, 21-24 April, Kharkiv, pp. 222-224. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2015.7136836>.
6. Taylor, J.D. (2012), *Ultrawideband Radar. Application and Design*, SRC Press Taylor & Francis Group, New York, 520 p.
7. Martynov, N.A. and Myronenko, H.N. (1996), “Otsenka kharakterystyk rasseianiya elektromahnytnykh voln na slozhnykh telakh, chastychno pokrytykh radyopohloshchayushchymy materialamy” [Evaluation of the characteristics of the scattering of electromagnetic waves on complex bodies partially covered with radio absorbing materials], *Radiotechnics*, No. 6, pp. 102-105.
8. Yussef, N.N. (1989), “Effektyvnaia ploshchad otrazheniya slozhnykh radyolokatsyonnykh tselei” [Effective area of reflection of complex radar targets], *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, No. 5, pp. 110-112.
9. Sukharevsky, O., Vasilets, V., Ryapolov, I. and Brechka, M. (2017), Scattering characteristics of Mi-8MT helicopter based on measurements of object scale model in an anechoic chamber, *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(26), pp. 109-114. <https://doi.org/10.30748/soi.2017.147.20>.
10. Knott, E.F., Shaeffer, J.F. and Tuley, M.T. (1993), *Radar Cross Section*, Artech House, Boston, 611 p.
11. Zakharov, E.V. and Pymenov, Yu.V. (1982), “Chyislenniye analizy dyfraktsyy radyovoln” [Numerical analysis of diffraction of radio waves], Radio and communication, Moscow, 184 p.
12. Katsenelenbaum, B.Z. (1996), “Vysokochastotnaia elektrodynamyka” [High-frequency electrodynamics], Science, Moscow, 240 p.
13. Vainshtein, L.A. (1988), “Elektromahnytnye volny” [Electromagnetic waves], Radio and communication, Moscow, 440 p.
14. Beckmann, P. (1968), *The Depolarisation of Electromagnetic Waves*, The Golem Press, 163 p.
15. Mentser, Dzh.R. (1958), “Dyfraktsiya y rasseianye radyovoln” [Diffraction and scattering of radio waves], Soviet's radio, Moscow, 148 p.
16. Ufymtsev, P.Ya. (1962), “Metod kraevykh voln v fizycheskoi teoryi dyfraktsyy” [Method of edge waves in the physical theory of diffraction], Soviet's radio, Moscow, 244 p.
17. Borzov, A.B., Zasovyn, E.A. and Sokolov, A.V. (1999), “Tsyfrovoe modelirovaniye polei rasseianiya korotkykh radyovoln elementamy slozhnykh radyolokatsyonnykh stsen” [Digital modeling of the fields of scattering of short radio waves by elements of complex radar scenes], *Radioelectronics*, No. 12, pp. 19-24.

Надійшла до редколегії 5.02.2018

Схвалена до друку 20.03.2018

### Відомості про авторів:

#### Сухаревський Олег Ілліч

доктор технічних наук професор  
провідний науковий співробітник  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-4607-5361>  
e-mail: [sukharevsky@euro.dinos.net](mailto:sukharevsky@euro.dinos.net)

#### Василець Віталій Олексійович

доктор технічних наук старший науковий співробітник  
провідний науковий співробітник  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3614-559X>  
e-mail: [admin@euro.dinos.net](mailto:admin@euro.dinos.net)

### Information about the authors:

#### Oleh Sukharevsky

Doctor of Technical Sciences Professor  
Lead Researcher  
of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-4607-5361>  
e-mail: [sukharevsky@euro.dinos.net](mailto:sukharevsky@euro.dinos.net)

#### Vitalii Vasilets

Doctor of Technical Sciences Senior Research  
Lead Researcher  
of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3614-559X>  
e-mail: [admin@euro.dinos.net](mailto:admin@euro.dinos.net)

**Ряполов Іван Євгенович**

кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3139-1644>  
e-mail: i.ryapolov.79@gmail.com

**Ivan Ryapolov**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Research Associate  
of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3139-1644>  
e-mail: i.ryapolov.79@gmail.com

**Ряполов Євген Іванович**

викладач  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-3623-8021>  
e-mail: e.i.ryapolov@gmail.com

**Yevhen Ryapolov**

Instructor  
of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3623-8021>  
e-mail: e.i.ryapolov@gmail.com

**ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ  
ДЛЯ ИМИТАЦИИ САМОЛЕТОВ ТАКТИЧЕСКОЙ АВИАЦИИ**

О.И. Сухаревский, В.А. Василец, И.Е. Ряполов, Е.И. Ряполов

*С помощью методов математического моделирования получены значения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) модели самолета Су-27 и трехгранных угловых отражателей в высокочастотном диапазоне длин волн. Оценены характеристики вторичного излучения трехгранных угловых отражателей, которые используются в качестве основного рассеивающего элемента, предлагаемой буксируемой радиолокационной воздушной ложной цели тактической авиации. Приведенные результаты показывают, что, если необходимо получить достаточно высокие значения ЭПР ложной цели при зондировании с передней полусферы, то необходимо использовать «четверенный» угловой отражатель, а если необходимо симитировать точные медианные значения ЭПР реального объекта в более узком телесном угле ракурсов облучения, то лучше использовать один наклоненный уголкового отражатель. Полученные результаты целесообразно использовать на этапе разработки воздушных ложных целей для имитации вторичного излучения различных сложных аэродинамических объектов, в качестве отражающего элемента которых применяются уголкового отражатели.*

**Ключевые слова:** вторичное излучение, эффективная поверхность рассеяния, уголкового отражатель, методы математического моделирования, ложная цель.

**THE ESTIMATION OF THE USE OF CORNER REFLECTORS  
FOR SIMULATION OF TACTICAL AVIATION AIRCRAFT**

O. Sukharevsky, V. Vasilets, I. Ryapolov, Ye. Ryapolov

*The relevance of the use of the towed false target of tactical aviation, its main element of the electromagnetic wave reflection is the angular reflectors, is substantiated in the article. The surface model of Su-27 aircraft and trihedral corner reflector was developed using mathematical modeling methods. The value of the effective reflective area (ERA) of Su-27 aircraft model and trihedral corner reflector in the high-frequency wavelength range is obtained. The research of characteristics of scattering by corner reflector for various applications is carried out. The first method involves the use of a "quadrant" corner reflector whose axis is directed along the axis of the false target. It allows to get the same scattering diagrams in the four sectors of the irradiation from the anterior hemisphere. Another proposed method of using corner reflector is the use of a single corner reflector, whose axis is deflected down the axis of the false target, allows for high values of ERA for nasal probing. The dependence of median ERA of Su-27 model and the quadrant corner reflector with cutouts from the azimuth of irradiation is presented. The median value is obtained in the ten-degree range of the azimuthal angles and represent the values of ERA used in the calculating the range of the object's detection with a probability of 0,5. In carrying out the researches considered in the article, the methods based on integral representations of classical electrodynamics and their short-wave asymptotics were used. The results show that if it is necessary to obtain high value of ERA for a false target when probing from the anterior hemisphere, then it is necessary to use "quadrant" corner reflector, and if it is necessary to simulate the exact median values of ERA of the real object in a narrower body corner of the irradiation corners, then it is better use one tilted corner reflector. It is expedient to use the obtained results during the development of air false targets for the simulation of secondary radiation of various complex aerodynamic objects, with the use of corner reflectors as a reflection element.*

**Keywords:** effective reflective area, corner reflector, methods of mathematical modeling, false target.