

О. Л. Сидорчук

## ПРОБЛЕМАТИКА МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ АНТЕН ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ ЕФЕКТИВНОЮ ПОВЕРХНЕЮ РОЗСІЮВАННЯ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ РОЗВІДКИ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

*У статті розглянуто актуальність відомих підходів до зниження радіолокаційної помітності засобів радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби за рахунок зменшення ефективної поверхні розсіювання їх антенних систем з урахуванням досвіду сучасної російсько-української війни.*

*Проаналізовано відомі наближені методи розрахунку розсіювання електромагнітних хвиль антенами, зокрема обчислення інтегральних і диференціальних поверхонь розсіювання, наведено прості формули для оцінювання таких величин.*

*Доведено, що зменшення електромагнітного поля, перевипроміненого об'єктами озброєння та військової техніки за рахунок застосування спеціальних форм, радіопоглинальних матеріалів та покриттів тощо, є непридатним для зниження розсіювання їх антенних систем. Складність полягає в неможливості уникнути перевипромінювання, оскільки за принципом оберненості будь-яка антена розсіює не менше половини падаючої на неї енергії. Отже, має сенс лише трохи зменшити сумарну або інтегральну розсіювальну потужність. Також можна припустити, що заміна антени лінійної поляризації на антену колової поляризації дозволить знизити її радіолокаційну помітність за рахунок зміни напрямку відбиття хвилі зондувальної бортової радіолокаційної станції.*

*Рекомендовано для наземних станцій радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби застосувати підхід мініатюризації рупорних опромінювачів їх антенних систем за умови збереження робочих характеристик шляхом зменшення габаритних розмірів, покращення узгодження в антенних трактах та зменшення перевипромінювання від апертури антени. Підбором амплітуди і фази коефіцієнта відбиття у фідерному тракту можна компенсувати тіньове і модове розсіювання та знизити його на 10–20 дБ.*

*Проведені дослідження в подальшому сприятимуть моделюванню антени з новим малогабаритним опромінювачем та дозволять оцінити, наскільки було зменшено її ефективну поверхню розсіювання.*

**Ключові слова:** *радіолокаційна станція; пірамідальний рупорний опромінювач; зменшення ефективної поверхні розсіювання; радіолокаційна помітність; дифракція електромагнітної хвилі.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Досвід операції Об'єднаних сил (антитерористичної операції), останніх воєнних конфліктів та теперішніх бойових дій російсько-української війни свідчить про зростання значущості радіоелектронної розвідки (РЕР) та радіоелектронної боротьби (РЕБ). Застосування засобів РЕР і РЕБ забезпечує

своєчасне виявлення та протидію системам радіолокаційної розвідки повітряного базування (літаків, вертольотів і безпілотних літальних апаратів) [1–5]. Разом з тим технічні засоби РЕР та РЕБ є основними цілями, які виявляють засобами повітряної радіолокаційної розвідки, вони можуть бути уражені в першу чергу. Тому в умовах бойового застосування противником авіації з бортовими радіолокаційними станціями (БРЛС) необхідним є зменшення радіолокаційної помітності наземних сил і засобів РЕР та РЕБ, що налаштовані на розвідку в діапазоні частот повітряних БРЛС.

У загальному випадку радіолокаційна помітність засобів РЕР і РЕБ значною мірою залежить від їх антенних систем. За деяких ракурсів спостереження антени стають джерелом домінуючого вторинного випромінювання і визначають радіолокаційну помітність таких засобів [6–12]. Внесок антен у загальну ефективну площу (поверхню) розсіювання (ЕПР) для окремих зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) у найбільш небезпечному секторі кутів опромінювання може досягати 98% [13]. Тому завдання зменшення радіолокаційної помітності ОВТ РЕР і РЕБ за рахунок зменшення ЕПР їх антенних систем є актуальним.

Значний внесок у радіолокаційну помітність зразків ОВТ здійснюють антени великої апертури, гостронаправлені (дзеркальні, лінзові) та рупорні антени [14–16]. У більшості випадків опромінювачами антенних систем станцій РЕР та РЕБ стають резонансні рупорні антени. Найбільш проблемним завданням є зменшення ЕПР дзеркальних антен із рупорним опромінювачем, який знаходиться у фокусі антенної системи та істотно впливає на її загальну ЕПР.

Відомі підходи зменшення електромагнітного поля, перевипроміненого об'єктами ОВТ за рахунок застосування спеціальних форм, радіопоглинальних матеріалів та покриттів тощо, є непридатними для зниження ЕПР їх антенних систем. Складність полягає в неможливості уникнути перевипромінювання, оскільки за принципом оберненості будь-яка антена розсіює не менше половини падаючої на неї енергії [17–18].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням розсіювальних властивостей антен, методам зменшення їх радіолокаційної помітності та оцінюванню внеску окремих елементів конструкцій у загальну ЕПР антенних систем приділяли увагу багато вчених, наприклад: У. Р. Стоун, Р. С. Хансен, П. Я. Уфімцев, Л. С. Бененсон, Я. Н. Фельд, О. І. Сухаревський, Я. О. Белевищук, В. О. Василець та інші. Проте застосування відомих методів зменшення ЕПР антен є досить проблематичним для засобів РЕР та РЕБ, оскільки призводить до погіршення основних характеристик їх антенних систем, зокрема коефіцієнта спрямованої дії. Впровадження таких методів зазвичай потребує оптимізації за комплексним критерієм “ефективність – помітність”, що неприпустимо для станцій РЕР та РЕБ. Так, зменшення коефіцієнта спрямованої дії їх приймальних антен призведе до зменшення максимальної дальності розвідки за головною та бічними пелюстками діаграми спрямованості антени БРЛС [19].

Отже, метою статті є дослідження відомих методів оцінювання конструкцій антени зі зменшеною ЕПР для зниження радіолокаційної помітності засобів РЕР і РЕБ за рахунок зменшення помітності їх антенних систем, а також попереднє оцінювання характеристик розсіювання дзеркальних антен з рупорним опромінювачем.

**Виклад основного матеріалу.** Проектування конструкцій антен зі зменшеною ЕПР належить до класу задач дифракції електромагнітної хвилі (ЕМХ) на тілах складної форми [20]. У разі падіння ЕМХ на такі об'єкти первинні хвилі можуть відбиватися, заломлюватися, частина енергії може поглинатися, у результаті чого змінюється структура первинної хвилі. Задачі виявлення впливу різних об'єктів на структуру електромагнітного поля є задачами дифракції.

Постановка дифракційних задач може бути досить різноманітною. Наприклад, вважатимемо, що розглядаються задачі дифракції монохроматичних ЕМХ на тілах, розміщених у безмежному однорідному ізотропному середовищі. Тіла можуть бути металевими (каркас рупора), діелектричними (фазуюча пластина всередині рупора), дифракція може відбуватися на отворах різної форми в нескінченних металевих екранах (прорізани гантелеподібні щілини) тощо. Вектори  $\mathbf{E}_n$ ,  $\mathbf{H}_n$  падаючої хвилі вважають відомими (рис. 1) [20].

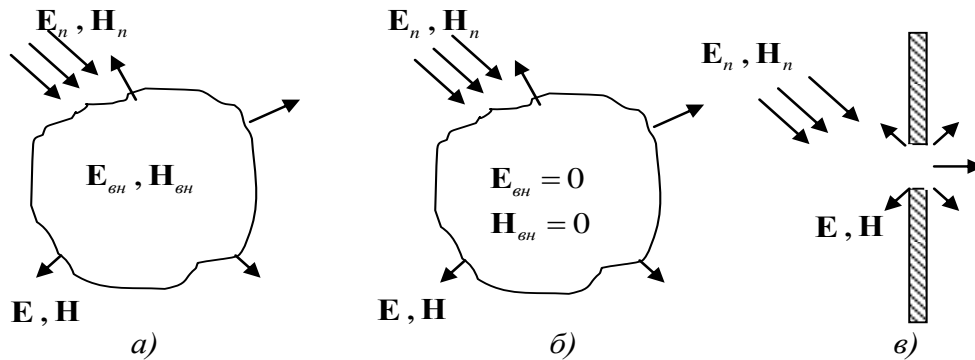


Рис. 1. До постановки задачі дифракції ЕМХ на діелектричній поверхні (а), металевій поверхні (б), отворі (в)

Усередині діелектричного тіла збуджується внутрішнє поле дифракції  $\mathbf{E}_{gn}$ ,  $\mathbf{H}_{gn}$ , яке дорівнює нулю на ідеально провідних тілах. Поза об'єктами дифракції збуджується зовнішнє поле дифракції  $\mathbf{E}_p$ ,  $\mathbf{H}_p$  (поле розсіювання). Повне поле  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  поза об'єктами, тобто поле розсіювання, знаходимо як суму векторів [20]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_n + \mathbf{E}_p, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_n + \mathbf{H}_p. \quad (1)$$

Щоб задане поле відповідало вимогам теореми єдності [20], воно має задовольняти граничні умови на поверхні  $S$  об'єкта дифракції для рис. 1а:

$$[\mathbf{E}, \mathbf{e}] = [\mathbf{E}_p, \mathbf{e}]; \quad [\mathbf{H}, \mathbf{e}] = [\mathbf{H}_p, \mathbf{e}]. \quad (2)$$

Для випадку, зображеного на рис. 1б, якщо об'єкт розсіювання ідеально провідний, то

$$[\mathbf{E}, \mathbf{e}] = [\mathbf{E}_p, \mathbf{e}] = 0, \quad [\mathbf{H}, \mathbf{e}] = [\mathbf{H}_p, \mathbf{e}] = \mathbf{j}_s, \quad (3)$$

де  $\mathbf{j}_s$  – поверхнева густина струму на поверхні  $S$ .

Запропонована постановка задач дифракції дозволяє проаналізувати та оцінити електромагнітні процеси, характерні для таких об'єктів, як: перешкоди, у разі поширення ЕМХ; відбивачі; екрани; антени; радіолокаційні цілі тощо [17, 18].

Для оцінювання дифракційних процесів залежно від об'єктів дифракції, як правило, вводиться низка інтегральних характеристик, наприклад: поперечний переріз розсіювання, поперечний переріз проходження або інші.

У довіднику з антенної техніки [18] та інших джерелах [17, 20] зазначають, що розсіювальні властивості антен так само, як й інших тіл, прийнято описувати ефективними поперечниками (площею або поверхнею) розсіювання:

однопозиційним (моностатичним) інтегральним  $\sigma_{\Sigma}(\theta, \phi)$ ;

двопозиційним (бистатичним) диференціальним  $\sigma_{\sigma}(\theta, \phi, \theta', \phi')$ .

Також ЕПР описують матрицею розсіювання  $M$  та коефіцієнтом спрямованої дії двопозиційної діаграми розсіювання:  $D^r(\theta, \phi, \theta', \phi') = \frac{4\pi P_r}{P_{\Sigma}} = \frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_{\Sigma}}$ .

Поперечники розсіювання характеризують повні потужності, що розсіюються тілом в усьому тілесному куті  $4\pi P_{\Sigma}(\theta, \phi)$ , помножені на одиницю тілесного кута в напрямку  $\theta', \phi', P_r(\theta, \phi, \theta', \phi')$ , за опромінювання тіла плоскою хвилею, що падає в напрямку  $\theta, \phi$ . Ці поперечники визначають у такий спосіб [17]:

$$\sigma_{\Sigma}(\theta, \phi) = \frac{P_{\Sigma}(\theta, \phi)}{|\operatorname{Re} \Pi(\theta, \phi)|}; \quad (4)$$

$$\sigma_{\sigma}(\theta, \phi, \theta', \phi') = \frac{4\pi P_r(\theta, \phi, \theta', \phi')}{|\operatorname{Re} \Pi(\theta, \phi)|}, \quad (5)$$

де  $\Pi$  – вектор Пойнтінга падаючої хвилі (для плоскої хвилі  $\operatorname{Re} \Pi = |\Pi|$ ).

Величини  $\sigma_{\Sigma}$  та  $\sigma_{\sigma}$ , що мають розмірність площі, дорівнюють нормальним до вектора  $\Pi$  площинам, через які падаючою хвилею переносяться потужність  $P_{\Sigma}$  та  $P_r$  відповідно.

У випадку двомірної задачі  $\sigma_{\Sigma}$  та  $\sigma_{\sigma}$  – погонні величини, що мають розмірність довжини. Величина  $\sigma_{\Sigma}$  є функцією напрямку  $\theta, \phi$  приходу падаючої хвилі, а величина  $\sigma_{\sigma}$ , крім того, залежить і від напрямку  $\theta', \phi'$  спостереження, тобто є двопозиційною [17].

Найбільший практичний інтерес становлять диференціальні поверхні  $\sigma_T$  тінювого (за напрямом первинної хвилі) і  $\sigma_{звор}$  зворотного, тобто радіолокаційного (назустріч первинній хвилі), розсіювання.

Оскільки  $P_{\Sigma} = \int_{\Omega} P_r(\theta, \phi; \theta', \phi') d\Omega'$ , то

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \sigma_{\sigma}(\theta, \phi; \theta', \phi') d\Omega' \equiv \bar{\sigma}_{\sigma}, \quad (6)$$

де  $\Omega$  – одинична сфера.

З (4), (5) випливає, що

$$\frac{\sigma_{\partial}}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{4\pi\sigma_{\partial}P_r(\theta, \varphi; \theta', \varphi')}{P_{\Sigma}(\theta, \varphi)} \equiv D_r(\theta, \varphi; \theta', \varphi'). \quad (7)$$

Отже,

$$\sigma_{\partial} = \sigma_{\Sigma}D_r, \quad (8)$$

де  $D_r$ , за аналогією з коефіцієнтом спрямованої дії (КСД) антени, можна назвати КСД розсіювання. Очевидно, що

$$\sigma_{\Sigma}(\theta, \phi) = \frac{\sigma_{np}(\theta, \phi)P_{\Sigma}(\theta, \phi)}{P_{np}(\theta, \phi)}, \quad (9)$$

де  $P_{np}$  – потужність, прийнята антеною;

$$\sigma_{np} \equiv \frac{P_{np}}{\text{Re}\Pi} - \text{ефективна поглинальна поверхня антени};$$

Поляризації перевипроміненого і первинного полів, як правило, різні. Зв'язок між ними описують за допомогою дев'ятикомпонентних (у загальному випадку) матриць розсіювання, різних для кожного їх напрямку.

Для зворотного розсіювання матриці є чотирикомпонентними (2-го роду)  $\sigma_{ik}$  ( $i, k = 1, 2$ )  $M$ , елементами яких є часткові диференційні поперечники розсіювання, що відповідають  $k$ -й компоненті електричного вектора розсіювання поля, у разі опромінювання  $i$ -ю компонентою падаючої хвилі [17]. Величини  $\sigma_{ik}$  – також двопозиційні функції, тобто залежать як від  $\theta, \phi$ , так і від  $\theta', \phi'$ . Для зворотного розсіювання справедливі співвідношення симетрії

$$\sigma_{ik} = \sigma_{ki} \quad (10)$$

та інваріантності, що полягає в незалежності «сліду» матриці  $M$ , яка дорівнює  $\sigma_{11} + \sigma_{22} + 2\sigma_{12}$ , від вибору поляризаційного базису, у якому подаються падаюче і розсіяне поля [18]. У загальному випадку  $\sigma_{12} \neq 0$ , отже, у розсіяному полі є крос-поляризаційна компонента, однак завжди можна ввести такий поляризаційний базис (свій для кожного напрямку  $\theta, \phi$ ), що матриця розсіювання буде діагональною і  $\sigma_{12} = 0$ . Наприклад, за нормального падіння плоскої хвилі на металеву площину, такий базис утворить дві будь-які взаємно ортогональні лінійні поляризації. З цього випливає, що за відбиття таких хвиль крос-поляризації не виникає. Але в базисі колових поляризацій  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0$ ,  $\sigma_{12} \neq 0$ . Це пояснюється тим, що в разі відбиття від металевої площини хвилі, яка падає до неї по нормалі та має колову поляризацію, вона змінює напрям обертання на протилежний. Проте, якщо антена є лінійним вібратором, то  $\sigma_{22} = \sigma_{12} = 0$ ,  $\sigma_{11} \neq 0$  [17, 18].

З огляду на розсіювання антенами падаючого на них поля, із зазначеного вище можна зробити висновок, що будь-яка антена, незалежно від ступеня узгодження її з навантаженням, розсіює у простір значну частину падаючої на неї енергії. Легко довести (7), (8), що, якщо в антенну систему надходить деяка потужність, це може мати місце лише за наявності розсіювання. Іншими словами, якщо антена не розсіює, то вона нічого й не приймає [17–20]. Тому має сенс лише трохи зменшити сумарну або інтегральну розсіювальну потужність. Також можна припустити, що заміна антени лінійної поляризації на антену колової дозволить зменшити її радіолокаційну помітність за рахунок зміни напряму відбиття хвилі зондуючої БРЛС.

У тій чи іншій мірі такі причини розсіювання мають місце в будь-яких антенах. Розсіювання елементами конструкції рупорних антен у загальному випадку аналізувати складно. Воно проявляється в рупорній антені та в низці випадків здебільшого за опромінювання антени збоку [21–24].

Розглянемо розсіювання, що має місце в разі опромінення антени в зоні головної пелюстки діаграми спрямованості.

Пояснення тіньового розсіювання як компенсуючого первинну хвилю за антеною та інтегральну характеристику недостатньо. Його джерелами, очевидно, є електричні струми, що наводяться на зовнішній стороні металеві поверхні антени, а також еквівалентні електричні та магнітні струми в її розкриві.

Реальна рупорна антена крім розкриву, що може бути у відомому сенсі аналогом чорної пластини, має додаткові металоелементи конструкції, а саме бокові стінки, на яких падаючою хвилею наводяться струми, що створюють нібито антену біжучої хвилі. Оскільки ці струми направлені протилежно збудженим у режимі передачі на внутрішній поверхні стінок, то і напрям розсіювання буде зворотним відносно випромінювання в режимі передачі та здійснюватиме внесок у тіньове розсіювання. Струми, що відповідають за тіньове розсіювання, вочевидь, можуть створювати деякий рівень розсіювання й у зворотний півпростір [25].

Поблизу гострих кромek металеві поверхні антени крім струмів, що враховуються в наближенні Кіргофа та паралельні кромці, наводяться так звані нерівномірні струми. Викликане ними поле розсіювання має вигляд циліндричних хвиль, що розходяться.

Додаткове зворотне розсіювання відповідає частині інтегрального ЕПР, що дорівнює  $(1-q)s_{\perp}$ , де  $q$  – коефіцієнт, який характеризує узгодження апертури та приймача з антеною. Отже, у разі короткозамкненої антени  $q \rightarrow -1$ , а  $\sigma_{\Sigma} \approx 2s_{\perp}$ . Якщо розкрив поглинає всю потужність, що на нього падає, то  $q \rightarrow 1$ , а  $\sigma_{\Sigma} \approx s_{\perp}$  [17, 18].

У конструкціях реальних апертурних антен неможливо забезпечити  $q=1$ . Так, у дзеркальних і лінзових антенах  $q$  може знизитися до 0,3, у хвилеводі й рупорних антенах може становити від 0,5 до 0,8 [17, 18]. Отже, зворотне розсіювання буде мати місце у будь-якій антені. До того ж вказані значення  $q$  реалізуються лише для напрямків головного максимуму її діаграми спрямованості. Для інших напрямків величина  $q$  буде ще нижчою (порівняно з рівномірним синфазним розкривом) [17, 18].

Відомо, що для рупорних антен можна визначити форму діаграми частини зворотного розсіювання [17, 18], що зумовлено незбігом у розкриві антени розподілень: первинного

поля (у режимі приймання) і поля в антені поблизу розкриву (що найчастіше збігається з розподіленням, збудженим у режимі передавання основної хвилі одномодового фідера). При цьому розподілення первинного поля в розкриві розкладається за системою власних парціальних хвиль рупора. Основна з них використовується у фідерному тракті (хвилеводі), їй відповідає поглинальна потужність  $\sigma = qs_{\perp}$  (якщо хвилевід узгоджений із трактом). На частку інших хвиль приходиться потужність, що приблизно дорівнює  $(1-q)s_{\perp}$ , оскільки є й інші джерела зворотного розсіювання. Кожна з них відбивається всередині рупора і перевипромінюється аналогічно його збудженню відповідною гармонікою. Їх діаграми розсіювання будуть багатопелюстковими. У разі зміни ракурсу опромінювання рупора амплітуди їх гармонік і, відповідно, розсіяна ними потужність змінюється (але парціальні діаграми є незмінними). Таке розсіювання прийнято називати модовим [18].

Для дзеркальних антен з рупорним опромінювачем аналогічні міркування можуть бути також застосовані з метою оцінювання розсіювання від опромінювача [19]. Крім того, необхідно розглядати і розсіювання від поверхні дзеркала за рахунок наведених на ньому струмів. Частина поля, що випромінюється такими струмами, збирається у фокальній плямі й за відсутності опромінювача розсіюється у вигляді досить широкого пучка. Інша частина розповсюджується безпосередньо. При цьому кривизна поверхні дзеркала спричинить у перевипроміненому полі і кросполяризаційну компоненту [19].

Якщо рупорна антена опромінюється в секторі головної пелюстки її діаграми спрямованості, а приймальний тракт повністю неузгоджений із антеною, то потужність, що проходить у тракт, буде повністю відбиватися. Частина інтегральної ЕПР, що зумовлена таким розсіюванням, дорівнюватиме  $\sigma_{\Sigma}^1 = qs_{\perp}$ , а відповідна йому диференціальна ЕПР  $\sigma_{\phi}^1$  у секторі діаграми спрямованості на передачу, згідно з формулою (3), матиме такий вигляд [17, 18]:

$$\sigma_{\phi}^1(\theta, \phi, \theta', \phi') = q(\theta, \phi)s_{\perp}D(\theta', \phi') = s_{ef}(\theta, \phi)D(\theta', \phi'), \quad (11)$$

де  $q(\theta, \phi)$  відповідає опроміненню у напрямку  $\theta, \phi$ ;

$D(\theta', \phi')$  – КСД антени в режимі передачі в напрямку спостереження  $\theta', \phi'$ ;

$s_{ef}$  – ефективна площа антени,  $s_{ef} = qs_{\perp}$ .

За часткової неузгодженості антен із навантаженням в (11) необхідно ввести еквівалентний коефіцієнт відбиття основної гармоніки за потужністю  $|\Gamma|^2 \leq 1$  [17, 19]:

$$\sigma_{\phi}^1(\theta, \phi, \theta', \phi') = s_{ef}(\theta, \phi)D(\theta', \phi')|\Gamma|^2, \quad (12)$$

де  $\Gamma$  – коефіцієнт відбиття основної гармоніки за потужністю.

Величину  $\sigma_{\phi}^1$  легко можна знайти за параметрами антени в режимі приймання та передачі. Хоча вона й не дорівнює істинній диференційній ЕПР [17, 18]:

$$\sigma_{\phi}(\theta, \phi, \theta', \phi') = \sigma_{\Sigma}(\theta, \phi)D'(\theta, \phi, \theta', \phi'), \quad (13)$$

її часто використовують для наближених розрахункових оцінок  $\sigma_o$ . Це допустимо, коли  $|\Gamma|^2 \approx 1$  і лише у вузькому секторі кутів поблизу максимуму діаграми спрямованості на передачу. За  $|\Gamma|^2 \ll 1$  така оцінка взагалі буде хибною.

На практиці часто обмежуються дослідженнями однопозиційної диференційної ЕПР [17, 18] (поперечником зворотного розсіювання)  $\sigma_o(\theta, \phi)$ , коли напрям спостереження протилежний напрямку опромінення. При цьому формули (12) та (13) набувають такого вигляду:

$$\sigma_o^1(\theta, \phi) = s_{ef}(\theta, \phi) D(\theta, \phi) |\Gamma|^2, \quad (14)$$

$$\sigma_o(\theta, \phi) = \sigma_\Sigma(\theta, \phi) D^r(\theta, \phi). \quad (15)$$

Як відомо із практики [17], графіки  $\sigma_o^1(\theta, \phi)$  та  $\sigma_o(\theta, \phi)$  суттєво відрізняються особливо за  $|\Gamma|^2 \ll 1$ . Дійсно, крива  $\sigma_o^1(\theta, \phi)$  незалежно від величини  $|\Gamma|^2$  має куполоподібну форму з максимумом за  $\theta = \theta_{\max}$ ,  $\phi = \phi_{\max}$ , повторюючи залежність від цих кутів  $s_{ef} D$  (величина  $|\Gamma|^2$  від  $\theta, \phi$  не залежить), а крива  $\sigma_o(\theta, \phi)$  за  $|\Gamma|^2 \ll 1$ , навпаки, у даному напрямку буде мати мінімум (що дорівнює приблизно  $\sigma_o^1(\theta_{\max}, \phi_{\max})$ ). За відхилення від цього напрямку  $\sigma(\theta, \phi)$  досить різко збільшиться відповідно до зростання модового розсіювання. Це підкреслює обмеженість застосування формул (11), (12), (14).

Оскільки  $s_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D$ , то (14) можна подати в еквівалентному вигляді [17, 18]:

$$\sigma_o^1(\theta, \phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} |\Gamma|^2 [D(\theta, \phi)]^2, \quad (16)$$

звідки видно, що головна пелюстка антени  $\sigma_o^1(\theta, \phi)$  (а також  $\sigma_o(\theta, \phi)$  за  $|\Gamma|^2 \approx 1$ ) відповідає квадрату її діаграми спрямованості в режимі передачі. Такі висновки підтверджено даними вимірювань [21–23]. У короткозамкненого пірамідального рупора  $\sigma_o(\theta_{\max}, \phi_{\max})$  суттєво менше  $\sigma_o(\theta_{\max}, \phi_{\max})$  рівновеликої розкриву рупора металевої пластини на 6–10 дБ. Це пояснюється тим, що пластини збуджується синфазно, тоді як компоненти зворотного розсіювання рупора розфазовані. Якщо рупор узгоджено з навантаженням (за основною гармонікою), то  $\sigma_o(\theta_{\max}, \phi_{\max})$  знизиться іще на 10–20 дБ. Підбором амплітуди і фази коефіцієнта відбиття у фідерному тракті можна компенсувати у цьому напрямку тіньове і модове розсіювання та знизити  $\sigma_o$  ще на 10–20 дБ [17, 22, 23].

Опромінювач може бути виготовлено у вигляді малогабаритного пірамідального рупора зі щільним відведенням основної моди, поглинанням хвиль вищих гармонік, узгодженим навантаженням, а також діелектричною пластинною, як фазообертач для



колової поляризації. Варіанти таких конструкцій запропоновано в патентах на винахід [24, 25]. Введені обмеження дозволять кількісно оцінити зменшення ЕПР нової антени, зокрема за допомогою математичної моделі, запропонованої у патенті на винахід [26] або у [22, 27].

Подальші дослідження можна обмежити тактико-технічними характеристиками станцій РЕР або РЕБ, більшість з яких працює за бортовими РЛС у діапазоні частот 10–15 ГГц та однопозиційною ЕПР:

$$G_A = \text{const}; \lambda \in [0,02 - 0,03], \text{ м}; n = \text{const}, s_{\text{ef}}(\theta, \phi) \rightarrow \min; F_{\text{БП}} \leq F_{\text{БП}_0}, \quad (17)$$

де  $G_A$  – коефіцієнт підсилення антени;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$n$  – кількість рупорних опромінювачів з однаковими параметрами, шт.;

$F_{\text{БП}}$  – рівень бічних пелюсток;

$F_{\text{БП}_0}$  – оптимальний рівень бічних пелюсток.

Для побудови нової антени необхідно забезпечити

$$\sigma_{\Sigma}(\theta, \phi), \text{ м}^2 \rightarrow \min; \sigma_{\theta}^1(\theta, \phi), \text{ м}^2 \rightarrow \min; \sigma_{\theta}(\theta, \phi), \text{ м}^2 \rightarrow \min \quad (18)$$

із урахуванням розглянутих вище причин розсіювання енергії антеною з метою зменшення її радіолокаційної помітності.

**Висновки.** Проведено дослідження відомих методів оцінювання конструкцій антени зі зменшеною ЕПР. Для проєктування антен зі зниженою радіолокаційною помітністю розглянуто можливі варіанти постановки дифракційних задач, які дозволять проаналізувати та оцінити електромагнітні процеси, характерні для таких об'єктів.

Під час попереднього оцінювання диференціальної  $\sigma_{\theta}(\theta, \phi)$  та інтегральної  $\sigma_{\Sigma}$  характеристик розсіювання дзеркальних антен з рупорним опромінювачем встановлено, що причини розсіювання зумовлені:

затіненням, яке вносить сама антена;

зворотним розсіюванням полів апертурою антени;

відбиттям від приймача;

розсіюванням на зовнішніх елементах конструкції [19, 23];

розсіюванням на гострих кромках рупора [28];

неузгодженням поляризації первинного поля і поля антени [9, 29].

З урахуванням специфіки наземних станцій РЕР та РЕБ для проєктування нової антенної системи доцільно застосувати підхід мініатюризації її рупорних опромінювачів за умови збереження робочих характеристик за рахунок зменшення габаритних розмірів, покращення узгодження в антенних трактах, зниження рівня перевипромінювання від апертури антени, а також покращення її поляризаційних характеристик [24–29].

**СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Шумигай О. В., Єрмоленко О. В. Сучасний стан багатофункціональних засобів та комплексів радіоелектронної боротьби. Тенденції та перспективні напрями їх розвитку // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2020. Т. 5, № 3. С. 119–125. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.14>
2. Живець Ю. М., Єрмоленко О. В., Коваль В. В. Обґрунтування доцільних варіантів застосування засобів зниження помітності військової техніки Збройних Сил України, захисту персоналу та спорядження від технічних засобів радіолокаційної та оптико-електронної розвідки // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2020. Т. 5, № 3. С. 33–40. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.046>
3. Сидорчук О. Л. Підвищення живучості військової техніки методами радіоелектронної боротьби і зниження помітності // Тези доп. наук.-практ. конф. «Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції». Житомир : ЖВІ, 2016. С. 55.
4. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами / Под ред. О. И. Сухаревского. Харьков : ХУВС, 2009. 466 с.
5. Сидорчук О. Л., Денисюк А. Ю., Шостак І. М. Вплив зменшення ефективної поверхні розсіювання антен на системи радіолокаційної розвідки та радіоелектронної боротьби // Тези доп. наук.-практ. конф. «Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення». Житомир : ЖВІ ДУТ, 2014. С. 95–96.
6. Сидорчук О. Л. Аналіз методів і способів зменшення ефективної поверхні розсіювання антенних систем // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир : ЖДТУ, 2012. № 2 (61). С. 94–106.
7. Сидорчук О. Л. Підхід до захисту зенітно-ракетних комплексів від ураження шляхом зменшення ефективної поверхні розсіювання їх антенних систем // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2017. Вип. 14. С. 157–170.
8. Залевский Г. С. Обзор методов расчета вторичного излучения радиолокационных объектов // Системы обработки информации : зб. наук. праць. Харків : ХУПС, 2007. Вип. 7 (65). С. 16–24.
9. Сидорчук О. Л. Метод покращення поляризаційних характеристик антенних систем переносних станцій наземної розвідки // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2018. Вип. 15. С. 78–93.
10. Сидорчук О. Л. Математичний апарат дослідження амплітуд поля, збудженого антенною системою радіолокаційної станції 1РЛ133 «Кредо» // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2016. Вип. 13. С. 62–72.
11. Husnu Deniz Basdemir. Gaussian source beam diffraction by a perfect electromagnetic half-plane // Journal of the Optical Society of America. 2020. Vol. 37, Iss. 6. P. 930–939. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.389239>

12. Jiyeon Lee, Sanghoon Kim, Aobo Li, Dan Sievenpiper. Shield pattern and scattering reduction scheme using impedance surfaces // IOP Publishing Ltd Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. Vol. 54, N 47. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac2173>
13. Белевищук Я. О., Василець В. О., Нечитайло С. В. Метод розрахунку ефективної поверхні розсіювання наземної техніки, оснащеної багатоелементними антенами // Авиационно-космическая техника и технологии. Харків : ХУПС, 2009. № 8 (65). С. 169–174.
14. Сидорчук О. Л. Розрахунок ефективності поверхні розсіювання рупорної антени при падінні на неї хвилі довільної форми із застосуванням леми Лоренца // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир : ЖДТУ, 2011. № 2 (57). С. 102–113. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2011-2\(57\)-103-113](https://doi.org/10.26642/tn-2011-2(57)-103-113)
15. Jiang W., Hong T. and Gong S. X. Research on the Scattering Characteristics and the RCS Reduction of Circularly Polarized Microstrip Antenna // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation. 2013. Article ID 735847, 9 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/735847>
16. Сидорчук О. Л. Дослідження амплітуд поля, збудженого лінійною решіткою рупорних опромінювачів // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратуробудування». 2016. Вип. 67. С. 5–11. <https://doi.org/10.20535/radap.2016.67.5-11>
17. Бененсон Л. С., Фельд Я. Н. Рассеяние электромагнитных волн антеннами (обзор) // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33, № 2. С. 225–246.
18. Справочник по антенной технике: в 5 т. Т. 1 / Л. Д. Бахрах, Л. С. Бененсон, Е. Г. Зелкин и др.; под ред. Я. Н. Фельда, Е. Г. Зелкина. Москва : ИПРЖР, 1997. 256 с.
19. Сидорчук О. Л. Метод визначення електромагнітного поля, розсіяного від рупорного опромінювача, розташованого у фокусі параболоїда обертання антенної системи станцій наземної розвідки // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2019. Вип. 16. С. 80–93. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2019.16.08>
20. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2. Випромінювання та поширення радіохвиль : Підручник для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усін та ін. Харків : ХНУРЕ; Колегіум, 2010. 435 с.
21. Choi W., Kwak B., Nam Y. Radar absorbing serrated edge for broadband radar cross-section reduction // Microw Opt Technol Lett. 2020. Vol. 62, Iss. 3. P. 1112–1116. <https://doi.org/10.1002/mop.32152>
22. Кореновская О. Л., Манойлов В. Ф., Никитчук Т. М., Сидорчук О. Л. Моделирование и экспресс-методика измерения диаграмм рупорных антенн // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратуробудування». 2015. Вип. 62. С. 31–39. <https://doi.org/10.20535/radap.2015.62.31-39>
23. Манойлов В. П. Сидорчук О. Л. Снижение ЭПР рупорной антенны для широкого сектора углов наблюдения // Тезисы Междунар. крымской науч.-практ. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2012). Севастополь, 2012. Т. 2. С. 487–488.
24. Рупорна антена колової поляризації : патент на винахід № 96661 /UA/ H01Q 13/10 (2006.01) / В. П. Манойлов, О. Л. Сидорчук ; заявл. 06.04.2010 ; опубл. 25.11.11, Бюл. № 22. 6 с.

25. Рупорна антена : патент на винахід № 97037 /UA/ H01Q 13/10 (2006.01) / В. П. Манойлов, О. Л. Сидорчук ; заявл. 06.07.2010 ; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24. 6 с.
26. Система для непрямого визначення антенної складової ефективною поверхні розсіювання апертурних антен : патент на винахід № 06557 /UA/ H01Q 13/02 (2006.01) / В. П. Манойлов, О. Л. Сидорчук ; заявл. 31.05.2013 ; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17. 4 с.
27. Артюшин Л. М., Куртсеітов Т. Л., Мирненко В. І., Сидорчук О. Л. Можливості застосування протирадіолокаційних покриттів у антенних системах засобів озброєння та військової техніки з метою зменшення їх радіолокаційної помітності // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки і оборони. Київ : НУОУ, 2016. Вип. 2 (26). С. 104–109.
28. Сидорчук О. Л., Залевський В. Й. Дослідження дифракції електромагнітної хвилі на кромках пірамідальної рупорної антени як однієї з причин розсіювання // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратуробудування». 2022. Вип. 89. С. 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAR.2022.89.11-20>
29. Сидорчук О. Л. Метод проектування радіолокаційних станцій наземної розвідки з антенною системою колової поляризації // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки і оборони. Київ : НУОУ, 2018. № 3 (33) С. 25–35.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2022.

## REFERENCES

1. Shumyhai, O. V., & Yermolenko, O. V. (2020). Suchasnyi stan bahatofunktsionalnykh zasobiv ta kompleksiv radioelektronnoi borotby. Tendentsii ta perspektyvni napriamy yikh rozvytku [The current state of multifunctional means and complexes of radio-electronic warfare. Trends and prospective directions of their development]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Collection. of science works of the Govt. scientific research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment]*, Vol. 5, № 3, 119–125. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.14> [in Ukrainian].
2. Zhyvets, Yu. M, Yermolenko, O. V, & Koval, V. V. (2020). Obgruntuvannia dotsilnykh variantiv zastosuvannia zasobiv znyzhennia pomitnosti viiskovoi tekhniky Zbroinykh Syl Ukrainy, zakhystu personalu ta sporiadzhennia vid tekhnichnykh zasobiv radiolokatsiinoi ta optyko-elektronnoi rozvidky [Justification of expedient options for the use of means of reducing the visibility of military equipment of the Armed Forces of Ukraine, protecting personnel and equipment from technical means of radar and optical-electronic intelligence]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Collection. of science works of the Govt. scientific research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment]*, Vol. 5, № 3, 33–40. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.046> [in Ukrainian].
3. Sydoruk, O. L. (2016). Pidvyshchennia zhyvuchosti viiskovoi tekhniky metodamy radioelektronnoi borotby i znyzhennia pomitnosti [Increasing the survivability of military equipment by the methods of radio-electronic warfare and reducing visibility]. In *Tezy dop. nauk.-prakt. konf. «Problemy stvorennia, rozvytku ta zastosuvannia vysokotekhnolohichnykh system spetsialnoho pryznachennia z urakhuvanniam dosvidu antyterorystychnoi operatsii»*

*[Theses add. science and practice conf. "Problems of creation, development and application of high-tech special-purpose systems, taking into account the experience of anti-terrorist operations."]. (pp. 55). Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].*

4. Sukharevskii, O. I. (Eds.). (2009). *Rasseianie elektromagnitnykh voln vozdushnymi i nazemnymi radiolokatsionnymi ob"ektami [Scattering of electromagnetic waves by air and ground radar objects].* Khar'kov [in Russian].

5. Sydoruk, O. L., Denysiuk, A. Yu., & Shostak, I. M. (2014). Vplyv zmenshennia efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia anten na systemy radiolokatsiinoi rozvidky ta radioelektronnoi borotby [The effect of reducing the effective scattering surface of antennas on the systems of radar reconnaissance and radio-electronic warfare]. In *Tezy dop. nauk.-prakt. konf. «Problemy stvorennia, rozvytku ta zastosuvannia informatsiinykh system spetsialnoho pryznachennia» [Theses add. science and practice conf. "Problems of creation, development and application of special purpose information systems"]*. (pp. 95–96). Zhytomyr : ZhMI DUT [in Ukrainian].

6. Sydoruk, O. L. (2012). Analiz metodiv i sposobiv zmenshennia efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia antenykh system [Analysis of methods and ways of reducing the effective scattering surface of antenna systems]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin ZhSTU. Technical sciences]*, 2 (61), 94–106. Zhytomyr [in Ukrainian].

7. Sydoruk, O. L. (2017). Pidkhid do zakhystu zenitno-raketnykh kompleksiv vid urazhennia shliakhom zmenshennia efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia yikh antenykh system [An approach to protecting anti-aircraft missile systems from damage by reducing the effective scattering surface of their antenna systems]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of construction, testing, application and operation of complex information systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 14, 157–170. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

8. Zalevskii, G. S. (2007). Obzor metodov rascheta vtorychnogo izlucheniia radiolokatsionnykh ob"ektov [Overview of methods for calculating the secondary radiation of radar objects]. *Sistemi obrobki informatsii [Information processing systems]*, 7 (65), 16–24. Kharkiv: KAFU [in Russian].

9. Sydoruk, O. L. (2018). Metod pokrashchennia poliaryzatsiinykh kharakterystyk antenykh system perenosnykh stantsii nazemnoi rozvidky [A method for improving the polarization characteristics of antenna systems for portable ground reconnaissance stations]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of construction, testing, application and operation of complex information systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 15, 78–93. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

10. Sydoruk, O. L. (2016). Matematychnyi aparat doslidzhennia amplitud polia, zbudzhenoho antennoiu systemoiu radiolokatsiinoi stantsii 1RL133 «Kredo» [Mathematical apparatus for studying the amplitudes of the field excited by the antenna system of the radar station 1RL133 "Credo"]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of construction, testing, application and operation of complex information systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 13, 62–72. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

11. Husnu Deniz Basdemir. (2020). Gaussian source beam diffraction by a perfect electromagnetic half-plane. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 37, Iss. 6, 930–939. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.389239>
12. Jiyeon Lee, Sanghoon Kim, Aobo Li, & Dan Sievenpiper. (2021). Shield pattern and scattering reduction scheme using impedance surfaces. *IOP Publishing Ltd Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 54, N 47. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac2173>
13. Belevyshchuk, Ya. O., Vasylets, V. O., & Nechytailo, S. V. (2009). Metod rozrakhunku efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia nazemnoi tekhniki, osnashchenoi bahatoelementnyimi antenami [A method of calculating the effective scattering surface of ground equipment equipped with multi-element antennas]. *Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohyy [Aerospace equipment and technologies.]*, 8 (65), 169–174. Kharkiv [in Ukrainian].
14. Sydorchuk, O. L. (2011). Rozrakhunok efektyvnosti poverkhni rozsiuvannia rupornoj anteny pry padinni na nei khvyli dovilnoi formy iz zastosuvanniam lemy Lorentsa [Investigation of the efficiency of the surface of the horn antenna expansion in case of a fall on it of a fine form due to the Lorenz stagnation]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin ZhSTU. Technical sciences]*, 2 (57), 102–113. [https://doi.org/10.26642/tn-2011-2\(57\)-103-113](https://doi.org/10.26642/tn-2011-2(57)-103-113) Zhytomyr [in Ukrainian].
15. Jiang, W., Hong, T., & Gong S. X. (2013). Research on the Scattering Characteristics and the RCS Reduction of Circularly Polarized Microstrip Antenna. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*, Article ID 735847, 9 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/735847>
16. Sydorchuk, O. L. (2016). Doslidzhennia amplitud polia, zbudzhenoho liniinoiu reshitkoju rupornykh oprominiuvachiv [Study of amplitudes of the field excited by a linear grid of horn irradiators]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio equipment. Radio equipment construction"]*, 67, 5–11. <https://doi.org/10.20535/radap.2016.67.5-11> [in Ukrainian].
17. Benenson, L. S., & Fel'd, Ia. N. (1988). Rasseianie elektromagnitnykh voln antennami (obzor) [Scattering of electromagnetic waves by antennas (review)]. *Radiotekhnika i elektronika [Radio engineering and electronics]*, Vol. 33, № 2, 225–246 [in Russian].
18. Bakhrakh, L. D., Benenson, L. S., & Zelkin, E. G., et al. (1997). *Spravochnik po antennoi tekhnike [Antenna Engineering Handbook]*. (Vols. 1–5). Moscow [in Russian].
19. Sydorchuk, O. L. (2019). Metod vyznachennia elektromagnitnoho polia, rozsiianoho vid rupornoho oprominiuvacha, roztashovanoho u fokusi paraboloida obertannia antennoi systemy stantsii nazemnoi rozvidky [Method for determining the electromagnetic field scattered from a horn irradiator located in the focus of the paraboloid of rotation of the antenna system of ground reconnaissance stations]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of construction, testing, application and operation of complex information systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 16, 80–93. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2019.16.08> Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].
20. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., & Usin, V. A. et al. (2010). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl. Ch. 2. Vyprominiuvannia ta poshyrennia radiokhvyl [Electrodynamics and propagation of radio waves. Part 2. Radiation and propagation of radio waves]*. Kharkiv [in Ukrainian].

21. Choi, W., Kwak, B., & Nam, Y. (2020). Radar absorbing serrated edge for broadband radar cross-section reduction. *Microw Opt Technol Lett*, Vol. 62, Iss. 3, 1112–1116. <https://doi.org/10.1002/mop.32152>
22. Korenovskaia, O. L., Manoilov, V. F., Nikitchuk, T. M., & Sidorchuk, O. L. (2015). Modelirovanie i ekspress-metodika izmereniia diagramm rupornykh antenn [Modeling and Express Method for Measuring Horn Antenna Diagrams]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii «Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio equipment. Radio equipment construction"]*, 62, 31–39. <https://doi.org/10.20535/radap.2015.62.31-39> [in Russian].
23. Manoilov, V. P., & Sidorchuk, O. L. (2012). Snizhenie EPR rupornoj anteny dlia shirokogo sektora uglov nabliudeniia [Reducing the EPR of a horn antenna for a wide sector of observation angles]. In *Tezisy Mezhdunar. krymskoi nauch.-prakt. konf. «SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii» [Abstracts of the International Crimean scientific and practical. conf. "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies"] (KryMiKo-2012)*, Vol. 2. (pp. 487–488). Sevastopol' [in Russian].
24. Manoilov, V. P., & Sydoruk, O. L. (2011). *Ruporna antena kolovoi poliaryzatsii: patent na vynakhid [Horn antenna of circular polarization: patent for the invention]* № 96661 /UA/ H01Q 13/10 (2006.01). Stated 06.04.2010; published 25.11.2011, Bulletin № 22. 6 p. [in Ukrainian].
25. Manoilov, V. P., & Sydoruk, O. L. (2011). *Ruporna antena: patent na vynakhid [Horn antenna: patent for an invention]*. № 97037 /UA/ H01Q 13/10 (2006.01). Stated 06.07.2010; published 26.12.2011, Bulletin № 24. 6 p. [in Ukrainian].
26. Manoilov, V. P., & Sydoruk, O. L. (2014). *Systema dlia nepriamoho vyznachennia antennoi skladovoi efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia aperturnykh anten: patent na vynakhid [System for indirect determination of the antenna component of the effective scattering surface of aperture antennas: patent for an invention]*. № 06557 /UA/ H01Q 13/02 (2006.01). Stated 31.05.2013; published 10.09.2014, Bulletin № 17. 4 p. [in Ukrainian].
27. Artiushyn, L. M., Kurtseitov, T. L., Myrnenko, V. I., & Sydoruk, O. L. (2016). Mozhyvosti zastosuvannia protyradiolokatsiinykh pokryttiv u antenykh systemakh zasobiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky z metoiu zmeshennia yikh radiolokatsiinoi pomitnosti [Possibilities of using anti-radar coatings in antenna systems of weapons and military equipment in order to reduce their radar visibility]. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky i oborony [Modern information technologies in the sphere of security and defense]*, 2 (26), 104–109. Kyiv [in Ukrainian].
28. Sydoruk, O. L., & Zalevskiy, V. Y. (2022). Doslidzhennia dyfraktsii elektromahnitnoi khvyli na kromkakh piramidalnoi rupornoj anteny yak odniiei z prychnyn rozsiuvannia [Investigation of electromagnetic wave diffraction at the edges of a pyramidal horn antenna as one of the causes of scattering]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii «Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio equipment. Radio equipment construction"]*, 89, 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.11-20>
29. Sydoruk, O. L. (2018). Metod proektuvannia radiolokatsiinykh stantsii nazemnoi rozvidky z antennoiu systemoiu kolovoi poliaryzatsii [Method of designing ground-based radar stations with antenna system of circular polarization]. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky i oborony [Modern information technologies in the field of security and defense]*, 3 (33), 25–35. Kyiv [in Ukrainian].

**O. L. Sydorчук**

**CHALLENGES OF EVALUATION METHODS FOR ANTENNAS WITH REDUCED EFFECTIVE SCATTERING SURFACES IN SIGNALS INTELLIGENCE AND ELECTRONIC WARFARE SYSTEMS**

*The article analyses the relevance of well-known approaches to reducing radar visibility of signals intelligence and electronic warfare systems by reducing the effective scattering surfaces of their antenna systems based on the experience of the current Russian-Ukrainian war.*

*The author has analysed known approximate methods used to calculate scattering of electromagnetic waves by antennas, and in particular, how integral and differential scattering surfaces can be calculated. The article provides simple formulas for estimating such values.*

*The author proves that any reduction of the electromagnetic field re-radiated by weapons and military vehicles because of their specific shapes, use of radio-absorbing materials and coatings, etc. doesn't influence the scattering from their antenna systems. Challenging is the impossibility to avoid the above re-radiation, since according to the reciprocal operation principle, any antenna scatters at least half of the energy captured by it. Therefore, it makes sense to reduce the total or integral scattering capacity just a little bit. It can also be assumed that we can reduce the radar visibility of an antenna by replacing a linear polarization antenna with a circular polarization one. It will change the direction of wave reflection on the onboard radar sensor.*

*The author recommends to apply miniaturized horn irradiators for their antenna systems in ground signals intelligence and electronic warfare stations provided that the performance characteristics are preserved by reducing overall dimensions, improving harmonization in antenna paths and reducing re-radiation from the antenna aperture. By selecting the amplitude and phase of the reflection coefficient in the feeder path, you can compensate for shadow and mode scattering and reduce it by 10–20 dB.*

*The conducted study will further contribute to the development of an antenna design with a new small-sized irradiator and will make it possible to assess reduction of its effective scattering surface.*

**Keywords:** *radar; pyramidal horn irradiator; reduction of effective scattering surface; radar visibility; electromagnetic wave diffraction.*