

УДК 621.396.96



С. А. Горелишев



О. А. Наконечний



О. М. Васильєва

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ВТОРИННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ КОМБІНОВАНОГО ОБ'ЄКТА ПРОСТОЇ ФОРМИ

З метою верифікації електродинамічного ітераційного методу розрахунку ефективної поверхні розсіювання комбінованого об'єкта простої форми було проведено експериментальне дослідження характеристик вторинного випромінювання даного об'єкта у безлунній камері. У статті наведено умови, методу проведення експерименту, матеріали та обладнання, які використовувалися, а також сформульовані допущення та обмеження проведення експерименту. Після оброблення отриманих експериментальних даних проаналізовано залежність ефективної поверхні розсіювання від азимута опромінювання. Порівняння розрахункових значень ефективної поверхні розсіювання окремих компонентів та комбінованого об'єкта в цілому показало високу збіжність з експериментальними даними, що свідчить про достовірність електродинамічного методу розрахунку.

К л ю ч о в і с л о в а: комбінований об'єкт, металевий компонент, діелектричний компонент, експеримент, верифікація.

Постановка проблеми. Дослідження та розробки, пов'язані з помітністю радіолокаційних об'єктів (РЛО), зокрема БпЛА, мають дві сторони. З одного боку, розробники прагнуть зменшити електромагнітну помітність РЛО, а з іншого – фахівці з радіолокації працюють над підвищенням ефективності радіолокаційного виявлення та спостереження цих об'єктів. Для вирішення зазначених задач необхідно проводити дослідження характеристик вторинного випромінювання (ХВВ) БпЛА або інших об'єктів різної конструкції та в різних діапазонах шляхом математичного чи фізичного моделювання.

Більшість РЛО є сукупністю металевих та діелектричних елементів, тобто є комбінованими об'єктами. Наприклад: літаки (металевий каркас та композитні обшивки) F-35 «Lightning II», B-2 «Spirit», F-22 «Raptor» (США); крилаті ракети (металеві корпуси та керамічні / полімерні головні обтікачі) BGM-109 «Томагавк» (США), 3М-14 «Калібр» (росія), AGM-158 «JASSM» (США); наземна техніка (металеві башти та обладнання можуть бути оснащені діелектричними протикумулятивними екранами або комплексами активного захисту, антени та датчики яких містять діелектрики) – танки Т-84 (Україна), M1 Abrams (США), бойові машини піхоти [1–3].

Оскільки всі математичні методи розрахунку ХВВ РЛО ґрунтуються на низці допущень, обмежень та спрощень, то необхідна верифікація їх адекватності реальним фізичним процесам. Для цього потрібно провести порівняльний аналіз результатів математичного моделювання з даними фізичного експерименту для комбінованих об'єктів простої форми. Це дозволить кількісно оцінити точність методу, виявити та усунути систематичні розбіжності, пов'язані з урахуванням особливостей математичного методу розрахунку. Тому дослідження, спрямовані на забезпечення достовірності, точності та можливості практичного використання результатів математичного моделювання, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для отримання інформації про ХВВ реальних радіолокаційних об'єктів використовуються експериментальні підходи, що засновані на проведенні експериментальних або натурних вимірювань [4]:

- вимірювання параметрів полів, що розсіяні макетами реальних РЛО у безлунних камерах (БЛК) [5–7];
- вимірювання параметрів полів, що розсіяні реальними зразками РЛО на полігонах [8–12].

У працях [11, 12] наведені результати вимірювання ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) реальних РЛО на полігоні шляхом опромінення встановленого на поворотній платформі об'єкта та вимірювання потужності відбитого сигналу в дальній зоні. Крім того, радіолокаційна станція у горизонтальній площині опромінювала еталонний відбивач. За співвідношенням цих даних за відомою формулою обчислюється ЕПР об'єкта. Недоліком такого методу є необхідність забезпечення умови дальньої зони. Для великих РЛО це потребує вимірювань на дуже великих відстанях, що є причиною недостатньої точності вимірювання ЕПР.

Як альтернатива у статті [13] запропонований спеціальний вимірювальний прилад – комплект малогабаритних вимірників коефіцієнтів відбиття для вимірювання показників відбиття у ближній зоні. Даний прилад розроблений на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Сутність запропонованого методу полягає у тому, що повне відбите поле від РЛО є сумою полів, відбитих від локальних ділянок. Але ця методика не враховує фазових набігів полів на різних фрагментах об'єкта, і загальна ЕПР оцінюється як сума ЕПР окремих ділянок поверхні об'єкта.

Використання макетів реальних РЛО засноване на умовах електродинамічної подоби. При цьому існують методи непрямого й прямого моделювання [14, 15, 16].

До непрямих методів моделювання можна віднести: метод з використанням хвиль у плоскій водянній ванні, моделювання з використанням ультразвукових полігонів та моделювання за допомогою світлових хвиль. Загальним недоліком цих методів є отримання наближених кількісних результатів та застосування для вирішення локальних задач, наприклад, знаходження «блискучих ділянок», тобто місць максимального відбиття радіохвиль.

У працях [17–20] наведені методи, які засновані на прямій електродинамічній подоби. При цьому виміри виконують або в польових умовах, або у БЛК. При проведенні експериментів в польових умовах на ЕПР РЛО впливає ефект відбиття від землі й місцевих предметів. Тому для проведення експериментів з високою точністю використовують БЛК [21, 22].

Отже, проведений аналіз показує, що необхідно провести порівняльний аналіз результатів математичного моделювання з даними фізичного експерименту за методом прямої електродинамічній подоби у БЛК.

Метою статті є оприлюднення результатів отримання експериментальних характеристик вторинного випромінювання комбінованого об'єкта простої форми та їх порівняння з результатами математичного моделювання.

Для досягнення даної мети вирішені такі задачі:

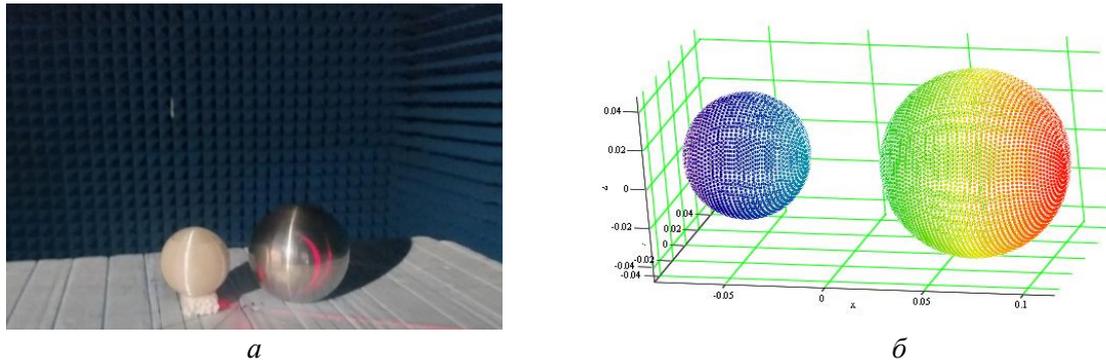
- проведено експериментальні дослідження характеристик вторинного випромінювання комбінованого об'єкта у вигляді металевих і діелектричних куль;
- виконане оброблення результатів експерименту та порівняння їх з результатами математичного моделювання в аналогічних умовах.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження характеристик вторинного випромінювання комбінованого об'єкта простої форми та їх порівняння з результатами математичного моделювання проведено експериментальні дослідження на базі Національного наукового центру «Інститут метрології» (м. Харків).

Метою експериментального дослідження було визначення залежності ЕПР комбінованого об'єкта простої форми від частоти опромінювання і ракурсу об'єкта та їх порівняння з математичними розрахунками, отриманими електродинамічним ітераційним методом [23].

Матеріалі та обладнанні. Як модель комбінованого об'єкта використовувалися два компонента сферичної форми: металева куля радіусом 4.5 см та діелектрична куля радіусом 3 см. Відстань між крайніми точками компонентів складала 2 см. Зовнішній вигляд комбінованого об'єкта дослідження наведений на рис. 1.

Для виготовлення металевої кулі використовувалася конструкційна вуглецева сталь марки 20 (ДСТУ 7809:2015) [24]. Діелектрична куля була виготовлена шляхом 3D-друку з прозорого матеріалу PET-G без домішок. Для внутрішнього наповнення використано матеріал з героїдною структурою, щільність заповнення при друкуванні 40 % [25].



a – зовнішній вигляд; *б* – математична модель
Рисунок 1 – Об'єкт дослідження

За результатами експериментальних досліджень отримані значення монолітного діелектричного матеріалу PET-G та діелектричного матеріалу з 40 % заповненням на основних частотах у діапазоні від 8 ГГц до 12 ГГц, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення діелектричної проникності матеріалу PET-G

Частота f , ГГц	100 % заповнення			40 % заповнення		
	ϵ'_3	$\tan\delta$	ϵ''_3	ϵ'_3	$\tan\delta$	ϵ''_3
8	2,9	0,02	0,058	1,58	0,024	0,039
9	2,9	0,022	0,0638	1,58	0,025	0,04
10	2,9	0,024	0,0696	1,58	0,0265	0,042
11	2,9	0,026	0,0754	1,58	0,0278	0,044
12	2,9	0,028	0,0812	1,58	0,029	0,046

Експериментальні дослідження проводилися у БЛК [21]. Вимірювальний стенд, який використовувався при проведенні експериментів, у своєму складі мав передавальну (П6-23М) та вимірювальну (HF907) антени, лазерний рівень (LEICA DISTO D5) (рис. 2, *a*), а також портативний векторний аналізатор ланцюгів (надвисокочастотний аналізатор (НВЧ-аналізатор) FieldFox Keysight N9951A) (рис. 2, *б*).



a – передавальна та вимірювальна антени і лазерний рівень;
б – НВЧ-аналізатор Field Fox Keysight N9951A

Рисунок 2 – Обладнання вимірювального стенда

Векторний аналізатор ланцюгів (ВАЛ) вимірює характеристики проходження сигналу через пристрій тестування та характеристики відбиття сигналу від його портів (*S*-параметри) [26]. Кожний *S*-параметр містить амплітудно-частотну (АЧХ) і фазочастотну (ФЧХ) характеристики.

Умови проведення експерименту. Експеримент проводився в режимі вимірювання характеристики *S*₁₂ ВАЛ з використанням фільтрації у частотній області. Комбінований об'єкт опромінювався рупорною антеною, підключеною до порту № 2 ВАЛ за допомогою коаксіального кабелю з

використанням коаксіально-хвильових переходів. Вимірювальна антена була підключена до порту № 1 ВАЛ гнучким коаксіальним кабелем з використанням коаксіально-хвильових переходів. Експериментальна залежність знімалася на ВАЛ та зберігалася у вигляді скрінна екрана (файл *.png) і Touchstone-файлу даних (файл з розширенням *.s2p). Параметри обладнання вимірювального стенда наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри вимірювального стенда

Параметр	Значення	Примітки
Полоса частот ΔF , ГГц	8–12	
Кількість вимірних точок у полосі частот	801	крок $\Delta f = 5$ МГц
Кількість точок виміру для кожної частоти	100	усереднення
Поляризація ЕМП	лінійна	горизонтальна
Смуга пропускання на проміжній частоті, кГц	10	
Часовий інтервал дискретизації, мкс	100	автоматично
Стабілізована потужність, дБм	-5	0,046
Дискрет при кутовому обертанні, град	30	вручну
Відстань від розкриття антени до центра комбінованого об'єкта, м	1,92	

Комбінований об'єкт або окремі його компоненти розташовані у БЛК на підставці з полістирольних панелей і орієнтовані відносно геометричних осей антен за допомогою лазерного рівня (рис. 2, а). Досліджувані об'єкти (металева куля, діелектрична куля, комбінований об'єкт) мають різні геометричні розміри.

Визначена мінімальна відстань R_{\min} до об'єкта, яка відповідає дальній зоні (зоні дифракції Фраунгофера) для діапазону частот від 8 ГГц до 12 ГГц:

$$R_{\min} = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}, \quad (1)$$

де – максимальний геометричний розмір досліджуваного об'єкта.

Також розрахована максимальна частота, при якій на відстані 1,92 м для вибраного об'єкта виконується умова дальньої зони (табл. 3).

Таблиця 3 – Параметри зони дифракції Фраунгофера

Досліджуваний об'єкт	Максимальний геометричний розмір, м	Мінімальна відстань, м		Максимальна частота, ГГц
		$f=8$ ГГц	$f=12$ ГГц	
Металева куля	0,09	0,432	0,648	35,5
Діелектрична куля	0,06	0,192	0,288	80
Комбінований об'єкт	0,17	1,541	2,312	9,97

Методика проведення експерименту. Основні етапи проведення експерименту:

- створення конфігурації експериментального вимірювального комплексу на базі БЛК;
- калібрування експериментального вимірювального комплексу (використовувався тип калібрування SOLT (до 40 ГГц));
- вимірювання чотирьох параметрів S ВАЛ «фоновий випромінювання» (шуму) БЛК, тобто випромінювання БЛК за умови відсутності у ній об'єкта, що дозволяє виключити вплив камери та кабелів;
- встановлення еталона (у нашому випадку металевої кулі) у БЛК та проведення вимірювання параметрів S на зразку;
- оброблення отриманого результату математичними методами та розрахунок $S_{\text{ет}}$ без урахування шуму;
- встановлення досліджуваного об'єкта у точку БЛК, де вимірювався еталон, та проведення вимірювання параметрів S на зразку;

– оброблення отриманого результату математичними методами та розрахунок ЕПР відповідно до виразу

$$\sigma_{ц} = \sigma_{ет} \left(\frac{|S_{ц}|}{|S_{ет}|} \right)^2, \quad (2)$$

де $\sigma_{ц}$ – ЕПР досліджуваного об'єкта;

$\sigma_{ет}$ – відома ЕПР еталона;

$S_{ц}$ – вимірне значення (S -параметр) для цілі;

$S_{ет}$ – вимірне значення (S -параметр) для еталона;

– математичний розрахунок ЕПР електродинамічним ітераційним методом [23] для досліджуваного об'єкта в умовах проведення експерименту та порівняння з експериментальними даними.

Допущення та обмеження у проведенні експерименту. При виконанні експерименту та подальшої математичної обробки отриманих даних вважалося, що характеристики вимірювального стенду лінійні та не змінюються з часом. Антени вважаються ідеальними, без паразитного випромінювання або бічних пелюсток, та повністю узгодженими. Крім того, розглядалася тільки моностатична схема. Передбачається, що вимірювання відбувається в дальній зоні, де фронт хвилі є практично плоским, і ЕПР не залежить від відстані.

Досліджуваний об'єкт не рухається, не вібрує та не деформується під час вимірювання. Умови проведення вимірів на еталоні та на різних досліджуваних об'єктах вважались ідентичними.

Як обмеження, що впливають на точність отриманих даних, можливо навести такі.

1. Навіть в екранованих або безлунних камерах можливі паразитні відбиття від стін, антен або обладнання, тобто існує можливість появи хибних піків або шумів.

2. Існує чутливість вимірювального комплексу до зміщення його складових (антен, кабелів тощо), що також створює похибки у фазі або амплітуді.

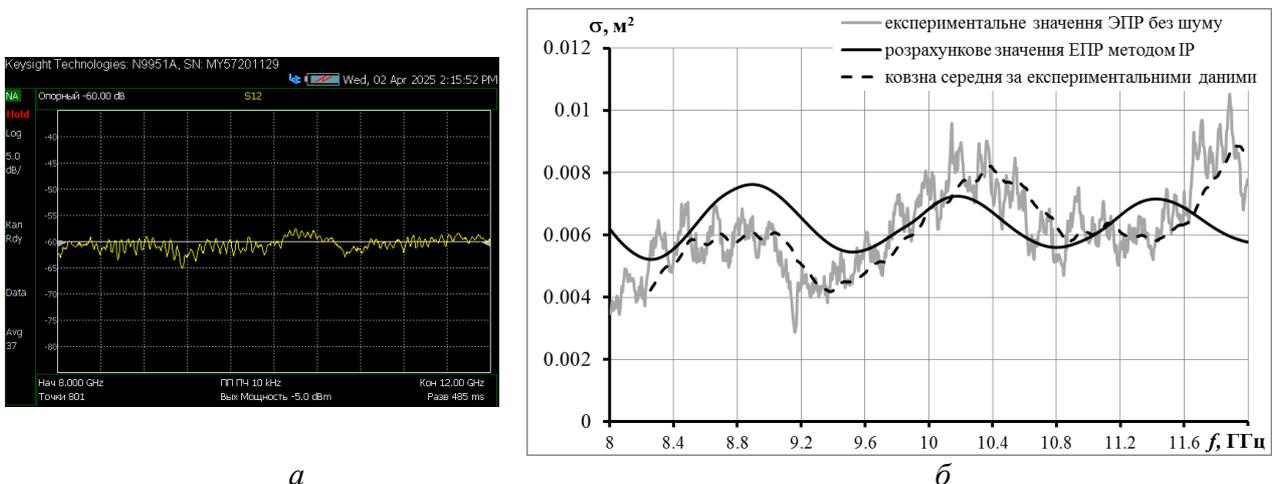
3. Можливе виникнення паразитних каналів передавання (витоки між кабелями, корпусами тощо), особливо на високих частотах.

4. Частотний та динамічний діапазони ВАЛ обмежує точність вимірювання дуже слабких сигналів розсіювання (нижче -30 дБ).

5. Точність виготовлення складових комбінованого об'єкта.

При проведенні експериментів як еталон використовувалася металева куля радіусом 4,5 см. Теоретичне значення ЕПР даного об'єкта відоме, воно розраховане різними методами [14, 15, 21, 26]. На рис. 3 наведене порівняння експериментальних даних та значення ЕПР металевої кулі, що розрахована електродинамічним ітераційним методом [23].

На рис. 3, б наведені оброблені експериментальні значення ЕПР $\sigma_{\text{експ}}$ без урахування шуму БЛК (сіра суцільна лінія) та розрахункові значення ЕПР $\sigma_{\text{теор}}$, отримане методами інтегральних рівнянь нульової ітерації (чорна суцільна лінія). Крім того, для згладжування даних експерименту та виявлення трендів застосовано метод ковзного середнього з періодом 51 відлік (чорна штрихова лінія). По осі ординат відкладається значення ЕПР σ у м², по осі абсцис – частота f у ГГц.



а

б

а – скрін екрана ВАЛ; б – експериментальні та розрахункові значення ЕПР

Рисунок 3 – Експериментальні та розрахункові значення ЕПР металевої кулі

Після порівнювання отримані коефіцієнти кореляції теоретичної ЕПР з експериментальними значеннями на рівні 0,37, а з даними ковзного середнього – 0,36, що свідчить про достатньо помірний позитивний зв'язок цих процесів. Існує певна тенденція подоби процесів, що розглядаються.

Середнє значення похибки $\delta(f)$ розраховувалося за виразом

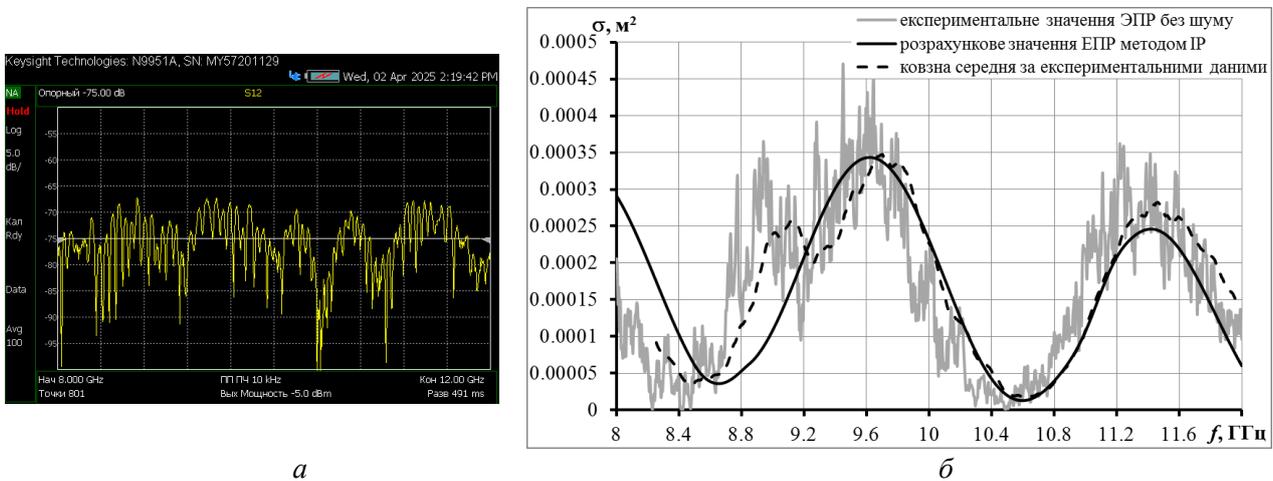
$$\delta(f) = \left| \frac{\sigma_1(f) - \sigma_2(f)}{\sigma_2(f)} \right| \cdot 100 \%, \quad (3)$$

де $\sigma_1(f)$ – ЕПР комбінованого об'єкта або його внутрішніх компонентів, отримана розробленим методом, заснованим на рішенні інтегральних рівнянь;

$\sigma_2(f)$ – ЕПР комбінованого об'єкта або його внутрішніх компонентів, отримана шляхом фізичного експерименту.

Після порівнювання з експериментальними даними $\delta(f)$ складало 16,95 %, для ковзного середнього – 15,68 %.

При верифікації розрахункових значень ЕПР діелектричного компонента з експериментальними (рис. 4) також отримано позитивні результати.



а – скрін екрана ВАЛ; б – експериментальні та теоретичні значення ЕПР

Рисунок 4 – Експериментальні та теоретичні значення ЕПР діелектричної кулі

Після порівнювання отримані коефіцієнти кореляції теоретичної ЕПР з експериментальними значеннями на рівні 0,68, а з даними ковзного середнього – 0,9, що свідчить про достатньо сильний позитивний зв'язок цих процесів.

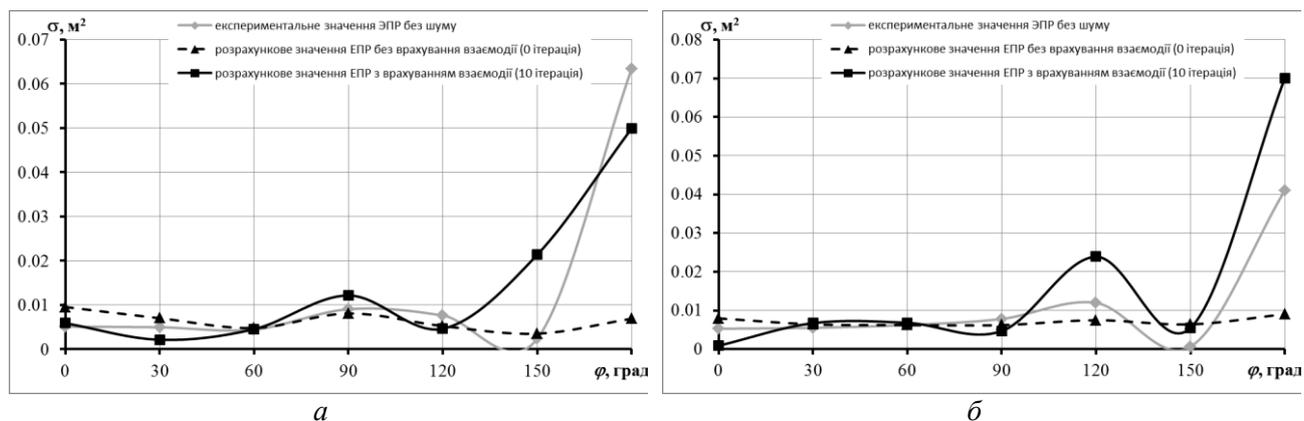
На відміну від металевої кулі у даному випадку середнє значення похибки $\delta(f)$ для експериментальних значень складало 61,11 %, для ковзного середнього – 23,81. Така достатньо велика середня похибка розрахункових значень ЕПР стосовно експериментальних пояснюється тим, що діелектрична сфера була виготовлена за допомогою 3D друку з не зовсім рівномірним 40 % заповненням і наявністю шорсткості на поверхні об'єкта. Значення комплексної діелектричної проникності матеріалу також визначено експериментально з недостатньою точністю. Крім того, існують обмеження ВАЛ на точність вимірювання дуже слабких сигналів розсіювання.

Проте можна констатувати, що розрахункові значення ЕПР окремих компонентів комбінованого об'єкта мають високу збіжність із експериментальними даними та свідчать про достовірність даного електродинамічного методу розрахунку.

Розглянемо експериментальні дані ЕПР комбінованого об'єкта та виконаємо верифікацію їхніх значень з розрахунками на нульовій ітерації (без урахування взаємодії компонентів об'єкта) та на десятій ітерації (з урахуванням взаємодії), які отримані запропонованим у статті [23] електродинамічним ітераційним методом. Крім того, виявимо тенденції та особливості поведінки ЕПР залежно від частоти та азимута опромінення.

Ураховуючи умову дальньої зони, ЕПР комбінованого об'єкта отримано на частотах 8 ГГц та 9 ГГц. Під час експерименту опромінювання досліджуваного об'єкта проводилось при зміні азимута φ від 0°

до 180° з кроком 30° . На рис. 5 наведені експериментальні залежності (сіра суцільна лінія) та розрахункові залежності на нульовій (чорна штрихова лінія) і десятій (чорна суцільна лінія) ітерації. По осі ординат відкладається значення ЕПР σ у м^2 , по осі абсцис – азимут φ у градусах.



a – на частоті 8 ГГц; *б* – на частоті 9 ГГц

сіра лінія – експеримент; чорна штрихова лінія – розрахунок без урахування взаємодії; чорна лінія – розрахунок з урахуванням взаємодії

Рисунок 5 – Залежності ЕПР комбінованого об'єкта від азимута опромінювання

Аналіз експериментальних даних (рис 5, сіра суцільна лінія) показав таке.

Ефект ослаблення взаємодії спостерігається при опроміненні комбінованих об'єктів на азимуті $\varphi = 0$ (металева куля повністю закриває діелектричну). Для комбінованого об'єкта експериментальне значення ЕПР складає $0,00508 \text{ м}^2$, що відповідає 74 % стандартної ЕПР металевої кулі радіусом 4,5 см. Таке зменшення пояснюється поглинанням частини енергії ЕМП діелектричною компонентою та наведенням струмів на поверхні металевої компоненти у протифазі.

При опроміненні комбінованого об'єкта на азимуті $\varphi = 180^\circ$ (мала діелектрична куля розташована попереду металевої та частково її закриває) спостерігається значне збільшення ЕПР – приблизно у 10 разів, що також пояснюється сильною взаємодією компонентів. Так, для комбінованого об'єкта ЕПР становить $0,063 \text{ м}^2$.

Проведення верифікації експериментальних та розрахункових залежностей ЕПР від азимута дозволяє констатувати таке.

Отримані розрахункові залежності значень ЕПР для комбінованого об'єкта на нульовій ітерації (чорна штрихова лінія) без урахування взаємодії на частотах 8 ГГц та 9 ГГц показали незначну залежність від азимута та відсутність ефекту збільшення ЕПР при зондуванні об'єкта на азимуті $= 180^\circ$. Для цих залежностей коефіцієнт кореляції з експериментальними даними перебуває у межах від -0,3 до 0,15, що свідчить про вкрай слабкий зв'язок між залежностями, який у більшості практичних випадків можна вважати відсутнім.

Розрахункові залежності значень ЕПР після 10 ітерацій (чорна суцільна лінія) демонструють значний збіг з експериментальними залежностями. Коефіцієнти кореляції перевищують 0,9, що вказує на сильний зв'язок. Крім того, на азимуті $\varphi = 180^\circ$ спостерігається ефект збільшення ЕПР.

Отже, проведена верифікація результатів визначення характеристик вторинного випромінювання комбінованого об'єкта, отриманих за допомогою розробленого у статті [23] ітераційного методу, з даними фізичних експериментів показала достатню збіжність результатів, що дає можливість виконувати математичні розрахунки з необхідною точністю та достовірністю.

Висновки

Для вирішення задач виявлення та супроводження РЛО необхідно досліджувати їх характеристики вторинного випромінювання у різних діапазонах опромінювання шляхом або математичного, або фізичного моделювання.

Більшість РЛО – це сукупність металевих та діелектричних елементів конструкції, тобто вони є комбінованими об'єктами. Оскільки всі математичні методи розрахунку характеристик вторинного

випромінювання РЛО ґрунтуються на низці допущень, обмежень та спрощень, то необхідна верифікація їх адекватності реальним фізичним процесам. Для цього необхідно провести порівняльний аналіз результатів математичного моделювання з даними фізичного експерименту для комбінованих об'єктів.

У статті наведено результати експериментального дослідження значення ЕПР комбінованого об'єкта простої форми від азимута опромінювання у безлунній камері та проведене порівняння з результатами, отриманими електродинамічним ітераційним методом.

Проведений аналіз даних математичного та фізичного моделювання окремих елементів комбінованого об'єкта та об'єкта у цілому показав, що розрахункові значення ЕПР мають високу збіжність з експериментальними даними та свідчать про достовірність електродинамічного методу розрахунку (з урахуванням взаємодії між компонентами).

Отримані розрахункові залежності значень ЕПР для комбінованого об'єкта на нульовій ітерації (без урахування взаємодії) на частотах 8 ГГц та 9 ГГц показали незначну залежність від азимута та відсутність ефекту збільшення ЕПР при зондуванні об'єкта на азимуті $\varphi=180^\circ$. Але розрахункові залежності значень ЕПР після 10 ітерацій (з урахування взаємодії) демонструють значний збіг з експериментальними залежностями. Коефіцієнти кореляції перевищують 0,9, що вказує на сильний зв'язок. Крім того, на азимуті $\varphi=180^\circ$ спостерігається ефект збільшення ЕПР.

Напрямом подальшого дослідження є використання розробленого ітераційного електродинамічного методу розрахунку для отримання апіорної радіолокаційної інформації реальних повітряних та наземних комбінованих об'єктів.

Перелік джерел посилання

1. Воєнні аспекти протидії «гібридній» агресії: досвід України : монографія / за заг. ред. А. М. Сиротенка. Київ : НУОУ ім. Івана Черняховського, 2020. 176 с.
2. Райан М. Сучасні військові стратегії та використання дронів. Австралійський національний університет, 2024. 344 с.
3. Markarian G. Countermeasures for Aerial Drones. Staniforth – Boston, London : Artech House, 2021. 350 p.
4. Масловський О. А. Радіолокаційні характеристики наземних об'єктів складної форми на основі вимірювань відбиття від локальних ділянок : дис. канд. фіз.-мат. наук : 01.04.03. Харків, 2020. 186 с.
5. Barton D. K. Radar System Analysis and Modeling. Norwood, USA : Artech House, Inc., 2005. 566 p.
6. Knott E. F., Schaeffer J. F., Tulley M. T. Radar cross section (Electromagnetics and Radar). 2-nd ed. Raleigh, NC : SciTech Publishing, 2004. 626 p.
7. Можаров Є. О., Галкін Н. К. Калібрування широкосмугового стенду для вимірювання характеристик об'єктів. *Журнал радіоелектроніки*. 2018. № 10. С. 15–25.
8. Radar cross-section measurement techniques / Borkar V. G., Ghosh A., Singh R. K., Chourasia N. *Defence Science Journal*. 2010. Vol. 60. № 2. Pp. 204–212. DOI:10.14429/dsj.60.341.
9. Garat J. Microwave techniques for radar cross section measurements: a review // MELECON 96 : Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications / IEEE. Bari, Italy, 1996. Vol. 1. Pp. 80–86. DOI: 10.1109/MELCON.1996.550967.
10. Dybdal R. B. Radar cross section measurements // Proceedings of the IEEE. 1987. Vol. 75, №. 4. Pp. 498–516. DOI:10.1109/PROC.1987.13757.
11. Translation Bureau: Radar definition. Public Works and Government Services. Canada. 2013. URL:<https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/bt-tb/index-eng.html> (date of application 15.08.2019).
12. McGraw-Hill Dictionary of scientific and technical terms / ed. D. N. Lapedes. New York : McGraw-Hill, 1974. 1634 p.
13. Колчигин Н. Н. Малогабаритный измеритель коэффициента отражения электромагнитных волн. *Радиотехника*. Харьков, 1988. Вып. 86. С. 84–88.
14. Штагер Е. А. Рассеяние на телах сложной формы. Москва : Радио и связь, 1986. 184 с.
15. Радиозлектронные системы: основы построения и теория : справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. Москва : МАКВИС, 1998. 828 с.

16. Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. Москва : Сов. радио. 1972. 232 с.
17. Radio frequency anechoic chamber with nonperturbing wireless signalling means : pat. 7190301 USA. Appl. 22.12.2004; publ. 13.03.2007. 4 p. URL:<https://patents.google.com/patent/US7190301B2/en> (date of application: 11.10.2019).
18. Radio frequency anechoic chamber with improved test stand : pat. 7102562 USA . Appl. 22.03.2004; publ. 05.09.2006. 7 p. URL:<https://patents.google.com/patent/US7102562> (date of application: 11.10.2019).
19. Мицмахер М. Ю., Торгованов В. А. Безэховые камеры СВЧ. Москва : Радио и связь, 1982. 128 с.
20. Варганов М. Е., Тучков Л. Т. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / под ред. Л. Т. Тучкова. Москва : Радио и связь, 1985. 236 с.
21. Анипко О. Б., Башинский Е. А., Украинец В. Г. Аэродинамический облик, радиолокационная и инфракрасная заметность самолетов военного назначения при их обнаружении : монография. Запорожье : АО «Мотор Сич», 2013. 250 с.
22. Scattering characteristics of Mi-8MT helicopter based on measurements of object scale model in an anechoic chamber / Sukharevsky O., Vasilets V., Ryapolov I., Brechka M. *Системи обробки інформації*. 2017. № 1. С. 109–114. DOI:<https://doi.org/10.30748/soi.2017.147.20>.
23. Горелишев С. А. Дослідження взаємодії елементів конструкції при розрахунку характеристик розсіювання комбінованих об'єктів резонансних розмірів. *Системи обробки інформації*. 2025. № 2 (181). С. 35–43. DOI:<https://doi.org/10.30748/soi.2025.181.04>.
24. ДСТУ 7809:2015. Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови. [Чинний від 2015-06-22]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 25 с.
25. Athanasios Goulas. The Impact of 3D Printing Process Parameters on the Dielectric Properties of High Permittivity Composites / Athanasios Goulas, Shiyu Zhang, Darren A. Cadman, Jan Järveläinen, Ville Mylläri, Will G. Whittow, John (Yiannis) C. Vardaxoglou and Daniel S. Engström // *Designs* 2019, 3(4), 50. DOI:<https://doi.org/10.3390/designs3040050>.
26. 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 applications*. 1997, 11 (8), 1091–1102.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2025 р.

UDC 621.396.96

S. Horielyshev, O. Nakonechnyi, O. Vasilyeva

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE SECONDARY RADIATION CHARACTERISTICS OF COMPOSITE OBJECT OF SIMPLE SHAPE

To solve the problems of detecting and tracking radar objects (ROs), it is necessary to study their secondary radiation characteristics in various ranges through either mathematical or physical modeling. Most ROs are a combination of metallic and dielectric structural elements, meaning they are composite objects. Since all mathematical methods for calculating the radar cross-section (RCS) of ROs are based on a series of assumptions, limitations, and simplifications, it is necessary to verify their adequacy to real physical processes. This requires a comparative analysis of mathematical modeling results with data from physical experiments for composite objects.

To verify the results of the mathematical modeling of the radar cross-section of a composite object of simple shape, an experimental study of the secondary radiation characteristics of this object was conducted in an anechoic chamber. The article describes the conditions and methodology of the experiment, the materials and equipment used, as well as the formulated assumptions and limitations of the experiment. The model of the composite object consisted of two spherical objects: a metal sphere with a radius of 4.5 cm and a dielectric sphere with a radius of 3 cm. The distance between the extreme points of the objects was 2 cm. After processing the obtained experimental data, an analysis of the RCS dependencies on the irradiation azimuth was performed.

The calculated RCS dependencies for the composite object at the zero iteration (without considering interaction) at frequencies of 8 and 9 GHz showed a slight dependence on the azimuth and the absence of an RCS enhancement effect when irradiating the object at an azimuth of 180°. However, the calculated RCS dependencies after 10 iterations (taking interaction into account) demonstrate significant agreement with the experimental dependencies. The correlation coefficients exceed 0.9, indicating a strong relationship. Furthermore, at an azimuth of 180°, an RCS increase effect is observed.

A comparison of the calculated RCS values, both for the individual components of the composite object and for the object as a whole, showed high convergence with the experimental data, confirming the reliability of the electrodynamic calculation method.

A direction for further research is the use of the developed iterative electrodynamic calculation method to obtain a priori radar information for real aerial and ground-based composite objects.

Keywords: composite object, metallic component, dielectric component, experiment, verification

Горелишев Станіслав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України навчально-наукового інституту логістики Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>

Наконечний Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри озброєння військ ППО СВ Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

<https://orcid.org/0000-0002-9659-9681>

Васильєва Олена Михайлівна – кандидат технічних наук, директор наукового центру електромагнітних вимірювань – начальник науково-дослідної лабораторії електромагнітних хвиль Національного наукового центру «Інститут метрології».

<https://orcid.org/0009-0007-9586-1485>